



Vlaanderen
is materiaalbewust



DUURZAME SANITATIE

LITERATUURONDERZOEK

SAMEN MAKEN WE
MORGEN MOOIER

OVAM

OVAM.VLAANDEREN.BE

OVAM



DUURZAME SANITATIE

Literatuuronderzoek / 1.07.2025



DOCUMENTBESCHRIJVING

- | | |
|---|--|
| 1 <i>Titel van publicatie:</i>
Duurzame sanitatie | 2 <i>Verantwoordelijke Uitgever:</i>
OVAM |
| 3 <i>Wettelijk Depot nummer:</i> D/2025/5024/27 | 4 <i>Trefwoorden:</i>
droogtoilet, composteren, sanitatie,
festival, evenementen |
| 5 <i>Samenvatting:</i>
Deze studie probeert vanuit de beschikbare literatuur en vanuit bestaande praktijkvoorbeelden een antwoord te geven op volgende vragen:
Waarom is duurzame sanitatie nodig?
Hoe kan dit verwezenlijkt worden? | |
| 6 <i>Aantal bladzijden:</i> 288 | 7 <i>Aantal tabellen en figuren:</i> / |
| 8 <i>Datum publicatie:</i> 1 juli 2025 | 9 <i>Prijs*:</i> / |
| 10 <i>Begeleidingsgroep en/of auteur:</i>
Auteur: Geert Bogaert (ECOprojecten)
Begeleidingsgroep: Gil Gram en Lore Claes (OVAM), Heleen Denorre (FOD), Matty Beckers (dOMG), Christophe Boogaerts (VLACO vzw), Frédéric Pacini (Leefmilieu Brussel), Thomas Anné (Ecoson), Matthias Ver Eecke (WhenNatureCalls) | 11 <i>Contactpersonen:</i>
Gil Gram (OVAM), Lore Claes (OVAM)
Geert Bogaert (ECOprojecten) |
| 12 <i>Andere titels over dit onderwerp:</i> / | |

U hebt het recht deze brochure te downloaden, te printen en digitaal te verspreiden. U hebt niet het recht deze aan te passen of voor commerciële doeleinden te gebruiken.

De meeste OVAM-publicaties kunt u raadplegen en/of downloaden op de OVAM-website:

ovam.vlaanderen.be

INHOUD

Samenvatting	11
Achtergrond en situering	11
Milieu-impact sanitaire systemen	12
Evaluatie van risico's, reductiepotentieel en normen voor compost van droogtoiletten	13
Hygiëniserings- en verwerkingstechnieken	16
Wettelijk kader voor verwerking van menselijke mest	19
Geschikte toepassingen	22
Lessen uit de praktijk	22
Résumé: Les systèmes sanitaires durables	24
Summary: sustainable sanitation	36
Terminologie	47
Inleiding	49
DEEL 1: milieu-impact sanitaire systemen	50
1 Afbakening van het onderzoeksveld	50
1.1 Theoretisch kader	50
1.1.1 Huidig sanitair systeem	50
1.1.2 Circulaire sanitaire systemen	54
1.2 Menselijke uitscheidingen en hun relatief belang	57
1.2.1 Geschatte hoeveelheden feces en urine	57
1.2.2 Zuiveringsslib, influent en effluent van RWZI's	60
2 Emissies naar water, bodem en lucht	64
2.1 Huidig sanitair systeem	64
2.1.1 Emissies naar water	64
2.1.2 Emissies naar de bodem	71
2.1.3 Emissies naar de lucht	73
2.2 Circulaire sanitaire systemen	75
2.2.1 Emissies naar water	75
2.2.2 Emissies naar de bodem	76
2.2.3 Emissies naar lucht	77
3 Effecten op hulpbronnen	80
3.1 Huidig sanitair systeem	80
3.1.1 Waterververbruik	80
3.1.2 Energieverbruik	80
3.1.3 Recuperatie van energie en nutriënten	80
3.2 Circulaire sanitaire systemen	81
3.2.1 Water- en energieverbruik	81
3.2.2 Landgebruik en organische stof	82
4 Effecten op menselijke gezondheid	85

4.1	Huidig sanitair systeem	85
4.2	Circulaire sanitaire systemen	86
5	Vergelijking milieu-impact: Life Cycle Analysis	87
DEEL 2: nieuwe verwerkingsmethoden en toepassingen voor menselijke mest.....		89
6	Milieu- en gezondheidsrisico's bij menselijke mest.....	89
6.1	Menselijke uitscheidingen	89
6.1.1	Hygiënerisico's	89
6.1.2	Milieu- en andere gezondheidsrisico's	92
6.1.3	Geschiktheid voor gebruik in de landbouw	108
6.2	Operationele toevoegstoffen	110
6.2.1	Fytosanitaire gevaren van toevoegstoffen	110
6.2.2	Verontreinigingen in toevoegstoffen	110
6.2.3	Geschiktheid voor gebruik in de landbouw	112
6.3	Stoorstoffen	113
7	Verwerkingsmethoden voor menselijke mest	115
7.1	Verwerkingsmethoden voor feces	115
7.1.1	Composteringstechnieken en gebruik	115
7.1.2	Compostering van menselijke mest	123
7.1.3	Reductie van milieu- en gezondheidsrisico's	136
7.1.4	Vergisting	147
7.1.5	Bokashi fermentatie	154
7.1.6	Zuivering met planten	155
7.1.7	Pyrolyse, vergassing en verbranding	157
7.2	Verwerkingsmethoden voor urine	158
7.2.1	Lageren/opslaan	160
7.2.2	Fermenteren	160
7.2.3	Verwerking volgens het VUNA-proces	161
7.2.4	Elektrochemische verwerking	161
7.2.5	Struvietwinning	162
8	Wetgeving en normen	164
8.1	België	164
8.1.1	Vlaanderen	164
8.1.2	Wallonië	175
8.1.3	Brussel	178
8.1.4	Federaal niveau	179
8.2	Duitsland	182
8.2.1	Algemeen wetgevend kader	182
8.2.2	Productspecificaties DIN SPEC 91421	184
8.2.3	ZirkulierBAR-project	185
8.3	Frankrijk	186

8.4	Europa	190
8.4.1	Meststoffenregelgeving	190
8.4.2	Het gebruik van zuiveringsslib in de landbouw	191
8.4.3	Kaderrichtlijn afvalstoffen	192
8.4.4	De Europese afvalstoffenlijst (EURAL)	193
8.4.5	De Europese verordening dierlijke bijproducten	193
8.4.6	Europese initiatieven ter bescherming van water	194
8.4.7	Europese initiatieven omtrent pesticiden, chemische stoffen en POP	194
8.4.8	Europese initiatieven omtrent PFAS	195
8.4.9	Europees Actieplan Circulaire Economie	195
8.5	Wereldgezondheidsorganisatie (WHO)	196
9	Evaluatie risico's, reductiepotentieel en normen	197
9.1	Pathogenen	198
9.2	Zware metalen	199
9.3	Medicijnresten	201
9.4	Pesticiden	202
9.5	Microplastics	203
9.6	PFAS	204
9.7	PAK's en BTEX	205
9.8	Dioxines en PCB's	206
9.9	Samenvatting	207
10	Producten afgeleid van menselijke mest	209
10.1	Toepassingen in landbouw	209
10.1.1	Zuiveringsslib (vergist/gedroogd/gecomposteerd)	209
10.1.2	Compost-, digestaat of fermentatieproducten	210
10.1.3	Insectenweek op menselijke mest	213
10.1.4	Algenweek: spirulina	214
10.2	Andere toepassingen	215
10.2.1	Energieproductie	215
10.2.2	Bouwmateriaal	216
11	Praktijkervaringen	217
11.1	Verwerkingsmethoden voor feces	217
11.1.1	Finizio - proefinstallatie voor compostering	217
11.1.2	L'Equilibre - Zwitserse wooncoöperatie	219
11.1.3	De Nieuwe Dokken (Gent)	221
11.1.4	Leaudegem - afvalwaterzuivering	222
11.1.5	Batchcompostering voor particulieren	223
11.1.6	Johnson-Su bioreactor	225
11.1.7	Brussel - publieke droogtoiletten	226
11.1.8	Kakume vluchtelingenkamp (Kenia)	227

11.1.9	Black soldier fly in Nairobi (Kenia)	228
11.2	Verwerkingsmethoden voor urine	229
11.2.1	AURIN - urineverwerking in kantoorgebouwen	229
11.2.2	Aneco - Pitribon	230
11.2.3	Lactopi Start – biostimulant	231
11.2.4	UCLL Diepenbeek - biomeiler	233
11.3	Andere praktijkervaringen	234
11.3.1	ZirkulierBAR (Duitsland)	234
11.3.2	Boerderij van de toekomst en KNAP (Nederland)	236
11.3.3	OCAPI (Frankrijk)	238
DEEL 3: Conclusies en aanbevelingen.....		239
Conclusies		239
Aanbevelingen		240
12	Bijlagen.....	243
12.1	Afbakening van het onderzoeksveld	243
12.1.1	Zuiveringsslib RWZI's	243
12.1.2	Medicijnresten in afvalwater	245
12.2	Risico-inhoud van menselijke mest	246
12.2.1	Pathogenen (Krause et al., 2021)	246
12.2.2	Zware metalen (Krause et al., 2021)	248
12.2.3	Medicijnresten	249
12.2.4	Pesticiden in koeienmest (Martine Bruinenberg, 2023)	251
12.2.5	Pesticiden in menselijke urine (BMH_Wal, 2025)	252
12.2.6	Nutriënten-inhoud (Krause et al., 2021)	253
12.2.7	PFAS in bloed	255
12.2.8	PAK's, dioxines,... in compost	256
12.3	Risico-inhoud van compost van menselijke mest	257
12.3.1	Pathogenen in compost van menselijke mest (TDM, 2017)	257
12.3.2	Medicijnresten in gecomposteerd rioolslib (Dalahmeh et al., 2022)	259
12.3.3	Medicijnresten in compost van menselijke mest (Häfner et al., 2023)	260
12.3.4	Medicijnresten in compost van menselijke mest (Carpentier, 2025)	261
12.4	Wetgeving in België	262
12.4.1	VLAREMA, Bijlage 2.3.1.A en Bijlage 2.3.1.B	262
12.4.2	Vlaams reglement voor de certificering (MB 14 februari 2019)	263
12.4.3	Brusselse saneringsnormen bodem	266
12.4.4	Richtlijnen voor compost van droogtoiletten (FOD VVVL)	268
12.5	Duitse wetgeving	271
12.5.1	Algemeen wetgevend kader	271
12.5.2	Productspecificaties DIN SPEC 91421	272
12.6	Wetgeving in Frankrijk	278
12.7	Europese wetgeving	279

12.7.1	Hergebruik gezuiverd afvalwater	279
13	Bibliografie	280

LIJST MET TABELLEN

Tabel 1 Analysekader huidig sanitair systeem in Vlaanderen: beschrijving milieu-impactcategorieën en effecten	51
Tabel 2 Analysekader circulaire sanitaire systemen: beschrijving milieu-impactcategorieën en effecten.....	54
Tabel 3 Schatting WHO voor 2014 van de regionale dierenpopulatie, dierlijke fecale productie, menselijke populatie en menselijke fecale productie.....	57
Tabel 4 Schatting humane productie van feces en urine in Vlaanderen	58
Tabel 5 N, P en K in humane feces en urine in vergelijking met kunstmest, compost, digestaat en dierlijke mest gebruikt in de landbouw in Vlaanderen.	59
Tabel 6 (Zuiverings-)slib afkomstig van RWZI's, riolen, septische putten en industrie in Vlaanderen (in ton natte stof)	60
Tabel 7 Debiet en belasting van rioolwater (influent) en gezuiverd afvalwater (effluent) van RWZI's	62
Tabel 8 Gemiddelde vrachten aan droge stof, organische stof, N, P en zware metalen in zuiveringsslib RWZI's in Vlaanderen	63
Tabel 9 Nutriëntenverlies bij composteren	78
Tabel 10 Emissie (kg CO _{2eq} /ton compost) t.g.v. directe en indirecte energie en t.g.v. broeikasgassen (CH ₄ en N ₂ O) tijdens productie van GFT-compost (Dekker, 2009) en van zelf gemaakte groencompost.....	79
Tabel 11 Energieverbruik GFT-compost (industrieel) en groencompost (boerderijcomposter).....	82
Tabel 12 Samenstelling menselijke uitscheidingen	90
Tabel 13 Indicator pathogenen en aantal kolonievormende eenheden (KVE/CFU), gemeten in menselijke urine en feces	91
Tabel 14 Concentraties van zware metalen in feces en urine volgens diverse studies	94
Tabel 15 Voorbeelden van veelvoorkomende verontreinigingen in verschillende afvalstromen en humane compost	107
Tabel 16 Aanbevelingen WHO voor opslagbehandeling van menselijke mest vooraleer te gebruiken	127
Tabel 17 Medicijnresten bij luierreyclage	171
Tabel 18 Normen voor bodemverbeterende middelen en voor zuiveringsslib (uitgedrukt in mg/kg droge stof).....	180
Tabel 19 Normen voor pesticiden en PFAS in drinkwater (uitgedrukt in µg/l)	182
Tabel 20 Normen voor bodemverbeterende middelen (NF U44-051) en voor zuiveringsslib (NF U44-095) in Frankrijk.....	189
Tabel 21 Indicator pathogenen, gemeten in menselijke urine (KVE/ml), feces (KVE/g) en compost van menselijke mest	198
Tabel 22 Concentraties (in mg/kg DS) van zware metalen in feces en andere in vergelijking met FOD-normen.....	200
Tabel 23 Evaluatie van de toepassing in de landbouw van compost van droogtoiletten (compost DT) a.h.v. het normenkader en de gegevens uit de literatuurstudie.....	207
Tabel 24 Productie van zuiveringsslib in een aantal geselecteerde EU-landen en toepassing voor landbouwdoeleinden en compostering (gemiddelde waarden in tonnen DS * 1000 over 2006-2015 en procentueel aandeel)	209
Tabel 25 Kenmerken en resultaten van verschillende composteringen van menselijke mest afkomstig van festivals in Frankrijk	257

LIJST MET FIGUREN

Figuur 1 Stroomschema voor de evaluatie van compost van droogtoiletten.....	14
Figuur 2 Huishoudelijke afvalwater inzamelings- en zuiveringssystemen in Wallonië.....	51
Figuur 3 Inhoud van huishoudelijk afvalwater.....	61
Figuur 4 Luchtemissies vanuit een RWZI.....	74
Figuur 5 Aantal microplasticdeeltjes per kg droge stof digestaat of compost.....	100
Figuur 6 Temperatuursverloop bij compostering.....	116
Figuur 7 Temperatuursverloop bij compostering.....	117
Figuur 8 Temperatuursverloop bij thuiscompostering.....	125
Figuur 9 Relatie tussen temperatuur en tijd om bepaalde pathogenen te elimineren.....	134
Figuur 10 Biogasopbrengst (Nm ³ /ton).....	150
Figuur 11 Concentraties pathogene bacteriën in influent en effluent van vergist zuiveringsslib.....	153
Figuur 12 Wetenschappelijke publicaties m.b.t. urine-recyclingtechnologieën.....	159
Figuur 13 Elektrochemische verwerking van urine.....	162
Figuur 14 Het beheer van rioolzuiveringsslib in Wallonië.....	176
Figuur 15 Stroomschema voor de evaluatie van compost van droogtoiletten.....	197
Figuur 16 Productie van spirulina op basis van urine.....	215
Figuur 17 Conventionele en nieuwe sanitatiesystemen met recyclage van nutriënten.....	237

SAMENVATTING

Achtergrond en situering

In het begin van de 20e eeuw ontstond een sanitair systeem met water gespoelde toiletten en riolering. Dit systeem in Europa is gebaseerd op een lineair model waarbij menselijke mest wordt afgevoerd en verwerkt met, in vele gevallen drinkbaar, water als transportmiddel. Dit lineair verloop heeft als gevolg dat naar schatting 10.000 liter afvalwater per persoon per jaar wordt geproduceerd. Voor het zuiveren van dit afvalwater is een rioleringsinfrastructuur en energie-intensieve waterzuivering nodig. Waardevolle nutriënten (stikstof, fosfor, kalium) en organische stof gaan verloren.

Vlaanderen streeft naar een circulaire economie waarbij kringlopen zoveel als mogelijk worden gesloten. Het Vlaamse afval- en materialenbeleid heeft dan ook als doel om afval te voorkomen, een daling van het materiaalgebruik -en verlies te bevorderen en producten zo lang mogelijk te behouden zodat hun waarde optimaal wordt benut. De overheid, maar ook tal van economische spelers en maatschappelijke actoren, is vragende partij voor een transitie naar een meer circulaire economie en zoekt manieren om de ecologische voetafdruk te verkleinen.

Het (tijdelijke) sanitair gegeven bij evenementen biedt hierbij veel potentieel. Momenteel zijn er allerlei toiletoplossingen beschikbaar, maar elk met een aantal belangrijke nadelen. Het concept van droge toiletten, waarbij geen water nodig is en de menselijke mest wordt opgevangen, vermengd met droog koolstofrijk organisch materiaal en wordt verwerkt zonder chemicaliën en/of water als medium voor transport en afvoer, biedt voordelen op vlak van milieu, logistiek en het kostenplaatje. Bovendien kan het testen van droge toiletten in de evenementensector potentieel een hefboom zijn voor de opschaling van het concept naar andere domeinen in de samenleving.

Menselijke mest is echter niet alleen een bron van nutriënten en organische stof, maar ook van pathogenen en farmaceutische residu's die niet wenselijk zijn in de biologische kringloop. Naast logistieke, economische en socio-culturele uitdagingen van de valorisatie van menselijke mest, is dit risico voor de mens- en milieugezondheid momenteel het grootste struikelblok voor de recyclage van nutriënten en organische stof uit menselijke mest. Daarom is vandaag de enige toegelaten verwerking zuivering via een rioolwaterzuiveringsinstallatie en/of verbranding.

Het hoofddoel van deze literatuurstudie is een grondig inzicht verkrijgen in de mogelijkheden, uitdagingen en kansen voor de hoogwaardige verwerking van menselijke mest en hieraan gelinkte bestaande wetgeving en normen in België, Europa en daarbuiten. Aanvullend vergelijkt de literatuurstudie de milieu-impact van droge toiletten met bestaande alternatieve toiletoplossingen, al dan niet in de evenementensector.

Dit moet de OVAM in staat stellen om te evalueren of droogtoiletten qua hoogwaardige verwerkingsmogelijkheden en milieu-impact zinvol en haalbaar zijn en welke de eventuele wettelijke en milieuhygiënische randvoorwaarden zijn voor een toelating van deze systemen.

Milieu-impact sanitaire systemen

Toiletwater, het zogenaamde 'zwarte' water, wordt samen met het 'grijze' water en regenwater afgevoerd via de openbare riolering. Het zwarte water maakt slechts 9% uit van alle afvalwater.

Rioolwaterzuiveringsinstallaties (RWZI's) verwerken het en lozen het gezuiverde afvalwater terug in de waterlopen.

Het waterverbruik en de emissies van verontreinigende stoffen naar water en lucht zijn de belangrijkste milieu-impactcategorieën in ons sanitair systeem.

Meer dan 17% van het huishoudelijk waterverbruik in Vlaanderen dient om toiletten te spoelen. Hiervoor is 45 miljoen m³ water per jaar nodig, wat overeenkomt met het watervolume van het Albertkanaal tussen Antwerpen en Maastricht. Vlaanderen hoort bij de regio's in Europa met de laagste watervoorraad per inwoner. Door klimaatverandering en frequentere periodes van droogte, komt het waterverbruik onder druk te staan.

Het gezuiverde water van RWZI's bevat nog aanzienlijke resten van stikstof (N) en fosfor (P), pathogenen, medicijnresten, pesticiden en PFAS die in het oppervlaktewater worden geloosd. Van pathogenen en medicijnresten kunnen we vrij zeker zeggen dat ze vooral van het toiletwater komen. De bijdrage van toiletwater in de eutrofiëring van waterlopen werd geschat op 22% voor N en 29% voor P. Alle verontreinigingen samen belasten de waterkwaliteit van onze rivieren. Persistente verontreinigingen maken de productie van zuiver drinkwater steeds moeilijker en kostelijker.

De broeikasgasemissies van Aquafin werden voor 2023 op 284.000 ton CO₂eq geschat, wat neerkomt op 0,4% van de totale broeikasgasemissies in Vlaanderen. De productie van één kg gft-compost stoot minder dan de helft broeikasgassen uit dan de zuivering van één liter afvalwater (113g CO₂eq/kg compost tegenover 295g CO₂eq/L afvalwater).

Circulaire sanitaire systemen gebruiken technologieën die water als spoel- en transportmiddel vermijden of hergebruiken, afvalstromen gescheiden houden en nutriëntenkringlopen kunnen sluiten. De belangrijkste milieu-impactcategorieën zijn de emissies naar bodem en lucht. Circulaire sanitaire systemen zijn er op gericht om nutriënten en organische stof terug aan de bodem te geven voor plantvoeding en bodemgezondheid.

Menselijke uitscheidingen in Vlaanderen bestaan anno 2024 uit 460.000 ton feces en 3.400.000 ton urine per jaar. Dit vertegenwoordigt 125.000 ton organisch materiaal (in droge stof) dat het gehalte ervan in Vlaamse landbouwbodems zou kunnen verrijken. Het stikstofpotentieel is groot: als bijvoorbeeld in Vlaanderen 75% van de stikstof uit menselijke urine gerecupereerd kan worden, zou dit ongeveer één derde van de huidige stikstofaanvoer door kunstmest op Vlaamse landbouwgronden kunnen vervangen.

Het gebruik van menselijke mest, die door aangepaste verwerkingstechnieken is omgezet in een organische meststof, is enkel wenselijk als eventuele mens- en milieugevaarlijke stoffen in voldoende mate zijn afgedood of verwijderd. Deze literatuurstudie toont dat het potentieel risico van gescheiden ingezamelde en verwerkte menselijke mest meestal lager ligt dan dat van gft-compost of dierlijke mest en dat een aangepaste verwerking pathogenen en milieugevaarlijke stoffen in voldoende mate kan verwijderen.

De milieu- en gezondheidsrisico's van medicijnresten, pesticiden, microplastics en PFAS blijven een grote zorg met name vanwege hun persistentie en mogelijke bio-accumulatie. Het composteren van gescheiden

ingezamelde menselijke mest verlegt en vermindert een deel van deze risico's van het milieucompartiment 'water' naar het milieucompartiment 'bodem'. Volgens de Wereldgezondheidsorganisatie (WHO) is het bodemsysteem over het algemeen beter geschikt voor de verdere afbraak van farmaceutische resten dan waterlichamen.

Uit een meta-analyse van 11 LCA-studies die een conventioneel sanitair systeem vergelijken met circulaire sanitaire systemen blijkt dat deze laatste doorgaans milieuvriendelijker zijn, omdat ze:

- aanzienlijk waterbesparend zijn (niet gekwantificeerd)
- 30% tot 50% minder broeikasgassen uitstoten
- 30% tot 70% minder energie vereisen
- 50% tot 85% minder eutrofiëring veroorzaken
- 90% ecotoxiciteit verminderen (van medicijnresten door urinescheiding en -behandeling)
- 85% zware metalen verminderen (toepassing RWZI-slib versus gerecycleerde meststoffen o.b.v. gescheiden ingezamelde feces en urine – enkel relevant in landen waar RWZI-slib als meststof is toegelaten, dus niet relevant voor Vlaanderen)

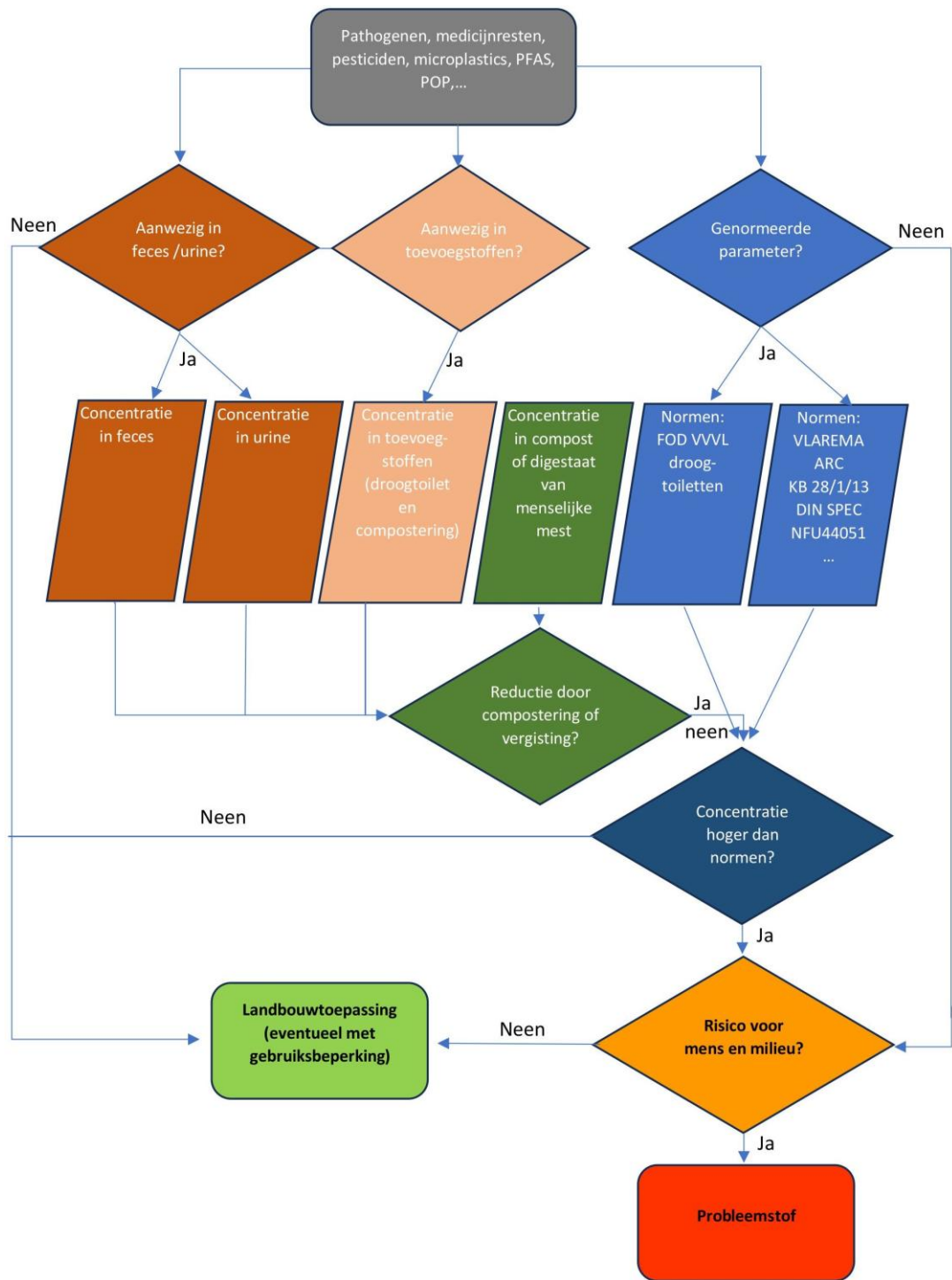
Vanuit milieustandpunt zijn circulaire sanitaire systemen dus zinvol, mits er wettelijke en milieuhygiënische randvoorwaarden voor worden opgesteld.

Evaluatie van risico's, reductiepotentieel en normen voor compost van droogtoiletten

Compost van droogtoiletten kan op een veilige manier in de landbouw worden toegepast. De gegevens verzameld in deze literatuurstudie tonen aan dat de compost beantwoordt aan de richtlijnen die werden voorgesteld door de Federale Overheidsdienst Volksgezondheid, Veiligheid van de Voedselketen en Leefmilieu (FOD VVVL) voor wat betreft: hygiëneparameters, zware metalen, PFAS, PAK's en dioxines. Voor medicijnresten stelt de FOD VVVL nog geen norm voorop, maar verwijst ze naar verdere bibliografische studie. De voorlopige richtlijnen van de FOD VVVL vermelden pesticiden en microplastics niet expliciet, maar ze worden in deze studie wel besproken.

In de volgende paragrafen wordt de informatie voor elke groep van parameters gestructureerd volgens onderstaand stroomschema.

Figuur 1 Stroomschema voor de evaluatie van compost van droogtoiletten



Compostering van menselijke mest reduceert de **hygiëneparameter** *E.coli* met 99,99%; hetzelfde geldt in grote mate voor Enterokokken. Voor *Clostridium perfringens* worden nog aantallen gevonden, maar deze zijn meestal gelijk aan de achtergrondwaarden van deze bacterie in gecultiveerde bodems. Er werd in geen enkel staal salmonella teruggevonden. Compostering reduceert ook de antimicrobiële resistentie (AMR).

Het gehalte aan **zware metalen** in feces en urine is lager dan dat in groencompost, dat op zijn beurt lager is dan dat in varkensmest, dat op zijn beurt lager is dan dat in zuiveringsslib van RWZI's (uitgezonderd koper). In compost van menselijke mest blijven arseen, cadmium, chroom en nikkel onder de norm. Kwik, koper, zink en lood blijven ruim onder de norm. Dat het gehalte aan chroom, nikkel en lood in feces en urine lager is dan dat in de compost van droogtoiletten, wordt verklaard door de toevoeging van groenafval dat met de menselijke mest mee gecomposteerd wordt.

Twee derde van de **medicijnresten** worden uitgescheiden via de urine. De concentraties van antibiotica in dierlijke mest liggen veel hoger dan in menselijke urine. Compostering van 6 maanden tot 1 jaar reduceert antibiotica en hormonen met 93-100% en de andere medicijnresten met 85-95%. De concentraties van een 100-tal geteste medicijnresten in compost van menselijke mest liggen voor 95% onder 10µg/kg DS. Een vijftal medicijnresten (metformine, amisulpride, ciprofloxacine, carbamazepine, doxycycline) hebben in een Zwitserse compost van droogtoiletten concentraties tussen 15-250µg/kg DS, wat onder de normen ligt die voor de recyclage van luiers gehanteerd worden (VLAREMA Bijlage 5.2.15.A). Voor medicijnresten stelt de FOD VVVL nog geen norm voorop, zodat we hier enkel een voorzichtig positieve evaluatie kunnen maken.

Organochloor **pesticiden** (welke het meest resistent zijn) worden na 100 dagen compostering met 80% gereduceerd. De meeste andere pesticiden worden matig tot goed afgebroken, met bepaalde uitzonderingen (zoals bv. clopyralid). Glyfosaat is een veel gebruikte onkruidbestrijder en komt in menselijke urine voor (0,13µg/l). Het totaal aan pesticiden in de urine van 40-59 jarige Walen bedraagt minder dan 20µg/l. Pesticiden in feces worden zeer weinig onderzocht waardoor we over zeer beperkte gegevens beschikken. Pesticiden in compost van droogtoiletten werden tot hiertoe niet geanalyseerd. Bovendien worden pesticiden niet expliciet vermeld in de voorlopige richtlijnen van de FOD VVVL, waardoor we geen volledige evaluatie kunnen maken.

Microplastics in feces bedragen 56mg/kg DS. Zo'n 45% van de microplastics heeft een deeltjesgrootte van minder dan 50µm; 55% heeft een deeltjesgrootte van 50-500µm. Drie maanden compostering van stedelijk gft-afval in Polen reduceert polymeren met 33-84% en additieven met 68%. In commerciële gft-compost (en gft-digestaat) zit meer gewicht aan microplastics van 1-5mm dan in feces, gezien ze daar niet voorkomen. Microplastics van 1-5mm grootte kwamen niet voor in puur agrarische vergisting. Op basis van het voorgaande kunnen we verwachten dat in compost van droogtoiletten minder microplastics (in gewicht) zitten dan in gft-compost of -digestaat. Maar dit werd nog niet bemeten. Bij gebrek aan meetresultaten in compost van droogtoiletten en aan normen voor microplastics kunnen we voor deze parameter geen volledige evaluatie maken.

Personen die gedurende een bepaalde periode drinkwater hadden gedronken dat met **poly- en perfluoralkylstoffen (PFAS)** gecontamineerd was, bleken 0,6µg PFOA/kg DS in feces en 0,02µg PFOA/l in de

urine te hebben. De vergelijking van de PFOA-waarden in bloed/serum van deze personen met metingen uit humane biomonitoringsprogramma's in Vlaanderen en Wallonië toont dat de waarden van gecontamineerde personen 3x tot 10x hoger liggen. Uit een Frans-Canadees onderzoek bleek compost van gemeentelijk bioafval 10 µg PFAS/kg DS te bevatten. In dierlijke mest werd 0,7µg PFAS/kg DS gemeten en in zuiveringsslib van RWZI's 370µg PFAS/kg DS. PFAS in toiletpapier maakt 2-8% van PFAS-belasting in rioolslib uit. Effluentwater van RWZI's bevat 10-1.000ng PFAS/l; oppervlaktewater bevat 6ng PFAS/l. Vlaamse drinkwatermaatschappijen rapporteerden trifluorazijnzuur (TFA), een erg korte PFAS-molecule afkomstig uit pesticiden, in concentraties van 2-8µg/l. In compost van droogtoiletten werd minder dan 10µg PFAS/kg DS gemeten, wat lager ligt dan de Vlaamse toetsingswaarde voor PFAS₂₀ van 15µg/kg DS in afvalstoffen gebruikt in of als bodemverbeteraar/meststof.

Polycyclische aromatische koolwaterstoffen (PAK's) in urine bedragen 0,055 mg/l. In compost van droogtoiletten werden 0,6-3,7 mg PAK's/kg DS gemeten, wat lager is dan de norm van 20 mg/kg DS die de FOD VVVL voorstelt. Onderzoek wees uit dat PAK's in zuiveringsslib van RWZI's met 60-75% gereduceerd werd na 40-110 dagen compostering.

Er zijn geen analyses van **benzeen, toluen, ethylbenzeen en xyleen (BTEX)** in compost van droogtoiletten, de voorgestelde norm van de FOD VVVL bedraagt 20 mg/kg DS.

Dioxines in compost van droogtoiletten blijven onder de door de FOD VVVL voorgestelde norm van 20 ngTEQ/kg DS. **Polychloorbifenylen (PCB's)** in compost van droogtoiletten blijven onder de Duitse norm van 0,1 mg/kg DS en ook onder de norm voor zuiveringsslib van RWZI's (KB van 28 januari 2013) van 0,8 mg/kg DS (som 7 PCB's).

Voor **minerale olie** zijn geen metingen in compost van droogtoiletten beschikbaar. We hebben hier geen studies over gevonden.

Hygiëniserings- en verwerkingstechnieken

De gescheiden inzameling van menselijke mest biedt mogelijkheden voor gerichte zuivering. Wij onderzochten een aantal verwerkingstechnieken voor feces (zoals compostering, vergisting, plantenzuivering, pyrolyse) en voor urine (zoals opslag, fermentatie).

Compostering

Bij compostering onder de juiste omstandigheden ontstaan temperaturen van 60 à 70°C die samen met een bepaalde composteringstijd de hygiëniserings van menselijke mest kunnen waarborgen. In Duitsland wordt menselijke mest van festivals onmiddellijk gehygiëniseerd in afgesloten containers met een temperatuur van meer dan 70°C gedurende meerdere uren of dagen. Zo wordt voldaan aan de Europese wetgeving dierlijke bijproducten die eist dat compost en digestaat waarin dierlijke bijproducten werden verwerkt, een warmtebehandeling hebben ondergaan van 70°C gedurende minimaal 1 uur of een daaraan gelijkwaardige, en officieel gevalideerde behandeling (hygiëniserings).

Uit het literatuuronderzoek is gebleken dat compostering zowel pathogenen als medicijn- en pesticidenresten, microplastics en PAK's in belangrijke mate reduceert. Dit kwam reeds aan bod in de vorige paragrafen. Het reductiepotentieel van compostering kan worden bevorderd door de aanwezigheid en ontwikkeling van een zo divers mogelijke microbiologie in de compost te stimuleren. Bijvoorbeeld door een juiste samenstelling van mest, groenmateriaal (zowel structuurmateriaal als gemakkelijk afbreekbare groenresten), klei-aarde en jonge compost.

Professionele compostering op grotere schaal, bijvoorbeeld in Duitsland, bereikt een veilige humuscompost in 3 maanden. Als men medicijnresten, microplastics en sommige pesticiden maximaal wil reduceren, heeft aerobe microbiologie 6 maanden tot 1 jaar nodig, afhankelijk van schaalgrootte en techniek. Compostering van menselijke mest op kleine schaal heeft 2 jaar nodig. Er moet namelijk rekening gehouden worden met meer warmteverlies en het niet of minder vaak keren van de compost. Dit wordt gecompenseerd door het isoleren van de composthoop en het toevoegen van meer structuur- en groenmateriaal.

Door het composteerproces te richten op microbiologie, naast temperatuur en snelheid, verkrijgt men een gezonde kwalitatieve humuscompost die het bodemleven stimuleert en het voorziet van organisch materiaal en andere voordelen.

Vergisting

Vergisten van menselijke mest wordt al vaak toegepast in grootschalige woonuitbreidingsprojecten in onder meer: Gent, Amsterdam, Hamburg en Helsingborg. Feces en urine worden co-vergist samen met bijvoorbeeld gft of dierlijke vetten om het geproduceerde biogas (70-105m³ biogas/ton vers mengsel) te gebruiken voor woningverwarming.

Onderzoek toont aan dat vergisting veel minder effectief is in de eliminatie van pathogenen en medicijnresten dan compostering. Dit hangt samen met de meestal vrij lage temperaturen waarbij vergisting gebeurt, de korte verblijftijd en het soort afbraakbacteriën dat bij vergisting aan het werk is.

In Gent wordt het digestaat afgevoerd naar verbranding. Maar als het zou nagecomposteerd worden, zou het alsnog als een kwalitatief eindproduct in de landbouw gebruikt kunnen worden.

Bokashi fermentatie

Gezien fermentatie bij omgevingstemperatuur verloopt, is de hygiënisatie onvoldoende om menselijke mest veilig als meststof te kunnen gebruiken. Fermentatie lijkt eerder geschikt als een bewaarstechniek naar analogie met inkuilen (van voedergewassen).

Fermentatie doet de pH-waarde dalen door de productie van melkzuur, waardoor er toch een vorm van 'zuurhygiënisatie' kan optreden. Enkele aanbieders van droogtoiletten voor festivals gebruiken fermentatie als een eerste stap, waarna in een tweede stap compostering volgt. Fermentatie verbetert volgens hen de kwaliteit van de compost (zonder specificatie).

Er is geen onderzoek gevonden dat aantoont dat Bokashi fermentatie pathogenen, onkruidzaden of plantenziektes afdoet of andere vormen van verontreinigingen (bv. medicijnresten) verwijdert.

Plantenzuivering

Fytoremediatie lijkt geen geschikte verwerkingstechniek voor de inhoud van droogtoiletten gezien de lage waarden voor zware metalen en PFAS in menselijke mest en de gezien praktische aspecten zoals ruimtebeslag.

Zuivering van zwart water met *plantenfilters* levert goede reducties op van organische belasting en pathogenen. Het praktijkvoorbeeld 'Leaudegem' toont aan dat de fosforbelasting kan gereduceerd worden tot onder de gemiddelde concentratie in Vlaamse rivieren; voor stikstof is dat niet het geval. Plantenfilters hebben ook enkele nadelen zoals hun oppervlaktebeslag, de tijd die nodig is om volledig volgroeid te zijn en de lagere performantie in de winter. Ze worden vaak gebruikt voor kleinschalige waterzuivering van huishoudelijk afvalwater in het buitengebied.

Pyrolyse

Pyrolyse-testen met droogtoiletsubstraat leverden 30% biochar (droge stof) op die voldeed aan de eisen van het vrijwillige kwaliteitsborgingssysteem (EBC) voor PAK's, PCB's, dioxines en zware metaalconcentraties, behalve Zn en Ni. De biochar kan gebruikt worden als meststof en is vrij van pathogenen door de hoge procestemperatuur. Stabiele koolstof maakt 60% uit van de biochar en kan voor lange tijd in de bodem worden vastgehouden. Pyrolyse van menselijke ontlasting zou ongeveer 0,11% van de menselijke koolstofuitstoot kunnen neutraliseren.

Het pyrolyseproces wordt doorgaans opgestart met externe energie, maar recupereert daarna energie uit de gassen die vrijkomen uit het gepyrolyseerde substraat. Hiervoor mag het inputmateriaal niet te nat zijn (maximaal 55% vocht). Pyrolyse stoot minder CO₂ uit ten opzichte van verbranding met energierecuperatie. De aanwezigheid van strooiselmateriaal en de afwezigheid van urine in het droogtoiletsubstraat is aangewezen om het pyrolyse-proces te optimaliseren en het zoutgehalte van de biochar te verminderen.

Urineverwerking

Over de hele wereld, maar vooral in China, is de belangstelling voor het gebruik van urine als meststof sterk toegenomen, gemeten aan het aantal wetenschappelijke publicaties dat het laatste decennium is verschenen. We zijn in deze studie slechts bij enkele verwerkingsmethoden blijven stilstaan.

Opslag in afgesloten containers gedurende 6 maanden is volgens de WHO voldoende om de urine veilig als meststof te gebruiken. Een natuurlijk afbraakproces dat gepaard gaat met een hoge pH zorgt voor de nodige hygiëniserende werking. Urine is in principe steriel, maar kan tijdens uitscheiding of inzameling wel besmet raken met fecale bacteriën.

Fermentatie met melkzuurbacteriën is een manier om via een verlaagde pH pathogenen te vernietigen. Medicijnresten worden bij beide vorige technieken in onvoldoende mate afgebroken. Daarom wordt bij een Zwitsers urineverwerkingsproces (VUNA), naast een nitrificatieproces, ook zuivering door een actiefkoolfilter voorzien, gevolgd door destillatie. Dit leverde de eerste urinemeststof ter wereld op met volledige goedkeuring in Zwitserland, Liechtenstein en Oostenrijk.

Struvietwinning (een P-meststof) uit urine was een tijdje geleden in de belangstelling maar is dat nu niet meer, mogelijk om economische redenen. Onderzoek gaf aan dat tetracyclines (antibiotica) worden opgenomen in de struvietkristallen.

Wettelijk kader voor verwerking van menselijke mest

Het bestaande wettelijk kader

In de VLAREM-wetgeving staat dat septisch materiaal afgevoerd moet worden naar een openbare zuivering, óf een daarvoor vergunde verwerker:

Subafdeling 4.2.8.3. Werking en onderhoud van individuele voorbehandelingsinstallaties

Artikel 4.2.8.3.1. De werking en het onderhoud van individuele voorbehandelingsinstallaties moeten aan volgende algemene bepalingen beantwoorden :

1° het lozen van geruimd septisch materiaal in de openbare riolering of in de collectoren is verboden.

2° septisch materiaal moet afgevoerd worden naar een openbare waterzuiveringsinstallatie. De openbare waterzuiveringsinstallatie kan (een deel van) de aangevoerde lading weigeren dewelke moet worden afgevoerd naar een daartoe vergunde verwerker.

Verwerking met als finaliteit verbranding

Bestaande verwerkers van niet-VLAREMA conform organisch biologisch afval moeten bekijken of menselijke mest/septisch materiaal valt onder de huidige vergunningen en zo niet hiervoor een wijziging aanvragen. Als het materiaal finaal wordt verbrand, zou een vergunning geen probleem mogen vormen en zijn ontheffingen (FOD) of grondstofverklaringen (OVAM) ook niet nodig. De VMM zal weliswaar toezien op de verwerking van de dunne fractie maar de verwerkers in kwestie beschikken over waterzuiveringsinstallaties waardoor hier ook geen probleem verwacht wordt. Op dit moment lijkt de enige verwerkingspiste om de inhoud van droogtoiletten (bv. van festivals) met een nuttige toepassing te verwerken 'vergisting met verbranding van het digestaat' te zijn. De nutriënten en organische stof gaan weliswaar verloren, maar (drinkbaar) water wordt niet verontreinigd bij de inzameling van het materiaal en milieuverontreinigende stoffen worden verwijderd terwijl energie deels wordt gerecupereerd.

Verwerking met als finaliteit een bodemverbeterend middel (BVM)

Als de verwerking (bv. vergisting) een finaliteit als BVM beoogt, mogen industriële afvalverwerkers menselijke mest niet aannemen. Dat heeft volgens de OVAM te maken met de bewijslast om aan te tonen (voor bijvoorbeeld medicijnresten en pathogenen) dat wordt voldaan aan artikel 36, 4° van het materialendecreet: "het gebruik van de stof of het voorwerp heeft over het geheel genomen geen ongunstige effecten op het milieu of de menselijke gezondheid". Het materialendecreet heeft voorrang, het VLAREMA is een uitvoeringsbesluit ervan. Bij de aanvraag van een grondstofverklaring (GV) zal de OVAM nagaan of de stroom voldoet aan artikel 36 en aan de VLAREMA bijlage 2.3.1 voorwaarden. Tot nader order verwachten we dat dat niet het geval zal zijn.

Thuiscompostering

Thuiscompostering van menselijke mest van droogtoiletten zou, volgens een interpretatie van het departement Omgeving, niet vrijgesteld zijn van een omgevingsvergunning omdat het geen plantaardig materiaal is. Er kan geen gunstig advies of vergunning worden verleend.

Relevante normen en richtlijnen

De richtlijnen en grenswaarden die de FOD VVVL (comité Meststoffen) begin 2025 opstelde voor compost van droogtoiletten vormen een belangrijk referentiepunt (bijlage 12.4.4). Het gaat om tentatieve normen inzake hygiëneparameters, zware metalen, PAK's, BTEX en dioxines, evenals de overname van de Vlaamse toetsingswaarde voor PFAS voor bodemverbeterende middelen/meststoffen. Voor Vlaanderen zijn deze en andere grenswaarden (bv. salmonella) voor digestaat en compost ook gespecificeerd in het VLAREMA en het ARC.

Voor medicijnresten stelt de FOD VVVL nog geen norm voorop maar verwijst ze naar verdere bibliografische studie. De FOD VVVL vermeldt pesticiden en microplastics niet expliciet, maar ze worden in deze studie wel besproken.

Toekomstige wetgeving kan inspiratie vinden in onderstaande normen en richtlijnen:

- de Duitse DIN SPEC 91421 (bijlage 12.5.2): wordt op experimentele wijze toegepast. De DIN SPEC bevat een vrij hoge PFAS-grenswaarde (enkel PFT) en relatief hoge zware metalen-grenswaarden (vooral Cu en Zn). De confrontatie met de praktijk toont aan dat de DIN SPEC een 'work-in-progress' is. Bijvoorbeeld in verband met de grenswaarden voor clostridium perfringens of het ontbreken van concrete grenswaarden voor vijf relevant geachte medicijnresten.
- de EU Fertiliser-verordening: menselijke mest komt niet voor in de 'component material categories' (CMC) indeling en dus zal een aanpassing vereist zijn.
- de einde-afvalcriteria (OVAM) en CMA (CMA-3-M) voor luiermateriaal gebruikt als bodemverbeterend middel (namelijk sterilisatie, aantonen afwezigheid microbiële activiteit, grenswaarden voor specifieke antibiotica en hormonen, eis van toegevoegde waarde ...)
- de Waalse wetgeving (12/1/1995) inzake toegestaan gebruik van RWZI-slib als bodemverbeterend middel (op voorwaarde van grenswaarden zware metalen inclusief verplichte certificatie). De regelmatige overschrijding van de soepelere PFAS-grenswaarden in zuiveringsslib leidde eind 2024 tot nieuwe PFAS-normen en lagere toegestane slib-toepassingen in de landbouw (max 6 ton/ha i.p.v. 12) én tot strengere monitoring van RWZI's.
- in Frankrijk laat het Besluit van 7/9/2009 tot vaststelling van de technische eisen die van toepassing zijn op niet-collectieve sanitaire voorzieningen, het gebruik van droogtoiletten toe. Het toezicht daarop is geregeld door het Besluit van 27 april 2012. Droogtoiletten werden ook toegelaten in zones met een collectief afvalwaterzuiveringssysteem. Het Franse directoraat-generaal Volksgezondheid heeft in 2010 een tiental aanbevelingen geformuleerd gericht naar regionale gezondheidsinstanties. De Franse norm voor bodemverbeterende middelen (NF U44-051) bevat een ruimere norm voor enterokokken.

Voor diverse medicijnen, drugs, en pesticiden (actieve stoffen en metabolieten) ontbreken relevante referentie- of grenswaarden voor compost. Uit discussies met de stuurgroep, waarvan een professionele verwerker deel uitmaakte, blijkt dat de verwerker wel rekening moet houden met dergelijke, mogelijke contaminatie. Deze dient aangegeven worden via de informatiefiche. Mogelijk zullen verwerkers hierop anticiperen door een verklaring of leverancierovereenkomst te laten ondertekenen die de verantwoordelijkheid voor de mogelijke aanwezigheid van dergelijke contaminanten legt bij de klanten die menselijke mest willen laten verwerken. Een juridisch kader is nodig om te vermijden dat de

verantwoordelijkheid van contaminatierisico's onnodig van de ene naar de andere speler in het verwerkingsproces gaat.

In Duitsland kan de afgewerkte compost van droogtoiletten die voldoet aan de Duitse DIN SPEC-normen slechts toegepast worden in veldexperimenten waarvoor toelating is verkregen. Ook in Vlaanderen wil men graag festivals verduurzamen, onder meer door het gebruik van droogtoiletten, maar doet zich een probleem voor om het ingezamelde afval nadien ook op een hoogwaardige manier te mogen of kunnen verwerken.

Voorstellen voor aanpassing en actie

In navolging van de aanbevelingen uit het Duitse ZirkulierBAR-project kunnen we gelijkaardige voorstellen doen om in Vlaanderen/België het wettelijke kader aan te passen zodat menselijke mest wordt gecomposteerd, vergist of gepyrolyseerd en dat de eindproducten van die verwerking kunnen verhandeld en toegepast worden:

- Creatie van een EURAL-code voor menselijke mest
- Bij finaal gebruik als bodemverbeterend middel of meststof:
 - Aparte artikels in VLAREMA en specifieke procesvoorwaarden in het Algemeen Reglement van de Certificering (ARC)
 - Kwaliteitscontrole en keuringsattest nodig als basis voor ontheffing FOD VVVL
 - Uitbreiding positieve lijst toegestane inputs voor vergisting (FOD VVVL)
 - Akkoord VLM om behandelde menselijke mest te beschouwen als 'Andere Mest'
- Aanpassing VLAREM in verband met voorwaarden van omgevingsvergunning van de vergunde verwerker
- Voor professionele compostering van menselijke mest moeten in principe geen gebruiksbeperkingen worden opgelegd als de compost gecertificeerd is volgens de normen. Dat betekent dat compost van menselijke mest zowel kan toegepast worden bij teelten die rechtstreeks voor voedsel bestemd zijn als bij boom- en bloemenkwekerijen.
- Het vrijstellen van een omgevingsvergunning voor compostering op kleine schaal en thuiscompostering van menselijke mest, eventueel gepaard gaande met het opleggen van beperkingen, zoals bijvoorbeeld het verplicht volgen van een opleiding en van een 'code van goede praktijk', enkel gebruik op eigen perceel, niet gebruik bij minder dan 2 jaar compostering, verplichte analyse bij gebruik in de moestuin ...

De woorden 'menselijke mest' en 'droogtoilet' komen in geen enkel Vlaams actie- en uitvoeringsplan voor. Nergens wordt het selectief inzamelen van menselijke mest, bv. bij festivals, vermeld. Impliciete verwijzingen naar menselijke mest vinden we terug bij de recyclage van wegwerpluiers en incontinentiemateriaal en de fosforrecuperatie bij afvalwaterverwerking. Om de transitie naar meer duurzame sanitaire systemen te bevorderen en te verankeren, raden we aan om doelstellingen en acties in de meerjarenplannen op te nemen.

Het ZirkulierBAR-project in Duitsland is een voorbeeld van een 'vruchtbare proeftuin' waarin kon geëxperimenteerd worden met alle aspecten van de transitie naar een duurzaam sanitair systeem.

Dit kan in Vlaanderen navolging vinden binnen het kader van een Green Deal 'Duurzame sanitatie', waarbij alle stakeholders samenwerken aan technieken, wetenschappelijk onderzoek en de voorbereiding van nieuwe regelgeving.

Geschikte toepassingen

Zuiveringsslib van RWZI's blijkt op grote schaal toegepast te worden in de landbouw, zowel in Europa als elders, maar niet in Vlaanderen, Nederland of Zwitserland. Onderzoek wijst op de gevaren van on(voldoende)verwerkt zuiveringsslib. Nacomposteren blijkt evenwel gunstige effecten te hebben op microverontreinigingen in zuiveringsslib.

De toepassing van urine als vloeibare meststof in de landbouw zou wel eens de best haalbare toepassing van menselijke mest kunnen zijn. Omdat urine in grotere hoeveelheden wordt geproduceerd, bevat het in absolute termen meer stikstof, fosfor en kalium dan feces. Urine is een snelle stikstofbemester. Urine kan door aangepaste toiletten en urinoirs apart ingezameld worden op plaatsen waar veel mensen samen komen. Twee derde van de medicijnresten worden via de urine uitgescheiden. Door urine apart te verwerken, kan het met relatief eenvoudige technieken gezuiverd worden. Hierdoor wordt het waterzuiveringssysteem in belangrijke mate van medicijnresten ontlast.

Gecomposteerd materiaal uit droogtoiletten, aangevuld met urine als vloeibare meststof, is in staat om dezelfde plantenopbrengsten te genereren als kunstmeststoffen of andere organische meststoffen. Compost blijkt een goede fosforbemester te zijn die zijn nutriënten eerder traag ter beschikking stelt van planten, terwijl urine een goede korte termijn stikstofbemester is. Menselijke compost kan zorgen voor een hoger organische stofgehalte in de bodem maar de hoeveelheid die per hectare kan toegediend worden, wordt beperkt door de mate van fosforverzadiging van de bodem en de P-bemestingslimiet (zie de mestactieplannen).

Onderzoek toont aan dat compost van menselijke mest veilig kan worden toegepast in de landbouw:

- Er werd geen significante verandering in concentraties van indicatororganismen voor fecale verontreiniging in de bodem vastgesteld na bemesting met deze compost.
- De dagelijkse toxische limieten van microverontreinigingen in gewassen bestemd voor menselijke consumptie werden niet overschreden (als gevolg van de opname van microverontreinigende stoffen via plantenwortels, scheuten, bladeren of vruchten).

Pyrolyse van feces is een piste die zeker verder onderzoek verdient. De toevoeging van zuiveringsslib van RWZI's aan klei voor de productie van bakstenen is een andere interessante optie.

Lessen uit de praktijk

'Duurzame sanitatie' is een economische sector die opbloeit. Nieuwe oplossingen worden aangeboden door steeds meer innovatieve bedrijven die een markt vinden voor hun product of technologie.

In Frankrijk, Duitsland en Zwitserland zijn de sectororganisaties RAE, NetSan en VaLoo en hun leden dagelijks aan het werk om duurzame sanitatie in de praktijk om te zetten met sensibilisering, wetenschappelijk onderzoek, nieuwe projecten, producten, diensten en technologie.

In november 2023 ging in Zürich de eerste internationale netwerkbijeenkomst door waar informatie werd uitgewisseld over strategie, kennis, wetgeving, voorbeeldprojecten en internationale samenwerking.

Wereldwijde samenwerking aan duurzame sanitatie wordt gestimuleerd via onder meer het forum van de Sustainable Sanitation Alliance (SuSanA).

Talrijke voorbeelden in deze studie tonen aan dat duurzame sanitatie haalbaar is. Dit beperkt zich niet enkel tot droogtoiletten op festivals. In grootschalige woonuitbreidingsprojecten in onder meer Gent, Amsterdam, Hamburg en Helsingborg wordt toiletwater samen met gft-afval vergist om energie te leveren voor woningverwarming. In Zwitserland werden appartementsblokken uitgerust met verschillende duurzame sanitatiesystemen. In Zürich en Parijs worden kantoorgebouwen uitgerust met een recuperatiesysteem voor urine. Openbare droogtoiletten in Berlijn en Brussel en op tal van andere plaatsen zijn een feit.

Tenslotte zijn er heel wat particulieren die een droogtoilet hebben. In Frankrijk is ongeveer 5% van de niet-collectieve sanitaire voorzieningen uitgerust met een waterloos strooiseltoilet. Een enquête in Wallonië en Brussel gaf aan dat 41% van de gezinnen met een droogtoilet niet op de openbare riolering is aangesloten. Zo'n 90% van de respondenten zeggen een droogtoilet te hebben uit ecologische overwegingen, 8% uit praktische overwegingen en 5% uit economische overwegingen.

RÉSUMÉ: LES SYSTÈMES SANITAIRES DURABLES

Contexte

Au début du 20e siècle, un système d'assainissement est apparu avec des toilettes à chasse d'eau et des égouts. En Europe, ce système est basé sur un modèle linéaire dans lequel le fumier humain est éliminé et traité en utilisant, dans de nombreux cas, de l'eau potable comme moyen de transport. Ce flux linéaire génère environ 10 000 litres d'eaux usées par personne et par an. Le traitement de ces eaux usées nécessite des infrastructures d'assainissement et un traitement de l'eau à forte intensité énergétique. De plus, on perd des nutriments précieux (azote, phosphore, potassium) et des matières organiques.

La Flandre a pour objectif le développement d'une économie circulaire où la boucle est bouclée. La politique de la Flandre en matière de déchets et de matériaux vise donc à éviter les déchets, à promouvoir une diminution de l'utilisation - et de la perte - de matériaux et à conserver les produits le plus longtemps possible afin d'optimiser leur valeur. Les autorités, mais aussi de nombreux acteurs économiques et sociaux, appellent à une transition vers une économie plus circulaire et cherchent des moyens pour réduire cette empreinte écologique.

Le système sanitaire (temporaire) lors d'événements offre un grand potentiel à cet égard. Actuellement, diverses solutions de toilettes sont disponibles, mais chacune d'entre elles présente un certain nombre d'inconvénients importants. Le concept des toilettes sèches, où aucune eau n'est nécessaire et où les excréments humains sont collectés, mélangés à des matières organiques sèches riches en carbone et traités sans produits chimiques et/ou sans eau comme moyen de transport et d'élimination, présente des avantages sur le plan de l'environnement, de la logistique et des coûts. En outre, l'expérimentation des toilettes sèches dans le secteur de l'événementiel pourrait permettre d'étendre le concept à d'autres secteurs de la société. Cependant, le fumier humain n'est pas seulement une source de nutriments et de matières organiques, mais aussi d'agents pathogènes et de résidus pharmaceutiques qui ne sont pas souhaitables dans le cycle biologique. Outre les défis logistiques, économiques et socioculturels de la valorisation du fumier humain, ce risque pour la santé humaine et environnementale est actuellement la principale pierre d'achoppement du recyclage des nutriments et de la matière organique du fumier humain. Par conséquent, aujourd'hui, le seul traitement autorisé est l'épuration via une station d'épuration et/ou l'incinération.

L'objectif principal de cette étude de littérature est de bien comprendre les possibilités, les défis et les opportunités pour le traitement de haute qualité du fumier humain et de la législation et des normes existantes en Belgique, en Europe et au-delà. En outre, l'étude de littérature compare l'impact environnemental des toilettes sèches avec les solutions alternatives existantes, que ce soit dans le secteur de l'événementiel ou non.

Ceci doit permettre à OVAM d'évaluer si les toilettes sèches sont utiles et réalisables en termes de possibilités de traitement de haute qualité et d'impact sur l'environnement, et quelles sont les conditions légales et environnementales possibles pour autoriser ces systèmes.

Impact environnemental des systèmes sanitaires

Les eaux des toilettes, appelées "eaux noires", sont évacuées avec les "eaux grises" et les eaux de pluie via le réseau d'égouts public. Les eaux noires ne représentent que 9 % de l'ensemble des eaux usées. Les stations d'épuration (STEP) les traitent et rejettent les eaux usées traitées dans les cours d'eau.

Si on considère l'impact environnemental de notre système d'assainissement, les catégories principales sont la consommation d'eau et les émissions de polluants dans l'eau et dans l'air.

Plus de 17 % de la consommation d'eau des ménages en Flandre sert à tirer la chasse d'eau des toilettes. Cela nécessite 45 millions de m³ d'eau par an, soit l'équivalent du volume d'eau du canal Albert entre Anvers et Maastricht. La Flandre est l'une des régions d'Europe où l'approvisionnement en eau par habitant est le plus faible. En raison du changement climatique et des périodes de sécheresse plus fréquentes, la consommation d'eau est un enjeu majeur.

Les eaux traitées par les STEP contiennent encore d'importants résidus d'azote (N) et de phosphore (P), des agents pathogènes, des résidus de médicaments, des pesticides et des PFAS qui sont déversés dans les eaux de surface. En ce qui concerne les agents pathogènes et les résidus de médicaments, nous pouvons être à peu près certains qu'ils proviennent principalement des eaux des toilettes. La contribution des eaux de toilettes à l'eutrophisation des cours d'eau a été estimée à 22% pour l'azote et à 29% pour le phosphore. Les polluants persistants rendent la production d'eau potable pure de plus en plus difficile et coûteuse.

Les émissions de gaz à effet de serre d'Aquafin ont été estimées à 284 000 tonnes de CO_{2eq} pour 2023, ce qui représente 0,4% des émissions totales de gaz à effet de serre en Flandre. La production d'un kg de compost de déchets verts émet moins de la moitié des gaz à effet de serre que le traitement d'un litre d'eaux usées (113 CO_{2eq}/kg de compost contre 295g CO_{2eq}/L d'eaux usées).

Les systèmes d'assainissement circulaire utilisent des technologies qui évitent ou réutilisent l'eau comme moyen de rinçage et de transport, séparent les flux de déchets et valorisent les nutriments. Les principales catégories d'impact environnemental sont les émissions dans le sol et dans l'air. Les systèmes d'assainissement circulaires visent à restituer au sol les nutriments et les matières organiques nécessaires au développement des plantes et à la santé du sol.

Les toilettes en Flandre produisent 460.000 tonnes de matières fécales et 3.400.000 tonnes d'urine par an en 2024. Cela représente 125.000 tonnes de matière organique (en matière sèche) qui pourraient enrichir les sols agricoles flamands. Le potentiel d'azote est important : si, par exemple, 75 % de l'azote de l'urine humaine pouvait être récupéré en Flandre, cela pourrait remplacer environ un tiers de l'apport actuel d'azote par des engrais chimiques sur les sols agricoles flamands.

L'utilisation de fumier humain, transformé en engrais organique par des techniques de traitement adaptées, n'est souhaitable que si les risques pour l'homme et l'environnement ont été suffisamment éliminés. Cette étude de littérature montre que le risque potentiel du fumier humain collecté et traité séparément est généralement inférieur à celui du compost de déchets verts ou du fumier animal, et qu'un traitement approprié peut éliminer suffisamment les agents pathogènes et les substances dangereuses pour l'environnement.

Les risques pour l'environnement et la santé des résidus de médicaments, des pesticides, des microplastiques et des PFAS restent une préoccupation majeure, notamment en raison de leur persistance et de leur potentiel de bioaccumulation. Le compostage du fumier humain collecté séparément permet de déplacer et de réduire certains de ces risques du compartiment environnemental "eau" vers le compartiment environnemental "sol". Selon l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), le sol est généralement mieux adapté à la dégradation des résidus pharmaceutiques que les masses d'eau.

Une méta-analyse de 11 études LCA comparant un système sanitaire conventionnel à des systèmes sanitaires circulaires montre que ces derniers sont généralement plus respectueux de l'environnement pour différentes raisons:

- Ils économisent significativement l'eau (non quantifié)
- Ils émettent de 30 à 50 % de gaz à effet de serre en moins
- Ils nécessitent de 30 à 70 % d'énergie en moins
- Ils provoquent de 50 à 85 % d'eutrophisation en moins
- Ils réduisent de 90 % l'écotoxicité (des résidus de médicaments grâce à la séparation et au traitement des urines)
- Ils réduisent de 85% les métaux lourds (utilisation des boues de STEP au lieu d'engrais recyclés à base de fèces et d'urine collectées séparément - uniquement pertinent dans les pays où les boues de STEP sont autorisées en tant qu'engrais, donc non pertinent pour la Flandre).

D'un point de vue environnemental, les systèmes d'assainissement circulaires sont porteur de sens, à condition que les conditions préalables légales et environnementales soient établies.

Évaluation des risques, du potentiel de réduction et des normes pour le compost issu des toilettes sèches

Le compost issu des toilettes sèches peut être utilisé en toute sécurité dans l'agriculture. Les données recueillies dans le cadre de cette étude de littérature montrent que le compost répond aux normes proposées par le Service Public Fédéral Santé, Sécurité de la chaîne alimentaire et Environnement (SPF SSE) en ce qui concerne les paramètres d'hygiène, les métaux lourds, les PFAS, les HAP et les dioxines. Pour les résidus de médicaments, le SPF SSE n'a pas encore fixé de norme, mais demande une étude de littérature plus approfondie. Les lignes directrices provisoires du SPF SSE ne mentionnent pas explicitement les pesticides et les microplastiques, mais ils sont abordés dans cette étude.

Le compostage du fumier humain réduit le **paramètre d'hygiène** E.coli de 99,99% ; il en va de même pour les entérocoques. Des résidus sont encore trouvés pour Clostridium perfringens, mais ils sont généralement égaux aux valeurs de cette bactérie dans les sols cultivés. Aucune salmonelle n'a été retrouvée dans les échantillons. Le compostage réduit également la résistance aux antimicrobiens (RAM).

La teneur en **métaux lourds** des fèces et de l'urine est inférieure à celle du compost vert, qui est lui-même inférieur à celle du lisier de porc, qui est lui-même inférieur à celle des boues d'épuration des stations

d'épuration (à l'exception du cuivre). Dans le compost de fumier humain, l'arsenic, le cadmium, le chrome et le nickel restent inférieurs à la norme. Le mercure, le cuivre, le zinc et le plomb restent bien en deçà de la norme. Le fait que la teneur en chrome, nickel et plomb des fèces et de l'urine soit inférieure à celle du compost de toilettes sèches s'explique par l'ajout de déchets verts compostés avec le fumier humain.

Deux tiers des **résidus de médicaments** proviennent de l'urine. Les concentrations d'antibiotiques dans les déjections animales sont beaucoup plus élevées que dans l'urine humaine. Un compostage de 6 mois à 1 an réduit les antibiotiques et les hormones de 93 à 100% et les autres résidus de médicaments de 85 à 95%. Les concentrations de quelque 100 résidus de médicaments testés dans le compost de fumier humain sont à 95% inférieures à 10 µg/kg MS. Environ cinq résidus médicamenteux (metformine, amisulpride, ciprofloxacine, carbamazépine, doxycycline) ont des concentrations comprises entre 15 et 250 µg/kg MS dans un compost suisse de toilettes sèches, ce qui est inférieur à aux normes utilisées pour le recyclage des langes (VLAREMA Annexe 5.2.15.A). Pour les résidus de médicaments, le SPF SSE n'a pas encore fixé de norme, de sorte que notre évaluation positive doit être considérée avec prudence.

Les pesticides organochlorés (qui sont les plus résistants) sont réduits de 80% après 100 jours de compostage. La plupart des autres pesticides sont modérément ou bien dégradés, à quelques exceptions près (p. ex. le clopyralid). Le glyphosate est un herbicide largement utilisé et se retrouve dans l'urine humaine (0,13µg/l). L'ensemble des pesticides dans l'urine de Wallons âgés de 40 à 59 ans sont inférieurs à 20µg/l. Les pesticides dans les fèces sont très peu étudiés et nous disposons donc de données très limitées. Les pesticides dans le compost des toilettes sèches n'ont pas été analysés jusqu'à présent. En outre, les pesticides ne sont pas explicitement mentionnés dans les lignes directrices provisoires du SPF SSE, de sorte que nous ne pouvons pas procéder à une évaluation complète.

Les microplastiques présents dans les matières fécales représentent 56mg/kg MS. Environ 45% des microplastiques ont une taille de particule inférieure à 50µm; 55% ont une taille de particule comprise entre 50 et 500µm. Le compostage de trois mois des déchets municipaux verts en Pologne réduit les polymères de 33 à 84% et les additifs de 66%. Dans le compost commercial de déchets verts (et le digestat de déchets verts), le poids des microplastiques de 1 à 5 mm est plus important que dans les fèces, étant donné qu'ils n'y sont pas présents. Les microplastiques de 1 à 5 mm n'étaient pas été présents dans le digestat purement agricole. Sur base de ce qui précède, on peut s'attendre à ce que le compost des toilettes sèches contienne moins de microplastiques (en poids) que le compost ou le digestat de déchets verts. Mais cela n'a pas encore été mesuré. En l'absence de résultats de mesures dans le compost des toilettes sèches et de normes pour les microplastiques, nous ne pouvons pas procéder à une évaluation complète de ce paramètre.

Chez des personnes ayant bu de l'eau potable contaminée par des **substances poly- et perfluoroalkyles (PFAS)** pendant une certaine période, on a trouvé 0,6µg PFOA/kg DS dans les fèces et 0,02µg PFOA/l dans l'urine. La comparaison des valeurs de PFOA dans le sang/sérum de ces personnes avec les mesures des programmes de biosurveillance humaine en Flandre et en Wallonie montre que les valeurs des personnes contaminées sont 3 à 10 fois plus élevées. Une étude franco-canadienne a révélé que le compost issu de biodéchets municipaux contenait 10 µg PFAS/kg MS. Dans le fumier animal, on a mesuré 0,7µg de PFAS/kg MS et dans les boues d'épuration des STEP 370µg de PFAS/kg MS. Les PFAS présents dans le papier hygiénique représentent 2 à 8 %

de la charge en PFAS dans les boues d'épuration. Les effluents des stations d'épuration contiennent 10 à 1 000ng de PFAS/l; les eaux de surface contiennent 6ng de PFAS/l. Les sociétés flamandes de distribution d'eau potable ont signalé la présence d'acide trifluoroacétique (TFA), une molécule PFAS très courte dérivée de pesticides, à des concentrations de 2 à 8µg/l. Moins de 10µg PFAS/kg MS ont été mesurés dans le compost des toilettes sèches, ce qui est inférieur à la valeur d'évaluation flamande pour les PFAS₂₀ de 15µg/kg MS dans les déchets utilisés pour enrichir ou fertiliser le sol.

Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) dans l'urine s'élèvent à 0,055 mg/l. Dans le compost des toilettes sèches, on a mesuré de 0,6 à 3,7 mg de HAP/kg de MS, ce qui est inférieur à la norme de 20 mg/kg de MS proposée par le SPF SSE. Des études ont montré que les HAP présents dans les boues d'épuration des STEP étaient réduits de 60 à 75 % après 40 à 110 jours de compostage.

Il n'y a pas d'analyses du **benzène, du toluène, de l'éthylbenzène et du xylène (BTEX)** dans le compost des toilettes sèches, la norme proposée par le SPF SSE est de 20 mg/kg de MS.

Les dioxines présentes dans le compost provenant de toilettes sèches restent inférieures à la norme de 20 ngTEQ/kg de MS proposée par le SPF-VVL. **Les polychlorobiphényles (PCB)** dans le compost des toilettes sèches restent inférieurs à la norme allemande de 0,1 mg/kg de MS et également inférieurs à la norme pour les boues d'épuration des STEP (AR du 28 janvier 2013) de 0,8 mg/kg de MS (somme 7PCB).

Pour **l'huile minérale**, aucune mesure dans le compost des toilettes sèches n'est disponible. Nous n'avons pas trouvé d'études à ce sujet.

Hygiène et techniques de traitement

La collecte séparée des déjections humaines offre des possibilités de traitement ciblé. Nous avons étudié un certain nombre de techniques de traitement pour les fèces (telles que le compostage, la digestion, l'épuration par les plantes, la pyrolyse) et pour l'urine (telles que le stockage, la fermentation).

Le compostage

Le compostage dans de bonnes conditions produit des températures de 60-70°C qui, associées à une certaine durée de compostage, peuvent assurer l'hygiénisation des déjections humaines. En Allemagne, les déjections humaines provenant des festivals sont immédiatement hygiénisées dans des conteneurs hermétiques à des températures supérieures à 70°C pendant plusieurs heures ou plusieurs jours. Cela permet de respecter la législation européenne sur les sous-produits animaux, qui exige que le compost et le digestat dans lesquels des sous-produits animaux ont été traités aient subi un traitement thermique à 70°C pendant au moins une heure ou un traitement équivalent et officiellement validé (hygiénisation).

L'analyse de la littérature a montré que le compostage réduit considérablement les agents pathogènes ainsi que les résidus de médicaments et de pesticides, les microplastiques et les HAP. Ce point a déjà été abordé dans les sections précédentes.

Le potentiel de réduction du compostage peut être favorisé en encourageant la présence et le développement d'une microbiologie aussi diversifiée que possible dans le compost. Par exemple, par une composition adéquate du fumier, des matières vertes (à la fois des matières texturées et des résidus verts facilement dégradables), de la matière argileuse et du compost jeune. Le compostage professionnel à grande échelle, par exemple en Allemagne, permet d'obtenir un compost d'humus sain en 3 mois. Si l'on veut réduire au maximum les résidus de médicaments, les microplastiques et certains pesticides, la microbiologie aérobie a besoin de 6 mois à 1 an, en fonction de l'échelle et de la technologie.

Le compostage du fumier humain à petite échelle nécessite 2 ans. Cela s'explique par le fait qu'il faut tenir compte d'une plus grande perte de chaleur et le fait de ne pas retourner le compost, ou de le retourner moins fréquemment. Cette perte est compensée par l'isolation du tas de compost et l'ajout de matériaux qui apportent plus de structure et de matériaux verts.

En axant le processus de compostage sur la microbiologie, en plus de la température et de la vitesse, on obtient un compost sain et de haute qualité qui stimule la vie du sol et lui apporte de la matière organique et d'autres avantages.

La digestion anaérobique

La digestion du fumier humain est déjà couramment utilisée dans des projets d'extension résidentielle à grande échelle, notamment à Gand, Amsterdam, Hambourg et Helsinki. Les fèces et l'urine sont co-fermentées avec, par exemple, des déchets verts ou des graisses animales afin d'utiliser le biogaz produit (70-105m³ de biogaz/tonne de mélange frais) pour le chauffage résidentiel.

Les recherches montrent que la fermentation est beaucoup moins efficace pour éliminer les pathogènes et les résidus de médicaments que le compostage. Ceci est lié aux températures généralement assez basses auxquelles la digestion a lieu, au temps de traitement court et au type de bactéries de décomposition qui interviennent dans la digestion.

À Gand, le digestat est acheminé vers l'incinération. Mais s'il était post-composté, il pourrait encore être valorisé comme produit de qualité dans l'agriculture.

La fermentation bokashi

La fermentation ayant lieu à température ambiante, l'hygiénisation est insuffisante pour utiliser en toute sécurité le fumier humain comme engrais. La fermentation semble plutôt convenir comme technique de stockage par analogie avec l'ensilage (des cultures fourragères).

La fermentation abaisse le pH en produisant de l'acide lactique, de sorte qu'une forme d'hygiénisation acide est toujours possible. Certains fournisseurs de toilettes sèches pour les festivals utilisent la fermentation comme première étape, suivie du compostage dans un deuxième temps. Selon eux, la fermentation améliore la qualité du compost (sans spécification).

Aucune recherche n'a été menée pour démontrer que la fermentation bokashi élimine les agents pathogènes, les graines de mauvaises herbes ou les maladies des plantes, ou qu'elle élimine d'autres formes de contaminants (par exemple les résidus de médicaments).

Purification par des plantes

La *phytoremédiation* ne semble pas être une technique de traitement appropriée pour le contenu des toilettes sèches, étant donné les faibles valeurs de métaux lourds et de PFAS dans le fumier humain et les aspects pratiques tels que l'espace requis.

Le traitement des eaux noires à l'aide de *filtres végétaux* permet de réduire considérablement la charge organique et les agents pathogènes. L'exemple pratique de Leudegem montre que les charges de phosphore peuvent être réduites à un niveau inférieur à la concentration moyenne dans les rivières flamandes, ce qui n'est pas le cas pour l'azote. Les filtres végétaux présentent également certains inconvénients, tels que leur besoin en surface, le temps nécessaire pour atteindre la pleine maturité et des performances moindres en hiver. Ils sont souvent utilisés pour le traitement à petite échelle des eaux usées domestiques dans la zone périphérique.

Pyrolyse

Les tests de pyrolyse avec le contenu des toilettes sèches ont permis d'obtenir 30% de biochar (matière sèche) répondant aux exigences du système d'assurance qualité (EBC) pour les HAP, les PCB, les dioxines et les concentrations de métaux lourds, à l'exception du Zn et du Ni. Le biochar peut être utilisé comme engrais et est exempt de pathogènes en raison de la température élevée du processus. Le carbone stable représente 60% du biochar et peut être retenu dans le sol pendant une longue période. La pyrolyse des matières fécales humaines pourrait neutraliser environ 0,11 % des émissions de carbone d'origine humaine.

Le processus de pyrolyse est généralement lancé à l'aide d'une énergie externe, mais récupère ensuite l'énergie des gaz libérés par le substrat pyrolysé. Pour ce faire, la matière première ne doit pas être trop humide (maximum 55% d'humidité). La pyrolyse émet moins de CO₂ que l'incinération avec récupération d'énergie.

La présence de litière et l'absence d'urine dans le substrat des toilettes sèches permettent d'optimiser le processus de pyrolyse et de réduire la teneur en sel du biochar.

Traitement de l'urine

Dans le monde entier, mais surtout en Chine, l'intérêt pour l'utilisation de l'urine en tant qu'engrais a considérablement augmenté, comme en témoigne le nombre de publications scientifiques parues au cours de la dernière décennie.

Dans cette étude, nous ne nous sommes penchés que sur quelques méthodes de traitement.

Selon l'OMS, il suffit de stocker l'urine dans des récipients hermétiques pendant 6 mois pour l'utiliser en toute sécurité comme engrais. Un processus de décomposition naturelle accompagné d'un pH élevé assure l'hygiénisation nécessaire. L'urine est fondamentalement stérile, mais peut être contaminée par des bactéries fécales lors de l'excrétion ou de la collecte.

La fermentation avec des bactéries d'acide lactique est un moyen de détruire les agents pathogènes en réduisant le pH.

Les résidus de médicaments ne sont pas suffisamment dégradés dans les deux techniques précédentes. C'est pourquoi un procédé suisse de traitement de l'urine (VUNA), en plus d'un processus de nitrification, assure également une purification au moyen d'un filtre à charbon actif, suivi d'une distillation. C'est ainsi qu'est né le premier engrais à base d'urine au monde, approuvé par la Suisse, le Liechtenstein et l'Autriche.

L'extraction de struvite (un engrais P) à partir d'urine a été sous les feux de la rampe il y a un certain temps, mais ne l'est plus, peut-être pour des raisons économiques. Des recherches ont montré que les tétracyclines (antibiotiques) sont absorbées par les cristaux de struvite.

Cadre juridique pour le traitement du fumier humain

Le cadre juridique existant

La législation du VLAREM stipule que les matières septiques doivent être éliminées dans une station d'épuration publique ou chez un transformateur agréé :

Sous-section 4.2.8.3. Fonctionnement et entretien des stations d'épuration individuelles

Article 4.2.8.3.1. L'exploitation et l'entretien des installations individuelles de prétraitement respectent les dispositions générales suivantes :

1° l'évacuation des matières septiques dépolluées dans le réseau public d'égouts ou dans les collecteurs est interdite.

2° les matières septiques doivent être évacuées vers une station publique d'épuration des eaux. La station d'épuration publique peut refuser (une partie) de la charge fournie, qui doit être évacuée vers un transformateur agréé.

Traitement avec incinération comme finalité

Les entreprises existantes qui traitent des déchets biologiques organiques non conformes à la VLAREMA doivent vérifier si le fumier humain/les matières septiques sont couverts par les autorisations actuelles et, si ce n'est pas le cas, demander une modification. Si le matériel est finalement incinéré, le permis ne devrait pas poser de problème et les exemptions (SPF SSE) ou les déclarations de matières premières (OVAM) ne sont pas non plus nécessaires. Bien que la VMM surveille le traitement de la fraction fine, les entreprises de transformation concernées disposent d'installations de traitement des eaux, de sorte qu'aucun problème n'est à craindre. À l'heure actuelle, la seule voie de traitement du contenu des toilettes sèches (p. ex. lors de festivals) avec une application utile semble être la "digestion avec combustion du digestat". Bien que les nutriments et la matière organique soient perdus, l'eau (potable) n'est pas contaminée lorsque le matériau est collecté et les polluants environnementaux sont éliminés, tandis que l'énergie est partiellement récupérée.

Traitement avec finalité un enrichissement du sol

Si le traitement (par exemple la digestion) vise une finalité telle que l'enrichissement, les entreprises de traitement des déchets industriels ne sont pas autorisées à prendre du fumier humain. Selon OVAM, il s'agit de la charge de la preuve pour démontrer (par exemple pour les résidus de médicaments et les agents pathogènes) que l'article 36, 4° du décret sur les matières est respecté: "*l'utilisation de la substance ou de l'objet n'a pas, dans l'ensemble, d'effets néfastes sur l'environnement ou la santé humaine*". Le décret sur les matériaux est prioritaire; le VLAREMA en est un arrêté d'exécution. Lors de la demande de déclaration de matières premières, OVAM vérifiera si le flux répond à l'article 36 et aux conditions de l'annexe 2.3.1 de la VLAREMA. Jusqu'à nouvel ordre, nous pensons que ce ne sera pas le cas.

Compostage domestique

Selon une interprétation du ministère de l'Environnement, le compostage domestique des excréments humains provenant des toilettes sèches ne serait pas exempté d'un permis d'environnement parce qu'il ne s'agit pas de matériel végétal. Aucun avis favorable ou permis ne peut être accordé.

Normes et lignes directrices pertinentes

Les lignes directrices et les valeurs limites établies par le SPF SSE (Comité des engrais) au début de 2025 pour le compost provenant des toilettes sèches constituent un point de référence important. Il s'agit de normes provisoires sur les paramètres d'hygiène, les métaux lourds, les HAP, les BTEX et les dioxines, ainsi que l'adoption de la valeur de référence pour les PFAS pour enrichir le sol ou comme engrais. Pour la Flandre, ces limites et d'autres (par exemple la salmonelle) pour le digestat et le compost sont également spécifiées dans la VLAREMA et l'ARC.

Pour les résidus de médicaments, le SPF SSE ne fixe pas encore de norme mais renvoie à une étude de littérature plus approfondie. Le SPF SSE ne mentionne pas explicitement les pesticides et les microplastiques, mais ils sont abordés dans cette étude.

La législation future peut s'inspirer des normes et des lignes directrices ci-dessous :

- la norme allemande DIN SPEC 91421 (annexe 12.5.2) : elle est appliquée de manière expérimentale. La norme DIN SPEC contient une valeur limite assez élevée pour les PFAS (PFT uniquement) et des valeurs limites relativement élevées pour les métaux lourds (en particulier Cu et Zn). La confrontation avec la pratique montre que la norme DIN SPEC devra évoluer. Par exemple, en ce qui concerne les limites pour le clostridium perfringens ou l'absence de limites concrètes pour cinq résidus de médicaments considérés comme pertinents.
- le règlement de l'UE sur les engrais : le fumier humain n'apparaît pas dans la classification des "catégories de matériaux constitutifs" (CMC) et une adaptation sera donc nécessaire.
- la fin du statut de déchet (OVAM) et la CMA (CMA-3-M) pour le matériel de couches utilisé comme enrichissement de sol (à savoir la stérilisation, la démonstration de l'absence d'activité microbienne, les limites pour les antibiotiques et les hormones spécifiques, l'exigence de valeur ajoutée...)
- la législation wallonne (12/1/1995) sur l'utilisation autorisée des boues d'épuration en tant qu'enrichissement du sol (sous réserve de valeurs limites pour les métaux lourds et d'une certification obligatoire). Le dépassement régulier des limites plus souples pour les PFAS dans les boues d'épuration a conduit à de nouvelles normes pour les PFAS à la fin de 2024 et à une réduction des applications de boues autorisées dans l'agriculture (maximum 6 tonnes/ha au lieu de 12) ainsi qu'à une surveillance plus stricte des stations d'épuration des eaux usées.
- En France, l'arrêté du 7/9/2008 fixant les prescriptions techniques applicables aux installations sanitaires non collectives autorise l'utilisation de toilettes sèches. Leur contrôle est réglementé par l'arrêté du 27 avril 2012. Les toilettes sèches ont également été autorisées dans les zones disposant d'un système d'assainissement collectif. La Direction générale de la santé publique a émis une douzaine de recommandations à l'attention des autorités sanitaires régionales en 2010. La norme française sur les amendements agricoles (NF U44-051) comprend une norme plus large sur les entérocoques.

Pour plusieurs médicaments, drogues et pesticides (substances actives et métabolites), il manque des valeurs de référence ou des valeurs limites pertinentes pour le compost. Les discussions avec le groupe de supervision, qui comprenait un transformateur professionnel, indiquent que le transformateur doit prendre en compte cette contamination potentielle. Cela devrait être indiqué sur la fiche d'information. Il est possible que les transformateurs anticipent cette situation en faisant signer une déclaration ou un accord de fournisseur qui attribue la responsabilité de la présence éventuelle de ces contaminants aux clients qui souhaitent que le fumier humain soit traité. Un cadre juridique est nécessaire pour éviter le transfert inutile de la responsabilité des risques de contamination d'un acteur à l'autre dans le processus de transformation.

En Allemagne, le compost provenant de toilettes sèches et répondant aux normes DIN SPEC ne peut être utilisé que dans le cadre d'expériences sur le terrain pour lesquelles une autorisation a été obtenue. En Flandre, il existe également une volonté de rendre les festivals plus durables, notamment par l'utilisation de toilettes sèches, mais un problème se pose quant à l'autorisation ou la possibilité de traiter les déchets collectés de manière qualitative par la suite.

Propositions d'adaptation et d'action

En suivant les recommandations du projet allemand ZirkulierBAR, nous pouvons faire des propositions similaires pour adapter le cadre légal en Flandre/Belgique afin que le fumier humain soit composté, fermenté ou pyrolysé et que les produits finis de ce traitement puissent être commercialisés et appliqués :

- Création d'un code EURAL pour le fumier humain
- Pour une utilisation finale en tant qu'amendement agricole ou engrais :
 - Articles distincts dans VLAREMA et conditions de traitement spécifiques dans le Règlement général de certification (ARC).
 - Certificat de contrôle de qualité et d'inspection requis comme base d'exemption SPF SSE
 - Extension de la liste positive des intrants autorisés pour la fermentation (SPF SSE)
 - Accord VLM pour considérer le fumier humain traité comme "autre sorte de fumier".
- Adaptation VLAREM en rapport avec les conditions du permis environnemental d'un transformateur agréé
- En principe, aucune restriction d'utilisation ne devrait être imposée pour le compostage professionnel du fumier humain si le compost est certifié conformément aux normes. Cela signifie que le compost issu du fumier humain peut être appliqué aux cultures directement destinées à l'alimentation ainsi qu'aux pépinières d'arbres et de fleurs.
- Exemption de permis d'environnement pour le compostage à petite échelle et le compostage domestique des déjections humaines, éventuellement assortie de restrictions, telles que, par exemple, une formation obligatoire et un "code de bonnes pratiques", l'utilisation uniquement sur sa propre parcelle, l'interdiction d'utiliser le compost pendant moins de deux ans, l'analyse obligatoire en cas d'utilisation dans le jardin potager, ...

Les mots "fumier humain" et "toilettes sèches" ne figurent dans aucun plan d'action et de mise en œuvre flamand. La collecte sélective des déjections humaines, par exemple lors de festivals, n'est mentionnée nulle part. On trouve des références implicites aux déjections humaines dans le recyclage des couches jetables et des produits d'incontinence, ainsi que dans la récupération du phosphore dans le traitement des eaux usées. Pour promouvoir et ancrer la transition vers des systèmes d'assainissement plus durables, nous

recommandons d'inclure des objectifs et des actions dans les plans pluriannuels .

Le projet ZirkulierBAR en Allemagne est un exemple de " terrain d'essai fertile " dans lequel il a été possible d'expérimenter tous les aspects de la transition vers un système d'assainissement durable. Il pourrait être imité en Flandre dans le cadre d'un Green Deal "Assainissement durable", dans lequel toutes les parties prenantes coopèrent sur les techniques, la recherche scientifique et la préparation de nouvelles réglementations .

Applications appropriées

Les boues d'épuration provenant des STEP semblent être largement utilisées dans l'agriculture, tant en Europe qu'ailleurs, mais pas en Flandre, aux Pays-Bas ou en Suisse. La recherche met en évidence les dangers des boues d'épuration non (suffisamment) traitées. Toutefois, le post-compostage semble avoir des effets bénéfiques sur les micropolluants présents dans les boues d'épuration.

L'application de l'urine comme engrais liquide dans l'agriculture pourrait bien être la meilleure application possible du fumier humain. L'urine étant produite en plus grandes quantités, elle contient plus d'azote, de phosphore et de potassium en termes absolus que les fèces. L'urine est un fixateur d'azote rapide. L'urine peut être collectée séparément en adaptant les toilettes et les urinoirs dans les lieux où de nombreuses personnes se rassemblent. Deux tiers des résidus de médicaments sont excrétés par l'urine. En traitant l'urine séparément, il est possible de la purifier à l'aide de techniques relativement simples. Cela permet de soulager considérablement le système de traitement de l'eau des résidus de médicaments.

Les matières compostées provenant des toilettes sèches, complétées par de l'urine en tant qu'engrais liquide, sont capables de générer les mêmes rendements végétaux que les engrais chimiques ou autres engrais organiques. Le compost semble être un bon engrais phosphoré qui rend ses nutriments disponibles aux plantes assez lentement, tandis que l'urine est un bon engrais azoté à court terme. Le compost humain peut augmenter la teneur en matière organique du sol, mais la quantité qui peut être appliquée par hectare est limitée par le degré de saturation du sol en phosphore et par la limite de fertilisation en P (voir les plans d'action relatifs aux effluents d'élevage).

Les recherches montrent que le compost de fumier humain peut être utilisé en toute sécurité dans l'agriculture :

- Aucune modification significative des concentrations d'organismes indicateurs de la contamination fécale dans le sol n'a été observée après la fertilisation avec ce compost.
- Les limites journalières de toxicité des micropolluants dans les cultures destinées à la consommation humaine n'ont pas été dépassées (en raison de l'absorption des micropolluants par les racines, les pousses, les feuilles ou les fruits des plantes).

La pyrolyse des matières fécales est une voie qui mérite certainement d'être étudiée plus en profondeur. L'ajout de boues d'épuration provenant de stations d'épuration à l'argile pour la production de briques est une autre piste intéressante.

Leçons tirées de la pratique

Le secteur de assainissement écologique des matières de toilettes sèches est un secteur économique en plein essor. De nouvelles solutions sont proposées par un nombre croissant d'entreprises innovantes qui trouvent un marché pour leur produit ou leur technologie. En France, en Allemagne et en Suisse, les organisations sectorielles RAE, NetSan et VaLoo et leurs membres travaillent quotidiennement à la mise en pratique de l'assainissement durable: sensibilisation, recherche scientifique, nouveaux projets, produits, services et technologies.

En novembre 2023, la première réunion du réseau international s'est tenue à Zurich, où des informations ont été échangées sur la stratégie, les connaissances, la législation, les projets exemplaires et la coopération internationale.

La coopération mondiale en matière d'assainissement durable est encouragée, entre autres, par le forum de l'Alliance pour l'assainissement durable (SuSana).

Les nombreux exemples présentés dans cette étude montrent que l'assainissement durable est possible. Cela ne se limite pas aux toilettes sèches dans les festivals. Dans des projets d'extension résidentielle à grande échelle dans des villes comme Gand, Amsterdam, Hambourg et Helsingborg, l'eau des toilettes est fermentée avec des déchets organiques pour fournir de l'énergie pour le chauffage domestique. En Suisse, des immeubles ont été équipés de divers systèmes sanitaires durables. À Zurich et à Paris, les immeubles de bureaux sont équipés d'un système de récupération de l'urine. Les toilettes sèches publiques sont une réalité à Berlin, à Bruxelles et dans de nombreux autres endroits.

Enfin, de nombreux particuliers disposent de toilettes sèches. En France, environ 5 % des installations d'assainissement non collectif sont équipées de toilettes à litière sans eau. Une enquête menée en Wallonie et à Bruxelles a révélé que 41 % des ménages disposant de toilettes sèches ne sont pas raccordés au réseau public d'égouts. Environ 90 % des personnes interrogées ont déclaré avoir des toilettes sèches pour des raisons écologiques, 8 % pour des raisons pratiques et 5 % pour des raisons économiques.

SUMMARY: SUSTAINABLE SANITATION

Background and context

In the early 20th century, a sanitation system emerged with water-flushed toilets and sewers. This system in Europe is based on a linear model in which humanure is disposed of and processed using, in many cases potable, water as the means of transport. This linear flow has the effect of producing an estimated 10,000 litres of wastewater per person per year. Treating this wastewater requires sewage infrastructure and energy-intensive water treatment. Valuable nutrients (nitrogen, phosphorus, potassium) and organic matter are lost.

Flanders aims for a circular economy where cycles are closed as much as possible. Flanders' waste and materials policy therefore aims to prevent waste, promote a decrease in materials use -and loss- and preserve products as long as possible so that their value is optimised. The government, but also numerous economic players and social actors, are calling for a transition to a more circular economy and are looking for ways to reduce the ecological footprint.

Temporary sanitation at events offers a lot of potential here. Currently, a variety of toilet solutions are available, but each with a number of significant drawbacks. The concept of dry toilets, where no water is needed and 'humanure' is collected, mixed with dry carbon-rich organic material and processed without chemicals and/or water as a medium for transport and disposal, offers environmental, logistical and cost advantages. Moreover, testing dry toilets in the event sector could potentially leverage the scaling up of the concept to other areas of society.

However, humanure is not only a source of nutrients and organic matter, but also of pathogens and pharmaceutical residues that are not desirable in the biological cycle. Besides logistical, economic and socio-cultural challenges of humanure valorisation, this risk to human and environmental health is currently the biggest stumbling block to recycling nutrients and organic matter from humanure. Therefore, today the only permissible treatment is purification via a sewage treatment plant and/or incineration.

The main objective of this literature study is to obtain a thorough understanding of the possibilities, challenges and opportunities for high-grade processing of humanure and related existing legislation and standards in Belgium, Europe and beyond. In addition, the literature study compares the environmental impact of dry toilets with existing alternative toilet solutions, whether or not in the event sector. This should enable OVAM to evaluate whether dry toilets are useful and feasible in terms of high- quality processing possibilities and environmental impact, and what the possible legal and environmental preconditions for an authorisation of these systems.

Environmental impact of sanitary systems

Toilet water, the so-called 'black' water, is discharged together with 'grey' water and rainwater via the public sewer system. Black water makes up only 9% of all wastewater. Sewage treatment plants (WWTPs) process it and discharge the treated wastewater back into watercourses.

Water consumption and emissions of pollutants to water and air are the main environmental impact categories in our sanitation system.

More than 17% of household water consumption in Flanders serves to flush toilets. This requires 45 million m³ of water per year, equivalent to the water volume of the Albert Canal between Antwerp and Maastricht. Flanders is among the regions in Europe with the lowest per capita water supply. Due to climate change and more frequent periods of drought, water consumption is coming under pressure. Treated water from WWTPs still contains significant residues of nitrogen (N) and phosphorus (P), pathogens, medicine residues, pesticides and PFAS that are discharged into surface water. Of pathogens and drug residues, we can be fairly certain that they mainly come from toilet water. The contribution of toilet water in eutrophication of watercourses was estimated to be 22% for N and 29% for P. All pollutants together burden the water quality of our rivers. Persistent pollutants make the production of pure drinking water increasingly difficult and costly.

AQUAFIN's greenhouse gas emissions were estimated at 284,000 tonnes of CO_{2eq} for 2023, representing 0.4% of the total greenhouse gas emissions in Flanders. The production of one kg of compost made of vegetable, fruit and garden waste (VFG) emits less than half greenhouse gases than the treatment of one litre of wastewater (113g CO_{2eq}/kg compost versus 295g CO_{2eq}/L wastewater).

Circular sanitation systems use technologies that avoid or reuse water as a means of flushing and transport, segregate waste streams and can close nutrient cycles. The main environmental impact categories are emissions to soil and air. Circular sanitation systems aim to return nutrients and organic matter to the soil for plant nutrition and soil health.

Human excretions in Flanders consist of 460,000 tonnes of faeces and 3,400,000 tonnes of urine per year in 2024. This represents 125,000 tonnes of organic matter (in dry matter, DM) that could enrich its content in Flemish agricultural soils. The nitrogen potential is large: if, for example, 75% of the nitrogen from human urine could be recovered in Flanders, this could replace about one-third of the current nitrogen supply by artificial fertilisers on Flemish agricultural soils.

The use of humanure, converted into an organic fertiliser by adapted processing techniques, is only desirable if any human and environmental hazards have been sufficiently killed off or removed.

This literature review shows that the potential risk of separately collected and processed humanure is usually lower than that of VFG compost or animal manure, and that appropriate processing can remove pathogens and environmentally hazardous substances sufficiently.

The environmental and health risks of drug residues, pesticides, microplastics and PFAS remain a major concern especially because of their persistence and potential bioaccumulation. Composting separately collected humanure shifts and reduces some of these risks from the environmental compartment 'water' to the environmental compartment 'soil'. According to the World Health Organisation (WHO), the soil system is generally better suited for further degradation of pharmaceutical residues than water bodies.

A meta-analysis of 11 LCA studies comparing a conventional sanitary system with circular sanitary systems shows that the latter are generally more environmentally friendly because they:

- significantly save water (not quantified)
- emit 30% to 50% less greenhouse gases
- require 30% to 70% less energy
- cause 50% to 85% less eutrophication
- reduce 90% of ecotoxicity (from medicine residues through urine separation and treatment)
- reduce 85% of heavy metals (application of WWTP sludge versus recycled fertilisers based on separately collected faeces and urine - only relevant in countries where WWTP sludge is allowed as fertiliser, so not relevant for Flanders)

From an environmental point of view, circular sanitation systems therefore make sense, provided legal and environmental preconditions are established.

Evaluation of risks, reduction potential and standards for compost from dry toilets

Compost from dry toilets can be safely applied in agriculture. The data collected in this literature review show that compost meets the guidelines proposed by the Federal Public Service for Health, Food chain safety and Environment (FPS HFE) in terms of: hygiene parameters, heavy metals, PFAS, PAHs and dioxins. For drug residues, the FPS HFE does not yet set a standard, but refers to further bibliographic study. The FPS HFE's provisional guidelines do not explicitly mention pesticides and microplastics, but they are discussed in this study.

Composting humanure reduces the *hygiene* parameter E.coli by 99.99%; the same is largely true for Enterococci. Numbers are still found for Clostridium perfringens, but these are mostly equal to the background values of this bacterium in cultivated soils. No salmonella was recovered in any sample. Composting also reduces antimicrobial resistance (AMR).

Heavy metal content in faeces and urine is lower than that in green compost, which in turn is lower than that in pig manure, which in turn is lower than that in sewage sludge from WWTPs (except for copper). In compost from humanure, arsenic, cadmium, chromium and nickel remain below the standard. Mercury, copper, zinc and lead remain well below the standard. That the levels of chromium, nickel and lead in faeces and urine are lower than those in dry toilet compost is explained by the addition of green waste composted with humanure.

Two-thirds of *drug residues* are excreted through urine. The concentrations of antibiotics in animal dung are much higher than in human urine. Composting from 6 months to 1 year reduces antibiotics and hormones by 93-100% and the other drug residues by 85-95%. The concentrations of some 100 drug residues tested in compost from humanure are below 10 µg/kg DM for 95% of the tested drugs. Some five drug residues (metformin, amisulpride, ciprofloxacin, carbamazepine, doxycycline) have concentrations between 15-250 µg/kg DM in a Swiss compost from dry toilets, which is below the standards used for the

recycling of nappies (VLAREMA Annex 5.2.15.A). For medicine residues, the FPS HFE does not yet set a standard, so we can only make a cautiously positive evaluation here.

Organochlorine pesticides (which are the most resistant) are reduced by 80% after 100 days of composting. Most other pesticides are degraded moderately to well, with certain exceptions (e.g. clopyralid). Glyphosate is a widely used herbicide and is found in human urine (0.13µg/l). Total pesticides in the urine of 40-59-year-old Walloons are less than 20µg/l. Pesticides in faeces are very little studied so we have very limited data. Pesticides in compost from dry toilets have not been analysed so far. Moreover, pesticides are not explicitly mentioned in the provisional guidelines of the FPS HFE, so we cannot make a complete evaluation.

Microplastics in faeces amount to 56mg/kg DM. Some 45% of microplastics have a particle size of less than 50µm; 55% have a particle size of 50-500µm. Three-month composting of municipal VFG waste in Poland reduces polymers by 33-84% and additives by 68%. In commercial VFG compost (and VFG digestate) there is more weight of microplastics of 1-5mm than in faeces, given that they do not occur there. Microplastics of 1 to 5mm size did not occur in purely agricultural digestion. Based on the above, we can expect compost from dry toilets to contain fewer microplastics (by weight) than VFG compost or digestate. But this has not yet been measured. In the absence of measurement results in compost from dry toilets and standards for microplastics, we cannot make a full evaluation for this parameter.

Individuals who had drunk drinking water contaminated with *poly- and perfluoroalkyl substances (PFAS)* for a certain period were found to have 0.6µg PFOA/kg DM in faeces and 0.02µg PFOA/l in urine. The comparison of PFOA values in blood/serum of these individuals with measurements from human biomonitoring programmes in Flanders and Wallonia shows that the values of contaminated individuals are 3x to 10x higher. A French-Canadian study found compost from municipal biowaste to contain 10µg PFAS/kg DM. In animal manure, 0.7µg PFAS/kg DM was measured and in sewage sludge from WWTPs 370µg PFAS/kg DM. PFAS in toilet paper accounts for 2-8% of PFAS load in sewage sludge. Effluent water from WWTPs contains 10-1,000ng PFAS/l; surface water contains 6ng PFAS/l. Flemish drinking water companies reported trifluoroacetic acid (TFA), a very short PFAS molecule derived from pesticides, at concentrations of 2-8µg/l. Less than 10µg PFAS/kg DM was measured in compost from dry toilets, which is lower than the Flemish assessment value for PFAS of 15µg/kg DM in waste used in or as a soil improver/fertiliser.

Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in urine amount to 0.055mg/l. In compost from dry toilets, 0.6-3.7mg PAHs/kg DM were measured, which is lower than the standard of 20mg/kg DM proposed by the FPS HFE. Studies showed that PAHs in sewage sludge from WWTPs were reduced by 60-75% after 40-110 days of composting.

There are no analyses of *benzene, toluene, ethylbenzene and xylene (BTEX)* in compost from dry toilets, the FPS HFE's proposed standard is 20 mg/kg DM.

Dioxins in compost from dry toilets remain below the FPS HFE's proposed standard of 20ngTEQ/kg DM.

Polychlorinated biphenyls (PCBs) in compost from dry toilets remain below the German standard of 0.1 mg/kg DM and also below the standard for sewage sludge from WWTPs of 0.8 mg/kg DM (sum 7 PCBs).

For mineral oil, no measurements in compost from dry toilets are available. We did not find any studies on this.

Hygiene and processing techniques

The separate collection of humanure offers opportunities for targeted treatment. We investigated a number of processing techniques for faeces (such as composting, digestion, plant purification, pyrolysis) and for urine (such as storage, fermentation).

Composting

Composting under the right conditions produces temperatures of 60-70°C, which, together with a certain composting time, can ensure the hygienization of humanure. In Germany, humanure from festivals is immediately hygienized in sealed containers at temperatures above 70°C for several hours or days. This ensures compliance with European animal by-products legislation, which requires that compost and digestate in which animal by-products were processed have undergone heat treatment at 70°C for at least 1 hour or an equivalent, and officially validated treatment (hygienization).

This literature study showed that composting significantly reduces pathogens as well as medicine and pesticide residues, microplastics and PAHs. This was already discussed in the previous sections. The reduction potential of composting can be promoted by encouraging the presence and development of as diverse a microbiology as possible in the compost. For example, by having the right composition of manure, green material (both structural material and easily degradable green waste), clay soil and young compost.

Professional composting on a larger scale, e.g. in Germany, achieves safe humus compost in 3 months. If medicine residues, microplastics and some pesticides are to be maximally reduced, aerobic microbiology needs 6 months to 1 year, depending on scale and technology. Composting humanure on a small scale needs 2 years. This is because more heat loss and no or less frequent turning of the compost must be taken into account. This is compensated by insulating the compost heap and adding more structural and green material.

Focusing the composting process on microbiology, in addition to temperature and speed, produces a healthy high-quality humus compost that stimulates soil life and provides it with organic matter and other benefits.

Anaerobic digestion

Digestion of humanure is already commonly used in large-scale residential extension projects in, among others: Ghent, Amsterdam, Hamburg and Helsingborg. Faeces and urine are co-digested together with e.g. biowaste or animal fats to use the biogas produced (70-105m³ biogas/tonne fresh mix) for residential heating.

Research shows that fermentation is much less effective in eliminating pathogens and drug residues than composting. This is linked to the usually quite low temperatures at which digestion takes place, the short residence time and the type of breakdown bacteria at work in digestion.

In Ghent, the digestate is sent for incineration. But if it were to be post-composted, it could still be used as a high-quality end product in agriculture.

Bokashi fermentation

As fermentation takes place at ambient temperature, hygienization is insufficient to safely use humanure as fertiliser. Fermentation seems rather suitable as a storage technique analogous to ensiling (of fodder crops).

Fermentation lowers the pH by producing lactic acid, so a form of 'acid hygiene' can still occur. Some providers of drying toilets for festivals use fermentation as a first step, followed by composting in a second step. Fermentation, they say, improves the quality of compost (without specification).

No research has been found showing that Bokashi fermentation kills off pathogens, weed seeds or plant diseases, or removes other forms of contaminants (e.g. medicine residues).

Plant purification

Phytoremediation does not seem to be a suitable treatment technique for the contents of dry toilets given the low values for heavy metals and PFAS in humanure and the given practical aspects such as space requirements.

Treatment of black water with *plant filters* provides good reductions in organic load and pathogens. The practical example 'Leaudegem' shows that phosphorus loads can be reduced to below the average concentration in Flemish rivers; for nitrogen this is not the case. Plant filters also have some disadvantages such as their surface area requirement, the time needed to reach full maturity and lower performance in winter. They are often used for small-scale treatment of domestic wastewater in the outlying area.

Pyrolysis

Pyrolysis tests with dry toilet substrate yielded 30% biochar (dry matter) that met the European voluntary quality assurance scheme (EBC) requirements for PAHs, PCBs, dioxins and heavy metal concentrations, except Zn and Ni. The biochar can be used as fertiliser and is pathogen-free due to the high process temperature. Stable carbon makes up 60% of the biochar and can be retained in the soil for a long time. Pyrolysis of human faeces could neutralise about 0.11% of human carbon emissions.

The pyrolysis process is usually started with external energy, but then recovers energy from the gases released from the pyrolysed substrate. For this, the input material should not be too wet (maximum 55% moisture). Pyrolysis emits less CO₂ compared to incineration with energy recovery.

The presence of litter material and the absence of urine in the dry toilet substrate is appropriate to optimise the pyrolysis process and reduce the salt content of the biochar.

Urine processing

Across the world, but especially in China, interest in the use of urine as a fertiliser has increased dramatically, as measured by the number of scientific publications published in the last decade.

We only dwelled on a few processing methods in this study.

Storage in sealed containers for 6 months is sufficient to safely use urine as fertiliser, according to WHO. A natural decomposition process accompanied by a high pH provides the necessary hygienization. Urine is basically sterile, but can become contaminated with faecal bacteria during excretion or collection.

Fermentation with lactic acid bacteria is a way to destroy pathogens via reduced pH.

Drug residues are insufficiently degraded in both previous techniques. Therefore, a Swiss urine treatment process (VUNAL, in addition to a nitrification process, also provides purification through an activated carbon filter, followed by distillation. This produced the world's first urine fertiliser with full approval in Switzerland, Liechtenstein and Austria.

Struvite extraction (a P fertiliser) from urine was in the spotlight a while ago but is no longer, possibly for economic reasons. Research indicated that tetracyclines (antibiotics) are absorbed into the struvite crystals.

Legal framework for humanure processing

The existing legal framework

VLAREM legislation states that septic material must be disposed of to a public treatment plant, or a licensed processor:

Subsection 4.2.8.3. Operation and maintenance of individual pretreatment plants

Article 4.2.8.3.1. The operation and maintenance of individual pre-treatment installations shall comply with the following general provisions :

1° the discharge of cleared septic material into the public sewer system or collectors is prohibited.

2° septic material must be disposed of to a public water treatment plant. The public wastewater treatment plant may refuse (part of) the load supplied, which must be disposed of to a licensed processor.

Treatment with incineration as finality

Existing processors of non-VLAREMA-compliant organic biological waste must check whether humanure/septic material is covered by the current permits and, if not, apply for an amendment. If the material is finally incinerated, a permit should not be a problem and exemptions (FPS HFE) or raw material declarations (OVAM) are not needed either. Although VMM will supervise the processing of the thin fraction, the processors in question have water treatment facilities, so no problem is expected here either. At present, the only processing route to process the contents of dry toilets (e.g. from festivals) with a useful application seems to be 'digestion with combustion of the digestate'.

While nutrients and organic matter are lost, (potable) water is not contaminated when the material is collected and environmental pollutants are removed while energy is partly recovered.

Treatment with a soil improver as finality

If the processing (e.g. digestion) aims for a finality like a soil improver, industrial waste processors are not allowed to take humanure. According to OVAM, this has to do with the burden of proof to show (for e.g. medicine residues and pathogens) that Article 36, 4° of the Materials Decree is complied with: "the use of the substance or object does not, on the whole, have adverse effects on the environment or human

health". The Materials Decree takes precedence; the VLAREMA is an implementing decree of it. When applying for a feedstock declaration, OVAM will check whether the stream complies with Article 36 and the VLAREMA Annex 2.3.1 conditions. Until further notice, we expect that this will not be the case.

Home composting

Home composting of humanure from dry toilets, according to an interpretation by the Department of the Environment, would not be exempt from an environmental permit because it is not plant material. No favourable opinion or permit can be granted.

Relevant standards and guidelines

The guidelines and limit values drawn up by the FPS HFE (Fertiliser Committee) in early 2025 for compost from dry toilets are an important reference point. These are tentative standards on hygiene parameters, heavy metals, PAHs, BTEX and dioxins, as well as the adoption of the Flemish test value for PFAS for soil improvers/fertilisers. For Flanders, these and other limits (e.g. salmonella) for digestate and compost are also specified in the VLAREMA and the ARC.

For medicine residues, the FPS HFE does not yet set a standard but refers to further bibliographic study. The FPS HFE does not explicitly mention pesticides and microplastics, but they are discussed in this study.

Future legislation can find inspiration in the standards and guidelines below:

- the German DIN SPEC 91421 is applied experimentally. The DIN SPEC contains a rather high PFAS limit value (PFT only) and relatively high heavy metal limit values (especially Cu and Zn). The confrontation with practice shows that the DIN SPEC is a work-in-progress. For example, in relation to the limits for clostridium perfringens or the lack of concrete limits for five drug residues considered relevant.
- the EU Fertiliser Regulation: humanure does not appear in the 'component material categories' (CMC) classification and so an adaptation will be required.
- the end-of-waste criteria (OVAM) and CMA (CMA-3-M) for nappy material used as a soil improver (namely sterilisation, demonstration of absence of microbial activity, limits for specific antibiotics and hormones, added value requirement ...)
- the Walloon legislation (12/1/1995) on permitted use of sewage sludge as a soil improver (subject to heavy metal limit values including mandatory certification). The regular exceeding of the more lenient PFAS limits in sewage sludge led to new PFAS standards at the end of 2024 and lower permitted sludge applications in agriculture (max 6 tons/ha instead of 12) as well as stricter monitoring of WWTPs.
- In France, the Decree of 7/9/2009 establishing the technical requirements applicable to non-collective sanitary facilities allows the use of dry toilets. Their supervision is regulated by the Decree of 27 April 2012. Dry toilets were also authorised in zones with a collective wastewater treatment system. The French Directorate-General of Public Health issued a dozen recommendations addressed to regional health authorities in 2010. The French standard for soil improvers (NF U44-051) contains a broader standard for enterococci.

For several medicines, drugs, and pesticides (active substances and metabolites), relevant reference or limit values for compost are missing. Discussions with the steering group, which included a professional processor, indicate that the processor does need to take into account such, potential contamination. This should be indicated via the information sheet. It is possible that processors will anticipate this by having a declaration or supplier agreement signed that places the responsibility for the possible presence of such contaminants on the customers who want humanure processed. A legal framework is needed to avoid unnecessary transfer of responsibility of contamination risks from one player to another in the processing process.

In Germany, compost from dry toilets that meets German DIN SPEC standards can only be applied in field experiments for which permission has been obtained. In Flanders too, there is a desire to make festivals more sustainable, including through the use of dry toilets, but a problem arises in terms of being allowed or able to process the collected waste in a high-quality manner afterwards.

Proposals for adaptation and action

Following the recommendations from the German ZirkulierBAR project, we can make similar proposals to adapt the legal framework in Flanders/Belgium so that humanure is composted, fermented or pyrolysed and that the end products of that processing can be traded and applied:

- Creation of a EURAL code for humanure
- For final use as a soil conditioner or fertiliser:
 - separate articles in VLAREMA and specific process conditions in the General Regulations of Certification (ARC)
 - Quality control and inspection certificate required as basis for exemption FPS HFE
 - Extension of positive list of permitted inputs for fermentation (FPS HFE)
 - Agreement VLM to consider treated humanure as 'Other Manure'
- Adaptation VLAREM in connection with conditions of environmental permit of licensed processor
- In principle, no use restrictions should be imposed for professional composting of humanure if the compost is certified according to the standards. This means that compost from humanure can be applied to crops directly intended for food as well as to tree and flower nurseries.
- Exemption from an environmental permit for small-scale composting and home composting of humanure, possibly accompanied by the imposition of restrictions, such as, for example, compulsory training and a "code of good practice", only use on one's own plot, no utilisation before less than 2 years of composting, compulsory analysis when used in the kitchen garden, ...

The words "humanure" and "dry toilet" do not appear in any Flemish action and implementation plan. Nowhere is the selective collection of humanure, e.g. at festivals, mentioned. Implicit references to humanure are found in the recycling of disposable nappies and incontinence materials and phosphorus recovery in wastewater treatment. To promote and anchor the transition to more sustainable sanitation systems, we recommend including targets and actions in multi-year plans .

The ZirkulierBAR project in Germany is an example of a "fertile testing ground" in which it was possible to experiment with all aspects of the transition to a sustainable sanitation system. This could be

emulated in Flanders within the framework of a Green Deal 'sustainable sanitation', in which all stakeholders cooperate on techniques, scientific research and the preparation of new regulations .

Suitable applications

Sewage sludge from WWTPs appears to be widely used in agriculture, both in Europe and elsewhere, but not in Flanders, the Netherlands or Switzerland. Research points to the dangers of un(sufficiently) processed sewage sludge. However, post-composting appears to have beneficial effects on micropollutants in sewage sludge.

The application of urine as a liquid fertiliser in agriculture may well be the best feasible application of humanure. Because urine is produced in larger quantities, it contains more nitrogen, phosphorus and potassium in absolute terms than faeces. Urine is a rapid nitrogen fixer. Urine can be collected separately by adapted toilets and urinals in places where many people congregate. Two thirds of drug residues are excreted through urine. By processing urine separately, it can be purified using relatively simple techniques. This significantly relieves the water treatment system of medicine residues.

Composted material from dry toilets, supplemented with urine as liquid fertiliser, is capable of generating the same plant yields as artificial or other organic fertilisers. Compost appears to be a good phosphorus fertiliser that makes its nutrients available to plants rather slowly, while urine is a good short-term nitrogen fertiliser. Human compost can provide higher soil organic matter content but the amount that can be applied per hectare is limited by the degree of phosphorus saturation of the soil and the P fertilisation limit (see manure action plans).

Research shows that compost from humanure can be safely applied in agriculture:

- No significant change in concentrations of indicator organisms for faecal contamination in soil was observed after fertilisation with this compost.
- Daily toxic limits of micropollutants in crops intended for human consumption were not exceeded (due to uptake of micropollutants through plant roots, shoots, leaves or fruits).

Pyrolysis of faeces is an avenue that certainly deserves further investigation. Adding sewage sludge from WWTPs to clay for brick production is another interesting option.

Lessons from practice

'Sustainable sanitation' is a booming economic sector. New solutions are being offered by more and more innovative companies that are finding a market for their product or technology.

In France, Germany and Switzerland, the sector organisations RAE, Netsan and Valoo and their members are working every day to put sustainable sanitation into practice with awareness-raising, scientific research, new projects, products, services and technology.

In November 2023, the first international network meeting went ahead in Zurich where information was exchanged on strategy, knowledge, legislation, exemplary projects and international cooperation.

Global cooperation on sustainable sanitation is promoted through, among others, the Sustainable Sanitation Alliance (Susana) forum.

Numerous examples in this study show that sustainable sanitation is feasible. This is not just limited to dry toilets at festivals. In large-scale residential extension projects in cities including Ghent, Amsterdam, Hamburg and Helsingborg, toilet water is fermented together with organic waste to provide energy for home heating. In Switzerland, flat blocks were equipped with various sustainable sanitation systems. In Zurich and Paris, office buildings are equipped with a urine recovery system. Public dry toilets in Berlin and Brussels and many other places are a reality.

Finally, many private individuals have dry toilets. In France, about 5% of non-collective sanitation facilities are equipped with a waterless litter toilet. A survey in Wallonia and Brussels indicated that 41% of households with a dry toilet are not connected to the public sewage system. Some 90% of respondents said they have a dry toilet for ecological reasons, 8% for practical reasons and 5% for economic reasons.

TERMINOLOGIE

Begrippen

Bokashi: is een anaeroob fermentatie proces m.b.v. effectieve micro-organismen.

Composttoilet/ecotoilet: is een droogtoilet dat als einddoel heeft om menselijke mest om te zetten in veilige en gezonde compost.

Droogtoilet: toilet zonder spoelwater als transportmiddel. Een droogtoilet is voorzien van een recipiënt voor de tijdelijke opslag van menselijke mest.

Effluent: het gezuiverde water dat de rioolwaterzuiveringsinstallatie verlaat en in het oppervlaktewater wordt geloosd

Feces of fecaliën (Latijn: faeces): ontlasting of het onverteerde restant van ingenomen voedsel dat via de endeldarm en de anus uit het lichaam wordt verwijderd (defecatie).

Influent: het vuile afvalwater dat voor zuivering naar een zuiveringsinstallatie aangevoerd wordt.

Menselijke mest: het geheel van urine en feces samen met strooisel en toiletpapier. (Engels: humanure)

Menselijke uitscheidingen: deze omvatten feces, urine, (menstruatie)bloed en braaksel.

Pathogenen: ziektekiemen, ziekteverwekkers voor de mens (indien voor planten, dan spreken we van plantpathogenen).

Sanitair systeem: een samenhangend geheel van inzamel- en verwerkingsmethoden voor menselijke mest, met daarop afgestemde methoden voor opslag en transport, en daaruit voortvloeiende reststromen of producten en hun eindbestemming of eventuele toepassing.

Sanitatie: het geheel van voorzieningen om gezondheidsrisico's door menselijke ontlasting te voorkomen. Het gaat dan zowel over sanitaire systemen als over gewoonten en gebruiken of onderwijs over hygiëne (toiletgebruik, handen wassen, enz.).

Strooisel: houtzaagsel, houtkrullen en ander gedroogd en fijn verhakseld plantaardig materiaal dat in droogtoiletten wordt toegevoegd om vocht en geuren te absorberen.

Urine: is een lichaamsvloeistof met opgeloste afvalstoffen die via de urinewegen wordt uitgescheiden.

Urinescheiding: toiletsystemen met urinescheiding scheiden urine van feces, zodat een aparte behandeling en verwerking mogelijk wordt.

Gebruikte afkortingen

ARC: Algemeen Reglement voor de Certificering

ARG: antibiotica resistente genen

BTEX: kleine groep aromatische koolwaterstoffen, met name benzeen, toluen, ethylbenzeen en xyleen. Het zijn allen vluchtige organische verbindingen die worden gewonnen uit aardolie en worden gebruikt als oplosmiddel.

BZV: biologische zuurstofverbruik

CZV: chemisch zuurstofverbruik

C/N: verhouding tussen koolstof en stikstof

CEC:	Cation Exchange Capacity (bindingscapaciteit kleihumuscomplex) is een maat voor het vermogen van de bodem om nutriënten en water vast te houden en die gedurende het seizoen na te leveren.
DS:	droge stof
EM:	effectieve micro-organismen
IBA:	individuele behandelingsinstallatie voor afvalwater
OBA:	organisch biologisch bedrijfsafval: het organisch-biologisch afval van bedrijven, met inbegrip van keukenafval en etensresten en levensmiddelenafval (VLAREMA definitie 61°/1)
PFAS:	poly- en perfluoralkylstoffen is een verzamelnaam voor meer dan 6000 stoffen waarin onder andere een combinatie van fluorverbindingen en alkylgroepen voorkomt
PCB's:	polychloorbifenyyl (pcb) is een klasse van organische stoffen met chlooratomen die vastzitten aan bifenyyl
PAK's:	polycyclische aromatische koolwaterstoffen
PFAA:	Perfluoralkyl- en polyfluoralkyletherzuren: in deze groep vallen onder andere de klassieke PFAS (PFOS en PFOA) en GenX. PFAA worden in het milieu nauwelijks afgebroken en zijn daardoor persistent. Twee belangrijke subgroepen van PFAA zijn de perfluoralkyl- carbon- en -sulfonzuren.
PFT:	geperfluoreerde oppervlakte-actieve stoffen, waartoe ook PFOA en PFOS behoren
PNEC:	Predicted No Effect Concentration: is de concentratie van een stof in een omgeving waarbij hoogst waarschijnlijk geen schadelijke effecten optreden bij blootstelling op lange of korte termijn.
POP:	persistente organische pollutanten
RWZI:	rioolwaterzuiveringsinstallatie
KWZI:	kleinschalige waterzuivering
VLAREMA:	Vlaams Reglement voor het duurzaam beheer van materiaalkringlopen en afvalstoffen

Chemische afkortingen

Ca	calcium
CH₄	methaan
K	kalium
N	stikstof
NH₃	ammoniak
NH₄	ammonium
NO	stikstofoxiden
N₂	stikstofgas
N₂O	lachgas
Na	natrium
Mg	magnesium
P	fosfor
P₂O₅	difosforpentoxide

INLEIDING

Om duurzaam te zijn moeten sanitaire systemen de milieu- en gezondheidsrisico's op alle punten van het sanitaire systeem elimineren, van het toilet via het verzamel- en behandelingssysteem tot hergebruik. Ze moeten bovendien de natuurlijke hulpbronnen (zoals proper water) vrijwaren, economisch en sociaal aanvaardbaar zijn, en technisch en institutioneel passend zijn. Dit is de definitie van 'Duurzame Sanitatie' die door de Sustainable Sanitation Alliance (SuSanA, 2008) gehanteerd wordt.

Duurzame of circulaire sanitaire systemen zijn gebaseerd op technologieën die:

- het gebruik van zuiver water als spoel- en transportmiddel zoveel mogelijk vermijden,
- het terugwinnen van plantvoedingsstoffen mogelijk maken,
- materiaalstromen scheiden bij de bron
- kringlopen sluiten.

Deze studie probeert vanuit de beschikbare literatuur en vanuit bestaande praktijkvoorbeelden een antwoord te geven op volgende vragen:

- 1) Waarom is duurzame sanitatie nodig? Het antwoord daarop wordt in Deel 1 gegeven
- 2) Hoe kan duurzame sanitatie verwezenlijkt worden? Het antwoord daarop volgt in Deel 2.

In Deel 3 worden conclusies getrokken en aanbevelingen gedaan.

DEEL 1: MILIEU-IMPACT SANITAIRE SYSTEMEN

1 AFBAKENING VAN HET ONDERZOEKSVELD

1.1 THEORETISCH KADER

Om de milieu-impact van een product, proces of systeem in te schatten wordt gebruik gemaakt van 'levenscyclusanalyse' (LCA)¹. Bij het uitvoeren van een LCA wordt rekening gehouden met een groot aantal verschillende effecten op het milieu. Deze effecten worden gegroepeerd in 'impactcategorieën'. Bij de effectbeoordeling gaat het erom rekening te houden met de effecten op hulpbronnen, ecosystemen en mensen.

In het onderstaande geven we een overzicht van de relevante impactcategorieën in relatie tot een bepaald sanitair systeem. Dat kan als kader gehanteerd worden voor de bespreking van de resultaten uit het literatuuronderzoek in hoofdstukken 2, 3 en 4.

1.1.1 Huidig sanitair systeem

Het huidig sanitair systeem in Vlaanderen maakt gebruik van water gespoelde toiletten. Het toiletwater, het zogenaamde 'zwart' water, wordt samen met het 'grijs' water (badkamer, keuken en wasmachine) en regenwater afgevoerd via de openbare riolering. Alhoewel sinds 2008 aan gescheiden riolering wordt gewerkt, is er nog een lange weg te gaan.² Riolwaterzuiveringsinstallaties (RWZI's) verwerken het rioolwater en lozen het gezuiverde afvalwater in de waterlopen. Het zuiveringsslib dat nuttige plantvoedingsstoffen en organisch materiaal bevat, mag in Vlaanderen niet in de landbouw gebruikt worden. Het wordt al dan niet met voorvergisting verbrand met het oog op energierecuperatie. Er wordt geëxperimenteerd met het terugwinnen van P uit de slibassen.

In de praktijk belandt een deel van het rioolwater ongezuiverd in de waterlopen. Eén op acht woningen in Vlaanderen was in 2018 niet aangesloten op de openbare riolering; de rioleringsgraad was toen 87%. Eind 2024 bedroeg de rioleringsgraad in Vlaanderen 93,5%. Aangezien de riolering niet altijd is aangesloten op een RWZI, maakt men het onderscheid met de zuiveringsgraad, d.w.z. het aantal inwoners dat is aangesloten op een RWZI. De zuiveringsgraad bedroeg in 2022 slechts 86%.³

Het afvalwater van 14% van de Vlaamse bevolking wordt onrechtstreeks, via een septische put, of rechtstreeks geloosd op grachten, beken en waterlopen. In het 'buitengebied' kunnen eigenaars worden verplicht een 'individuele behandelingsinstallatie voor afvalwater' (IBA) te plaatsen die het afvalwater dient te zuiveren⁴.

¹ 'Levenscyclus impact analyse' (LCIA) is de fase van LCA waarin de milieueffecten van een product of proces worden geëvalueerd.

² David Callens van Fluviu, de grootste rioolbeheerder in Limburg: "40 procent van de Limburgse straten bevat een vuilwaterleiding en een aparte regenwaterafvoer. Dat kan een leiding zijn of een gracht. Ongeveer 20 procent van de Limburgse woningen is al gescheiden aangesloten."

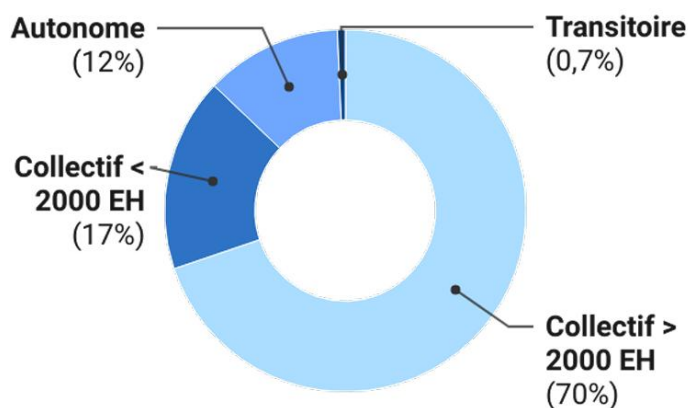
³ Bron: <https://vmm.vlaanderen.be/feiten-cijfers/water/riolering-en-waterzuivering/indicator-zuiveringsgraad?activeAccordion=d6a2409a-fe7b-4ad0-ad15-df15b8a05cbb> De aanwezigheid van riolering betekent niet noodzakelijk ook aansluiting op een RWZI. De toename in rioleringsgraad is deels toe te schrijven aan extra gerealiseerde riolering op het terrein maar ook deels aan een betere inventarisatie.

⁴ 31,5% van deze IBA's werd reeds gebouwd (toestand eind 2023) en deze worden voorlopig nog niet meegeteld in de zuiveringsgraad. Bron:

<https://vmm.vlaanderen.be/feiten-cijfers/water/riolering-en-waterzuivering/indicator-zuiveringsgraad/hoe-wordt-de-riolerings-en-zuiveringsgraad-berekend>

Autonome sanitaire voorzieningen betreffen in Wallonië bijna 12% van de bevolking (Govaerts, 2022), d.w.z. ongeveer 130.000 huishoudens of 400.000 mensen (zie figuur). Het is niet helemaal duidelijk of vergelijkbaar is met de 14% niet op RWZI aangesloten huishoudens in Vlaanderen.

Figuur 2 Huishoudelijke afvalwater inzamelings- en zuiveringssystemen in Wallonië



Bron: Govaerts, 2022.

In onderstaande tabel worden voor diverse milieu-impactcategorieën de mogelijke negatieve of positieve effecten van het zonet beschreven huidig sanitair systeem opgesomd.

Tabel 1 Analyse kader huidig sanitair systeem in Vlaanderen: beschrijving milieu-impactcategorieën en effecten

Milieu-impactcategorieën ⁵	Eenheid ⁶	Negatieve impact	Positieve impact
Gebruikte of gerecycleerde hulpbronnen			
- landgebruik	m ²	- Voor riolering, zuiverings- en verwerkingsinstallaties - Stortplaatsen voor verbrandings- en filterresidu's	
- watergebruik	m ³	- Direct verbruik: toiletspoeling - Indirect: productie riolering, infrastructuur en materieel	water voor industrie/landbouw (ook drinkwater) door verdere zuivering, bv. door UF, AC en RO ⁷

⁵ Bronnen: <https://www.hhc.earth/nl/knowledge-base/artikelen/er-is-meer-dan-co2-een-overzicht-van-impact-categorieen> en WHO (2006), tabel 8.1, p.118.

⁶ Bron: <https://greenhouse-sustainability.com/artikelen/milieu-impact-categorieen/>

⁷ Bronnen: <https://www.aquafin.be/nl-be/bedrijven/aanbod-gezuiverd-water-en-energie/gezuiverd-afvalwater-gebruiken#paragraaf-1374187>
Ultra puur water uit RWZI-effluent; bijna 10 jaar ervaring in Emmen (NL). <https://nwttr.nl/ultrapuur-water-uit-rwzi-effluent-bijna-10-jaar-ervaring-in-emmen/>

- grondstoffengebruik (fossiele energie)	Mj	- Direct verbruik: pompen en beluchting, slibdroging ⁸ , transport van slib e.a. - Indirect verbruik: door gebruik van kunstmeststoffen i.p.v. gerecycleerde organische meststoffen	- biogas door vergisting van zuiveringslib - stoom en elektriciteit door verbranding van gedroogd zuiveringslib ⁹
- grondstoffen- en chemicaliëngebruik (mineralen, metalen,...)	kg Sbeq.	Gebruik van ijzerchloride/sulfaat, polyelectrolyet, natronloog, aluminiumchloride/sulfaat ¹⁰	- Ammoniak, ijzer, ... - Fosfor uit (as van) zuiveringslib verwerkt tot kunstmeststof
- organisch materiaal		Wordt verbrand: verlies voor bodemtoepassing	Cellulosevezels, vetzuren ¹¹
Emissies naar water			
- eutrofiëring door P, N (zoet water) (zout water)	kg Peq. kg Neq.	- Lozing ongezuiverd afvalwater - Lozing gezuiverd afvalwater (normen P en N in gezuiverd afvalwater: VLAREM bijlage 5.3.1) - Gezuiverd slibwater	
- organische belasting	ton BZV/CZV/ZS	- Lozing ongezuiverd afvalwater - Lozing gezuiverd afvalwater (normen BZV/CZV/ZS in gezuiverd afvalwater: VLAREM bijlage 5.3.1) - Gezuiverd slibwater	
- verzuring	mol H+eq.	- Door vrijgekomen verbrandingsgassen zoals stikstofoxide en zwaveloxide	
- ecotoxiciteit zoetwaterorganismen, inclusief planten en dieren	CTUe	Lozing gevaarlijke stoffen (medicijnresten, persistente organische pollutanten, PFAS)	

⁸ Bron: <https://pers.aquafin.be/aquafin-start-bouw-nieuwe-co-neutrale-slibdrogers-in-beringen-en-roeselare>

⁹ Bron: <https://pers.aquafin.be/bouw-gestart-van-installatie-die-energie-uit-afvalwater-van-4-miljoen-inwoners-recupereert-vanaf-2027>

¹⁰ Bron: <https://edepot.wur.nl/661424> (o.a. tabel met gebruikte hoeveelheden in Nederland)

¹¹ Bron: <https://stories.kuleuven.be/nl/verhalen/gooi-het-slib-niet-met-het-afvalwater-weg>

Emissies naar bodem			
- ecotoxiciteit	µg/ha	- ruimingslib (zandfractie) of verbrandingsassen die als bouwstof worden verwerkt? - voor het bodemleven door toepassing kunstmest? - voor waterorganismen door vervuilde waterbodems?	- ruimingslib (zandfractie) of verbrandingsassen die als bouwstof worden verwerkt?
- eutrofiëring door N&P	mol Neq.	Door overbemesting?	
- verzuring	mol H+eq.	- Door vrijgekomen verbrandingsgassen zoals stikstofoxide en zwaveloxide - Door toepassing van kunstmeststoffen ¹²	
Emissies naar lucht			
- broeikaspotentieel	kg CO ₂ eq.	- N ₂ O en CO ₂ bij zuivering - Bij slibverbranding of co-verbranding in cementovens - Slibtransport	
- fotochemische ozon creatie	kg NMVOCeq.	Bij slibverbranding ¹³ en (slib)transport	
- fijn stof	kg PM _{2,5}	Bij slibverbranding en (slib)transport	
Menselijke toxiciteit			
- gevaarlijke stoffen (inname via drinkwater, voeding of inademing)	CTUh	Via drinkwater (50% drinkwaterproductie is afkomstig van oppervlaktewater)	

Bronvermeldingen: zie voetnoten

Het huidig sanitair systeem is in het begin van vorige eeuw in de plaats getreden van een systeem waarbij menselijke mest een belangrijke meststof was voor de landbouw. Het gebruik van water gespoelde toiletten en de ontwikkeling van kunstmeststoffen¹⁴ hebben geleid tot een verminderd aanbod en een verminderde

¹² Lange termijn toepassing van ammoniakale meststoffen zonder toevoeging van organische meststoffen leidt tot verzuring van de bodem. Bron: Damodaran, T., Bagyaraj, D., & Revanna, A. (2016). *Effect of chemical fertilizers on the beneficial soil microorganisms*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20802.79044>

¹³ Bron: Achter de schermen van slibverbrandingsinstallatie Brugge. https://issuu.com/aquafin/docs/aqua_2021_2_def/s/12651079

¹⁴ De basis voor de productie van kunstmest is ammoniak en dat wordt gemaakt via het zogenaamde Haber-Boschproces. Daarbij wordt stikstof uit de lucht omgezet in ammoniak in een energie-intensief proces o.b.v. fossiel aardgas.

vraag naar menselijke mest (Decker, 2010).

Als het mogelijk is om menselijke mest na verwerking om te zetten naar een veilige meststof, kan dit het gebruik van kunstmeststoffen doen dalen. Het is een verantwoorde keuze om bij de vergelijking van de milieu-impact van verschillende sanitaire systemen de systeemgrenzen uit te breiden tot het al dan niet gebruik van gerecycleerde nutriënten in de landbouw. Deze keuze heeft uiteraard gevolgen voor de vergelijking van de milieu-impact¹⁵.

Er zal ook rekening moeten gehouden worden met het feit dat de huidige zuiveringsinfrastructuur meer zuivert dan alleen toiletwater. Hiervoor moet gecorrigeerd worden als vergeleken wordt met alternatieve sanitaire systemen die bijvoorbeeld geen oplossing bieden voor grijswater.

1.1.2 Circulaire sanitaire systemen

Circulaire sanitaire systemen zijn gebaseerd op technologieën die:

- het gebruik van water als spoel- en transportmiddel zoveel mogelijk vermijden,
- het terugwinnen van plantvoedingsstoffen mogelijk maken,
- materiaalstromen scheiden bij de bron
- de mogelijkheid bieden om kringlopen sluiten

We hebben het dan over toiletsystemen zonder water (bv. strooiseltoiletten) of met heel weinig water (bv. vacuümtoiletten) of met watertoiletten in een gesloten kringloop, al of niet met scheiding van feces en urine. In vergelijking met het huidig sanitair systeem is er in circulaire sanitaire systemen geen of veel minder verdunning door water. De afvalstromen worden ook meestal niet vermengd met grijswater of regenwater. “Hierdoor blijven de water- en nutriëntenkringlopen technisch gescheiden. Individuele groepen stoffen worden dus niet verdund, met elkaar vermengd of kruisbesmet, waardoor een gerichtere en efficiëntere behandeling mogelijk wordt” (Cullmann A., 2022).

De verwerking gebeurt door technieken zoals composteren en vergisten die verder uitgebreid worden besproken in hoofdstuk 7, met een aantal praktijkvoorbeelden in hoofdstuk 11.

Op welke vlakken deze systemen al of niet ‘duurzamer’ zijn in vergelijking met het huidig sanitair systeem, zou moeten blijken uit de vergelijking van de verschillende milieu-impactcategorieën. Het onderstaand overzicht geeft een overzicht van de milieu-impactcategorieën en effecten voor circulaire sanitaire systemen.

Tabel 2 Analyse kader circulaire sanitaire systemen: beschrijving milieu-impactcategorieën en effecten

Milieu-impactcategorieën ¹⁶	Eenheid ¹⁷	Negatieve impact	Positieve impact
Gebruikte of gerecycleerde hulpbronnen			
- landgebruik	m ²	- Productie van koolstofvrij strooisel en groenresten - Opslag- en verwerking	

¹⁵ De negatieve milieu-impact van de productie (bv. verbruik aardgas, luchtmissies,...) en het gebruik (bv. op het bodemleven) van kunstmeststoffen, eventueel gecorrigeerd voor verschillen in gewasopbrengsten bij gebruik van gerecycleerde organische meststoffen en kunstmeststoffen, komt dan eveneens in beeld. Dit blijkt van belang te zijn voor de conclusies van de LCA-vergelijking (zie hoofdstuk 5).

¹⁶ Bronnen: <https://www.hhc.earth.nl/knowledge-base/artikelen/er-is-meer-dan-co2-een-overzicht-van-impact-categorieen> en WHO (2006), tabel 8.1, p.118.

¹⁷ Bron: <https://greenhouse-sustainability.com/artikelen/milieu-impact-categorieen/>

- watergebruik	m ³	- Direct verbruik: reiniging recipiënten, procesverbruik, beperkte toiletspoeling - Indirect: productie infrastructuur en materieel	waterrecyclage bij bepaalde urineverwerkingstechnieken
- grondstoffengebruik (fossiele energie)	Mj	- Procesverbruik: beluchting, ventilatie - Transport: inzameling - Indirect verbruik: ?	- warmterecuperatie bij compostering - biogas door vergisting
- grondstoffen- en chemicaliëngebruik (mineralen, metalen,...)	kg Sbeq.	Klei-poeder, ijzermaterialen,...	- N/P/K/... in compost/digestaat - Fosfor (struviet) uit urine
- organisch materiaal	kg C	Houtig afval, gebruikt als strooisel, kan niet meer voor energiewinning dienen (tenzij deel bij vergisting)	Organisch materiaal in compost of digestaat wordt terug in de bodem gebracht
Emissies naar water			
- eutrofiëring door P, N (zoet water) (zout water)	kg Peq. kg Neq.	- Condens- en uitloogwater (na zuivering) - vluchtige componenten (NH ₃)	
- organische belasting	ton BZV/CZV/ZS	- Condens en uitloogwater (na zuivering)	
- verzuring	mol H+eq.	- verbrandingsgassen (NO _x , S ₂ O) - vluchtige componenten (NH ₃)	
- ecotoxiciteit zoetwaterorganismen, inclusief planten en dieren	CTUe		
Emissies naar bodem			
- ecotoxiciteit voor het bodemleven	µg/ha	gevaarlijke stoffen in compost of digestaat (medicijnresten, organische pollutanten, PFAS)	
- eutrofiëring door N&P	mol Neq.	- Door overbemesting? - vluchtige componenten (NH ₃)	
- verzuring	mol H+eq.	- verbranding biogas (NO _x , SO ₂) - vluchtige componenten (NH ₃)	

Emissies naar lucht			
- broeikaspotentieel	kg CO ₂ eq.	- CO ₂ , N ₂ O,... bij compostering - CH ₄ bij vergisting (indien ontsnapt of afgefakkeld) - transport	
- fotochemische ozon creatie	kg NMVOCeq.	Bij transport	
- fijn stof	kg PM _{2,5}	Bij transport	
Menselijke toxiciteit			
- gevaarlijke stoffen (inname via drinkwater, voeding of inademing)	CTUh	Opname van gevaarlijke stoffen door planten → voeding	

Bronvermeldingen: zie voetnoten

Het belangrijkste verschil met het huidige sanitaire systeem is de plaats waar de resten van microbiële verontreiniging en milieugevaarlijke stoffen na ‘verwerking’ van feces en urine, terecht komen. Deze komen in het huidige sanitair systeem vooral in het water terecht, terwijl ze in een circulair sanitair systeem vooral in de bodem terecht komen. Volgens de WHO is het bodemsysteem over het algemeen beter geschikt voor de afbraak van bv. farmaceutische resten dan waterlichamen (WHO, 2006).¹⁸

Een positief verschil is mogelijk de efficiëntie in de verwijdering. Doordat in circulaire sanitaire systemen feces en urine niet vermengd worden met andere afvalwaterstromen en regenwater, zijn de te behandelen hoeveelheden kleiner en zou de verwijdering van milieugevaarlijke stoffen met specifieke verwerkingsmethoden succesvoller kunnen zijn.

Uit (Oosterlinck, 2020): “Nieuwe sanitatieconcepten gebaseerd op bronscheiding (source separation) en on-site behandeling van huishoudelijk afvalwater worden erkend als één van de meest veelbelovende methodes om grondstoffen te herwinnen (resource recovery) (McConville et al., 2017). Met deze aanpak, kan een hogere herwinningsefficiëntie bereikt worden door minder verdunning (met grond- en regenwater) en kan een hogere kwaliteit van het gerecupereerde product gerealiseerd worden door het scheiden van verschillende stromen (Tervahauta, 2014).”

Een negatief verschil is dat er op het eerste zicht meer baantransport zal nodig zijn om menselijke mest naar de plaats van verwerking te brengen. Dit hangt af van de geografische schaal van verwerking en van het type circulair systeem. In steden bijvoorbeeld wordt de combinatie vacuümtoiletten + lokale vergisting vaak

¹⁸ Bron: WHO (2006), p.119 en 120.

toegepast, waar water zorgt transport, zij het dan in een gescheiden inzamelsysteem met een beperkt waterverbruik en de mogelijkheid tot recirculatie van het gezuiverd water als toiletspoelwater. Een ander negatief verschil is dat er misschien meer landgebruik nodig is doordat plantaardig strooisel en groenmateriaal worden gebruikt voor de compostering van menselijke mest. Hernieuwbare materialen hebben het voordeel t.o.v. fossiele grondstoffen dat ze onuitputtelijk zijn, voor zover er (land)oppervlakte beschikbaar is. De kans is groot dat compostering oppervlakte-intensiever is dan waterzuivering, wat zeker een nadeel is in dichtbebouwde gebieden.

1.2 MENSELIJKE UITSCHIEDINGEN EN HUN RELATIEF BELANG

1.2.1 Geschatte hoeveelheden feces en urine

In 2014 bedroeg de totale massa feces van de veestapel en mensen over de hele wereld 3,9 miljard ton/jaar. De totale menselijke fecale massa bedroeg 810 miljoen ton. Met de voortdurend groeiende wereldbevolking wordt geschat dat de totale massa feces in 2030 minstens 4,6 miljard ton zal bedragen, waarvan 1 miljard ton menselijke feces. De jaarlijkse wereldwijde productie van feces van dieren – voornamelijk runderen, kippen en schapen – was ongeveer vier keer zo groot als die van mensen, en zou nog toenemen (Berendes et al., 2018).

Tabel 3 Schatting WHO voor 2014 van de regionale dierenpopulatie, dierlijke fecale productie, menselijke populatie en menselijke fecale productie

Region	Animal population, 2014	Animal feces (kg/yr)	Human population, 2014	Human feces (kg/yr)	Total feces (kg/yr)
Africa	2.34×10^9	4.01×10^{11}	9.62×10^8	1.06×10^{11}	5.07×10^{11}
Americas	6.74×10^9	7.84×10^{11}	9.75×10^8	1.27×10^{11}	9.11×10^{11}
EastMed	3.49×10^9	2.98×10^{11}	6.39×10^8	8.00×10^{10}	3.78×10^{11}
Europe	4.00×10^9	3.70×10^{11}	9.09×10^8	1.14×10^{11}	4.84×10^{11}
SEAsia	4.26×10^9	4.87×10^{11}	1.90×10^9	2.01×10^{11}	6.88×10^{11}
WPacific	8.91×10^9	7.79×10^{11}	1.83×10^9	2.16×10^{11}	9.95×10^{11}
World	2.97×10^{10}	3.12×10^{12}	7.22×10^9	8.10×10^{11}	3.93×10^{12}

Bron: Berendes et al., 2018

Voor 2014 werd de verdeling berekend over verschillende sanitaire systemen (UNICEF_WHO, 2023):

- 0,2% van de wereldbevolking gebruikt ecologische sanitatie: composteren om meststof te genereren
- 56% van de wereldbevolking gebruikt een vorm van fecale slibverwerking, d.w.z. elke vorm van opvang van feces ter plaatse die door de gebruiker moet worden geleegd, afgedekt of anderszins verwerkt (d.w.z. opvang die niet is aangesloten op het riool of deel uitmaakt van ecosan).
- 29% van de wereldbevolking is aangesloten op riolering
- 12% van de wereldbevolking beschikt over geen enkel systeem (=‘open defecation’).
- 3,5 miljard mensen leven nu nog steeds zonder veilig beheerde sanitaire voorzieningen

- 419 miljoen mensen (5,2%) doen hun behoeften in de open lucht.

In een andere studie (van den Broek et al., 2024) kwam de geschatte jaarlijkse hoeveelheid geproduceerde menselijke feces in de wereld op 371 miljoen ton¹⁹ en de hoeveelheid urine op 5,7 miljard ton. Tezamen bevatten deze hoeveelheden feces en urine 78 miljoen ton koolstof (C), 37 miljoen ton stikstof (N), 5,1 miljoen ton fosfor (P) en 15 miljoen ton kalium (K).

De belangrijkste factoren die leiden tot variatie in fecale productie zijn de totale voedselinname, het lichaamsgewicht en een al of niet vezelrijk dieet (Rose et al., 2015). Rose stelde vast dat de fecale productie bij personen met een laag inkomen dubbel zo hoog is (in nat gewicht) dan die van personen met een hoog inkomen.

De hoeveelheden feces en urine kunnen op eenvoudige of meer ingewikkelde wijze ingeschat worden, via een gemiddeld gewicht per persoon/dag of via meer 'gewogen' berekening op basis van lichaamsgewicht of inkomensverdeling. We maakten de oefening voor Vlaanderen in onderstaande tabel.

Tabel 4 Schatting humane productie van feces en urine in Vlaanderen

Parameters	Berendes et al. (2018)	Rose et al. (2014)	Van den Broek (2024)	Vinnerås et al. (2002)
Feces/pers./dag (g)	343,2	184,1	127,9	139,7
Feces/pers./jaar (kg)	125,3	67,2	46,7	51
Feces totaal (ton)	854.460	458.449	318.577	347.910
Urine/pers./dag (g)		1,3	1,9	1,2
Urine/pers./jaar (kg)		489,5	698,6	446,8
Urine totaal (m³)		3.339.388	4.765.912	3.047.812
Urine totaal (ton)		3.419.533	4.880.294	3.120.960

Gebaseerd op een bevolking van 6.821.770 personen (op 1/1/ 2024; cijfer afkomstig van de Vlaamse overheid).

Zoals reeds eerder vastgesteld, valt op dat door de berekeningsformule²⁰ die Berendes hanteert, een hoge dagelijkse fecale productie van meer dan 340g per dag wordt geschat, in vergelijking met de andere berekeningsmethoden. We stellen voor om voor de berekening van de nutriëntinhoud verder uit te gaan van de berekening volgens Rose et al. (2014): een gewogen gemiddelde op basis van een indeling in hoge en lage inkomens.

¹⁹ Deze schatting belooft slechts 45% van het totaal berekend door Berendes et al. (2018). De enige verklaring daarvoor zijn verschillen in het geschatte gewicht per persoon per dag. Berendes baseert zich op een formule van Yang et al. (2017) op basis van het lichaamsgewicht van dier of mens, terwijl van den Broek zich baseert op één cijfer van Rose et al. (2014), wat een grove vereenvoudiging lijkt.

²⁰ Met een gewogen gemiddeld lichaamsgewicht van 70,8kg voor de gemiddelde Vlaming.

Tabel 5 N, P en K in humane feces en urine in vergelijking met kunstmest, compost, digestaat en dierlijke mest gebruikt in de landbouw in Vlaanderen.

Soort	Hoeveelheid ton	Stikstof (N)		Fosfor (P)		Kalium (K)	
		gN/kg	N (ton)	gP/kg	P (ton)	gK/kg (K (ton)
Urine	3.419.533	5,6	19.149	0,7	2.394	2,1	7.181
Feces	458.449	14,1	6.464	2,8	1.284	7,0	3.209
Totaal	3.877.982		25.614		3.677		10.390
Dierlijke mest			92.365		39.932		
Kunstmest			43.111		876		19.300
Compost	98.000	8,6	842	3,8	374	7,3	713
Digestaat	750.000	5,0	3.750	4,0	3.000	5,0	3.750
Maximale mestgebruiksruimte*			126.700				

* Voor werkzame stikstof

Bronnen: Hoeveelheid feces en urine: berekening op basis van Rose et al. (2014)

Nutriënt-inhoud feces en urine (2024): berekening gebaseerd op van den Broek et al. (2024)

Dierlijke mest en kunstmest (2022): Vlaamse Landmaatschappij (Mestbank) en

<https://landbouwcijfers.vlaanderen.be/landbouw/totale-landbouw/kunstmestgebruik-kalium>

Compost en digestaat naar Vlaamse landbouw (2023): berekening gebaseerd op VLACO:

<https://vlaco.be/nieuws/lichte-daling-afzet-compost-en-digestaat-in-2023>

Om het relatief belang van deze nutriënt-inhoud van urine en feces in te schatten, geven we de hoeveelheden N,P,K bij het gebruik van dierlijke mest, kunstmest, compost en digestaat eveneens weer. De maximale mestgebruiksruimte voor meststoffen op landbouwgrond wordt berekend op basis van de beschikbare landbouwarealen (665.000 ha) en de maximale bemestingsnormen. De mestgebruiksruimte voor werkzame stikstof houdt rekening met percentages werkzame stikstof die in het eerste jaar vrijkomen volgens mestsoort: kunstmest (=100%), vloeibare (dierlijke) mest (=60%), vaste dierlijke mest en boerderijcompost (=30%), bemesting door begrazing van vee (=20%) en gecertificeerde GFT- en groencompost (=15%).

Hieruit blijkt dat het recyclagepotentieel van stikstof in menselijke urine en feces behoorlijk groot is in vergelijking met wat er op de Vlaamse landbouwgrond wordt aangevoerd. Indien bijvoorbeeld 75% van de stikstof uit menselijke urine²¹ gerecupereerd kan worden, zou dit ongeveer 33% van de huidige stikstofaanvoer door kunstmest kunnen vervangen.

²¹ Hierbij moet rekening gehouden worden met stikstofverliezen bij opslag, verwerking en toediening van urine en met de plantopname van stikstof in vergelijking met kunstmest.

Uit het onderzoek van Verstraete & Vlaeminck (2011) blijkt dat indien 50% van de N gerecupereerd kan worden uit het huishoudelijk afvalwater en keukenafval dit in het beste scenario zal voldoen aan 15% van de wereldwijde vraag aan stikstof gebaseerde meststoffen (Oosterlinck, 2020).

Volgens de Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA) zou het recyclen van meststoffen uit menselijke mest, afhankelijk van het macro-element, 17% tot 25% van de in Duitsland gebruikte synthetische minerale meststoffen kunnen vervangen en zo een belangrijke bijdrage kunnen leveren aan de bescherming van hulpbronnen en het klimaat (DWA, 2015).

Uit de berekening van de bodembalans voor 2006 bleek een overschot op de bodembalans van 47,66 miljoen kg N en 3,6 miljoen kg P. Dit is de N en P die achterblijven in de landbouwbodems (na bemesting en afvoer van de teelten) en die vatbaar zijn voor uitspoeling naar oppervlaktewater. Ten opzichte van 1990 was dit een daling met 55 % voor N en met 88 % voor P. Per hectare bedroeg het overschot op de bodembalans in 2006 76,3 kg N en 5,8 kg P. Om de kwaliteit van het oppervlaktewater beter te beschermen, zou het overschot op de bodembalans maar 35 kg N/ha mogen bedragen, althans dit was in 2007 de termijndoelstelling voor 2030 (MIRA, 2007).

1.2.2 Zuiverings-slib, influent en effluent van RWZI's

Per jaar produceert Aquafin ongeveer 350.000 ton ontwaterd rioolwaterzuiverings-slib, dat zo'n 95.000 ton droge stof bevat²². Dit slib wordt deels afgevoerd naar de slibdrooginstallaties van Aquafin, de slibverbrandingsoven te Brugge of een externe verwerker. Het gebruik van RWZI-slib als bodemverbeterend middel is sinds 2006 verboden in het Vlaams gewest, en dit op basis van artikel 12 van het Mestdecreet; in Wallonië wordt RWZI-slib wel gebruikt in de landbouw.

Tabel 6 (Zuiverings-)slib afkomstig van RWZI's, riolen, septische putten en industrie in Vlaanderen (in ton natte stof)

Type/ herkomst	2019	2020	2021	2022	2023	2024
<u>RWZI's</u>						
Ontwaterd zuiverings-slib, waarvan:	336.263	342.494	365.406	349.648	354.033	391.917
Ontw. zuiv.slib (verbranding)	209.283	218.665	242.646	235.885	228.160	252.757
Gedroogd slib* (verbranding)	35.342	33.623	33.820	30.849	33.833	38.466
<u>Rioolkolken en -pompputten</u>						
Ruimingsslib		176.000				
<u>Septische putten</u>						
Ruimingsslib	?	?	?	?	?	?
<u>Industrie</u>						

²² Bron: VMM, 12 januari 2023: <https://vmm.vlaanderen.be/nieuws/sediment-aanpakken-via-plannen-en-slimme-oplossingen>

Waterzuiveringsslib voor gebruik in de landbouw (nat gewicht)	144.993	160.049	127.178	112.242	109.307
Ander waterzuiveringsslib voor afvalverwerking (nat gewicht)		725.816		638.019	
Totaal zuiveringsslib (nat gewicht)		885.866		750.261	
Waarvan verwerkt via compostering/vergisting		443.393		488.777	

*Geproduceerd gedroogde slib op de slibdrogers te Deurne, Leuven en Houthalen

Bron: cijfers AQUAFIN en IMJV meldingen/extrapolatie (uit parlementaire vragen en antwoorden nr. 330, 29 januari 2025)
OVAM (2022): <https://emis.vito.be/nl/bbt/bbt-tools/selectiesystemen/afss/afvalstromen/riool-en-rioolkolkenslib>

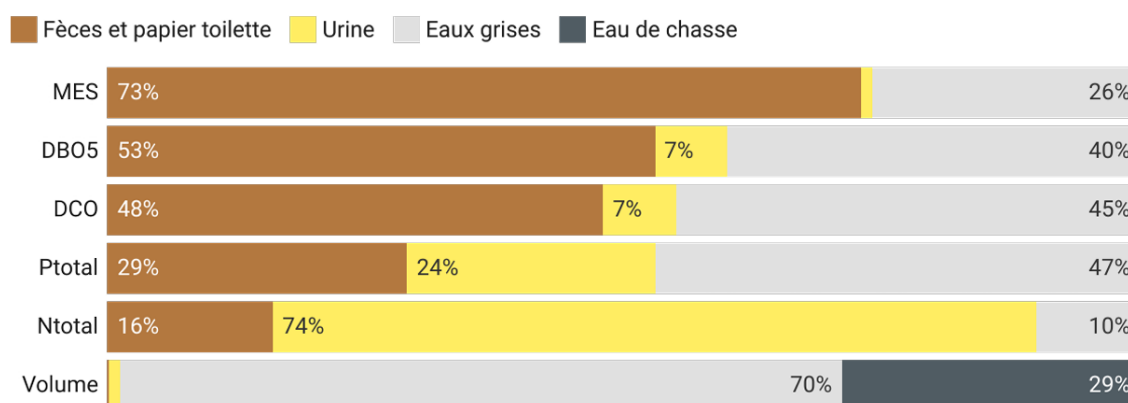
Daarnaast wordt jaarlijks gemiddeld circa 800.000 ton waterzuiveringsslib geproduceerd door bedrijven. Jaarlijks wordt gemiddeld 130.000 ton waterzuiveringsslib van bedrijfsafvalwaterzuivering rechtstreeks ingezet als bodemverbeteraar in de landbouw, na het afleveren van een grondstofverklaring door de OVAM. Het zuiveringsslib is hoofdzakelijk afkomstig van bedrijven uit de voedingsindustrie en één bedrijf dat papier produceert op basis van primair hout.

Daarvan werden in 2020 en 2022 respectievelijk 443.393 en 488.777 ton zuiveringsslib van bedrijfsafvalwaterzuivering verwerkt via compostering of vergisting, waarna de geproduceerde compost en digestaat als bodemverbeteraar worden ingezet in Vlaanderen, Wallonië of in het buitenland. Dit zuiveringsslib is bijna volledig afkomstig van de voedingsindustrie.

Voor het ruimingsslib afkomstig van rioolkolken en pomputten van riolering hebben we geen recente cijfers teruggevonden en helemaal geen cijfers over ruimingsslib van septische putten.

Hoeveel zuiveringsslib afkomstig is van toiletwater, is moeilijk te bepalen, maar onderstaande figuur geeft een idee van het aandeel van toiletwater in het huishoudelijk afvalwater, en dat voor diverse parameters.

Figuur 3 Inhoud van huishoudelijk afvalwater



MES: zwevende stoffen; DBO5: BZV na 5 dagen; DCO: CZV

Bron: Govaerts (2022)

Het volume en de belasting van rioolwater (influent) met organisch materiaal en nutriënten is samen met de belasting van het gezuiverd afvalwater (effluent) weergegeven in onderstaande tabel.

Tabel 7 Debiet en belasting van rioolwater (influent) en gezuiverd afvalwater (effluent) van RWZI's

Type stroom/belasting	Eenheid	Influent	Effluent	Zuivering %
Rioolwater (volume/jaar)	miljoen m ³	961		
Chemisch zuurstofverbruik (CZV)	ton	252.000	26.900	89,4%
Zwevende stoffen (ZS)	ton	135.000	9.790	92,5%
Stikstof (N)	ton	28.200	5.470	80,2%
Fosfor (P)	ton	3.900	711	82,0%
Arseen (As)	ton	2,63	1,18	55,2%
Cadmium (Ca)	ton	0,195	0,11	43,1%
Chroom (Cr)	ton	4,84	1,49	69,3%
Koper (Cu)	ton	37,7	6,76	82,1%
Kwik (Hg)	ton	0,0479	0,02	67,6%
Nikkel (Ni)	ton	5,39	2,71	49,8%
Lood (Pb)	ton	13,8	1,60	88,4%
Zink (Zn)	ton	169,0	39,26	76,8%

Bron: Vlaamse Milieumaatschappij (VMM), cijfers 2023.

Het verschil tussen influent- en effluentwater is wat door de RWZI's uit het rioolwater wordt gezuiverd, het zogenaamde zuiveringsrendement.

Een deel van het organisch materiaal, stikstof en fosfor blijft achter in het zuiveringsslib. Het meest vluchtige deel verdwijnt in de lucht onder de vorm van broeikasgassen of verzurende en vermestende gassen.

In onderstaande tabel werd een berekening gemaakt van de vrachten aan droge stof, organische stof, N, P en zware metalen in zuiveringsslib van RWZI's in Vlaanderen voor 2022 door gebruik te maken van gemiddelde concentraties afkomstig van twee verschillende bronnen.

Tabel 8 Gemiddelde vrachten aan droge stof, organische stof, N, P en zware metalen in zuiveringsslib RWZI's in Vlaanderen

Stof	Eenheid	Concentratie (OVAM 2008)	Concentratie (STOWA 2022)	Vracht (ton) (OVAM 2008)	Vracht (ton) (STOWA 2022)
Ontwaterd slib (2022)				350.000	350.000
Droge stof (ds)				95.000	95.000
Organische droge stof				55.100	66.500
Organische droge stof	% ds	58,0	70,0		
Organische en ammoniakale stikstof (N)	% ds (g/kg ds)	4,7	(59,2)	4.465,0	5.624,0
Fosfor (P2O5)	% ds (g/kg ds)	5,6	(36,7)	5.320,0	3.486,5
Zink (Zn)	mg/kg ds	1.302,0	995,0	123,7	94,5
Koper (Cu)	mg/kg ds	306,0	364,0	29,1	34,6
Lood (Pb)	mg/kg ds	149,0	77,0	14,2	7,3
Chroom (Cr)	mg/kg ds	72,0	39,3	6,8	3,7
Nikkel (Ni)	mg/kg ds	30,0	25,6	2,9	2,4
Cadmium (Cd)	mg/kg ds	4,3	0,9	0,4	0,1
Kwik (Hg)	mg/kg ds	0,9	0,4	0,1	0,04
Arseen (As)	mg/kg ds		10,0		1,0

Bronnen: OVAM, *Voortgangsrapportage 2008-2009 - Uitvoeringsplan Slib*
 STOWA, *Verkenning circulaire slibketen 2050*

Zuiveringsslib bevat diverse waardevolle bestanddelen. Volgens berekeningen voor Nederland is fosfaat in de meeste gevallen het meest waardevolle bestanddeel in de verschillende slibsoorten. Voor primair slib geldt dit niet; hiervoor is meestal stikstof het meest waardevol. In theorie zou 45% van het zuiveringsslib de totale hoeveelheid fosfaat die nu via kunstmest wordt toegediend kunnen vervangen. Echter, gezien het nutriëntenoverschot in Nederland lijkt met name de organische stof in het slib interessant voor landbouwkundige toepassing (Bisschops, 2025).

2 EMISSIES NAAR WATER, BODEM EN LUCHT

2.1 HUIDIG SANITAIR SYSTEEM

In het huidig sanitair systeem zijn de emissies naar water en lucht het belangrijkste. Daarom zullen we daar uitgebreider op ingaan.

2.1.1 Emissies naar water

2.1.1.1 Nutriënten en organische stof

De RWZI's zorgen voor een 80% zuivering van de instromende N-vracht (82% van de inkomende P-vracht). De hoeveelheden nutriënten en zuurstofbindende stoffen in het influent- en effluentwater van RWZI's werden weergegeven in Tabel 7.

De berekende vuilvrachten aan stikstof (N) en fosfor (P) in menselijk feces en urine (Tabel 5) bedragen respectievelijk 91% en 94% van de vuilvrachten N&P in het influent van de RWZI's. Maar we weten dat een deel (20%?) van de N en P in menselijke feces en urine niet aankomt in de RWZI's. We verwijzen daarvoor naar de reeds eerder vermelde zuiveringsgraad; deze bedroeg 86% in april 2022 (VMM). We verwijzen ook naar de zogenaamde 'overstorten' die bij zware regen in werking worden gesteld om overdruk op de riolering te vermijden en de werking van de RWZI's te vrijwaren. Hierdoor komt rioolwater ongezuiverd in waterlopen terecht, met een negatief effect op het milieu als gevolg. Er zijn meer dan 8.000 overstorten. T.o.v. 2010 is de gemiddelde overstortduur (voortschrijdend over 5 jaar) in 2019 gedaald van 2,76 % naar 1,89 %. In 2019 was de jaargemiddelde overstortduur 1,29 %. Dat komt op jaarbasis overeen met een gecumuleerde duur van 6800 minuten of 4,75 dagen overstort (VMM, 2019).

Het aandeel van de huishoudens in de netto-emissies van N naar het oppervlaktewater bedroeg in 2022 25% (=6.187 ton); het aandeel voor P bedroeg 55% (=918 ton)²³. Het aandeel van de landbouw bedraagt respectievelijk 47% voor N en 32% voor P. Huishoudelijk afvalwater draagt voor één vierde bij aan de eutrofiëring van onze waterlopen (VMM, 2022). Het deel daarvan dat afkomstig is van toiletwater bedraagt 90% voor de N-emissies en 53% voor de P-emissies; de rest is afkomstig van grijswater (keuken, badkamer,...) (Govaerts, 2022). De bijdrage van toiletwater in de eutrofiëring van waterlopen kan daardoor geschat worden op 22,5% voor N en 29,2% voor P.

In 2021 waren de huishoudens goed voor 86% van de netto-emissies van biochemisch zuurstofverbruik (BZV) en 72% van de netto-emissies van chemisch zuurstofverbruik (CZV); de rest is afkomstig van bedrijven²⁴ (VMM, 2021). In het huishoudelijk afvalwater neemt het toiletwater 60% van de BZV-emissies en 55% van de CZV-emissies voor zijn rekening; de rest is afkomstig van het grijswater (Govaerts, 2022). De bijdrage van

²³ Bron: VMM: <https://vmm.vlaanderen.be/feiten-cijfers/water/kwaliteit-waterlopen/lozingen/indicator-emissies-van-nutrienten-naar-oppervlaktewater?activeAccordion=ffb59251-3ca6-485a-ab65-b14c74cdec9d%2Cbbc0f1d0-906b-4427-bc6f-d6ee731be195>

²⁴ Bron: VMM: <https://vmm.vlaanderen.be/feiten-cijfers/water/kwaliteit-waterlopen/lozingen/indicator-emissies-van-zuurstofbindende-stoffen-naar-oppervlaktewater-door-huishoudens?activeAccordion=4b0bedcb-b186-4482-80ea-1121f11b480d%2C96f4654d-2c63-46ef-b02f-cbc4ab3c24b4>

toiletwater in de emissies van zuurstofbindende stoffen naar oppervlaktewater kan daardoor geschat worden op 51,6% voor BZV en 39,6% voor CZV.

2.1.1.2 **Microbiële verontreiniging**

In België is er sinds de corona pandemie een nationaal epidemiologische surveillance van *niet-gezuiverd rioolwater* in 30 RWZI installaties, goed voor een bereik van 38% van de bevolking. Het volgt wekelijks de evolutie van een aantal virussen zoals SARS-CoV-2 (COVID 19), Influenza (griepvirus) en RSV²⁵.

Virusdeeltjes kunnen via de ontlasting van besmette mensen in het rioolwater terechtkomen. De inactivering van coronavirussen in (afval)water is sterk afhankelijk van de temperatuur, het gehalte aan organisch materiaal en de aanwezigheid van antagonistische bacteriën. Coronavirussen sterven snel af in afvalwater, met T99,9%-waarden van tussen de 2 en 4 dagen. Poliovirus overleefde langer dan coronavirussen (Gundy & Pepper, 2008). Door enkele malen per week stalen te nemen en de coronavirusdeeltjes te tellen, kan men de evolutie van de besmetting in elk meetpunt goed opvolgen.

In een burgeronderzoek²⁶ waarin stalen werden genomen van *oppervlaktewater* in rivieren, kanalen, beken en plassen in Vlaanderen en Brussel bleek bij een derde van de 385 tests te veel van de E.coli bacterie aanwezig te zijn: meer dan 2.000 kolonies per 100 milliliter. Bij 43 procent van de meetplaatsen werd de norm die de overheid hanteert voor zwemplassen (minder dan 1.000 kolonies) niet gehaald. Bij hogere concentraties wordt kinderen, ouderen en mensen met een verlaagde weerstand afgeraden het water in te gaan.

De E.coli bacterie komt op verschillende manieren in het oppervlaktewater terecht:

- Rechtstreekse lozing van ongezuiverd huishoudelijk afvalwater (woningen niet aangesloten op RWZI, via riool overstorten) of via dierlijke mest
- Lozing van gezuiverd huishoudelijk afvalwater (via RWZI's of IBA's)

Ondanks de verschillende zuiveringsstappen is stedelijk afvalwater afkomstig van een RWZI niet vrij van microbiologische contaminanten. Onderzoek van Flanders' FOOD²⁷ in samenwerking met Inagro, UGent, Boerenbond en Vlakwa wees uit dat *gezuiverd stedelijk afvalwater* gemiddeld 100.000 kolonievormende eenheden (kve) E. coli per 100 ml RWZI-water bevat, wat ver boven de opgelegde wettelijk limiet ligt van 10 tot 1.000 kve per 100 ml (afhankelijk van de teelt en toegepaste irrigatietechniek).

2.1.1.3 **Zware metalen**

Een fractie van het gehalte metalen blijft opgelost in het oppervlaktewater. Een groot deel komt in gebonden toestand voor. De metalen kunnen zich binden aan zwevende stoffen en zich als neerslag op de waterbodem afzetten. Daardoor kan er, lang na het stopzetten van een vervuilende activiteit, nog een grote nalevering zijn van metalen uit de waterbodem. De directe ecotoxiciteit van metalen voor het waterleven wordt hoofdzakelijk bepaald door het gehalte metalen in opgeloste vorm. De opgeloste vorm is dus ecologisch relevanter dan het totaalgehalte (VMM, 2018).

²⁵ Bron: Sciensano <https://www.sciensano.be/nl/projecten/nationaal-epidemiologische-surveillance-van-afvalwater>

²⁶ Bron: De Morgen, Een op de drie waterlopen in Vlaanderen bevat te veel E.coli, artikel van 29 maart 2024.

Het onderzoek van Waterland vzw uit 2024 wordt in 2025 overgedaan met het burgeronderzoek 'Watermonsters', i.s.m. KU Leuven en De Standaard.

²⁷ Onderzoek uitgevoerd in het kader van het Vlaio LA-traject 'IRRICOLI'.

Verschillende bronnen spelen een rol in de netto-emissies van zware metalen naar oppervlaktewater²⁸:

- bodemerosie voor arseen (36%), cadmium (33%), chroom (79%), kwik (41%) en lood (58%).
- atmosferische depositie voor cadmium (48%), koper (35%), kwik (44%), lood (21%) en zink (36%).
- grondwater voor arseen (35%) en nikkel (49%).
- transport voor koper (30% - vooral door beroepsvaart en railverkeer).
- infrastructuur voor zink (23% - vooral corrosie van gebouwschillen, o.a. dakgoten).

Huishoudens hebben een kleine rechtstreekse emissie en een grotere onrechtstreekse emissie via de RWZI's. Huishoudens hebben een belangrijk aandeel in de influentvrachten van RWZI's voor arseen (52%), chroom (41%), koper (37%), kwik (54%) en nikkel (47%)²⁹.

Zware metalen worden vooral in menselijke feces afgescheiden en veel minder in urine (zie Tabel 14). Ze gaan voor het grootste deel via het toiletwater en de riolering naar de RWZI's (VMM, 2018). Aan de hand van de concentraties in Tabel 14 en de geschatte hoeveelheden feces en urine in Tabel 4 is het mogelijk te achterhalen welk deel van de influentvrachten voor zware metalen in RWZI's afkomstig is van menselijk mest en urine, rekening houdend met de gemiddelde zuiveringsgraad (aandeel personen aangesloten op een RWZI). Met enige voorzichtigheid kunnen we stellen dat het gewogen aandeel van zware metalen in feces en urine op de aanwezige zware metalen in het influentwater van RWZI's naar schatting 13,6% bedraagt. Vooral zink (87%) en koper (10%) wegen door in het totaal gewicht van zware metalen afkomstig uit feces en urine. Relatief gezien zijn vooral kwik (46%) en cadmium (28%) in influent rioolwater afkomstig uit feces en urine, terwijl koper en zink goed zijn voor respectievelijk 8% en 16%. Voor Nederland werd een soortgelijke berekening gemaakt, zij het enkel voor koper en zink (Bisschops, 2025). Daaruit bleek dat koper en zink uit feces en urine respectievelijk 5-11% en 10-27% uitmaken van totaal koper of totaal zink in influent RWZI afvalwater. De rest van de zware metalen komt van andere bronnen, zoals grijswater van huishoudens³⁰, afvalwater van bedrijven (vooral voor cadmium), infrastructuur (voor chroom, koper, lood en zink), depositie (voor arseen, cadmium, koper, kwik en nikkel) en bodemerosie (voor arseen en chroom).

Het aandeel van de vuilvrachten in het effluent van de RWZI's in de totale netto-emissies van zware metalen naar oppervlaktewater in 2022 varieert van 4% voor lood tot 17% voor zink (VMM).

2.1.1.4 Microplastics

Vlaamse waterlopen bevatten gemiddeld 0,36 microplastics/L water, met concentraties variërend tussen de 0 en 4,8 microplastics, zo blijkt uit een studie van UGent in opdracht van de VMM en Vlaams minister van Omgeving (Vercauteren M., 2021a). Het huishoudelijk afvalwater draagt hieraan stevig bij: het bevat gemiddeld 9,37 microplastics per liter water. Ter vergelijking, een relevante studie uit Schotland rapporteerde gemiddeld ongeveer 16 microplastics/L afvalwater. Per Vlaming komen elke dag tussen 355 en 1634 microplastics (gemiddeld 1145 microplastics) in het huishoudelijk afvalwater terecht, goed voor een jaarlijkse lozing van 418.000 microplastics. Alle Vlamingen samen lozen via het huishoudelijk afvalwater jaarlijks ruwweg

²⁸ Bron: VMM: <https://vmm.vlaanderen.be/feiten-cijfers/water/kwaliteit-waterlopen/lozingen/indicator-emissies-van-zware-metalen-naar-oppervlaktewater?activeAccordion=97c0c260-47bf-4ccf-9394-97851acce62%2C50148264-baa3-42cf-99bc-48d1b3392c4b>

²⁹ Bron: VMM: <https://vmm.vlaanderen.be/feiten-cijfers/water/riolering-en-waterzuivering/indicator-zware-metalen-in-het-influent-en-effluent-van-rwzis?activeAccordion=83a1ef1f-9204-4c74-bb96-ac9b3ee31239%2C356d46fc-4cca-4af7-bc54-3fe8613484e8>

³⁰ Totaal huishoudelijk afvalwater (zwartwater + grijswater) blijkt voor koper en zink goed te zijn voor respectievelijk 68% van totaal koper en 56% van totaal zink in influent RWZI afvalwater in Nederland (Bisschops, 2025).

3000 kg microplastics³¹. Bij 83% (in 2019) van de huishoudens wordt dit afvalwater naar een RWZI getransporteerd.

Aangezien het influent van de onderzochte KWZI's voor 60% tot 88% uit huishoudelijk afvalwater bestaat, is het aannemelijk dat de gemeten partikel grootte niet groter was dan 1mm (1.000µm). Bijna 50 % van de gevonden partikels heeft een lengte tussen 25 en 100 µm. Dit stemt overeen met de partikelgrootte van enkele bronnen van microplastics. Bijvoorbeeld, microplastics in verzorgingsproducten zijn meestal kleiner dan 500 µm maar er is variatie afhankelijk van product tot product (Napper et al., 2015; Sun et al., 2020). Een ander voorbeeld zijn microvezels afkomstig uit kledij die met het spoelwater van de wasmachine in de riool terecht komen. Deze vezels hebben typisch een kleine diameter (kleiner dan 10 µm) en kunnen enkele micro- tot millimeter lang zijn. Door hun langgerekte vorm, glippen deze microvezels makkelijk door de poriën van de zeven en filters die gebruikt worden bij de extractie van microplastic uit de stalen. Ben-David et al. (2021) berekende dat in totaal bijna 74 % van alle gevonden microplastic in huishoudelijk afvalwater microvezels waren. Het is dus mogelijk dat de gerapporteerde waarden een onderschatting (door het niet analyseren van microvezels) zijn van de werkelijke emissie van microplastic in het huishoudelijk afvalwater. Zoals wordt besproken in paragraaf 6.1.2.4 zijn microplastics in feces en urine niet groter dan 500µm, met ongeveer 50% kleiner dan 50µm.

Uit de studie (Vercauteren M., 2021b) blijkt dat Vlaamse RWZI's 97,5 % (tussen de 92,6 en 100 %) van de microplastic deeltjes uit het afvalwater verwijderen, alvorens het geloosd wordt in de naburige waterloop. In Nederland werden verwijderingspercentages van 76% tot 99% vastgesteld (van Egmond J.L., 2021). Een RWZI vormt dus een belangrijke schakel in de afvalwaterketen waar microplastics verwijderd kunnen worden. Rekening houdend met deze zuiveringspercentages, belandt er uiteindelijk jaarlijks toch nog 623 kg aan microplastic deeltjes via het huishoudelijk afvalwater in Vlaamse waterlopen.

2.1.1.5 Medicijnresten

In een rapport van de VMM (VMM, 2017) werd een berekening gemaakt van de influent- en effluentvrachten van medicijnen in afvalwater van RWZI's in Vlaanderen (zie bijlage 12.1.2). Iopromide, gabapentine, amidotrizoïnezuur, naproxen, sotalol, hydrochloorthiazide en propranolol hebben de hoogste influentvrachten (> 900 kg). Gabapentine, iopromide, amidotrizoïnezuur, sotalol en hydrochloorthiazide hebben de hoogste effluentvrachten (> 900 kg). Het gewogen gemiddelde zuiveringsrendement bedraagt 49% met een sterke variatie al naargelang de stof.

Eén van de belangrijkste bronnen van medicijnresten in rioolwater zijn menselijke urine en feces. In Nederland worden 480.000 kg dierlijke geneesmiddelen gebruikt t.o.v. 2.300.000 kg menselijke geneesmiddelen (in actieve stof). RIVM schat dat hiervan ieder jaar in Nederland minimaal 190.000 kilo werkzame stof via de riolering in het oppervlaktewater terecht komt.³²

³¹ De massa van de individuele partikels ligt tussen 0,003 µg en 176,7 µg. De totale massa van de microplastics was gemiddeld $37,6 \pm 114,2$ µg per liter. Per inwoner is er een totale massa microplastics van op 0,47 ($\pm 0,5769$) gram per jaar. (Bron: Vercauteren, 2021)

³² Bron: RIVM: <https://www.rivm.nl/medicijnen-en-het-milieu/hoe-komen-medicijnen-in-het-milieu-terecht>

De emissiefactoren en de verwijderingsrendementen werden in een berekeningsmodel (WEISS) gebruikt om de bruto en netto emissies van medicijnen naar oppervlaktewater te kwantificeren voor gezinnen en ziekenhuizen .

De gezinnen hebben een gemiddeld aandeel van 92% in de netto emissies ten opzichte van 8% voor de ziekenhuizen. Ook bij de bruto emissies is het aandeel van de gezinnen veruit het grootst.

De medicijnen met de grootste bruto/netto emissies zijn een ontstekingsremmer (15.300/3.310 kg ibuprofen), anti-epileptica (6.170/2.030 kg levetiracetam; 1.700/1.440 kg gabapentine) en een bètablokker tegen hartritme stoornissen (2.090/1.510 kg sotalol).

In dezelfde studie (VMM, 2017) gebeurden analyses in het oppervlaktewater, in het oppervlaktewater dat bestemd is voor de productie van drinkwater en in het drinkwater zelf. Analyses in heel Vlaanderen tonen aan dat medicijnen wijd verspreid zijn in het oppervlaktewater. Carbamazepine, gabapentine, irbesartan en sotalol worden in meer dan 90% van de meetpunten teruggevonden. Op 65% van de meetpunten worden meer dan 15 medicijnen teruggevonden.

Om na te gaan of de verontreinigende stoffen een invloed hebben op het waterleven worden de gemeten concentraties getoetst aan de milieukwaliteitsnormen (MKN) of aan de 'predicted no effect concentration' (PNEC) of concentratie waarbij geen enkel nadelig effect op biota verwacht wordt. De PNEC waarden worden voor een aantal medicijnen frequent overschreden (op een totaal van 76 meetplaatsen): diclofenac (53), sulfamethoxazol (42), clarithromycine (17), iopamidol (14) en propranolol (14). De maximale waarde uit de beschikbare PNEC waarden wordt overschreden voor clarithromycine (3 meetplaatsen) en propranolol (op 7 meetplaatsen).

In het gezuiverde drinkwater komen slechts 4 van de opgevolgde stoffen voor: carbamazepine (anti-epilepticum), iopamidol (röntgencontrastmiddel), iopromide (röntgencontrastmiddel), lidocaïne (pijnstiller). In alle gevallen liggen de vastgestelde concentraties onder de 100 nanogram per liter. Dit wijkt niet af van de vaststellingen van de Wereldgezondheidsorganisatie (WGO, 2011) die concludeert dat gezondheidseffecten bij deze lage concentraties erg onwaarschijnlijk zijn.

2.1.1.6 Pesticiden

De druk op het waterleven door gewasbescherming wordt samengevat in de SEQ-indicator³³, waarin de landbouw een overweldigend (99% in 2019) aandeel blijkt te hebben³⁴. De drie meest gebruikte gewasbeschermingsmiddelen in 2019 waren Mancozeb (fungicide), Aluminiumsilicaat (insecticide) en Glyfosaat (herbicide). Via diverse wegen komen pesticiden in het oppervlaktewater terecht. Eén van die wegen is via drinkwater en voedingsmiddelen, via menselijke uitwerpselen naar rioolwater, dat al of niet gezuiverd terugvloeit naar oppervlaktewater.

Humaan biomonitoringsonderzoek leert ons dat er pesticiden in menselijke urine zitten (en in het bloed). Jammer genoeg wordt de aanwezigheid van pesticiden in menselijke feces weinig onderzocht.

³³ Deze indicator (Seq+) weegt de jaarlijks verkochte hoeveelheid werkzame stof per gewasbeschermingsmiddel naar toxiciteit voor waterorganismen en verblijftijd in het milieu, en wordt uitgedrukt als de som van de verspreidings-equivalenten (ΣSeq). Bron: Vlaams parlement, schriftelijke vraag nr. 12 van Johan Danen, 11 oktober 2019.

³⁴ Bon: VMM: <https://vmm.vlaanderen.be/feiten-cijfers/water/kwaliteit-waterlopen/lozingen/indicator-druk-op-het-waterleven-door-gewasbescherming-seq>

In het effluent van RWZI's in Vlaanderen worden pesticiden aangetroffen³⁵. Twaalf pesticiden werden in meer dan 5% van de metingen teruggevonden. Aminomethylfosfonzuur en glyfosaat werden in alle metingen teruggevonden. In de periode 2020-2022 werden enkele pesticiden gemeten zoals Terbutylazine, Flufenacet, Dimethenamid en Metolachloor die boven de milieukwaliteitsnorm voor de maximumconcentratie in oppervlaktewater zaten. Dit was in minder dan 2% van de metingen het geval. De jaargemiddelde concentratie was voor geen enkel pesticide te hoog (VMM). Concreet betekent dit dat de waterinname in het drinkwaterproductiecentrum De Blankaart (De Watergroep, West-Vlaanderen) maar voor zes maanden wordt stopgezet i.p.v. een heel jaar (zie bespreking in paragraaf 4.1). Met andere woorden, jaargemiddelden zeggen weinig over het al dan niet voorkomen van (tijdelijke) normoverschrijdingen in situaties (bv. drinkwaterproductie) waar er eigenlijk op geen enkel moment normoverschrijdingen zouden mogen zijn. Naast menselijke feces en urine zijn er nog andere bronnen van pesticiden in effluent water, waaronder lozingen van industrieel afvalwater (bv. van de voedingsindustrie), afspoeling van landbouwgronden en het huishoudelijk gebruik van pesticiden. Twee casestudies, diazinon en chloorpyrifos in huishoudelijke pesticiden en fipronil en imidacloprid in vlooiënbestrijdingsmiddelen voor huisdieren, benadrukken het belang van het identificeren van verwaarloosde bronnen van milieuverontreiniging via het afvalwater (Sutton R., 2019). In een studie in Polen leidde het rioolwaterzuiveringsproces tot een vermindering van de concentratie organochloorpesticiden met 37-100%, gemiddeld 85%. De resten organochloorpesticiden in het gezuiverde rioolwater varieerden op jaarbasis tussen 0,02 en 14,97 ng/L (Cybulski et al., 2021). Volgens Amerikaanse onderzoekers (Sutton, 2019) zijn conventionele afvalwaterzuiveringstechnologieën over het algemeen niet effectief in het verwijderen van pesticiden uit afvalwater. Een hoge verwijderingsefficiëntie wordt alleen waargenomen bij sterk hydrofobe verbindingen, zoals pyrethroiden. Referentiewaarden voor waterleven kunnen in onverdunde effluënten worden overschreden. Zo werden bijvoorbeeld zeven verbindingen, waaronder drie pyrethroiden, carbaryl, fipronil en het sulfondegredaat daarvan, en imidacloprid, aangetroffen in gezuiverd afvalwater in concentraties die de door de Amerikaanse Environmental Protection Agency (EPA) vastgestelde normen voor chronische blootstelling aan ongewervelden voor waterleven overschreden. Pesticiden die via RWZI's stromen, verdienen prioriteit voor aanvullend onderzoek om bronnen en geschikte strategieën ter voorkoming van vervuiling te identificeren.

2.1.1.7 PFAS

De Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA) en het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat hebben onderzoek laten doen naar de concentraties PFAS in het afvalwater van 8 rioolwaterzuiveringen (Derksen A., 2021). Van de 35 onderzochte PFAS zijn er 28 tenminste eenmaal in influent en/of effluent aangetroffen. De concentraties PFAS totaal liggen in influent én effluent in de orde grootte 10 – 1000 ng/l en voor zuiveringsslib in de orde grootte 10 – 100 µg/kg DS. Van de totale hoeveelheid PFAS verlaat het grootste deel de RWZI via effluent. PFAS worden niet of nauwelijks verwijderd door de RWZI's. Vaak blijken de concentraties PFAS in het effluent zelfs hoger te zijn dan in het influent. PFAS-precursors lijken hierbij een rol te spelen. Precursors zijn PFAS-verbindingen, vaak met een niet volledig gefluoreerde koolstofketen, die kunnen afbreken tot stabiele PFAS (met een volledig gefluoreerde koolstofketen). Dit wordt ook bevestigd door een Zweedse studie (Eriksson et al., 2017).

³⁵ Bron: VMM: <https://vmm.vlaanderen.be/feiten-cijfers/water/riolering-en-waterzuivering/indicator-pesticiden-in-het-effluent-van-rwzis?activeAccordion=a1bcb83-f9f4-4a15-ac15-9bf4a393e8dd%2C2da0179f-ba08-440c-bd20-1c5edf6b5fe1%2C6690e67f-1af5-4cfb-91c9-38b84d41a1a8>

Op basis van de PFAS-concentraties in het effluent is een indeling gemaakt in hoog, matig en laag met PFAS belaste RWZI's. De emissie van PFAS via het effluent naar het oppervlaktewater bedraagt ongeveer 50 mg/IE150/jaar³⁶ voor de hoog belaste RWZI's, 5 mg/IE150/jaar voor de matig belaste RWZI's en 1 mg/IE150/jaar voor de laag belaste RWZI's. De emissie via effluent wordt voor heel Nederland globaal geschat op 65 – 180 kg PFAS/jaar, terwijl 15 – 45 kg PFAS/jaar de zuivering via zuiveringsslib verlaat. Het aandeel dat via slib de RWZI's verlaat is 2,6 tot 41% van het totaal dat de zuivering verlaat. Het onderzoek laat zien dat PFAS met biologische zuivering niet uit het water verwijderd wordt. De onderzoekers concluderen dat nader bronnenonderzoek nodig is.

Onderzoekers van de Universiteit van Florida hebben een bron van PFAS in rioolwater gevonden, m.n. wc-papier (Thompson et al., 2023). Het was al eerder aangetoond dat PFAS in papieren producten kunnen voorkomen, omdat het wordt gebruikt bij het verpulpen van papier in papiermolens, waarbij de papiervezels losgemaakt worden. Doordat wc-papier vaak gemaakt wordt van gerecycleerd papier, kunnen de stoffen uiteindelijk terecht komen in wc-papier³⁷. Ze analyseerden rollen wc-papier uit verschillende delen van de wereld: Afrika, West-Europa, Noord-, Zuid- en Midden-Amerika, en troffen daarin zes soorten PFAS aan (op 34 geanalyseerde PFAS-stoffen), met als belangrijkste (91%) Polyfluoralkylfosforzuurdiesters (6:2 diPAP). Daarnaast analyseerden ze PFAS in het zuiveringsslib van acht Noord-Amerikaanse RWZI's. DiPAP's behoorden eveneens tot de meest voorkomende PFAS-waarden gemeten in afvalwaterzuiveringsslib, hoewel ze een kleinere bijdrage vertegenwoordigden (gemiddeld 54% ± 15%) dan in het toiletpapier zelf. De concentraties van 6:2 diPAP varieerden van 27,2 tot 750 ng/g DS met een gemiddelde concentratie van 141 ng/g DS. Twee andere studies naar Noord-Amerikaans rioolslib identificeerden diPAP's op vergelijkbare wijze als de meest voorkomende PFAS, gemeten met gemiddelde concentraties van 6:2 diPAP van 164 en 121 ng/g DS. Interessant is dat de gerapporteerde resultaten uit Europa en China aantoonde dat diPAP's minder bijdragen aan de totale massa PFAS in afvalwaterslib. Studies uit Zweden, Frankrijk en China rapporteerden gemiddelde concentraties van respectievelijk 2,0, 2,9 en 11,6 ng/g voor 6:2 diPAP, wat neerkomt op 3%, 2% en 8% van de totale gemeten massa PFAS. Daardoor wordt de fractie van 6:2 diPAP in afvalwaterslib, toegeschreven aan toiletpapiergebruik, in de Verenigde Staten en Canada geschat op 4%, terwijl dit in Zweden en in Frankrijk opliep 35% en 89%.

2.1.1.8 Waterkwaliteit

Metingen van vet oplosbare stoffen in waterorganismen zijn relevant omdat ze een idee vormen van de biobeschikbaarheid van deze stoffen in het milieu en de mogelijke toxiciteit voor de organismen zelf en voor hun predatoren. Daartoe worden de meetresultaten getoetst aan ecotoxicologisch onderbouwde milieukwaliteitsnormen (Teunen L., 2020). Een beperkt aantal stoffen overschrijdt vaak en soms in ruime mate de milieukwaliteitsnorm in de periode 2019-2021. Op alle meetplaatsen zijn er overschrijdingen van de milieukwaliteitsnorm voor kwik, polygebromineerde difenylethers (PBDE – een vlamvertrager) en heptachloor(epoxyde), een insecticide. Voor PFOS wordt de norm in 49% van de metingen overschreden.

³⁶ Het betreft een IE die uitgedrukt wordt in een zuurstofbindend vermogen van 150 gram zuurstof per inwoner per dag.

³⁷ Bron: <https://www.newscientist.nl/nieuws/wc-papier-is-een-onverwachte-bron-van-pfas-in-rioolwater/>

Daarnaast zijn er nog overschrijdingen van de milieukwaliteitsnorm in de metingen voor benzo(a)pyreen (26%), fluoranteen (10%) en dioxines (14%)³⁸.

Verskillende bronnen spelen een rol. Voor fluorantheen en benzo(a)pyreen zijn atmosferische depositie en transport belangrijke bronnen. Voor kwik zijn atmosferische depositie en bodemerosie belangrijke bronnen. Nalevering van historisch vervuild sediment speelt een grote rol voor kwik, heptachloor(epoxide) en dioxines. De concentraties van PFOS, PBDE en HBCD worden voornamelijk toegewezen aan puntvervuiling door industrie. Voor PFOS zijn huishoudens ook een belangrijke bron.

Om al deze micropolluenten uit het afvalwater te halen, zullen RWZI's in de toekomst een vierde zuiveringsstap moeten implementeren (cf. wijziging Europese richtlijn stedelijk afvalwater). Daarom zijn Aquafin en de VMM een project gestart om zo'n zuiveringsstap te bouwen op de RWZI te Aartselaar. De techniek bestaat uit ozonbehandeling en behandeling met actiefkool. Binnen het Interreg Vlaanderen-Nederland-onderzoeksproject 'Schone Waterlopen' zal er een levenscyclusanalyse worden uitgevoerd om te bepalen in hoeverre het milieu gebaat is bij een quaternaire zuivering. Gezien de verwachte schaarste aan actiefkool kijkt Aquafin ook naar mogelijkheden om het zuiveringsslib via pyrolyse met thermische energie te verwerken tot biochar, wat als actiefkool kan gebruikt worden³⁹.

2.1.2 Emissies naar de bodem

Binnen het huidig sanitair systeem wordt in Vlaanderen (en ook Nederland) geen zuiveringsslib van RWZI's toegepast in de landbouw. Het slib wordt ontwaterd en verbrand waardoor er nog enkel assen en rookgasreinigingsresidu's overblijven. Deze kunnen waar mogelijk nog nuttig toegepast worden bij de productie van een bouwstof, voor fosfaat terugwinning of ingezet in noodzakelijke voorzieningen op stortplaatsen. We vermoeden dat de emissies naar de bodem van deze toepassingen beperkt zullen zijn, maar kunnen hier wegens tijdsgebrek niet verder op ingaan.

Wat in Vlaanderen en Nederland de praktijk is, geldt niet voor de rest van Europa, waar zuiveringsslib wel in de landbouw wordt gebruikt. Een studie uit het Verenigd Koninkrijk (Lofty et al., 2022) stelde concentraties vast van 0,01g microplastics (of 24,7 microplastic-deeltjes) per gram droog zuiveringsslib, wat overeenkomt met ongeveer 1% van het gewicht van het rioolslib. Aan de hand van deze cijfers en gegevens van de Europese Commissie en Eurostat werd de potentiële jaarlijkse microplastic-verontreiniging van de bodem in heel Europa geschat op 31.000-42.000 ton (uitgaande van microplastics met een grootte van 1000–5000 µm). De studie suggereert dat het verspreiden van slib op landbouwgrond deze mogelijk tot een van de grootste wereldwijde reservoirs van microplastic-verontreiniging zou kunnen maken. Daarom moet het recycleren van ruw rioolslib op landbouwgrond worden herzien.

Een meta-studie (Casella C., 2023) rapporteert dat het aantal microplastic deeltjes in rioolwaterzuiveringsslib varieert van 1.500-170.000 microplastics/kg DS, waarbij de deeltjesgrootte varieert van 1µm tot 5.000µm. Aangezien microplastics aanwezig zijn in rioolslib en dat slib voornamelijk voor landbouwdoeleinden wordt gebruikt, zijn er mogelijke milieurisico's, zowel in het watermilieu (via afspoeling) als in het bodemmilieu. Microplastics in de bodem remmen de groei van planten en kunnen worden opgenomen door planten om via

³⁸ Bron: VMM: <https://vmm.vlaanderen.be/feiten-cijfers/water/kwaliteit-waterlopen/fysisch-chemische-toestand/indicator-gevaarlijke-stoffen-in-biota?activeAccordion=8fd5e21c-29eb-43f9-8e59-21b2531d8e82>

³⁹ Bron: Aquafin, Jaarverslag 2023.

de voedselketen de mens te bereiken. De milieurisico's kunnen worden versterkt door adsorptie van zware metalen zoals cadmium, wat een verhoogd risico op grondwaterverontreiniging veroorzaakt. Microplastics in rioolslib kunnen door de bodemfauna worden opgenomen en diverse schadelijke effecten veroorzaken, zoals valse verzadiging, onvoldoende voedselvoorziening en darmschade, onder andere (Casella C., 2023).

Verontreiniging van oppervlaktewater blijft niet beperkt tot de waterkolom zelf. Een aantal stoffen hebben immers de neiging zich te binden aan het zwevend stof. Als dit zwevend stof bezinkt, gaat het samen met de eraan vastgehechte pollutanten de waterbodem of sedimentlaag vormen. Verontreiniging van waterbodems is vaak het gevolg van historische vervuiling met zware metalen, pesticiden, PCB's ... Sinds 2010 zijn er decretale milieukwaliteitsnormen voor waterbodems.

Bij de laatste monitoringscyclus (2016-2021) bleek 31 % van de waterbodems niet verontreinigd; 27% was verontreinigd of sterk verontreinigd. Sinds 2000 is de toestand verbeterd. Het percentage verontreinigde of sterk verontreinigde waterbodems nam duidelijk af terwijl het percentage licht of niet verontreinigde waterbodems toenam⁴⁰.

Uit de studie naar microplastics in Vlaamse waterlopen (Vercauteren M., 2021a) bleek dat in het sediment (afkomstig van de waterbodem) heel wat microplastics bezinken. Er werden gemiddeld 2.480 microplastic deeltjes per kg sediment (tussen de 610 tot 9.558 MP/kg) gevonden. In het sediment werden kleinere microplastics (25 – 50 µm) aangetroffen dan in het oppervlaktewater.

Herwonnen fosfaten mogen als meststof worden verhandeld, gebruikt en vervoerd als ze voldoen aan de samenstellingsvoorwaarden inzake maximumgehalten voor verontreinigde stoffen zoals beschreven in bijlage 2.3.1 van VLAREMA (zie bespreking in paragraaf 7.2.5). Herwonnen fosfaten zijn: struviet, magnesiumfosfaat, dicalciumfosfaat die zijn vrijgekomen bij de zuivering van industrieel proceswater of huishoudelijk, stedelijk of industrieel afvalwater of ander afvalwater door precipitatie met opgelost magnesium, ammonium of kalium. Dat pathogenen en medicijnresten bij de herwinning van fosfaat mogelijk worden mee opgenomen, maakt dat het gebruik van struviet voorwerp is van onderzoek en discussie⁴¹ (zie ook paragraaf 7.2.5).

Ondanks het feit dat er momenteel geen zuiveringsslib in de landbouw wordt gebruikt, ging men in Nederland toch op zoek naar de mogelijkheden om daar verandering in te brengen. De Nederlandse normen voor het gebruik van zuiveringsslib als meststof in de landbouw zijn aanzienlijk strenger dan de Europese. Ook zijn de normen strenger dan koper- en zinkwaarden die in dierlijke mest kunnen worden aangetroffen. Sinds 1995 wordt er in Nederland geen RWZI-slib meer afgezet in de landbouw, doordat vanaf toen normen voor zware metalen van toepassing werden. Hieraan voldoet zuiveringsslib niet. Op dit moment wordt er per jaar 300.000 ton droge stof aan zuiveringsslib afgevoerd, dat voor het overgrote deel (96%) wordt verbrand. (STOWA, 2025) Voor toepassing in de landbouw dient zuiveringsslib wel te voldoen aan de eerder genoemde normwaarden voor zware metalen. Op voorhand was bekend dat de koper- en zinkgehalten in communaal zuiveringsslib daarbij problematisch zijn.

⁴⁰ Bron: VMM: <https://vmm.vlaanderen.be/feiten-cijfers/water/kwaliteit-waterlopen/waterbodem/indicator-waterbodemkwaliteit?activeAccordion=3228832b-4515-443b-9194-802cdc42196c%2C3259d06e-75a7-4117-b01b-bf1c5691cb6b%2Cbd8ee05-ecba-4c56-8314-5fae7d28249a>

⁴¹ Sectorplan 'Assen van slibverbranding', Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat Nederland (geldig vanaf 1 januari 2024).

Er is ook gekeken naar de herkomst van koper en zink in rioolwater, om te kijken of het mogelijk zou zijn om de koper- en zinkgehalten in zuiveringsslib te verlagen, bijvoorbeeld door het bij de bron apart inzamelen en behandelen van toiletwater. Maar aangezien koper en zink uit toiletwater maar goed zijn voor 5-11%, respectievelijk 10-27%, van totaal koper of totaal zink in influent RWZI afvalwater, bleek dit niet voldoende te zijn.

Het verder afkoppelen van hemelwater van het vuilwaterriool zal het zinkgehalte doen dalen. Deze daling zal echter niet voldoende zijn om te voldoen aan de huidige norm voor zink in zuiveringsslib.

De belangrijkste conclusie van dit onderzoek is dat het op dit moment niet mogelijk is om Nederlands communaal zuiveringsslib als meststof in te zetten in de landbouw en zo de kringloop te sluiten. De Nederlandse normwaarden voor koper en zink worden in elke slibstroom overschreden en het is niet de verwachting dat het mogelijk is om deze gehalten omlaag te brengen. Daarnaast zijn er nog diverse andere verontreinigingen (PFAS, microplastics, nanodeeltjes, antibioticaresistente organismen) die milieurisico's vormen bij toepassing van slib in de landbouw.

Het doel dat de Waterschappen zich hebben gesteld om in 2050 100% circulair te zijn blijft wel staan. Er zijn aanbevelingen gedaan voor mogelijke vervolgactiviteiten, en dit zijn (STOWA, 2025):

- Onderbouwen van een versoepeling van de Nederlandse normen voor zware metalen in slib
- Verder onderzoek naar herkomst van probleemstoffen met het oog op maatregelen om de slibkwaliteit te verhogen
- Slibbehandeling voor reductie van verontreinigingen
- Alternatieve toepassingen waar problemen rondom verontreinigingen niet spelen, zoals toepassing bij gewassen die niet geconsumeerd worden.
- Bioraffinage tot verschillende producten
- Mogelijke afzet naar het buitenland waar dit wel binnen de normen past, waarbij de principiële vraag gesteld zou moeten worden of dat wenselijk is.

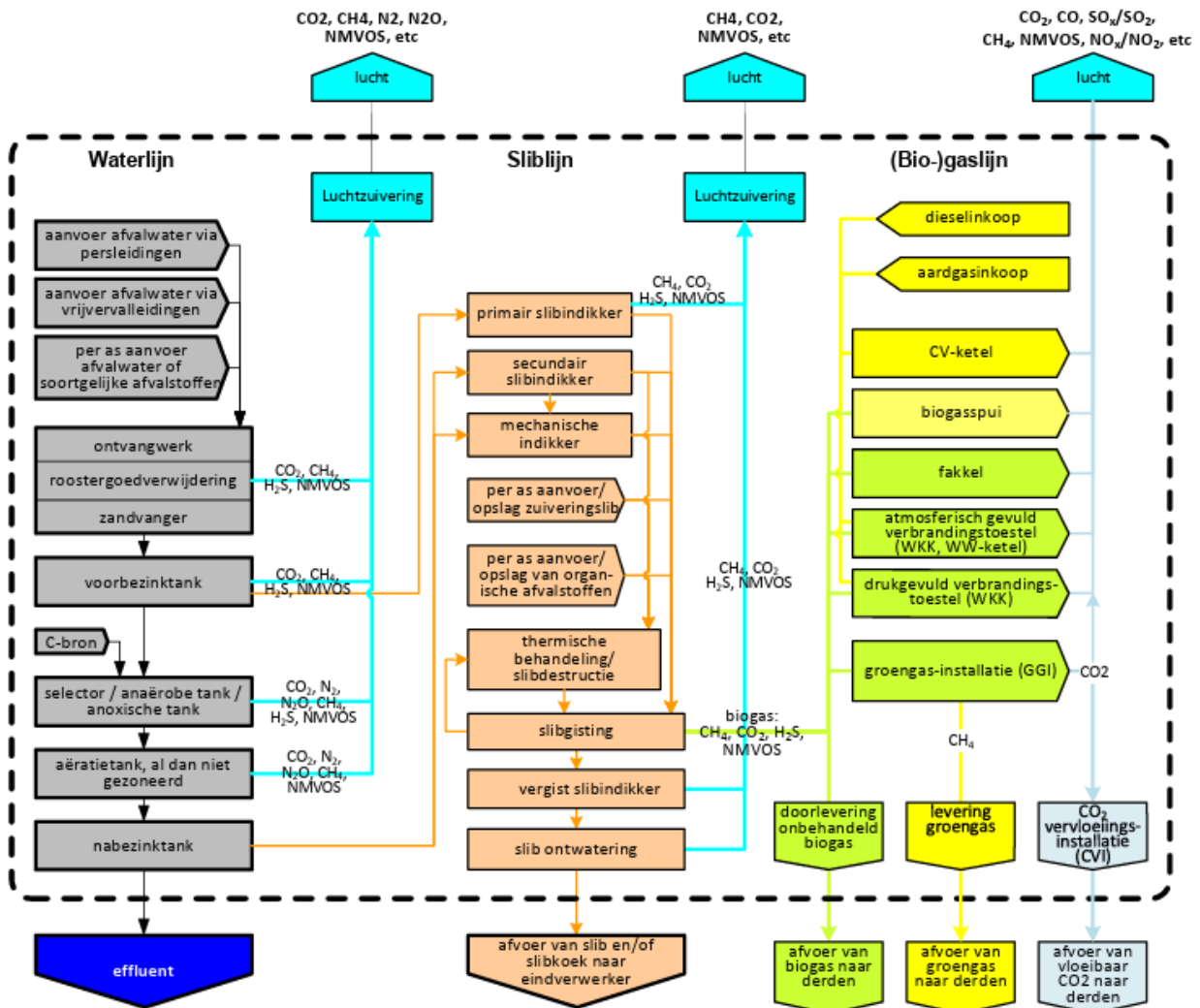
2.1.3 Emissies naar de lucht

Binnen het huidig sanitair systeem wordt toiletwater ofwel afgevoerd naar RWZI's ofwel ter plaatse geloosd (al of niet na passage in een septische put) of ter plaatse gezuiverd in een IBA.

De emissie van methaan door huishoudens nam in de periode 2000-2018 met 44 % af doordat er steeds meer septische putten werden aangesloten op RWZI's (VMM, 2020).

De emissies naar de lucht door RWZI's worden weergegeven in onderstaande figuur, afkomstig uit de 'Handleiding Rekentool 2024 en e-MJV voor Zuiveringbeheerders' in Nederland (Baltussen, 2025).

Figuur 4 Luchtemissies vanuit een RWZI



Figuur 1 Emissies vanuit een rwzi

Bron: Balthussen, 2025.

De luchtemissies van RWZI's kunnen worden opgedeeld in luchtverontreinigende emissies verbonden aan verbrandingsprocessen (NO_x , SO_2 , fijn stof, NMVOS,...) en de emissies verbonden aan het zuiveringsproces (waterlijn), de slibverwerking (sliblijn) en de slibvergisting (biogaslijn), die grotendeels broeikasgassen (CO_2 , CH_4 , N_2 , N_2O) zijn. Zowel bij de waterlijn als bij de sliblijn zijn er emissies van vluchtige componenten (o.a. NH_3 , organische stoffen, geurcomponenten - staan niet op het afgebeelde schema) die bijdragen aan de vorming van secundair fijn stof, verzuring, eutrofiëring en geurhinder (Huybrechts D., 2001) (Baltussen J., 2014).

De uitstoot van broeikasgassen door de sector 'Afvalverwerking', waartoe het storten van afval, de afvalverwerking (zonder energierecuperatie) en de afvalwaterbehandeling behoren, bedroeg in 2022 1,285 Mton CO₂-eq, zijnde 1,9% van de totale broeikasgasuitstoot in Vlaanderen⁴². De sector kende al een belangrijke daling voordien, maar kon ook tussen 2005 en 2022 verder verminderd worden. Grootste drijfveren hier waren een stortverbod aangevuld met de verplichting om vrijkomende gassen (methaan) maximaal nuttig aan te wenden voor energierecuperatie en het hoger aantal aansluitingen van het afvalwater op de rioolwaterzuiveringsinstallaties waardoor de emissies van CH₄ afkomstig van de septische putten in die periode aanzienlijk daalden.

De eerste broeikasgasinventaris van Aquafin berekende de totale uitstoot van broeikasgassen in 2023 op 284.000 ton CO₂eq, wat 48 kg CO₂eq per inwoner equivalent of 295g CO₂eq /L afvalwater vertegenwoordigt. Daarmee belopen de emissies van de RWZI's 22% van de broeikasgasemissies van de Vlaamse afvalsector en 0,4% van de totale broeikasgasemissies in Vlaanderen.

2.2 CIRCULAIRE SANITAIRE SYSTEMEN

Gezien circulaire sanitaire systemen grotendeels het onderwerp zijn van Deel 2, raken we hier slechts een paar zaken aan die in Deel 2 niet aan bod komen.

2.2.1 Emissies naar water

Hèt kenmerk van circulaire sanitaire systemen, zoals beschreven in paragraaf 1.1.2, is dat zij geen of veel minder water (in kringloop) gebruiken. De aparte verwerking van menselijke feces en urine is erop gericht om de gerecycleerde (mest)stoffen nuttig toe te passen in de bodem en/of gedeeltelijk in energie om te zetten. In vergelijking met het huidige sanitair systeem is er met andere woorden weinig of geen emissie naar waterlopen.

Bij het composteringsproces komt er water vrij door de afbraak van organisch materiaal door micro-organismen. Overtollig vocht (percolaatwater) wordt tijdelijk opgevangen en opnieuw toegevoegd om de vochtigheidsgraad op peil te houden. Omdat veel vocht tijdens de thermofiele fase van de compostering verdampt, moet er vaak nog extra water worden toegevoegd. Bij compostering in open lucht is het van belang om de composttrillen af te dekken met luchtdoorlatend vezeldoek om uitspoeling van nutriënten, die in anorganische vorm in dit percolaatwater zijn opgelost, te voorkomen.

In afgedekte composteerproeven met bloembolresten (Dekker P., 2010), werd vastgesteld dat van de aanwezige N, P en K er met het percolaatwater resp. 3%, 1% en 14% verloren gaat.

De totale hoeveelheid afvalwater is het grootst bij compostering in open lucht, omdat hier significante hoeveelheden verontreinigd regenwater vrijkomen. Bij compostering in gesloten systemen (vooral gft-compostering) worden relatief kleinere hoeveelheden afvalwater gegenereerd. Door hergebruik van deze afvalwaterstromen kan soms zelfs een nullozing haalbaar zijn (Huybrechts D., 2005).

Omdat er in vergelijking met een volledig aerobe installatie minder water wordt afgevoerd met de

⁴² Bron: VMM: <https://vmm.vlaanderen.be/feiten-cijfers/klimaat/klimaatthemas/broeikasuitstoot/indicator-broeikasgasemissies-per-sector?activeAccordion=dae2bc63-b1df-43d5-b4ae-10de7b1c582a%2C0d22a55d-5eb3-4d02-ad5d-1630fffb4f17>

composteringslucht, kent een gft-vergistingsinstallatie meestal een groter afvalwateroverschot dan een gft-composteerinstallatie. Het resterend afvalwateroverschot in een gft-vergistingsinstallatie is sterk installatie- en exploitatie gebonden, en bedraagt typisch 150 tot 300 liter per ton vergist materiaal. Dit afvalwateroverschot moet (na zuivering) geloosd worden, of eventueel afgevoerd naar een externe verwerker (Huybrechts, 2005).

2.2.2 Emissies naar de bodem

Circulaire sanitaire systemen zijn erop gericht om nutriënten en organische stof terug aan de bodem te geven om de bodemgezondheid in stand te houden. Dat betekent dat pathogenen en milieugevaarlijke stoffen door aangepaste verwerkingstechnieken in voldoende mate zullen moeten verwijderd worden. Dit wordt nagegaan in het literatuuronderzoek in Deel 2, paragraaf 7.1.3.

Hier bespreken we de emissies naar de bodem die mogelijk ontstaan bij de toepassing van gerecycleerde meststoffen.

Uit een studie van het ILVO en de VMM bleek dat gemiddeld 5.314 kg veterinaire antibiotica jaarlijks via de mest van mestkalveren en varkens samen op het land wordt gebracht, wat overeenkomt met 3,13% van het totaal verkochte aantal kg veterinaire antibiotica. Er werd berekend dat 1,0 tot 181,9 kg veterinaire antibiotica via run-off jaarlijks kan afspoelen naar waterlopen (ILVO_VMM, 2017).

Gezien het literatuuronderzoek in Deel 2 van deze studie aan toont dat compostering de concentraties van medicijnresten in menselijke mest sterk kan reduceren, mogen we toch een verschil verwachten in vergelijking met de toepassing van verse dierlijke mest. Bovendien is de uitspoelingsfactor voor nutriënten in compost lager dan die van onbewerkte mest of kunstmest in de bodem. Hiervoor verwijzen we naar de verschillende werkingscoëfficiënten voor stikstof voor verschillende soorten meststoffen (zie paragraaf 8.1.1.6) en naar de waterabsorptie- en waterretentiecapaciteit van compost.

Uit de literatuurstudie van milieu- en gezondheidsrisico's verbonden aan feces en urine (paragraaf 6.1.2.4) bleek dat feces tot 14 µg/g aan microplastics (= 0,0014%) kan bevatten (Luqman et al., 2021). Feces bevat 28.000 microplastic deeltjes (MPs) per kg DS. De deeltjesgrootte van de microplastics in feces is kleiner dan 500µm; ongeveer de helft van de deeltjes zijn kleiner dan 50µm (Yan et al., 2022).

Rijpe gft-compost bevat 70-120 MPs/kg DS en een commercieel verkrijgbare meststof van een gft-vergister die alleen afval uit de handel verwerkt, bevat 895 MPs per kg droge stof (Weithmann et al., 2018). Hier werd enkel het segment deeltjes 1-5mm gemeten.

Bovendien is uit studies gebleken (paragraaf 7.1.3) dat compostering microplastics afbreekt. De concentraties van polymere verbindingen namen na drie maanden compostering af met 33 tot 84%, terwijl de afname voor additieven 68% bedroeg. Na 18 maanden compostering was het verlies van polymere verbindingen hoger dan 82%, behalve voor polypropyleen (slechts 70%) (Růžicková J., 2022).

Samengevat mogen we aannemen dat compost van menselijke mest minder microplastics (in gewicht) en meer kleinere microplastics zal bevatten dan gangbare gft-compost of gft-digestaat. De ecologische risico's van resterende microplastics blijven een belangrijke zorg, met name vanwege hun persistentie en de diversiteit aan polymeertypen.

In Vlaamse professionele composteer- en vergistingsinstallaties is een vloeistofdichte vloer verplicht volgens VLAREM (Huybrechts, 2005). Hierdoor wordt lekkage van proceswater of verontreinigd regenwater naar de

bodem in principe vermeden. Indien zich toch lekkage voordoet, zal de bodem en het grondwater verontreinigd worden met hoofdzakelijk organische verontreinigingen. De organische verbindingen zullen in de bodem doorgaans snel worden afgebroken, zodat grootschalige verontreiniging weinig waarschijnlijk is. Het percolaatwater bij thuiscompostering daarentegen komt doorgaans wel in de bodem terecht. In een Franse studie van kleinschalig composteren van feces en urine uit droogtoiletten in compostbakken (Nasri B., 2018) werd in de eerste 6-maand 0,9 kg percolaat per dag gemeten. In deze droogtoiletten zonder urinescheiding werd gemiddeld slechts 31 gewichts% koolstofrijke materialen toegevoegd. Om bodemverontreiniging door percolaatwater bij thuiscompostering te vermijden, stelt Jenkins (2019) voor dat er voldoende koolstofrijk strooisel in de toiletten wordt gebruikt zodat alle urine geabsorbeerd wordt nog voor de toiletemmer in de compostbak wordt geleid⁴³. Bovendien moet er in de compostbak een dikke absorberende bodemlaag aangelegd worden en moet de compostbak met een waterdicht deksel afgesloten zijn om insijpeling van regenwater te verhinderen.

Bij de toepassing van gerecycleerde mestproducten moet volgens de regels van het Mestdecreet rekening gehouden worden met de reeds hoge nitraat- en fosforresidu's in Vlaamse landbouwgronden. Fosfaatuitspoeling kan al optreden bij een fosfaatverzadiging van 25% (MIRA, 2007). Om het oppervlakte- en grondwater te beschermen tegen de uitspoeling van nitraten, volgt de Vlaamse Landmaatschappij het nitraatresidu van de landbouwgronden op (VLM, 2024). Het nitraatresidu in het bodemprofiel op het einde van het groeiseizoen moet dan ook zo laag mogelijk zijn. Duurzaam bemesten blijft de boodschap volgens VLM, met de juiste meststof, dosis, techniek en op het juiste tijdstip⁴⁴.

2.2.3 Emissies naar lucht

Het BBT-rapport voor composteer- en vergistingsinstallaties (Huybrechts et al., 2005) vermeldt het volgende i.v.m. emissies naar lucht van composteer- en vergistingsinstallaties:

“Geuremissies vormen een belangrijk aandachtspunt. De biologische omzettingsprocessen bij compostering en vergisting gaan immers onvermijdelijk gepaard met de productie van restgassen, waaronder vele geurcomponenten. Vluchtige organische zwavelverbindingen (o.a. dimethyldisulfide en dimethylsulfide), terpenen, organische zuren, esters, ketonen en ammoniak (NH₃) zijn de belangrijkste geproduceerde geurcomponenten. Dezelfde zwavelverbindingen worden teruggevonden in ieder proces waar organisch materiaal thermisch of microbiëel wordt behandeld (De Bo, 1999).

Geuremissies zijn bij compostering in open lucht moeilijker te controleren dan bij gesloten compostering, waar de in het composteringsproces gevormde geurcomponenten worden meegenomen met de afgevoerde lucht en worden gezuiverd door biofilters. Een belangrijke oorzaak van geuremissies bij composteringsprocessen is het optreden van anaërobie: indien tijdens het composteringsproces tijdelijk of plaatselijk anaërobe condities ontstaan in het compostend materiaal. De belangrijkste geurbronnen in een groencomposteerinstallatie zijn volgens het TNO-onderzoek (Steunenberg C.F., 1994): het omzetten van de hopen (geeft aanleiding tot piekmissies), de continue emissie van de hopen, de opslag van het te verwerken materiaal, en het verkleinen. De grootste geuremissie heeft plaats tijdens de eerste weken van het composteringsproces, en neemt daarna vrij snel af.

⁴³ Dit is namelijk een basisvoorwaarde om een geurvrij droogtoilet te hebben.

⁴⁴ Bron: <https://vilt.be/nl/nieuws/minder-nitraatresidu-in-bodem-in-2023-door-nat-weer-en-goed-groeiseizoen>

Bij vergisting is in het eigenlijke vergistingsproces geen luchttoevoer en -afvoer noodzakelijk. Het proces vindt plaats in gesloten reactoren, en de gevormde geurcomponenten komen in het biogas terecht. Bij verbranding van het biogas worden zij geoxideerd, zodat in de verbrandingslucht nagenoeg geen geurcomponenten meer aanwezig zijn.”

Naast geurcomponenten doen zich in composteer- en vergistingsinstallaties ook emissies voor van ammoniak (NH₃), broeikasgassen en stof. Het BBT-rapport (Huybrechts et al., 2005) vermeldt hierover:

“De hoeveelheid ammoniak die geproduceerd wordt tijdens het composteerproces is ondermeer afhankelijk van de procesvoering, de hoeveelheid stikstof in het ingangsmateriaal en de C/N verhouding. Vooral installaties die N-rijke materialen verwerken, bijvoorbeeld champignonsubstraatbedrijven, kunnen te maken hebben met hoge NH₃ emissies (meer dan 200 mg/Nm³) (Kriesch S.). In het omgekeerde geval, bij hoge C/N verhoudingen in de verwerkte materialen, zal de NH₃ emissie eerder beperkt zijn.

Bij compostering is CO₂ het hoofdproduct van de biologische omzetting. Aangezien het gevormde CO₂ niet van fossiele oorsprong is, wordt dit niet meegerekend als broeikasgas. Over de grootte van de CH₄- en N₂O emissies bij compostering worden in de literatuur sterk uiteenlopende cijfers gegeven, gaande van 12 kgCO₂eq/ton gft-afval tot 169 kgCO₂eq/ton groenafval.

Bij vergisting is CH₄ het hoofdbestanddeel (50 tot 70 %) van het gevormde biogas. Bij de verbranding van het biogas wordt CH₄ grotendeels omgezet in CO₂. Door onvolledige verbranding van het biogas en/of door lekken in de biogasinstallatie, kan een gedeelte van het CH₄ onverbrand in de atmosfeer terecht komen. De grootte van de CH₄-emissies bij vergisting is vermoedelijk sterk afhankelijk van de aard van de procesvoering. In de literatuur worden dan ook sterk uiteenlopende cijfers gegeven, gaande van 4,2 tot 42 kgCO₂eq/ton gft-afval. Bijkomend aan de procesemissies moet nog rekening gehouden worden met emissies bij de opslag van de verwerkte materialen en bij opslag, transport, en gebruik van onvoldoende gestabiliseerde compost of digestaat.

De geëmitteerde stofvrachten blijven in het algemeen relatief laag.”

In een LCA-studie over groencomposteren (Dekker, 2010) wordt gesteld dat tijdens het composteringsproces 30-40% van de droge stof en 30-50% van het water verdwijnt. Deze verliezen treden op via de lucht en via het percolaatwater, zoals weergegeven in volgend overzicht.

Tabel 9 Nutriëntenverlies bij composteren

nutriënt	Via lucht	Via percolaatwater	Totaal verlies
C	CO ₂ , CH ₄		40-65 %
N	NH ₃ , N ₂ , N ₂ O, NO ₂ , NO	NH ₄ , NO ₃ , NO ₂	5-40%
K		K ₂ O	5-55%
P		P ₂ O ₅	1-10%
S	H ₂ S		
Ca		CaO	0,5-2,5%
Mg		MgO	0,5-2,5%

Bron: Dekker et al., 2010 (verslag Mirjam Akkerman)

Stikstof gaat vooral in de broeifase als NH₃ verloren en in mindere mate tijdens de rijpingsfase in de vorm van NO en N₂. De laatste twee gasen ontstaan alleen onder zuurstofarme omstandigheden en bij aanwezigheid van NO₃ of te wel nitrificatie gevolgd door denitrificatie. Nitrificerende bacteriën worden bij temperaturen onder de 38°C actief. De optimale temperatuur voor nitrificatie is 37°C. Vervolgens kan onder zuurstofarme omstandigheden en bij een temperatuur van 25°C denitrificatie optreden. Dit gaat gepaard met stijging van de pH (zuurgraad). Sommige auteurs adviseren de compost tijdens de rijpingsfase uit te rijden, zodat het laatste deel van de rijping in de bodem plaatsvindt.

Methaan (CH₄) ontstaat alleen wanneer geen zuurstof of geen nitraat aanwezig is.

Zwavel (S) komt in eiwitten voor en is ook van belang voor micro-organismen. Vooral onder anaerobe omstandigheden kan H₂S ontsnappen. Dit kan gebeuren bij het composteren van zwavelrijk materiaal zoals uien, prei en knoflook (Akkerman, 2000, referentie Van Ginkel, 1999).

Tabel 10 Emissie (kg CO_{2eq}/ton compost) t.g.v. directe en indirecte energie en t.g.v. broeikasgassen (CH₄ en N₂O) tijdens productie van GFT-compost (Dekker, 2009) en van zelf gemaakte groencompost.

		direct en indirect energieverbruik	CH ₄ en N ₂ O	Totaal
GFT-compost	transport	7,4	0	7,4
	composteren	43,4	62,1	105,5
	totaal	50,8	62,1	112,9
Zelfgemaakte compost	transport	0,1	0	0,1
	composteren	2,3	52,5	54,8
	totaal	2,4	52,5	54,9

Bron: Dekker, 2010 en Dekker, 2009

Met de nodige voorzichtigheid besluiten de onderzoekers dat het direct en indirect energieverbruik (en de daaraan verbonden CO₂-emissies) bij het maken van groencompost op het eigen bedrijf veel lager is dan dat bij de productie van gft-compost. De emissies van methaan en lachgas tijdens het composteren, uitgedrukt in CO₂-equivalenten, liggen ongeveer op hetzelfde niveau.

Voor industriële groencompostering werden door Dekker et al. (2010) bij gebrek aan gegevens geen berekeningen gemaakt.

Met de VLACO CO₂-tool werd een CO₂ equivalente broeikasgasemissie (aanvoer bioafval, energieverbruik verwerking, emissies verwerking, afvoer compost) per ton compost berekend van 163,9 kg CO_{2eq}/T voor groencompostering, 127,9 kg CO_{2eq}/T voor gft-compostering en 262,5 kg CO_{2eq}/T voor gft-vergisting met nacompostering.⁴⁵

⁴⁵ Bron: schriftelijke mededeling van Christophe Boogaerts (VLACO) op 22/5/2025 en website: <https://vlaco.be/kenniscentrum/onderzoeksprojecten/vlaco-s-co2-tool>

3 EFFECTEN OP HULPBRONNEN

3.1 HUIDIG SANITAIR SYSTEEM

3.1.1 Waterverbruik

De gemiddelde Vlaming verbruikt 103 liter water per dag, waarvan 18 liter voor het spoelen van zijn toilet⁴⁶. Het totale Vlaamse waterverbruik voor toiletspoeling bedraagt dan 44,5 miljoen m³ per jaar, of evenveel water als er in het Albertkanaal zit tussen Antwerpen en Maastricht.

Het deel van het toiletwater dat via de riolering naar een RWZI wordt geleid (=86% algemene zuiveringsgraad in Vlaanderen) heeft een aandeel van 4% in het totale influentdebiet van RWZI's (zie Tabel 7). In onderzoek in Nederland (Geraats B., 2008) werd aangenomen dat het influent van RWZI's bestaat uit 46% afvalwater, 26% regenwater en 27% rioolvreemd water⁴⁷. Hiermee rekening houdend, heeft influent toiletwater een aandeel van 8,7% in het influent afvalwater (zonder regenwater en rioolvreemd water) van RWZI's. Het aandeel van toiletwater in RWZI influent afvalwater is lager dan het aandeel toiletwater (17,4%) in het dagelijks waterverbruik van de gemiddelde Vlaming, wat te wijten is aan de afvalwaterproductie van niet-huishoudens.

3.1.2 Energieverbruik

Uit Oosterlinck (2020): "In een RWZI is elektriciteit de belangrijkste energiebron, deze bedraagt 25-50% van de totale operationele kosten in en ongeveer 1% van het elektriciteitsverbruik van een land (Foladori et al., 2015). De elektriciteit gaat vooral naar aeratie van het slib-watmengsel (mixed liquor) (55-70%), pompen in de primaire en secundaire bezinking (15.6%) en slibontwatering (7%) (Gandiglio et al., 2017). Om de RWZI zelfvoorzienend te maken op vlak van energie en zo kosten te besparen is een combinatie van aanpassingen in verschillende secties van de RWZI nodig (Verstraete & Vlaeminck, 2011). Enerzijds is een reductie van het elektriciteitsverbruik nodig; de grootste impact kan hierbij bereikt worden door reduceren van aeratie en pompgebruik en het optimaliseren van de aeratie door gebruik te maken van hoog efficiënte air diffusers en compressoren (Rittmann, 2013). Anderzijds is het belangrijk om zo veel mogelijk energie te recupereren d.m.v. anaerobe vergisting van het waterzuiveringsslib en het biogas te valoriseren in een warmtekrachtkoppeling (WKK). Biogasproductie kan geoptimaliseerd worden door COD-rijker slib te produceren, een voorbehandeling van het slib of d.m.v. covergisting met keukenafval (Gandiglio et al., 2017). "

3.1.3 Recuperatie van energie en nutriënten

Uit het biogas afkomstig van de vergisting van zuiveringsslib, produceert Aquafin al geruime tijd groene energie en biomethaan. Bij zo'n 13 RWZI's (op een totaal van zo'n 330 RWZI's) recupereren vergistingsinstallaties groene energie (warmte, elektriciteit) voor de eigen processen of om op het net te zetten. Groene elektriciteitsproductie in 2023 was goed voor 22,4 Gwh of 8,1% van het totaal stroomverbruik van Aquafin; de helft daarvan kwam van biogasproductie, de andere helft van PV-installaties. In een vijftal

⁴⁶ Bron: De Watergroep: <https://www.dewatergroep.be/nl-be/drinkwater/veelgestelde-vragen/waterverbruik>

⁴⁷ Rioolvreemd water is extra water dat door het riool wordt afgevoerd maar er eigenlijk niet op hoort te zitten (grondwater, instromend oppervlaktewater etc.). Bron: STOWA-rapport 2008-14.

installaties wordt biogas omgezet naar methaangas dat op het gasnet kan gezet worden (3.700 MWh in 2023). In de toekomst behoort riothermie ook tot de mogelijkheden om groene warmte te recupereren uit rioolwater⁴⁸.

Tegen 2030 wil Aquafin af van fossiele brandstoffen (gas en stookolie). De grootste stappen hierin worden gezet met de bouw van twee nieuwe slibdrogers die zullen werken op restwarmte van naburige afvalverwerkers. De huidige drogers werken nog grotendeels op aardgas en worden tegen 2027 vervangen. Vanaf 2027 zal een nieuwe installatie van waterzuiveringsbedrijf Aquafin op de site van ArcelorMittal Belgium in de haven van Gent energie recupereren uit de verbranding van gedroogd zuiveringsslib afkomstig van het afvalwater van 4 miljoen inwoners. In 2023 werd nog één derde van het slib gedroogd in de eigen installaties en werden twee derden verbrand als ontwaterd slib. De installatie in Gent zal in de toekomst twee derden van het slib voor zijn rekening nemen.

In een vervolgtrajec plant Aquafin met deze installatie ook de opstart van fosforrecuperatie uit de vliegassen van de slibverwerking.

3.2 CIRCULAIRE SANITAIRE SYSTEMEN

We gaan hier vooral verder in op het gebruik van strooisel in droogtoiletten en het gebruik van vers groen materiaal bij de compostering of vergisting van menselijke mest.

3.2.1 Water- en energieverbruik

Buiten wat werd besproken in paragraaf 2.2.1, blijken er niet zo direct cijfers te vinden over het netto water- en energieverbruik van groen- en gft-composteringsinstallaties of vergistingsinstallaties.

Dit werd ook vastgesteld door een Nederlands LCA-onderzoek over groencompostering (Dekker, 2010). Het waterverbruik komt in deze studie niet aan bod⁴⁹, maar het energieverbruik wel.

⁴⁸ Bron: AQUAFIN, Jaarverslag 2023.

⁴⁹ Dekker (2010): Regenwater dat op het terrein valt, wordt via een rioleringsstelsel, dat zich onder de vloer van het terrein bevindt, opgevangen in een zogenaamd percolaatbassin omdat het organische verbindingen kan bevatten. Dit water wordt weer gebruikt voor het besproeien van de composthopen

Tabel 11 Energieverbruik GFT-compost (industrieel) en groencompost (boerderijcomposteren)

Compost	Onderdeel	Directe energie (MJ/ton compost)	Indirecte energie (MJ/ton compost)	Totaal energie (MJ/ton compost)
GFT-compost	Transport GFT-afval naar composteerder	84,2		84,2
	Indirecte energie bouw composteerinstallatie		0,0	0,0
	Energie verbruik tijdens composteren	720,0		720,0
	Transport van compost naar de akker	15,7		15,7
	totaal	819,9	0,0	819,9
Zelf composteren	Transport van groenafval naar teler	1,2		1,2
	Assemblage kraan en breedstrooier		4,6	4,6
	Energie verbruik tijdens composteren	25,4		25,4
	Transport compost naar de akker	1,1		1,1
	totaal	27,7	4,6	32,3

Bron: Dekker et al., 2010

De tabel laat zien dat het totale energieverbruik (directe en indirecte energie) nodig voor de productie en transport van GFT-compost ongeveer 25 keer hoger is dan dat van compost bereid op het eigen bedrijf. Voor industriële groencompostering werden door Dekker et al. (2010) bij gebrek aan gegevens geen berekeningen gemaakt.

3.2.2 Landgebruik en organische stof

Het strooisel dat doorgaans gebruikt wordt in droogtoiletten is koolstofrijk plantaardig afval zoals houtzaagsel, houtkrullen, hennep- en miscanthusstrooisel, vlasleem of een mengeling daarvan. De gebruikte hoeveelheid is afhankelijk van het type droogtoilet:

- Zonder urinescheiding: 600 liter per persoon/jaar
- Met urinescheiding: 100 liter per persoon/jaar

Dit vertegenwoordigt een behoorlijk volume dat, indien droogtoiletten op grootte schaal zouden toegepast worden, misschien niet meer uit bestaande afvalstromen leverbaar is, maar moet gecultiveerd worden. Dezelfde vraag stelt zich ook voor de compostering van menselijke mest, waarbij belangrijke hoeveelheden van zowel koolstofrijk structuurmateriaal en stikstofrijk 'vers of groen' materiaal aan de mest moeten toegevoegd worden.

Zoals uit onderstaande gegevens van VLACO⁵⁰ blijkt, is er echter behoorlijk wat aanvoer van reststromen die in aanmerking komen voor zowel strooiselmateriaal als structuurmateriaal of groen materiaal.

In 2023 werd er in de gft-verwerking ruim 296.000 ton gft-afval, bijna 95.000 ton groenafval en 11.000 ton organisch-biologisch bedrijfsafval verwerkt. In 2023 verwerkte men in de groencompostering 601.000 ton groenafval. Samen met de 95.000 ton groenafval die in de gft-verwerking is gecomposteerd, betekent dit dat er 696.000 ton groenafval is verwerkt tot compost. In 2023 werd er ruim 1 miljoen ton biologisch afval in de

⁵⁰ VLACO: <https://vlaco.be/nieuws/selectieve-inzameling-en-verwerking-in-cijfers-2023>

compostering verwerkt. In 2023 is er in totaal ruim 2,1 miljoen ton input verwerkt in co-vergistingsinstallaties: het gaat dan om (bijna) 1,6 miljoen ton afval, 425.000 ton mest en 129.000 ton energiegewassen. In 2023 werd er bijna 360.000 ton mest, samen met bijna 56.000 ton organisch-biologisch afval verwerkt in de biothermische drogers.

De hoeveelheid groenafval in Nederland (Dekker, 2010) wordt geraamd op ca. 3.200.000 ton per jaar, bestaande uit:

- Plantsoenafval 1.180.000 ton: 37%
- Bermmaaisel 563.000 ton: 17%
- Sloopmaaisel 1.159.000 ton: 36%
- Dunningshout 200.000 ton: 6%
- Heideplagsel 100.000 ton: 3%

Het (houtige) deel van deze reststromen die als strooisel zouden worden afgeleid naar droogtoiletten zal onvermijdelijk terugkomen als input (gemengd met menselijke mest) voor compostering en vergisting.

In de evolutie naar meer bio-economie zal er concurrentie ontstaan tussen zo hoogwaardig mogelijke toepassingen voor biomassastromen. In dat licht zou (gedroogde) groencompost een uitstekend strooiselmateriaal in droogtoiletten kunnen zijn dat afvalstromen zoals zaagsel, schaafsel,... uit de houtverwerking kan vervangen. In de compost- en vergistingssector wordt gekeken naar mogelijkheden om uit groenafval en gft-voorvergisting bepaalde stromen energetisch om te zetten⁵¹. Deze evoluties kunnen de beschikbaarheid van strooiselmateriaal en koolstof- of stikstofrijk plantaardig afval voor de compostering of vergisting van menselijke mest beïnvloeden.

Elke compostering van menselijke mest zal een belangrijke instroom vergen van vers groen materiaal dat gemakkelijk afbreekbaar is; dit helpt om hogere temperaturen te bereiken (voor hygiënisatie) en om moeilijker afbreekbare materialen (houtig strooisel) sneller af te breken. Afhankelijk van de aard en hoeveelheid strooisel die in de droogtoiletten werd ingevoerd, zal ook meer of minder 'structuurmateriaal' aan de compostering moeten worden toegevoegd.

VLACO schatte dat 20% structuurmateriaal een minimum aandeel is dat nodig is in de compostering (t.o.v. gemiddeld 32% werkelijk aanwezig structuurmateriaal). Compostering van de dikke fractie van runderdrijfmest blijkt mogelijk te zijn met 17 à 20 gewichts% structuurmateriaal zoals stro en gras (VCM, 2015).

Volgens de aanbevelingen voor een goede praktijk bij kleinschalige thuiscompostering van menselijke mest (zie hiervoor paragraaf 7.1.2.2) blijkt het nodig te zijn om veel meer structuurmateriaal en vers groen materiaal toe te voegen, naar schatting 200% à 300% (in gewicht). De reden daarvoor is dat er op die manier niet gekeerd hoeft te worden. Dit verschilt uiteraard met professionele compostering waar het veelvuldig keren toelaat de zuurstof in de compostering op peil te houden met veel minder structuurmateriaal.

Wat de vergisting van menselijke mest betreft, is het duidelijk uit de praktijkvoorbeelden in hoofdstuk 11 dat co-vergisting (bv. met gft-afval of andere) overal wordt toegepast. We verwijzen naar paragraaf 7.1.4.2 voor

⁵¹ Uit scenario's van 15% biomassaverbranding uit groenafval en gft-voorvergisting zou een energetisch potentieel equivalent aan het elektrisch verbruik van ca 27.000 gezinnen en het thermisch verbruik van 7.000 gezinnen kunnen worden afgeleid. Bron: VLACO: <https://vlaco.be/kenniscentrum/verwerking/uitdagingen-bij-minder-structuurmateriaal>

een beschrijving van enkele onderzoeksresultaten terzake. Er zijn echter weinig cijfers beschikbaar over verhoudingen en hoeveelheden: 1:1 (menselijke mest/ rijststro) of 2:1 (menselijke mest/ gft-afval).

De vraag of het op grote schaal verwerken van menselijke mest tot compost, digestaat, energie,... tot bijkomend landgebruik zou leiden als gevolg van de noodzakelijke instroom van extra plantaardig afval (groenafval, gft-afval) is nog niet beantwoord (en waarschijnlijk nog niet onderzocht).

Een belangrijke aanvulling op het voorgaande en een belangrijk verschil met het huidige sanitaire systeem is dat een groot deel van de organische stof in de menselijke mest (en in de plantaardige afvalstromen die als toevoegstoffen bij compostering en vergisting ervan worden gebruikt) onder de vorm van compost en digestaat terug kan vloeien naar de bodem. Het op peil houden van het gehalte organische stof in Vlaamse bodems is noodzakelijk voor het handhaven van bodemstructuur, bodemleven en algemene bodemfertiliteit (Nutricycle, 2022).

VLACO bekeek verschillende Europese onderzoeken over het effect van periodieke composttoedieningen op het organische koolstofgehalte in de bodem. Geconcludeerd kon worden dat 10 jaar lang 10 à 15 ton compost/ha jaarlijks toedienen kan leiden tot een absolute toename in het organische koolstofgehalte van de bodem van 0,15 à 0,3 %. Bij dergelijke composttoedieningen blijft circa 40 % van de koolstof van de compost opgeslagen na 10 jaar, gemiddeld 35 % na 20 jaar, 25 % na 50 jaar, en 10 % na 100 jaar.

Indien alle geproduceerde menselijke feces in Vlaanderen zou gecomposteerd worden, zou er 125.000 ton droge organische stof extra beschikbaar zijn om het organische stof gehalte in Vlaamse bodems te verbeteren⁵².

⁵² Berekening op basis van volgende aannames: 460.000 ton feces in Vlaanderen, 75% droge stof, waarvan 80% organische stof, 55% gewichtsreductie door compostering.

4 EFFECTEN OP MENSELIJKE GEZONDHEID

Het valt buiten de mogelijkheden van deze studie om in te gaan op de eigenlijke gezondheidseffecten van verontreinigingen in bv. drinkwater en voeding die het gevolg zijn van emissies door het huidige sanitaire systeem, dan wel door circulaire sanitaire systemen. We stippen slechts een paar zaken aan.

4.1 HUIDIG SANITAIR SYSTEEM

Zo'n 50% van het drinkwater in Vlaanderen wordt uit oppervlaktewater gewonnen, waar in het huidig sanitair systeem gezuiverd en ongezuiverd toiletwater op wordt geloosd. Dit (on)gezuiverde toiletwater is belast met tal van milieugevaarlijke stoffen (zie paragraaf 2.1.1) die tenslotte ook in het drinkwater terechtkomen. Uit metingen blijkt dat de bestaande waterbehandelingstechnieken die door de drinkwaterbedrijven worden ingezet in belangrijke mate de aanwezige stoffen verwijderen. Vier medicijnresten werden teruggevonden in drinkwater op een beperkt aantal locaties: carbamazepine (anti-epilepticum), iopamidol (röntgencontrastmiddel), iopromide (röntgencontrastmiddel), lidocaïne (pijnstiller) (VMM, 2017). De teruggevonden concentraties liggen zeer laag en onder de grens van 100 nanogram per liter. Bij dergelijke lage concentraties zijn volgens de WGO negatieve effecten ten gevolge van een blootstelling aan deze stoffen via drinkwater erg onwaarschijnlijk (WGO, 2011).

Pesticiden en PFAS komen ook voor in drinkwater, maar hierbij is (on)gezuiverd toiletwater niet de primaire vervuiliingsbron, maar wel bijvoorbeeld de pesticiden die in de landbouw worden gebruikt en langs andere wegen in oppervlakte water terechtkomen. Via besmette voeding en drinkwater komen deze stoffen ook in feces en urine voor en vloeien ze al dan niet via de waterzuivering terug naar het oppervlaktewater. Persistente organische pollutanten circuleren zo in een kringloop en accumuleren wanneer niet wordt ingegrepen op het gebruik ervan. We geven enkele voorbeelden uit de actualiteit. Het water uit het waterspaarbekken De Blankaart kan vaak tijdelijk niet worden gebruikt voor drinkwaterproductie omwille van teveel vervuiling door pesticiden. Bentazon, een onkruidbestrijder, was in de zomer van 2023 een probleem, maar er zijn nog andere stoffen die problematisch zijn, zoals metaldehyde, een stof die in slakkenkorrels aanwezig is, metazachloor (dat vooral gebruikt wordt voor koolgewassen), metobromuron en terbutylazine (dat gemakkelijk afspoelt van de velden)⁵³. Het waterproductiecentrum De Blankaart beschikt over een nieuwe nabehandeling van water (met ozonering, waterstofperoxide en actieve koolfilters) waardoor pesticiden kunnen verwijderd worden⁵⁴. Maar er zijn grenzen aan die behandeling, waardoor geen water wordt ingenomen als de gehalten van die stoffen te hoog worden. In 2024 mat De Watergroep triazoolwaarden die de Europese voorzorgswaarde van 0,1µg/l overschrijden (tot 0,49 µg/l in De Blankaart).⁵⁵ 1,2,4-triazool is een afbraakproduct van de schimmelbestrijder metconazool. Maar die waterwinningsgebieden zijn cruciaal voor het West-Vlaamse drinkwater. Omdat 47% van het totale aandeel van de waterproductiecentra in de productieregio West van De Watergroep met een verhoogde

⁵³ Bron: VRT: <https://www.vrt.be/vrtnws/nl/2023/08/17/geen-drinkwater-uit-west-vlaamse-bekkens-door-pesticidenvervuili/>

⁵⁴ Bron: De Watergroep: <https://www.dewatergroep.be/nl-be/over-de-watergroep/infrastructuur/de-blankaart/masterplan-de-blankaart>

⁵⁵ Bron: VRT: <https://www.vrt.be/vrtnws/nl/2025/01/10/watergroep-uitzondering-triazool-in-water-brouns/>

concentratie 1,2,4-triazool werden geconfronteerd, vroeg De Watergroep een uitzondering op de Europese norm aan bij minister Brouns. De minister ging daarop in en legde de maximumconcentratie op 1 µg/l 1,2,4-triazool per liter drinkwater (10 keer hoger dan de Europese norm); een uitzondering geldig voor 2 jaar. Uit onderzoek door milieu-inspectie bleek deze vervuiling afkomstig te zijn van een soja-verwerkend bedrijf in Ieper⁵⁶.

Nog in 2024 bleek uit een onderzoek van De Watergroep dat TFA, of trifluorazijnzuur, werd aangetroffen in waterbekkens en aan de kraan in West-Vlaanderen, weliswaar onder de nieuwe Vlaamse gezondheidsnorm, maar wel boven de Waalse gezondheidsnorm. TFA, een molecuul uit de familie van PFAS, wordt gebruikt in pesticiden en in geneesmiddelen zoals antidepressiva. Hij ontstaat ook wanneer gelekte koelgassen uit koelkasten en airco's afbreken in de atmosfeer, de (intussen verboden) CFK's en HFK's.

Maar ook in grondwater dringen milieugevaarlijke stoffen door, zoals bleek uit het onderzoek naar diffuse verspreiding van PFAS in het freatisch grondwater in Vlaanderen (VMM, 2022): PFBS, PFOA, PFBA en PFOS komen in 66% tot 50% van de meetplaatsen voor, op 12% van de meetplaatsen werd geen enkele van de 45 geanalyseerde PFAS-parameters gedetecteerd. Er is sprake van een diffuse verspreiding in heel Vlaanderen die nog verder moet gelinkt worden aan de (gekende punt-)bronnen. Ook afvalwater (al of niet gezuiverd) blijkt PFAS te bevatten en is een mogelijke diffuse verspreidingsbron naar grondwater.

In het freatisch grondwater in Vlaanderen bedroegen de P50-, P90- en maximale PFOS-concentraties respectievelijk 1, 18 en 110ng/l. Wanneer de normen uit de Drinkwaterrichtlijn (EU Richtlijn 2020/2184) in beschouwing worden genomen, blijkt dat er op 6% van de locaties een overschrijding van de norm (0,1 µg/l) werd vastgesteld voor de som van de 'PFAS-20'. Op 1 locatie (nl. rond de site van 3M in Zwijndrecht) werd een overschrijding van de norm (0,5 µg/l) voor de som van alle gemeten PFAS-verbindingen vastgesteld.

Het effect van microbiële verontreiniging van oppervlaktewater is dat het water ongeschikt wordt om in te zwemmen. Teveel ziekteverwekkende micro-organismen in zwemwater, afkomstig uit lozingen van (on)gezuiverd afvalwater, kunnen diarree, koorts, misselijkheid, braken en buikkrampen veroorzaken. Uit burgeronderzoek (Waterland, 2024) bleek dat bij 43 procent van 385 meetplaatsen in Vlaanderen en Brussel de norm voor E.coli die de overheid hanteert voor zwemplassen niet werd gehaald.

4.2 CIRCULAIRE SANITAIRE SYSTEMEN

Daar waar het huidige sanitaire systeem vooral via het drinkwater de gezondheid bedreigt, zullen circulaire sanitaire systemen, die nutriënten en organische stoffen naar de bodem brengen, dat eerder via de voeding doen. We verwijzen hiervoor naar de resultaten van het literatuuronderzoek in Deel 2, paragraaf 7.1.3 en in paragraaf 10.1.2.

Wat uit humaan biomonitoring onderzoek alvast blijkt, is dat zware metalen, microplastics, medicijnresten, PFAS en residu's van bestrijdingsmiddelen in urine terug te vinden zijn. Onderzoek naar de concentraties van deze stoffen in feces zijn eerder zeldzaam, wat de inschatting van de totale milieubelasting van feces en urine bemoeilijkt.

⁵⁶ Bron: VRT: <https://www.vrt.be/vrtnws/nl/2025/04/01/iepers-bedrijf-loost-schimmelbestrijder-in-afvalwater-ieverlee/>

5 VERGELIJKING MILIEU-IMPACT: LIFE CYCLE ANALYSIS

Door de Technische Universiteit van Berlijn⁵⁷ werd een meta-studie uitgevoerd (Scheck, 2023) die onderzocht of het terugwinnen van voedingsstoffen uit toiletten met scheiding van materiaalstromen ecologische voordelen biedt in vergelijking met het conventionele, op (afval)water gebaseerde, sanitaire systeem dat bij ons gebruikelijk is.

In totaal werden 11 LCA-studies uit zes verschillende landen en vier continenten gevonden die beantwoordden aan de gestelde criteria:

- methodologie: volgens ISO 14040 en ISO 14044
- vergelijkend onderzoek: minimaal één gescheiden inzamelsysteem en één conventioneel systeem
- nutriënten uit gescheiden inzamelsystemen worden gerecycleerd en toegepast in de landbouw; in conventionele systemen wordt verondersteld dat daarvoor kunstmeststoffen worden gebruikt

De gekozen studies verschillen wat betreft de reikwijdte van vijf composttoiletten tot 169 miljoen toiletten. De systeemgrenzen omvatten bij elke studie de processen van toiletgebruik, tot het recycleren van uitwerpselen en bemesting, waarbij de onderzochte concepten en technologieën per onderzoek verschillen. In zes studies worden zowel feces als urine in de analyse betrokken; in de andere studies enkel urine⁵⁸.

De studies verschillen ook in de manier waarop de urine wordt behandeld voordat deze als meststof wordt gebruikt. Vier studies gaan ervan uit dat een lange opslag voldoende is om uit de urine een veilige meststof te produceren. In de andere studies worden verschillende technische processen gebruikt om meststoffen uit urine te halen. Van deze studies overwegen sommige gecentraliseerde, andere gedecentraliseerde procedures voor de verwerking van urine; één onderzoek vergelijkt zowel gecentraliseerde als gedecentraliseerde procedures. Een ander onderscheid is het transport: in het concept van droge scheidingstoiletten wordt het afval met geschikte voertuigen vervoerd, terwijl in het concept met watertransport afvalwater met urine en feces apart worden verzameld en afgevoerd of via aparte leidingsystemen naar de verwerkingsinstallatie worden geleid.

Er werden zes categorieën van milieueffecten beoordeeld⁵⁹:

- Waterverbruik (4/11):
 - scheidingssystemen kunnen het waterverbruik aanzienlijk verminderen t.o.v. conventionele systemen
- Broeikaspotentieel (10/11):
 - 30% tot 50% besparing mogelijk (t.o.v. conventioneel systeem) met gescheiden inzamelsystemen
 - sanitaire systemen die gebruik maken van scheiding van materiaalstromen besparen een groot deel van de broeikasgas-uitstoot van rioolwaterzuiveringsinstallaties
 - het gebruik van gerecycleerde meststoffen bespaart op de uitstoot van broeikasgassen bij de productie van kunstmeststoffen
 - de broeikasgasemissies die voortvloeiden uit het subproces van de verwerking van feces of urine tot meststof lagen in alle studies lager dan de emissies die zouden ontstaan bij de productie van

⁵⁷ De onderzoekers behoren tot: Fachgebiet Wirtschafts- und Infrastrukturpolitik (WIP - Technische Universität Berlin), Leibniz-Institut für Gemüse- und Zierpflanzenbau (IGZ) e.V., Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW) e.V., Berlin.

⁵⁸ In onderzoeken waarbij de ontlasting niet wordt gebruikt voor de productie van meststoffen, wordt deze afgevoerd of gebruikt in biogasinstallaties.

⁵⁹ Niet alle studies hebben elke milieucategorie geanalyseerd; dit wordt telkens tussen haakjes aangegeven. Voor een overzicht: zie Scheck et al. (2023).

- kunstmeststoffen met dezelfde bemestingsprestaties
- struvietwinning o.b.v. urine geeft hogere broeikasgasemissies (door het gebruik van natriumfosfaat)
 - latrine-systemen zonder onmiddellijke verwerking hebben hogere methaanemissies.
- Energieverbruik (7/11):
 - 30 en 70% energiebesparingspotentieel met scheidingssystemen
 - de exploitatie van rioolwaterzuiveringsinstallaties en de productie van kunstmeststoffen zijn de twee grootste energieverbruikers in het conventionele systeem
 - in een scheidingssysteem kunnen beide processen gedeeltelijk worden vervangen, zonder dat andere energie-intensieve processen hun plaats innemen.
 - Eutrofiëringspotentieel (9/11):
 - 50% tot 85% minder eutrofiëring door scheidingssystemen
 - één studie schat een hoger eutrofiëringspotentieel door scheidingssystemen
 - Verzuringspotentieel (7/11):
 - laag verzuringspotentieel voor het conventionele systeem
 - indien gezuiverd afvalwater en rioolslib gebruikt worden voor irrigatie en bemesting van velden, is het verzuringspotentieel tweemaal zo groot in vergelijking met het afzonderlijk verzamelen van urine, bemesting met urine en irrigatie met urinevrij afvalwater.
 - laag (of geen) verzuringspotentieel voor scheidingssystemen indien ze geen chemicaliën met een hoog verzuringspotentieel gebruiken voor de terugwinning van nutriënten, bv. bij de behandeling van urine.
 - Ecotoxiciteit (4/11):
 - het conventionele sanitatiesysteem is ecotoxischer omdat geneesmiddelen, die voornamelijk via de urine in het afvalwater terechtkomen, niet volledig uit het afvalwater worden verwijderd.
 - 90% vermindering van ecotoxiciteit (van o.a. medicijnresten via urinescheiding en -behandeling).
 - 85% vermindering van zware metalen zoals cadmium, chroom en lood naar de bodem indien gebruik wordt gemaakt van gerecycleerde meststoffen uit systemen met materiaalstromscheiding (i.p.v. toepassing van zuiveringslib als meststof)

DEEL 2: NIEUWE VERWERKINGSMETHODEN EN TOEPASSINGEN VOOR MENSELIJKE MEST

6 MILIEU- EN GEZONDHEIDSRISICO'S BIJ MENSELIJKE MEST

In een studie ter voorbereiding van de Duitse DIN SPEC 91421, een productnorm voor gerecycleerde producten uit droogtoiletten⁶⁰ (Krause, Häfner, Augustin, Harlow, et al., 2021), worden drie hoofdgroepen van inputstromen onderscheiden:

- *menselijke uitscheidingen*, zoals: feces, urine, (menstruatie)bloed en braaksel,
- *operationele toevoegstoffen* gerelateerd aan het toiletgebruik (toiletpapier, strooiselmateriaal, reinigingsproducten) of gerelateerd aan het verwerkingsproces (b.v. de toevoeging van grasmaaisel in het composteringsproces),
- *stoorstoffen*, zoals: hygiëneproducten, verpakkingsafval, glas, kleding, luiers of de inhoud van chemische toiletten.

De beoordeling van deze inputstromen betreft:

- *epidemische hygiënerisico's of infectierisico's*, verbonden aan het voorkomen van pathogenen (ziektekiemen, ziekteverwekkers) in vooral feces, urine, bloed en braaksel.
- *milieu- en andere gezondheidsrisico's*, verbonden aan de aanwezigheid van schadelijke stoffen in menselijke uitscheidingen (zoals residu's van geneesmiddelen en drugs,...), in toevoegstoffen of in stoorstoffen (b.v. zware metalen, microplastics en andere toxische stoffen zoals bestrijdingsmiddelen).
- *geschiktheid voor gebruik in de landbouw*: hier wordt gekeken naar de bemestingswaarde en de capaciteit om de vruchtbaarheid van de bodem te verbeteren.

6.1 MENSELIJKE UITSCHIEDINGEN

6.1.1 Hygiënerisico's

De *ontlasting of feces* van een gezond persoon bestaat uit vijf primaire elementen: water, eiwitten, vet, koolhydraten en vezels. Ontlasting bestaat uit onverteerde voedselresten, afgestorven darmbacteriën⁶¹, afgeschilferde darmwandcellen en andere afscheidingsstoffen, zoals galkleurstoffen.

⁶⁰ De productspecificatie definieert kwaliteitscriteria en -vereisten voor verhandelbare en kwaliteitsgegarandeerde recyclingproducten van menselijke oorsprong voor gebruik als meststof in de tuinbouw en is gebaseerd op de Duitse en Europese wetgeving inzake meststoffen en recyclingmeststoffen. Concrete vereisten voor kenmerken en eigenschappen van de recyclingmeststoffen werden afgeleid uit de Duitse meststoffenwetgeving (Krause et al., 2021, p.1110).

⁶¹ In de mens leven darmbacteriën (lactobacillen, bifidum-bacteriën) die ons helpen om energie uit de voeding te halen, de darmcellen te voeden, het immuunsysteem te stimuleren, onze gemoedstoestand beïnvloeden en belangrijke vitamines produceren, zorgen voor ontgiftiging,... (Maag-, Lever-, DarmStichting - Nederland). Het microbiom, de wereld van bacteriën, virussen en gisten op en in ons lichaam, is een nog vrij jong vakgebied dat nieuwe ontwikkelingen belooft op het gebied van doelgerichte probiotica, mogelijke therapieën voor darmontstekingen en hoe de darmbacteriën de werking van kankermedicijnen kunnen verbeteren. In onze darmen zitten tussen de 100 en 200 verschillende soorten. UMC Utrecht, De boeiende wereld van het microbiom, artikel van 23-08-2023.

Tabel 12 Samenstelling menselijke uitscheidingen

Samenstelling	Feces		Urine	
	Aanwezigheid	Gew% of (Verdeling)	Aanwezigheid	Gew% of (Verdeling)
Water	√	65% - 80%	√	95%
Eiwitten	√			
Vet	√			
Koolhydraten	√			
Vezels	√			
Dode bacteriën	√	25%-54%		
Andere afvalstoffen :	√			
-Zouten :	√		√	
-Stikstof	√	(10%)	√	(90%)
-Fosfor	√	(50%)	√	(50%)
-Kalium	√	(30%)	√	(70%)
-Ureum			√	
-Oplosbare gifstoffen, medicijnresten	√	(36%)	√	(64%)
Pathogenen: bacteriën, virussen, protozoa en wormen	√		steriel	
Parasieten: spoelwormen, lintwormen, larven of eitjes	√			
Hoeveelheid per dag		100-200g		1-1,5l
C/N		7,5		<1

Bron: (Rose et al., 2015) - bewerking

In *feces* komt een ruime waaier van ziekteverwekkers voor in de vorm van bacteriën, virussen, protozoa en wormen. De Wereldgezondheidsorganisatie (WHO) heeft een uitgebreide lijst samengesteld van pathogenen die via menselijke ontlasting worden uitgescheiden en via water en slechte hygiëne worden overgedragen. Het voorkomen van deze ziekteverwekkers is uiteraard verbonden met de gezondheid, met al of niet hygiënische leefomstandigheden, gedrag en gewoonten. Men kan dus andere pathogenen aantreffen in elke mens, en in verschillende bevolkingsgroepen of culturen. De pathogenen worden samengevat in de tabellen in bijlage 12.2.1 (Krause et al., 2021) en geclassificeerd volgens epidemiologisch risico: hoog, gemiddeld, laag of onbepaald.

Het *hygiënerisico van menselijke urine* is laag, omdat algemeen wordt aangenomen dat het geen

pathogenen transporteert. Urine wordt gefilterd in de nieren en is steriel totdat het door de urinewegen gaat, waar het in contact komt met relatief onschadelijke bacteriën (waaronder lactobacillen).

Er zijn maar weinig pathogenen van menselijke pathologische relevantie die met urine worden uitgescheiden. Zie tabellen in bijlage 12.2.1 (Krause, Häfner, Augustin, & Udert, 2021).

Als urine verzameld wordt in toiletten met urinescheiding, kan het vanwege de kruisbesmetting met ontlasting toch pathogenen bevatten.

In een Franse studie van Toilettes Du Monde (TDM, 2017) werden volgende indicator-pathogenen geselecteerd en bemeaten voor het opvolgen van hygiënerisico's van de inzameling en verwerking van menselijke mest afkomstig van festivals en evenementen die gebruik maken van droogtoiletten:

Tabel 13 Indicator pathogenen en aantal kolonievormende eenheden (KVE/CFU), gemeten in menselijke urine en feces

Soort	Pathogenen	Aanwezigheid in urine (KVE/ml)	Aanwezigheid in feces (of strooisel) (KVE/g)
Bacteriën	E. coli	10.000 tot 10.000.000	1.000 tot 10.000.000
	Enterokokken	10.000 tot 10.000.000	1.000.000 tot 10.000.000
	Salmonella	geen	geen
	SRB*		10.000 tot 100.000
	Clostridium perfringens	-	1.000 tot 10.000
Virussen	Hepatitis A	geen	geen
Schimmels**	Aspergillus	Aspergillus Fumigatus (10 tot 800) Aspergillus Glaucus (300 tot 3.000) Aspergillus Niger (100 tot 1.000)	
Parasitaire wormen	Levensvatbare eieren	geen	geen

* SRB of anaerobe sulfaat-reducerende bacteriën worden over het algemeen beschouwd als indicatoren voor Clostridium-besmetting.

**Niet aanwezig in menselijke urine en feces, maar wel in het strooiselmateriaal (stro, zagemeel, houtschilfers).

Bron: studie TDM, 2017

De analyses op zuivere urine (apart ingezameld) en op feces bevatten geen Salmonella, Hepatitis A of levensvatbare eitjes van parasitaire wormen. Urine bevat wel E.coli bacteriën en Enterokokken⁶² en feces bevat bijkomend ook Clostridium perfringens en SRB.

In de normen voor hergebruik van gezuiverd rioolwater (zie paragraaf 8.4.8) in de landbouw vinden we nog andere mogelijke indicator-pathogenen, zoals:

- Legionella spp.

⁶² Dit is verrassend en in tegenspraak met wat doorgaans wordt aangenomen. De onderzoekers nemen aan dat er toch fecale contaminatie bij de inzameling is opgetreden of dat er personen met bepaalde ziektes (bv. urinaire infectie) deelnamen aan de festivals.

- Totaal aantal colifagen/F-specifieke colifagen/somatische colifagen/colifagen (als een indicator voor virussen)
- Sporen van *Clostridium perfringens* of sporenvormende sulfaat reducerende bacteriën (SRB)
- *Campylobacter*, rotavirus en *Cryptosporidium* (als indicatoren voor respectievelijk een besmetting met bacteriën, virussen of protozoa)

Er bestaan veel gevaarlijke door *bloed overgedragen pathogenen*, waaronder hepatitisvirussen, syfilis, malaria en het humaan immunodeficiëntievirus (HIV). Pathogenen die tijdens een infectie in het bloed circuleren, kunnen actief blijven in uitgescheiden bloed. Overdracht van door bloed overgedragen pathogenen vindt plaats via bloedtransfusie of ander direct contact met bloed. Krause et al. (2021) hebben geen diepgaande studie gevonden over het lot van pathogenen die met menstruatiebloed worden uitgescheiden. Niettemin wordt een goed beheer van de verwijdering van menstruatie-hygiëneartikelen ten zeerste aanbevolen, d.w.z. deze hygiëneartikelen apart inzamelen in afvalbakken die in de buurt van het toilet zijn geplaatst. Van de door bloed overgedragen pathogenen is geweten dat ze buiten het lichaam slechts zeer kort kunnen overleven. Het risico op overdracht van deze pathogenen via de toiletbril is zeer klein. Normaal gezien kan dat enkel via contact met slijmen of via prik-, bijt-, snij- en spataccidenten met bloed; niet via de huid. Handen wassen na het toiletbezoek verhindert opname via de mond⁶³.

Ten slotte behoren *gastro-intestinale infecties, vaak gepaard gaand met diarree en braken*, tot de meest voorkomende infectieziekten wereldwijd en kunnen niet alleen via ontlasting, maar ook via braaksel worden overgedragen. De hoeveelheid braaksel die in droogtoiletten wordt verzameld, is echter normaal gesproken zeer laag. Noro- en rotavirussen zijn met name relevant voor kinderen. De belangrijkste bacteriële pathogenen zijn *Salmonella*, *Campylobacter* of *Escherichia coli* die gastro-intestinale infecties veroorzaken die meestal zeer besmettelijk zijn (Krause et al., 2021). Ook hier is de regel: handen wassen na het toiletbezoek om besmetting te verhinderen.

6.1.2 Milieu- en andere gezondheidsrisico's

In dit gedeelte wordt de relevantie van zware metalen, microplastics, medicijnresten, PFAS en residu's van bestrijdingsmiddelen als verontreinigende stoffen in menselijke uitwerpselen besproken.

Hierbij komt volgend onderzoek, voor zover beschikbaar, aan bod:

- Analyses op menselijke urine en feces
- Analyses van rioolwater
- Vergelijkende analyses (menselijke uitscheidingen versus dierlijke mest, kunstmest, rioolslib, compost)
- Analyses van oppervlaktewater, drinkwater en bodem

Via deze analyses krijgen we een beeld van de (potentiële) risico's, voornamelijk voor de menselijke gezondheid. Sommige stoffen kunnen accumuleren in de voedselketen en risico's inhouden voor de gezondheid op langere termijn.

⁶³ Bronnen: <https://www.huisarts.nl/vragen-en-antwoord/hoelan-blijft-het-hiv-virus-buiten-het-lichaam-leven/>, RIVM: <https://lci.rivm.nl/richtlijnen/prikaccidenten> en <https://www.gezondheid.be/artikel/hygiene/hoer-onhygienisch-is-een-toiletbril-37267>

6.1.2.1 Zware metalen

Krause et al. (2021) stellen vast dat het gehalte aan *zware metalen* in menselijke ontlasting laag is, vergeleken met conventionele biogene afvalstromen (bv. vloeibare mest van rundvee, varkensmest, rioolslib), of met groencompost, gft-compost en compost van digestaat (zie tabel 12.2.2). Voor cadmium (Cd) is het gehalte in menselijke ontlasting vergelijkbaar (menselijke inname van cadmium via voedsel- en tabaksconsumptie). Toch bevatten minerale fosformeststoffen 3 tot 20 maal meer cadmium dan een vloeibare meststof gemaakt van menselijke urine (Krause, Häfner, Augustin, Harlow, et al., 2021).

In het kader van het Waalse humane biomonitoringsprogramma (BMH-Wal) werd onderzoek uitgevoerd in verschillende fasen, gericht op verschillende leeftijdsgroepen van de bevolking. Sinds de lancering in 2019 hebben in totaal 1.732 Walen deelgenomen aan het BMH-Wal-programma. De monsters werden verzameld in kraamklinieken, scholen en openbare instellingen en geanalyseerd om de aanwezigheid van verschillende verontreinigende stoffen vast te stellen. De onderzoekers testten het bloed en de urine van de deelnemers op 80 chemicaliën, waaronder: metalen zoals lood, kwik, cadmium, arseen, pesticiden zoals glyfosaat, pyrethroïden, organofosfaten, weekmakers zoals bisfenolen, PAK's en persistente verontreinigende stoffen zoals PCB's en PFAS. Fase 3 is net afgerond: 302 volwassenen van 40 tot 59 jaar namen deel aan de campagne. De blootstelling⁶⁴ van Waalse volwassenen van 40 tot 59 jaar aan lood, kwik en cadmium zou volgens de studie (Jacques A., 2025) moeten beperkt worden omdat de waargenomen waarden gezondheidsrisico's inhouden. Bij 14,9% van de deelnemers was de loodconcentratie in het bloed hoger dan de Franse waakzaamheidsnorm voor loodgehaltes in het bloed (25 µg/L). De loodconcentratie in urine bedroeg maximaal 0,44 µg/l en 1,76 µg/l voor respectievelijk 50% en 95% van de deelnemers. De concentratie van kwik in urine bedroeg maximaal <0,25 µg/l en 0,67 µg/l voor respectievelijk 50% en 95% van de deelnemers. De concentratie van cadmium in urine bedroeg maximaal 0,20 µg/l en 0,94 µg/l voor respectievelijk 50% en 95% van de deelnemers.

In onderstaande tabel geven we ter vergelijking de concentraties uit twee andere studies weer van zware metalen in menselijke feces (Maurya, 2012) en urine (Bertram et al., 2023). Er zitten veel meer zware metalen in feces dan in urine. Zink komt zowel in feces als in urine in de hoogste concentraties voor.

⁶⁴ Als gevolg van roken (in combinatie met alcoholgebruik) en het eten van vis.

Tabel 14 Concentraties van zware metalen in feces en urine volgens diverse studies

Metalen	Feces (Maurya, 2012)		Urine (Bertram, 2023)		Urine (BMH-Wal, 2025)
	(µg/kg)*	(mg/kg DS)**	(µg/L)	(mg/kgDS)***	(µg/L) (P50/P95)
Arseen (As)	-	-	12,70	0,25	7,63 / 79,6
Cadmium (Cd)	135,8	0,5	0,29	0,01	0,20 / 0,94
Chroom (Cr)	-	-	0,12	0,00	0,0 / 0,37
Koper (Cu)	7.875,3	32,5	9,70	0,20	5,56 / 19,9
Kwik (Hg)	54,3	0,2	0,27	0,01	0,0 / 0,67
Nikkel (Ni)	1.629,4	6,5	1,00	0,02	1,02 / 4,21
Lood (Pb)	570,3	2,3	1,14	0,02	0,44 / 1,76
Zink (Zn)	67.890,5	271,6	309,00	6,3	208 / 999

* Hiervoor werd de hoeveelheid in mg/cap/dag gedeeld door het gemiddeld gewicht (184,1g/cap/dag – Rose et al., 2014)

** droge stof gehalte feces (25%) ***droge stof gehalte urine (5%)

- Geen meting

Bronnen: Maurya (2012), Bertram (2023) en BMH-Wal (Jacques A., 2025)

6.1.2.2 Medicijnresten en drugs

In een Zwitserse studie (J. Lienert et al., 2007) werden de uitscheidingsroutes van 212 actieve ingrediënten van farmaceutische producten, wat gelijkstaat aan 1.409 producten, geanalyseerd. Gemiddeld werd 64% (+/-27%) van elk actief ingrediënt uitgescheiden via de urine en 35% (+/-26%) via de feces. In de urine werd 42% (+/-28%) van elk actief ingrediënt uitgescheiden als metabolieten.

Stoffen die voornamelijk met de ontlasting worden uitgescheiden omvatten vet oplosbare stoffen (bijv. naproxen, diclofenac – ontstekingsremmende en pijnstillende middelen) die de neiging hebben om te bioaccumuleren en over het algemeen een hoger ecotoxicologisch risico vormen dan wateroplosbare stoffen. Hoewel urine het grootste deel van de restanten van het geneesmiddel bevat, varieert de verdeling van de stoffen in urine en feces afhankelijk van hun chemische eigenschappen (lipofiel/hydrofiel) en het daaraan verbonden risicopotentieel. Het risicopotentieel voor urine en ontlasting met betrekking tot menselijke geneesmiddelen wordt daarom op ongeveer hetzelfde geschat (Judith Lienert et al., 2007).

De belangrijkste residuen die met de urine worden uitgescheiden, zijn niet-gemetaboliseerde werkzame stoffen en conjugaten die vatbaar zijn voor latere transformatie in het milieu door hydrolyse, evenals metabolieten, waarvan sommige zeer bioactief zijn. Daarom moeten bij het beoordelen van het risico van geneesmiddelen niet-gemetaboliseerde werkzame stoffen en metabolieten in aanmerking worden genomen.

Om het risico van farmaceutische producten in gerecycleerde meststoffen of afvalstoffen te beoordelen, maakten Krause et al. (2021) een vergelijkende tabel van concentraties van residuen weer die zijn aangetroffen in menselijke urine, rioolslib, verschillende P-recyclingmeststoffen uit rioolslib (struviet), dierlijke mest en bodem (zie tabel in bijlage 12.2.3).

Samenvattend laat de vergelijking zien dat farmaceutische belastingen in urine sterk variëren, wat afhankelijk is van of het monster afkomstig is van gezinswoningen, wooncomplexen of openbare urinoirs. Maximale farmaceutische niveaus in urine zijn over het algemeen aanzienlijk lager dan die in drijfmest (tetracycline, trimethoprim) en zuiveringsslib van RWZI's (ciprofloxacin, naproxen, ibuprofen, diclofenac, carbamazepine, estrone en estradiol). Dit illustreert dat sommige medicijnresten, zoals naproxen en diclofenac, eerder via feces dan via urine in het afvalwater en het zuiveringsslib terecht komen.

De verbindingen die in hoge concentraties in de bodem worden aangetroffen, lijken op die in mest, bijvoorbeeld de antibiotica Sulfadimidine, Enrofloxacin, Tetracycline, Chloortetracycline, Trimethoprim en Sulfadiazine. Voor een aantal antibiotica kunnen de gegevens van Krause vergeleken worden met gegevens uit Vlaanderen (ILVO_VMM, 2017). Hieruit blijkt dat de maximale waarden van antibiotica in drijfmest uit de literatuurstudie van Krause meestal veel hoger liggen dan die gemeten in het onderzoek van ILVO/VMM. In deze laatste studie werden de grootste bruto-emissiewaarden voor veterinaire antibiotica op landbouwgronden berekend voor volgende antibiotica: Oxytetracycline, Doxycycline, Neomycine, Flumequine, Sulfadiazine en Tilmicosine.

Zowel volgens Krause et al. (2021) als van de Broek et al. (2024) zijn er in tegenstelling tot urine weinig wetenschappelijke studies over medicijnresten in menselijke feces. Sarah van den Broek heeft een review uitgevoerd van gepubliceerde literatuur⁶⁵ om de kansen en uitdagingen van het gebruik van meststoffen afgeleid van menselijke uitwerpselen in landbouwsystemen te onderzoeken (van den Broek et al., 2024). Daarin worden twee Chinese studies geciteerd die antibiotica in menselijke feces onderzochten. In één onderzoek (Zhang et al., 2023) werden ontlastingsmonsters verzameld van oudere personen die in drie maanden geen antibiotica hadden gebruikt. Van de 78 gescreende antibiotica werden er 18 geïdentificeerd in 74 van de 140 fecale monsters, met maximale concentraties variërend van 0,6 tot >5.000 µg/kg (Norfloxacin en Oxytetracycline). Twee macroliden, Azithromycine en Tilmicosine, vertoonden hoge detectiefrequenties met maximale concentraties van >300 µg/kg. De gegevens suggereren dat de aangetroffen antibiotica afkomstig waren van voedsel of blootstelling aan de omgeving, o.m. omdat ook veterinaire antibiotica (zoals Tilmicosine) in menselijke feces werden aangetroffen⁶⁶.

Sinds 2005 worden analyses van rioolwater gebruikt om een breed scala aan biomarkers in het afvalwater te volgen. Deze vertellen bijna real-time en met een hoge geografische resolutie iets over een bepaalde populatie. Het kan gaan om gedrag (druggebruik of voedingspatroon), blootstelling (aan bestrijdingsmiddelen en industriële stoffen) en gezondheid (pathogenen of medicijngebruik)⁶⁷.

⁶⁵ Zie het overzicht in paragraaf 6.1.2.8.

⁶⁶ Voor Tilmicosine kunnen we deze gegevens vergelijken met metingen in drijfmest van mestkalveren (gemiddeld 143 µg/kg, met maximale waarde 1.149 µg/kg) en van mestvarkens (gemiddeld 6 µg/kg, met maximale waarde 221 µg/kg) (ILVO_VMM, 2017).

⁶⁷ Magazine Water Matters, juni 2020, *Wastewaterbased epidemiology: rioolwater als spiegel van de samenleving*.

Het Europees Drugs Agentschap (EUDA) onderzoekt het afvalwater op aanwezigheid van drugs in tientallen steden, waaronder Brussel en Antwerpen, zowel in lidstaten van de Europese Unie als daarbuiten. Antwerpen is koploper voor drugsresten van cocaïne en MDMA⁶⁸.

AquaFin werkt samen met universiteiten om deze analyses op *influent* rioolwater uit te voeren. Daarnaast voert AquaFin uiteraard analyses op het effluent afvalwater van RWZI's (opgevolgd door VMM) en voert het ook bijkomend onderzoek naar nieuwe pollutanten in het effluent water⁶⁹.

In een rapport van de VMM (VMM, 2017) werd een berekening gemaakt van de influent- en effluentvrachten van medicijnen in afvalwater van RWZI's in Vlaanderen (zie bijlage 12.1.2). Iopromide, gabapentine, amidotrizoïnezuur, naproxen, sotalol, hydrochloorthiazide en propranolol hebben de hoogste influentvrachten (> 900 kg). Gabapentine, iopromide, amidotrizoïnezuur, sotalol en hydrochloorthiazide hebben de hoogste effluentvrachten (> 900 kg) (VMM, 2017).

Uit de influent gegevens van 45 Nederlandse RWZI's (Schmitt, 2017) bleek de aanwezigheid van medicijnresten in rioolwater, zoals: Metformine, Cafeïne, Beta-sitosterol, Jomeprol, Jopromide, Paracetamol, Joxialaminezuur, Ibuprofen, Daidzeine, Dipyridamol, Oxazepam, Codeïne, Temazepam, Metoprolol, Carbamazepine, Diclofenac, Sotalol, Naproxen, Gemfibrozil. In dezelfde studie werden ook antibioticaresiduen bepaald: miprofloxacin, sulfamethoxazol, sulfapyridine, trimethoprim, norfloxacin, doxycycline, sulfadiazine en tetracyclines.

Het milieurisico van *medicijnresten* wordt voornamelijk beoordeeld op basis van hun *ecotoxicologische effect* in ontvangende wateren, hun gedrag in de bodem en hun opname door organismen en planten.

Krause et al. (2021) vermelden volgende resultaten uit diverse studies:

- De toevoer van hoeveelheden *antibiotica* per hectare per jaar bij optimale bemesting met menselijke urine ligt ten minste 100 keer lager in vergelijking met varkens- en rundveemest. Hormonen laten een trend zien die in dezelfde richting wijst, met uitzondering van 17a-ethinylestradiol. (Winker et al., 2009)
- Het ecotoxicologische risico voor bodems als urine uit urine scheidende toiletten werd gebruikt als meststof: laag risico voor trimethoprim en diclofenac, potentieel hoog risico voor het antibioticum sulfamethoxazol. (Bischel et al., 2015)
- De volgende menselijke farmaceutische residuen in rioolslib vormen een bijzonder risico voor de bodem en worden aanbevolen als indicatoren voor risicobeoordeling of kwaliteitsborging (Konradi et al., 2004) en (Konradi en Vogel, 2013):
 - ▶ Antibiotica: ofloxacin, ciprofloxacin, norfloxacin, roxithromycine, ciproflaxine, sulfamethoxazole;
 - ▶ Pijnstiller: diclofenac
 - ▶ Anti-epilepticum: carbamazepine;
 - ▶ Hormonen: ethinylestradiol, estradiol;
 - ▶ Bètablokker: metoprolol
 - ▶ Lipide modifierend middel (cholesterol verlager): fenofibraat.

Een Zwitserse studie (Schinkel et al., 2025) onderzocht de concentraties antibiotica, conserveermiddelen met antimicrobiële eigenschappen en diverse andere microverontreinigingen in vergist zuiveringslib en in

⁶⁸ Bron: EUDA, https://www.euda.europa.eu/publications/html/pods/waste-water-analysis_en

⁶⁹ AquaFin en de VMM lieten analyses uitvoeren voor een 30-tal rioolwaterzuiveringsinstallaties op de aanwezigheid van PFAS in het effluent afvalwater van RWZI's. <https://www.aquaFin.be/nl-be/over-aquaFin/wat-doen-we/onderzoek-innovatie/pfas-opsporen-en-verwijderen-in-de-waterzuivering>

menselijke fecale compost. Residu's van deze stoffen in vergist zuiveringsslib van 29 Zwitserse RWZI's, afkomstig van 2,6 miljoen mensen (30% van de Zwitserse bevolking), werden vergeleken met residu's in compost van de inhoud van droogtoiletten na thermofiele compostering, afkomstig van 10.000 mensen. Fluorochinolonen (een groep breed spectrum antibiotica) en conserveermiddelen domineren in Zwitsers zuiveringsslib met gewogen gemiddelde concentraties van 6500 µg/kg en 2300 µg/kg op een totaal van 11.000 µg/kg voor 39 onderzochte stoffen. De verontreiniging met deze stoffen in vergist zuiveringsslib was in heel Zwitserland relatief constant. De concentraties in fecale compost (350 µg/kg na 12 weken) waren ongeveer 30 keer lager dan in rioolslib. De concentraties antibiotica in fecale compost (72 µg/kg) liggen 90x lager in vergelijking met zuiveringsslib.

Het verontreinigingspatroon verschilde tussen compost en slib. Terwijl antibiotica 57% uitmaken van de totale belasting van de onderzochte stoffen in zuiveringsslib, is dat slechts 17% in compost van menselijke mest. Chemicaliën die worden gebruikt in down-the-drain-toepassingen, bijv. (methyl)benzotriazol, conserveermiddelen uit persoonlijke verzorgingsproducten of corrosie-inhibitoren, zijn minder relevant in compost. Daarentegen maken de 'andere' medicijnresten in compost 74% uit van de totale belasting. De niveaus van andere microverontreinigingen in compost worden gedomineerd door metformine en amisulpride (70%), die respectievelijk worden gebruikt als medicijnen tegen diabetes type 2 en als antipsychoticum. Dierlijke mest die als meststof wordt gebruikt, kan gecombineerde fluorochinolongehaltes bevatten tussen 15 en 600 µg/kg (Zhang et al., 2015) of in sommige gevallen zelfs tot 3000-8000 µg/kg (Martínez-Carballo et al., 2007; Qian et al., 2016). De fluorochinolonconcentraties in mest zijn dus ook veel hoger dan in compost.

6.1.2.3 Pesticiden

In het kader van een Europees platform voor *humane biomonitoring* is onderzocht welke bestrijdingsmiddelen gevonden worden in de urine van mensen⁷⁰. Dit onderzoek is uitgevoerd bij mensen die dichtbij een fruitboomgaard wonen én bij mensen die op grotere afstand daarvan wonen. In de urine van zowel de kinderen als de volwassenen zijn resten van verschillende typen bestrijdingsmiddelen gevonden. Het ging om middelen tegen insecten, onkruid en schimmels. Deze stoffen kunnen afkomstig zijn van de omgeving, gebruik in huis en tuin, en/of van de voeding. De bestrijdingsmiddelen die het vaakst bij de Nederlandse deelnemers voorkwamen in de urine waren Acetamiprid (bij 93%) en Chloorprofam (bij 75%). Acetamiprid is een insecticide dat wordt gebruikt op fruitbomen en onder andere ook op aardappelen. Chloorprofam is een onkruidverdelger, vooral gebruikt op uien en aardappelen. Uit het onderzoek blijkt alleen óf er blootstelling aan een bestrijdingsmiddel is geweest. Het onderzoek zegt niets over hoe hoog de blootstelling was. In het Europese project SPRINT wordt op grote schaal onderzoek gedaan naar de aanwezigheid van bestrijdingsmiddelen in het milieu, dieren en mensen. Tien verschillende landen, waaronder België en Nederland, hebben eraan meegewerkt. Bij meer dan 700 mensen is bloed afgenomen en is de feces en de urine onderzocht. Het onkruidbestrijdingsmiddel glyfosaat is het meest en in de grootste hoeveelheden gevonden.⁷¹ Een review van onderzoek over humane blootstelling aan en gezondheidseffecten van glyfosaat (Słojewska et al., 2025) maakt melding van 0,8-2,8µg/l glyfosaat in urine bij 8-100% van de deelnemers.

⁷⁰ Onderzoek van het RIVM samen met het IRAS (Institute of Risk Assessment Sciences - Universiteit Utrecht) in het kader het Europees project HBM4EU: <https://www.rivm.nl/bestrijdingsmiddelen/omwonenden/europees-onderzoek-bestrijdingsmiddelen-in-urine>

⁷¹ Bron: WUR, <https://www.wur.nl/nl/nieuws/170-verschillende-bestrijdingsmiddelen-aangetroffen-in-milieu-dieren-en-mensen-in-nederland.htm> en de SPRINT website <https://sprint-h2020.eu/index.php/resources/publications>.

De in het kader van het Waalse humane biomonitoringsprogramma (Jacques A., 2025) waargenomen concentraties verontreinigende stoffen liggen in dezelfde orde van grootte als die in andere Europese landen, of liggen zelfs lager voor chemische stoffen waarvoor de afgelopen jaren op Belgisch en/of Europees niveau beperkingen gelden, zoals PFAS (PFOA en PFOS), glyfosaat, chloorpyrifos, bisfenol A of bepaalde organochloorverbindingen. Het BMH-Wal-programma laat zien dat wettelijke beperkingen de concentraties van verontreinigende stoffen in de lichamen van de Walen effectief verminderen.

Voor *glyfosaat en zijn metabolieten* werden concentraties in de urine vastgesteld bij 18,5% van de deelnemers boven de detectielimiet van $<0,08\mu\text{g/l}$; de concentratie voor het 95%-percentiel bedroeg $0,13\mu\text{g/l}$. Deze waarden liggen lager dan vergelijkbare Vlaamse waarden uit 2014 (P95 = $0,39\mu\text{g/l}$), mogelijk omdat in de tussentijd al enige restrictieve maatregelen m.b.t. het gebruik werden genomen.

Bij Walen van 40 tot 59 jaar zijn de hoogste concentraties gemeten niet-specifieke metabolieten van *organofosfaatpesticiden* diethylfosfaat (DEP) en dimethylthiofosfaat (DMTP), met een kwantificeringsfrequentie van respectievelijk 83% en 41% en P95's van respectievelijk $8,2$ en $2,9\mu\text{g/l}$. De specifieke metaboliet van chloorpyrifos (TCPY) werd in 90% van de monsters gekwantificeerd met een mediane concentratie (P50) van $0,23\mu\text{g/l}$ en een P95 van $1,1\mu\text{g/l}$. Andere metabolieten werden in minder dan 10% van de geanalyseerde monsters aangetroffen.

Zoals verwacht werd 3-PBA, een veelvoorkomende metaboliet van een groot aantal *pyrethroïde pesticiden*, in hogere concentraties gemeten in de urine van Waalse volwassenen van 40 tot 59 jaar (DF = 89%, P50 = $0,40\mu\text{g/l}$, P95 = $2,6\mu\text{g/l}$), ruim vóór t-DCCA (DF = 59%, P50 = $0,19\mu\text{g/l}$, P95 = $1,70\mu\text{g/l}$) en DBCA, een specifieke metaboliet van deltamethrin (DF = 42%, P95 = $1,74\mu\text{g/l}$).

Van de 14 *organochloorpesticiden* die bij Waalse volwassenen (40-59 jaar) zijn gemeten, werden er in sommige monsters slechts 3 in concentraties boven de LOQ aangetroffen: HCB in 22% van de monsters, b-HCH in 14% van de monsters en 4,4'-DDE in 35% van de monsters. Deze werden enkel in het bloed gemeten.

De berekende referentiewaarden voor alle pesticiden (95 percentiel) die in urine van Waalse volwassenen (40-59 jaar) zijn gemeten, zijn opgenomen in de tabel in paragraaf 12.2.5. Het totaal van alle in urine gemeten pesticiden (95 percentielwaarden opgeteld) bedraagt $20,32\mu\text{g/l}$.

In Vlaanderen werden eveneens metabolieten van organofosfaatpesticiden in urine onderzocht (Steunpunt_O&G, 2024). Voor de leeftijdsgroep 14-15 jarigen bedraagt de som van dimethylfosfaat (DMP), DMTP, DEP en TCPY gemiddeld $17,6\mu\text{g/l}$, met als P90 $58,9\mu\text{g/l}$. Voor de leeftijdsgroep 20-40 jarigen bedraagt de som van DMP, DMTP en DEP gemiddeld $11,5\mu\text{g/l}$, met als P90 $41,9\mu\text{g/l}$.

Voor de pyrethroïde pesticiden bedraagt de concentratie in urine bij 50-65 jarigen van 3-PBA gemiddeld $0,544\mu\text{g/l}$ (Steunpunt_O&G, 2019).

In Nederland hebben een journalist en enkele proefpersonen hun *ontlasting en urine onderzocht op de aanwezigheid van pesticiden*⁷². Na twee weken gangbaar voedsel te hebben geconsumeerd bevatte de ontlasting van de proefpersoon 72 microgram bestrijdingsmiddelen per kg droge stof en de urine $4,7$ microgram per liter. Er werden in het totaal 20 stoffen gevonden in de ontlasting en 8 in de urine.

Na twee weken uitsluitend biologische voeding te hebben geconsumeerd bevatte zowel de ontlasting als de urine een totale opgetelde concentratie van alle stoffen die ruim 4 maal lager was dan na de twee weken

⁷² Bron: <https://www.krantvandeearde.nl/bestrijdingsmiddelen-in-ons-lichaam/>

gangbare voeding. Het aantal stoffen dat werd aangetroffen was ongeveer gehalveerd. Bij een ander persoon werd 0,99µg/l glyfosaat in de urine gemeten⁷³.

We hebben geen studies teruggevonden waarbij pesticiden in feces geanalyseerd werden, terwijl we wel studies vonden die deze stoffen in urine analyseerden. Een vergelijking tussen bestrijdingsmiddelenresidu's in menselijke uitscheidingen en die in dierlijke mest of zuiveringslib van rioolwater is dan moeilijk. Een recent onderzoek naar *pesticiden in koeienmest* in Nederland (Bruinenberg M., 2023) stelde de concentraties van verschillende pesticiden vast (zie bijlage 12.2.4). Het totaal van de bestrijdingsmiddelen in de koeienmest belooft 813,3µg/kg DS. Uit de tabel blijkt het aandeel van glyfosaat en zijn metabooliet AMDA samen voor 88% mee te tellen in het totaalcijfer. De concentratie van alle pesticiden in de mest van koeien kan moeilijk worden vergeleken met de schaars beschikbare gegevens voor feces van mensen⁷⁴. Er is een significant positieve correlatie tussen residu's van werkzame stoffen van insecticiden en herbiciden in weidemest enerzijds en de hoeveelheid enkelvoudige voeders (eiwitrijke voeders, bijproducten) anderzijds. Ook was de gemiddelde som van alle werkzame stoffen (zonder glyfosaat/AMPA) per monster hoger op de gangbare bedrijven (43µg per kg droge stof) dan op de biologische bedrijven (20µg per kg droge stof). Glyfosaat was afwezig in alle monsters bij biologische bedrijven.

Een studie (Rousis et al., 2021) toont aan dat metingen van menselijke urinemetabolieten van herbiciden en insecticiden in *onbehandeld afvalwater* van stedelijke gebieden (in Spanje, Italië, Portugal en Zwitserland) nuttig kunnen zijn om de blootstelling van de bevolking aan specifieke pesticiden te beoordelen. Deze studie geeft voor het eerst ruimtelijke en temporele verschillen in menselijke blootstelling aan organofosfaten en breidt informatie uit over blootstelling aan pyrethroïden. De geschatte innames werden vergeleken met de ADI en potentiële risico's voor de menselijke gezondheid kwamen aan het licht in sommige gemeenschappen. In Vlaamse RWZI's wordt *effluentwater* gemonitord op pesticidenresidu's. In het effluent van 16 RWZI's verspreid over Vlaanderen werden in de periode 2020-2022 in totaal 50 verschillende pesticiden aangetroffen. Aminomethylfosfonzuur en glyfosaat werden in alle metingen teruggevonden met een gemiddelde concentratie van respectievelijk 2.300ng/l en 711ng/l⁷⁵.

6.1.2.4 **Microplastics**

Menselijke inname van microplastics is onvermijdelijk vanwege de alomtegenwoordigheid van microplastics: naast voedselproducten en water kunnen microplastics ook afkomstig zijn van voedselverwerking, verpakking of bereiding en van neerslag uit de lucht. In een meta-studie werd na analyse van gegevens uit 59 publicaties een gemiddelde massa voor individuele microplastics in het 0-1 mm groottebereik berekend. Mensen krijgen wereldwijd gemiddeld 0,1-5 g microplastics per week binnen via verschillende blootstellingsroutes. Het maximaal gemiddeld gewicht van 5g per week is het equivalent gewicht van een bankkaart (Senathirajah et al., 2021).

⁷³ Bron: <https://rinekediokinga.nl/blog/bestrijdingsmiddelen-en-iouw-darmgezondheid/>

⁷⁴ Een indicatieve vergelijking met de Nederlandse proefpersoon (zie eerder), lijkt erop te duiden dat pesticiden in humane feces een factor 10 of 40 lager kunnen liggen, afhankelijk van de voeding, dan in koeienmest. Deze indicatieve vergelijking is niet gebaseerd op statistisch relevant onderzoek.

⁷⁵ Bron: VMM, Pesticiden in het effluent van RWZI's 2020-2022.

In de volgende studies werden *microplastic deeltjes* in feces, urine en in compost van bioafval onderzocht:

- Feces: 20 deeltjes van 50-500- μm diameter gedetecteerd in 10 g feces; grotere deeltjes dan 500 μm kwamen niet voor (Schwabl et al., 2019).
- Feces bevat tot 14 $\mu\text{g/g}$ aan microplastics (Luqman et al., 2021).
- Urine: onderzoek naar aanwezigheid van microplastics is pas recent begonnen (O’Callaghan et al., 2024). Micro- en nanoplastics werden vastgesteld in 54% van de onderzochte urinestalen. Gemiddeld 2 microfibrillen (10-871 μm) per 100ml en 1 fragment (0,01nm-6 μm) per 100ml (Barnett et al., 2023).
- Compost/digestaat/percolaat: 14-895 deeltjes van minimaal 1mm diameter per kilogram DS en een niet-gespecificeerde hoeveelheid kleinere deeltjes (Weithmann et al., 2018).

Figuur 5 Aantal microplasticdeeltjes per kg droge stof digestaat of compost

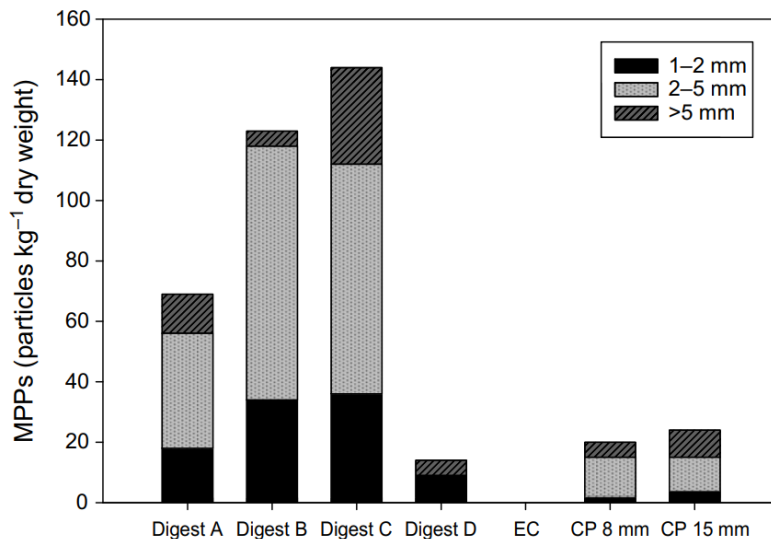


Fig. 1. Size fractions of MPPs in different fertilizers. Digests A/B/C/D, biowaste digester; EC, energy crop digester; CP 8 mm/15 mm, biowaste composting plant.

Bron: Weithmann et al., 2018

In de grafiek uit het onderzoek van Weithmann et al. (2018) worden de in detail onderzochte stalen van één bioafvalcomposteringsinstallatie en één bioafvalvergister in Duitsland weergegeven.

De bioafvalcomposteringsinstallatie verwerkt het bioafval van huishoudens met een bijna gelijke hoeveelheid groenafval uit het gebied. De installatie verwijdert potentieel niet-biologisch afbreekbaar materiaal, inclusief plastic, zo grondig mogelijk door een reeks zeef- (80 mm), metaalscheidings- en handmatige sorteerstappen. Het resterende materiaal wordt vervolgens overgebracht naar een boxcomposter. De installatie biedt twee soorten commerciële, kwaliteit gecontroleerde, gecertificeerde compost, gezeefd door respectievelijk 8- en 15-mm mazen. Beide composten (CP 8mm en CP 15mm) werden bemonsterd.

De batch bioafvalvergister verwerkte voornamelijk bioafval van huishoudens met de toevoeging van wat groenafval en af en toe energiegewassen. Het mengsel wordt direct in de vergister gebracht zonder

voorbehandeling. Operators verwijderen de verontreinigende materialen uit de uiteindelijke compost met behulp van een of twee zeefstappen. Van deze verwerking werden twee rijpe composten (Digest A en B), een niet-gerijpte meststof (Digest C) en het gepoolde percolaat (Digest D) geanalyseerd.

Een agrarische vergister die alleen energiegewassen zoals maïs/graskuilvoer en, in mindere mate, gemalen tarwe verwerkt en geen bioafval, diende als referentie (Energycrop=EC). Het monster werd genomen uit de uitlaat van de navergister (end-of-process).

Daarnaast werden nog andere stalen gescreend op microplastics partikels (niet in grafiek) afkomstig van:

- een commercieel verkrijgbare meststof van een bioafvalvergister, die alleen afval uit de handel verwerkt: 895 deeltjes >1mm per kg droge stof
- digestaatmonsters van 10 extra agrarische biogasinstallaties, die voedermiddelen, zonnebloemen of afval van fruitverwerking verwerken, samen met de reguliere energiegewassen: 0 tot 11 deeltjes >1mm per kg droge stof

Het aantal deeltjes in compost van 50% gft-afval en 50% groenafval (20-25/kg DS) en in (al dan niet) gecomposteerd digestaat van hoofdzakelijk gft-afval (70-145/kg DS), in vergelijking met digestaat van energiegewassen (0 deeltjes), toont aan dat gft-afval meer microplastics bevat dan groenafval of energiegewassen.

Wat uit de vermelde studies kan afgeleid worden, is dat in commerciële, gecertificeerde compost en digestaat meer microplastics (in gewicht) kunnen zitten dan in feces⁷⁶. In feces zitten grote aantallen kleine microplastics (tot maximaal 500µm), in compost/digestaat zitten veel grotere deeltjes van 1-5mm (terwijl de kleine deeltjes niet werden gemeten).

In een Chinese studie (Yan et al., 2022) die een positieve correlatie vaststelde tussen de concentratie van microplastics in feces en de ernst van Inflammatory Bowel Disease (IBD) vinden we meer informatie over microplastics in feces.

Microplastics werden gedetecteerd in de ontlasting van alle 102 deelnemers, ongeacht of ze gezonde deelnemers of IBD-deelnemers waren. De gemiddelde concentraties microplastics in feces van gezonde mensen en IBD-patiënten waren respectievelijk 28,0 en 41,8 deeltjes/g DS. De grootte bereiken van de microplastics die werden gedetecteerd in feces van gezonde en IBD-deelnemers waren respectievelijk 4,4-333,2 µm en 1,7-393,8 µm. In beide groepen waren de meeste microplastics (99,7% bij de gezonde en 97,5% bij de IBD-deelnemers) kleiner dan 300 µm. Er werden significante distributievverschillen waargenomen in deze kleine microplastics. Het percentage microplastics kleiner dan 50 µm in feces van IBD-patiënten ($54,9 \pm 16,6\%$) was significant hoger ($p < 0,001$) dan dat in de ontlasting van gezonde deelnemers ($45,1 \pm 15,8\%$). Het percentage microplastics van 50-300 µm in feces van IBD-patiënten ($42,6 \pm 15,9\%$) was significant lager dan dat in feces van gezonde deelnemers ($54,6 \pm 15,5\%$).

Door een vragenlijstonderzoek te combineren met de kenmerken van fecale microplastics, concluderen de onderzoekers dat de plastic verpakking van drinkwater en voedsel en blootstelling aan stof belangrijke bronnen zijn van menselijke blootstelling aan microplastics. Bovendien suggereert de positieve correlatie tussen fecale microplastics en IBD-status dat blootstelling verband kan houden met het ziekteproces of dat IBD

⁷⁶ Aangezien de partikelgrootte in menselijke mest niet groter is dan een halve millimeter en dat in de compost geen deeltjes van minder dan 1 mm geteld werden, is de vergelijking onvolledig, maar desondanks kan berekend worden dat het gewicht van microplastics per kg droge stof in compost van bioafval enkele keren hoger kan liggen dan in feces.

de retentie van microplastics verergert. De relatieve mechanismen verdienen nader onderzoek. De resultaten benadrukken ook dat de analyse van fecale microplastics nuttig is voor het beoordelen van menselijke microplastics-blootstelling en mogelijke gezondheidsrisico's.

Of de inname van microplastics een substantieel risico vormt voor de menselijke gezondheid is nog niet duidelijk. Niet alleen de microplastic deeltjes zelf (hun grootte,...), maar ook toxische stoffen en additieven in microplastics leveren mogelijk een risico voor milieu- en gezondheid. Er moet op dit domein nog veel onderzocht worden⁷⁷.

Krause et al. (2021) besluiten dat het onduidelijk blijft of microplastics een probleem vormen in de context van het recyclen van menselijke feces en urine, omdat ze op verschillende plaatsen in het milieu voorkomen, met name in de hydrosfeer, en geen probleem vormen dat specifiek is voor het recyclen van meststoffen afkomstig van droogtoiletten.

Microplastics kunnen door mensen worden opgenomen en uitgescheiden met de ontlasting; het menselijk lichaam is echter niet de bron van microplastics. Zolang er geen uitgebreide behandeling van microplastics in rioolwaterzuiveringsinstallaties is, verschilt de verspreiding van compost uit menselijke ontlasting niet van de verspreiding van riolslib in de landbouw of van het lozen van gezuiverd afvalwater in het oppervlaktewater. (Boness, 2020).

Uit een studie in het Verenigd Koninkrijk (Lofty et al., 2022) blijkt dat microplastics met een partikel grootte van 1-5mm volledig uit het influent van een RWZI worden gezuiverd en terechtkomen in het zuiveringsslib. Uit de studie van UGent (Vercauteren M., 2021a) blijkt dat microplastics met een partikel grootte van 25-1.000µm voor 97% uit het influent van RWZI's worden gezuiverd zodat maar zo'n 3% terecht komt in het effluent. Een klein of groot deel (12% tot 94%) van de microplastics komen terecht in het zuiveringsslib, afhankelijk van weersomstandigheden (droog/nat) weer.

Het aantal microplastic deeltjes in rioolwaterzuiveringsslib varieert van 1.500-170.000MPs/kg DS, waarbij de deeltjes grootte varieert van 1µm tot 5.000µm (Casella C., 2023).

6.1.2.5 PFAS

In een Zweedse studie (Fletcher et al., 2022) werden feces- en urinemonsters verzameld van meer dan 200 deelnemers, waarbij parallelle metingen van meerdere PFAS werden uitgevoerd. Gemeentelijk drinkwater dat verontreinigd was met PFAS werd in Ronneby (Zweden) naar gezinnen verdeeld. De bron was blusschuim dat sinds het midden van de jaren 80 in de buurt werd gebruikt. Schoon water werd verstrekt vanaf december 2013. Het doel van de studie was de omvang na te gaan van fecale versus urine uitscheiding voor PFAS in een populatie die sterk was blootgesteld aan PFAS.

Voor PFOA waren de mediane concentraties 10 ng/ml in serum (bloed), 0,02 ng/ml in urine en 0,6 ng/g drooggewicht in feces, overeenkomend met geschatte eliminatiesnelheden van respectievelijk 28 en 17 ng/dag via urine en feces. Fecale eliminatie was over het algemeen minder dan urinaal, mediane ratio 0,45. Equivalente mediane fecale/urinale dagelijkse eliminatie ratio's waren 0,18 voor PFHxS en 3,65 voor PFOS. Fecale eliminatie is belangrijk, maar voor sommige PFAS, bv. L-PFOS, is de urinale eliminatie veel groter.

⁷⁷ Gezondheidsraad Nederland, Briefadvies Gezondheidsrisico's van microplastics in het milieu, 15 december 2016, publicatienr. 2016/17.

Perfluorverbindingen worden verspreid over het hele lichaam, met de hoogste gehalten in de lever, nieren en in het bloed. In het bloed komen ze voor gebonden aan bloedeiwitten. Door menstruatie kunnen vrouwen sneller perfluorverbindingen uit het lichaam verwijderen dan mannen of dan vrouwen in menopauze (Steunpunt_O&G, 2021).

We kunnen de cijfers voor PFOA uit Zweden (waarden in bloed/serum) vergelijken met de metingen uit het humaan biomonitoringsprogramma bij volwassenen van 40 tot 59 jaar in Wallonië (mediaanwaarde 1,06 µg/L; 95-percentiel 2,50 µg/L) en met metingen bij 20-40 jarigen (gemiddelde 3,23 µg/L) en 50-65 jarigen in Vlaanderen (gemiddelde 2,82 µg/L; mediaan 2,94 µg/L; 95-percentiel 6,31 µg/L). Zie tabel in bijlage 12.2.7 en de factsheet 'Perfluorverbindingen' van het Steunpunt Omgeving en Gezondheid (Steunpunt_O&G, 2021). De waarden bij de Zweedse gebruikers van met PFAS besmet drinkwater liggen duidelijk hoger.

De door de Duitse Nationale Biomonitoring Commissie vastgestelde HBM I-waarde voor de algemene bevolking (respectievelijk 2 µg/L en 5 µg/L voor PFOA en PFOS in serum) werd door respectievelijk 11,3% en 14,6% van de Waalse volwassenen van 40 tot 59 jaar overschreden voor PFOA en PFOS. Geen enkele deelnemer bereikte de HBM II-drempelwaarde voor PFOA, maar de HBM II-drempelwaarde (20 µg/L) werd door één deelnemer (0,3%) overschreden voor PFOS.

De som van 7 PFAS⁷⁸ overschreed bij 94% van de deelnemers de eerste drempelwaarde van 2 µg/L en bij 0,7% de drempelwaarde van 20 µg/L.

In het kader van een generieke meetcampagne in 2021, uitgevoerd door Aquafin, werd vastgesteld dat er gemiddeld 32 µg/kg droge stof PFAS in het ontwaterd RWZI-slib aanwezig is, en respectievelijk 57 µg/kg droge stof PFAS in het gedroogde slib, wat in lijn ligt met resultaten uit Nederland. Gezien er geen afzet naar de landbouw is, wordt geen specifieke toetsing aan de toetsingswaarden (15 µg/kg DS) uitgevoerd⁷⁹.

De aanwezigheid van PFAS in RWZI slib is niet enkel het gevolg van menselijke feces of urine. Er zijn immers veel andere bronnen waardoor PFAS in het rioolwater terecht kunnen komen. PFAS zijn bestand tegen hoge temperaturen en zijn water-, vuil-, en vetafstotend. Daarom worden ze veel gebruikt in industriële toepassingen en consumentenproducten. Denk aan de antiaanbaklaag in pannen, cosmetica, textiel, brandblusschuim, schoonmaakmiddelen of smeermiddelen⁸⁰.

In een Frans-Canadees onderzoek (Munoz et al., 2022) werden PFAS gekarakteriseerd in 47 organische producten die worden gebruikt in landbouwgebieden in Frankrijk, inclusief historische en recente materialen. Het betreft producten afkomstig van stedelijk afval (zuiverings-slib van RWZI's, compost van groenafval en zuiverings-slib, compost van bioafval, compost van vast stedelijk afval, digestaat van stedelijk afval), producten afkomstig van agrarisch afval (stalmest van melkvee, varkensmest, pluimveemest, compost van stalmest van

⁷⁸ De som van 7 PFAS: PFOA (lineair en vertakt), PFOS (lineair en vertakt), PFHxS, PFNA, PFDA, PFUnDA, MeFOSAA. In het BMH-Wal-programma werden de vertakte vormen van FOA en PFOS, PFUnDA en MeFOSAA echter niet gemeten. Daarom worden de somwaarden voor de studiedeelnemers onderschat. Voor de berekening van de som werden waarden onder de detectiegrenswaarde vervangen door de detectiegrenswaarde (worst case-benadering).

⁷⁹ Bron: Parlementaire vragen en antwoorden nr. 330 van MIEKE SCHAUVLIEGE, 29 januari 2025.

⁸⁰ Bron: <https://www.vlaanderen.be/pfas-vervuiling/over-pfas>

melkvee, digestaat van varkensmest) en producten afkomstig van industrieel afval (papierslib en verbrandingsas).

In totaal werden 160 PFAS uit 42 klassen gedetecteerd door middel van target screening en homologe gebaseerde non-target screening. Target PFAS waren laag in landbouwafval, zoals varkensmest, pluimveemest of mest van melkvee (mediaan \sum_{46} PFAS: 0,66 $\mu\text{g}/\text{kg DS}$). Hogere PFAS-niveaus werden gerapporteerd in stedelijk en industrieel afval, slib van papierfabrieken, riolslib of restcompost van huishoudelijk afval (mediaan \sum_{46} PFAS: 220 $\mu\text{g}/\text{kg DS}$).

In producten van stedelijk afval ($n = 24$) varieerden de maximale Σ PFAA-concentraties als volgt, afhankelijk van het producttype: zuiveringsslib van RWZI's (370 $\mu\text{g}/\text{kg DS}$), compost van groenafval en zuiveringsslib (180 $\mu\text{g}/\text{kg DS}$), compost van restafval van stedelijk vast afval (94 $\mu\text{g}/\text{kg DS}$), compost van gemeentelijk bioafval (10 $\mu\text{g}/\text{kg DS}$), digestaat van stedelijk afval (0,76 $\mu\text{g}/\text{kg DS}$). Over het algemeen vertoonden PFOS en PFOA de hoogste detectiepercentages, respectievelijk 100% en 96%. PFOS was ook dominant in het PFAA-samenstellingsprofiel en vertegenwoordigde gemiddeld 57% van de Σ PFAA. Andere opvallende PFAA's waren PFOA (15% van Σ PFAA), PFHxA (6,3%), PFDA (4,8%) en PFDoA (2,3%). Nog eens 27 PFAA's vormden samen minder dan 15% van de totale PFAA's.

Uit de tijdreeks van historische slibmonsters van afvalwaterzuiveringsinstallaties blijkt dat PFOS geleidelijk toeneemt: de concentraties waren laag in de jaren 1976-1980 ($\sim 12 \mu\text{g}/\text{kg DS}$), maar waren halverwege de jaren 1990 met een orde van grootte toegenomen ($\sim 120 \mu\text{g}/\text{kg}$), wat overeenkomt met de sterke toename van de wereldwijde PFOS-productie in de periode 1970-1990 (Paul et al., 2009).

In de zomer van 2021 voerden de verschillende waterbedrijven in Vlaanderen op vraag van de Vlaamse Milieumaatschappij een op risico gebaseerde monitoringscampagne voor PFAS uit (VMM, 2022b). Daarbij werd de volledige keten voor *drinkwater* van bron tot kraan doorgelicht. De stalen werden getoetst aan de zogenaamde PFAS-20 norm, de norm die Europa voorziet voor het meten van de 20 meest relevante soorten PFAS in het water. Het ruwwater van de Vlaamse waterbedrijven komt voor ongeveer de helft uit grondwater en de helft uit oppervlaktewater. In de studie van 2021 werden in totaal 98 stalen op oppervlaktewater en 313 stalen op grondwater onderzocht. De belangrijkste conclusies zijn:

- Bij geen enkele meting in oppervlaktewater is de toetsingswaarde drinkwater (100 nanogram per liter) overschreden. Bij 1 grondwaterwinning werd die toetsingswaarde wel overschreden.
- De gemiddelde concentratie voor alle onderzochte PFAS is lager dan 6,4 ng/l in oppervlaktewater en lager dan 1,3 ng/l voor grondwater.
- De top 5 van meest voorkomende PFAS in oppervlaktewater zijn: PFOA, PFHxA, PFBS, PFPeA en PFHpA. Voor grondwater zijn de meest voorkomende PFAS: PFBS, PFPeA, PFOA, PFHxA en PFOS.

In onderzoek van VITO (Colles, 2022) werd 6:2 FTS teruggevonden in stalen van alle watertypes (irrigatie-, regen- en leidingwater). De resultaten voor 6:2 FTS in deze studie zijn veel hoger (44-29-55ng/l) dan de meetresultaten gerapporteerd door VMM in drinkwater (2021) en in oppervlaktewater en grondwater bestemd voor productie van drinkwater (2022). Het is nog niet duidelijk wat daar de reden voor is. Dit zou verder moeten onderzocht worden.

Sommige PFAS worden gebruikt bij de productie van bestrijdingsmiddelen (zie ook paragraaf 6.2.2). *Trifluorazijnzuur (TFA)*, een erg korte PFAS-molecule, is vooral afkomstig uit pesticiden⁸¹. De stof kwam recent in het nieuws omdat ze in veel hogere concentraties *in drinkwater* wordt teruggevonden dan de meer gekende PFAS⁸² en dan vooral in gebieden met intensieve landbouw.

Slechts bij 8 van de 287 metingen die Vivaqua sinds begin 2021 heeft uitgevoerd werden concentraties van minder dan 0,5 µg/l vastgesteld (hoogst vastgestelde waarde was 1,9µg/l). De gemeten TFA-concentratie in het drinkwater van Farys ligt lager dan 4,5 µg/l, dus onder de nieuwe Vlaamse gezondheidkundige advieswaarde van 15,6 µg/l. Ook Water-Link heeft bij metingen concentraties vastgesteld van maximaal 4,9 µg/l. De Watergroep heeft in West-Vlaamse drinkwaterbekkens vrij hoge waarden gemeten. De hoogste waarden werden opgetekend in bekkens in Zillebeke (8,3µg/l), Dikkebus, in De Blankaart, de watertoren in Roksem (allemaal meer dan 7 µg/l), Zedelgem, Koekelare, Poperinge en Houthulst (6 µg/l en meer).

Begin 2022 voerde de VMM een eerste oriënterende onderzoek uit om de diffuse verspreiding door PFAS in het ondiepe *freatische grondwater* in Vlaanderen na te gaan (VMM, 2022a). De VMM onderzocht het grondwater van bijna 200 willekeurige ondiepe freatische putten op de aanwezigheid van 45 verschillende PFAS. De belangrijkste vaststellingen uit het onderzoek zijn:

- 17 van de 45 onderzochte PFAS werden gedetecteerd. Het gaat om onder andere 12 stoffen van de PFAS-20 en de 10 stoffen uit de grondwaterrichtlijn. De frequentst voorkomende PFAS zijn PFBA, PFBS, PFOA en PFOS, zowel in hogere als lagere concentraties.
- De norm van de drinkwaterrichtlijn (som 20 PFAS) wordt op 6% van de locaties overschreden. De strengere EFSA-ricisogrens, die als richtwaarde op lange termijn wordt gezien, wordt op 46% van de locaties overschreden. Die vaststelling is mogelijk het gevolg van puntverontreinigingen.

6.1.2.6 PAK's

Polycyclische aromatische koolwaterstoffen (PAK's) zijn veelvoorkomende milieuverontreinigende stoffen die ontstaan door de onvolledige verbranding van organische materialen. De belangrijkste antropogene bronnen van PAK's zijn de verbranding van vaste brandstoffen voor verwarmingsdoeleinden, illegale afvalverbranding, wegtransport en industrieën die op fossiele brandstoffen draaien. PAK's kunnen gemakkelijk het lichaam binnendringen omdat ze in alle elementen van het milieu aanwezig zijn, waaronder water, bodem, lucht en voedsel.

De PAK-blootstelling wordt beoordeeld door middel van technieken om de concentratie van 1-hydroxypyreen in menselijke urine te meten (Styszko et al., 2023). Naast deze verbinding zijn de meest frequent bepaalde biomarkers naftaleen- en fluoreenmetabolieten. De hoogste concentraties van 1-hydroxypyreen (15,4µg/l) en van 1- en 2-hydroxynaftaleen (46 en 36µg/l), evenals 2-hydroxyfluoreen (27µg/l), worden geassocieerd met beroepsmatige blootstelling (bv. arbeiders in cokesfabrieken, asfaltwerkers in de wegenbouw). Tot op heden zijn PAK-metabolieten in feces alleen geanalyseerd in diermodellen voor PAK-blootstelling.

⁸¹ Pesticiden zijn een belangrijke bron van TFA, maar de stof wordt ook gebruikt in geneesmiddelen zoals antidepressiva. Hij ontstaat ook wanneer gelekte koelgassen uit koelkasten en airco's afbreken in de atmosfeer, de (intussen verboden) CFK's en HFK's.

⁸² Bronnen: <https://www.bruzz.be/actua/milieu/hoe-pfas-en-pesticiden-ons-drinkwater-bedreigen-2025-01-16> en <https://www.vrt.be/vrtnews/nl/2024/10/23/tfa-ultrakorteketen-pfas-in-drinkwater/>

In het humaan biomonitoringsprogramma voor Wallonië werden naftaleenmetabolieten in hogere concentraties aangetroffen in de urine van volwassenen van 40 tot 59 jaar (P50 = 2,33 en 0,43 µg/l voor respectievelijk 2- en 1-naftol), bij kwantificeringsfrequenties van respectievelijk 90% en 52% voor 2- en 1-naftol. Andere metabolieten werden gekwantificeerd in percentages variërend van 9% tot 52%. Alle PAK-metabolieten opgeteld geeft een maximale waarde (p95) van 55µg/l in de urine van volwassenen van 40 tot 59 jaar.

6.1.2.7 Dioxines

In een studie (Beníšek et al., 2015) werd de belasting van compost en digestaat verzameld in 16 Europese landen (88 monsters) onderzocht. Gemeten concentraties van 2,3,7,8-tetrachloordibenzo-p-dioxine (2,3,7,8-TCDD)-equivalenten (TEQbio) werden vergeleken met concentraties van polycyclische aromatische koolwaterstoffen (PAK's) en geselecteerde gechloreerde verbindingen, waaronder polychloordibenzo-p-dioxinen/furanen (PCDD's/F's), coplanaire polychloorbifenylen (PCB's), indicator-PCB-congeneren en organochloorpesticiden (OCP's).

De mediane concentraties van TEQbio (dioxine-achtige verbindingen) bepaald door de in vitro-assay in ruwe extracten van verschillende soorten compost varieerden van 0,05 tot 1,2 met een maximum van 8,22 µg (TEQbio)/kg DS. Uit het pan-Europese onderzoek naar verontreiniging met organische verontreinigingen bleek dat de kwaliteit van de compost over het algemeen goed was. Het merendeel voldeed aan de conservatieve normen die in sommige landen worden gehanteerd.

De resultaten van de analyses zijn opgenomen in bijlage 12.2.8.

6.1.2.8 Overzicht

De reeds eerder geciteerde studie van Sarah van den Broek (van den Broek et al., 2024) heeft een review uitgevoerd van gepubliceerde literatuur om de kansen en uitdagingen van het gebruik van meststoffen afgeleid van menselijke uitwerpselen in landbouwsystemen te onderzoeken. In onderstaande tabel brengen ze een overzicht van veel voorkomende verontreinigingen in urine, feces, septisch slib, compost van menselijke mest, zwart water en rioolwater.

Tabel 15 Voorbeelden van veelvoorkomende verontreinigingen in verschillende afvalstromen en humane compost

Source	Urine	Feces	Fecal sludge	Compost	Blackwater	Sewage/ WWTP influent
Inorganic contaminants						
Metals	Magnesium Zinc Copper (Effebe et al., 2019; Koch and Rotard, 2001)	Lead Zinc Copper (Koch and Rotard, 2001; Rose et al., 2015)	Copper Zinc Nickel (Gros et al., 2020)	Iron Zinc Copper (Häfner et al., 2023)	Zinc Copper Nickel (Gros et al., 2020)	Zinc Manganese Copper (Cheng et al., 2022)
Microplastics	Polypropylene Polyethylene vinyl acetate Polyvinyl chloride (Pironti et al., 2023)	Polyethylene Polystyrene Polypropylene (Basri K et al., 2021; Luqman et al., 2021)	No data available	No data available	Polyethylene terephthalate Polypropylene Polyethylene (Ó Briain et al., 2020)	Acrylic Acrylonitrile-butadiene Polystyrene acrylic (Liu et al., 2021)
Organic contaminants						
Pharmaceuticals	X-ray contrast media Analgesics Antiepileptic drugs (Lienert et al., 2007a)	Gestagens Cytostatics Antihypertensives (Lienert et al., 2007a)	Antihypertensives Beta-blockers Antidepressants (Gros et al., 2020)	Salicylic acid Allopurinol Carbamazepine (Häfner et al., 2023)	Antidepressants Beta-blockers Diuretics (Gros et al., 2020)	Acetaminophen Naproxen Acetylsalicylic acid (Park et al., 2020)
Personal care products	Monoethyl phthalate Monobutyl phthalate (Pineda et al., 2023)	Methylparaben Ethylparaben Propylparaben (Moscoso-Ruiz et al., 2023)	No data available	No data available	Benzophenone Tonalide (Westhof et al., 2016)	Galaxolide Tonalide (Reif et al., 2011)
Persistent organic pollutants	2-hydroxynaphthalene 1-hydroxynaphthalene 2-hydroxyfluorene (Deng et al., 2023)	Tetrachlorodibenzo-p-dioxins Polychlorinated biphenyls (Fernández-González et al., 2015)	No data available	No data available	No data available	Perfluorohexane sulfonate Perfluoropentanoic acid N-methyl perfluorooctane sulfonamidoacetic acid (Moneta et al., 2023)
Microbial contaminants						
Pathogens	<i>Human polyomavirus 2</i> <i>Aeromonas</i> spp. <i>Clostridium perfringens</i> (from fecal contamination) (Bischel et al., 2015)	<i>Enterococcus</i> spp. <i>Rotavirus</i> <i>Giardia lamblia</i> (Lalander et al., 2013; Schönning et al., 2007)	<i>E. coli</i> <i>Salmonella enterica</i> <i>V. cholerae</i> (Harper et al., 2023)	<i>Clostridium thermocellum</i> <i>Pseudomonas</i> sp. <i>Serratia</i> sp. (Aburto-Medina et al., 2020)	<i>Salmonella typhi</i> <i>Escherichia coli</i> <i>Vibrio cholerae</i> (Xu et al., 2023)	<i>Norovirus</i> <i>Campylobacter</i> spp. <i>Cryptosporidium</i> spp. (Daso et al., 2012)
Resistance to antibiotics	Sulfonamide Tetracycline (Bischel et al., 2015; Zhou et al., 2021)	Fluoroquinolone Beta-lactamase Tetracycline (Abramova et al., 2023)	Beta-lactamase Fluroquinolone Gentamicin (Gomi et al., 2024)	Sulfamethoxazole Erythromycin Gentamicin (Werner et al., 2022)	Beta-lactamase (Londong et al., 2021)	Aminoglycoside Tetracycline Fluoroquinolone (Honda et al., 2023)

Bron: van den Broek et al. (2024)

6.1.3 Geschiktheid voor gebruik in de landbouw

De specifieke landbouwkundige toepassing van meststoffen afkomstig van menselijke uitwerpselen hangt grotendeels af van hun macronutriëntengehalte en nutriëntenverhoudingen. Andere relevante eigenschappen zijn onder meer het zoutgehalte, watergehalte en de fysieke structuur.

Er moet ook rekening worden gehouden met de Vlaamse context, zoals beschreven in (Nutricycle, 2022): *“De Vlaamse bemestingsnormen zijn ingesteld op maximaal toelaatbare gift van N en P. Organisch materiaal, zoals compost, waterzuiveringsslib, mest of digestaat is gekenmerkt door een verhoogde P gehalte waardoor men er slechts relatief beperkte hoeveelheden op land mogen worden afgezet alvorens de norm te bereiken. Dat betekent dat deze organische materialen niet gewenst en dus niet geschikt zijn voor afzet op Vlaamse landbouwbodem wanneer beschouwd vanuit het perspectief van P bemesting (door reeds hoge aanwezigheid van P in onze bodems). Niettemin hebben deze zelfde Vlaamse bodems een uitgesproken nood aan organische koolstof opbouw voor het handhaven van onze bodemstructuur, bodemleven en algemene bodemfertiliteit. Een schijnbare tegenstelling dus : door de hogere P in dergelijke stromen is afzet in Vlaanderen minder geschikt, doch door het progressief verlies aan bodem organisch materiaal is er een duidelijke nood aan verhoogde input aan organische koolstof in onze landbouwbodems.”*

Vergelijking van de C/P-verhouding toont aan dat Duitse compost van festivals (Mühlenberg, 2024) een C/P-verhouding heeft die varieert van 10 tot 15. Afhankelijk van hoeveel groenafval wordt toegevoegd kan dit oplopen tot een C/P van 19, wat in de buurt zit van gft-compost (C/P=21), maar ver onder groencompost (C/P=38). VLACO maakte de berekening van de maximale aanbreng effectieve organische stof voor een reeks van organische meststoffen en bodemverbeteraars, rekening houdende met de P-limiet van 55 kg/ha (VLACO, 2021). Hieruit bleek dat met groencompost (2.073kg/ha) meer effectieve organische stof per hectare kan aangebracht worden dan met het telen van graan (en onderwerken van het stro +/-1.500kg/ha) of met groenbemesters (430kg/ha). Humane compost kan dus onder of in de buurt zitten van gft-compost (1.146kg/ha).

Krause et al. (2021): Mensen scheiden plantvoedingsstoffen voornamelijk uit via de urine: ~90% van de stikstof (N), 50 tot 65% van de fosfor (P) en 50 tot 80% van de kalium (K). Deze verdeling wordt weerspiegeld in de verhouding van de voedingsstoffen N, P en K in urine en feces; de NPK-verhouding in urine is ~18:2:5 en in feces (droge stof) is deze ~3:1:1. Urine is daarom rijk aan N en feces rijk aan P.

Urine wordt verder gekenmerkt door een uitgebalanceerde N-K-verhouding, die overeenkomt met de voedingsbehoeften van veel gewassen; het P-gehalte is echter vrij laag. Urine gebaseerde meststoffen zijn daarom goed geschikt voor bodems met P-overschotten. Ter vergelijking (zie tabel in bijlage 12.2.4): digestaat en varkens- of rundveemest hebben een veel nauwere N-P-verhouding, waardoor er een risico is op overbemesting met P bij het proberen voldoende N te leveren. Bodems met een laag P-gehalte kunnen profiteren van meststoffen op basis van feces, die goede P-leveranciers zijn, vergelijkbaar met digestaat en vloeibare mest. Het grootste deel van het calcium (Ca) en magnesium (Mg) dat door mensen wordt uitgescheiden, bevindt zich in de feces.

Krause et al. (2021): Naast de totale hoeveelheid voedingsstoffen in meststoffen is hun beschikbaarheid voor planten een kritische eigenschap. Aangezien de minerale vormen van N in meststoffen—ammonium (NH₄⁺) en nitraat (NO₃⁻)—wateroplosbaar zijn, zijn ze potentieel direct beschikbaar voor planten. Recyclingmeststoffen

met een hoog aandeel minerale N hebben over het algemeen een *goed bemestingseffect op korte termijn*. De ionische N-vormen verschillen echter in mobiliteit binnen de bodemoplossing: NH_4^+ kan zich gemakkelijk binden aan de negatief geladen kleideeltjes en organische materie (fixatie), of kan worden geconsumeerd door micro-organismen (immobilisatie), terwijl NO_3^- zeer mobiel is en vatbaar voor uitspoeling.

Feces bevat een aanzienlijk deel organisch gebonden N (Norg) en wordt daarom vaker gekenmerkt door een *lange termijn bemestingseffect*. Voor compost afkomstig van menselijke mest is de beschikbaarheid van de voedingsstoffen voor planten vergelijkbaar met die in compost die is afgeleid van grondstoffen van plantaardige of dierlijke oorsprong. De voedingsstoffen zijn voornamelijk gebonden in de organische matrix en kunnen worden gemineraliseerd.

Verse urine heeft een zeer lage organische C tot N-verhouding van <1 . Urine en van urine afgeleide meststoffen zijn daarom N-meststoffen met een hoge direct beschikbare voedingswaarde onder de vorm van ureum, NH_4^+ of NO_3^- . Daarentegen hebben feces een significant hogere C tot N-verhouding, wat bijdraagt aan humusvorming, C-binding en C-opslag in de bodem en aan de verbetering van de bodemstructuur, de toename van het waterhoudend vermogen en de pH van de bodem.

Vanwege de goede bemestende eigenschappen is urine geschikt als vervanger voor synthetische meststoffen bij de teelt van gewassen zoals maïs, bonen, tarwe, gerst of miscanthus.

Een langdurig experiment in Denemarken met 11 jaar herhaalde toediening van urine onthulde dat het equivalent van minerale meststof, en dus de verhouding van N-gebruiksefficiëntie vergeleken met minerale NPK-meststof, 82% kan bereiken (Gómez-Muñoz et al., 2017).

Bij de toepassing van gerecycleerde mestproducten, zoals compost van menselijke mest of vloeibare meststoffen op basis van menselijke urine, moet rekening gehouden worden met het feit dat het nitraat- en fosforresidu in sommige landbouwgronden al vrij hoog is.

Het Mestdecreet bakent sinds 1996 fosfaatverzadigd gebied af. Alle gebieden die op basis van een bemonstering met een probabiliteit van 95% een fosfaatverzadigingsgraad hebben vanaf de kritische grenswaarde voor fosfaatdoorslag van 35%, worden vanaf 1 januari 2012 als fosfaatverzadigde gebieden beschouwd. Volgens berekeningen gaat om 64 km². Op de landbouwgronden die in fosfaatverzadigd gebied liggen, wordt de bemesting beperkt tot 40 kg P₂O₅ per hectare per jaar.

Vanuit wetenschappelijk oogpunt (Vlassak et al., 2001) moet de grensconcentratie voor oppervlaktewater op 0,1 mg P/l liggen (nu 0,3) en de kritische grenswaarde voor de fosfaatverzadigingsgraad op 25 % (nu 35 %). Het fosfaatverzadigd gebied breidt drastisch uit tot 1812 km² als uitgegaan wordt van 25 % fosfaatverzadiging en 3.827 km² indien met een 80 % betrouwbaarheidsinterval wordt gewerkt (momenteel is het betrouwbaarheidsinterval decretaal vastgelegd op 95 %)⁸³.

Bovendien is aangetoond dat fosfaten veel gemakkelijker uit- en afspoelen naar grond- en oppervlaktewater, dan aanvankelijk aangenomen. Vanwege de vertraagde uitspoeling van fosfaat zal de kwaliteit van grond- en oppervlaktewater de komende tien jaar in sterke mate bepaald worden door de historische fosfaatgiften en in mindere mate door de toekomstige giften. In het bijzonder in gronden met hoge grondwaterstand zal fosfaat mobiel worden en dit zal leiden tot verhoogde fosfaatconcentraties in grond en oppervlaktewater, voornamelijk door directe uitspoeling.

⁸³ Bron: <https://www.vlm.be/nl//SiteCollectionDocuments/Mestbank/Studies/Deel%201A.pdf>

Er zijn ook *mogelijke landbouwriscos* verbonden aan het recyclen van meststoffen uit menselijke uitwerpselen. Afhankelijk van het dieet heeft urine vaak een *verhoogd zoutgehalte* in de vorm van natriumchloride (NaCl), wat de elektrische geleidbaarheid van de bodem kan verhogen. Afhankelijk van de hoeveelheid of frequentie van toediening kan overtollig NaCl zoutgevoelige gewassen beïnvloeden of een negatieve impact hebben op de bodemstructuur.

Er konden echter geen negatieve effecten op de bodemvruchtbaarheid en plantengroei, gerelateerd aan zoutophoping in de bodem, worden gedetecteerd na 11 jaar van continue urinetoeëpassing in Denemarken (Gómez-Muñoz et al., 2017). Verzilting treft voornamelijk bodems in droge en semi-aride gebieden met weinig neerslag, of waar geen uitspoeling plaatsvindt. Er is echter meer onderzoek nodig om dit risico volledig te beoordelen. De impact van verzilting van de bodem en het grondwater moet ook worden vergeleken met die van andere, conventionele meststoffen.

6.2 OPERATIONELE TOEVOEGSTOFFEN

In veel gevallen bestaan gerecycleerde producten van droogtoiletten niet alleen uit menselijke uitwerpselen. Veel voorkomende toevoegstoffen zijn toilet gerelateerde materialen zoals toiletpapier, strooiselmateriaal of detergents, en toevoegstoffen voor compostering of urinebehandeling. Hieronder wordt het risicopotentieel van toevoegstoffen besproken, met de nadruk op fytosanitaire gevaren, verontreiniging en hun geschiktheid voor de landbouw.

6.2.1 Fytosanitaire gevaren van toevoegstoffen

Fytohygiëne houdt zich bezig met het elimineren van plantpathogenen of onkruidzaden. Dit is vooral relevant voor meststoffen die worden gerecycleerd uit plantaardige afvalstoffen, zoals compost. Het toevoegen van materialen zoals keukenafval, groenafval, stro of andere oogstresten aan de menselijke mest is raadzaam voor de compostering, omdat dit het ontbindingsproces en de kwaliteit van de resulterende meststof optimaliseert. Maar het brengt mogelijk plantpathogenen of onkruidzaden met zich mee. Normaal gezien zal het composteerproces, met hoge temperaturen gedurende een voldoende lange periode, in combinatie met de bijbehorende vochtigheid, afrekenen met deze fytosanitaire risico's. Verder spelen microbiële activiteiten in het rotproces, antagonistische effecten of toxische afbraakproducten ook een rol bij het elimineren van plantpathogenen of onkruidzaden (Krause, Häfner, Augustin, & Udert, 2021).

6.2.2 Verontreinigingen in toevoegstoffen

Het gewone *toiletpapier* van tegenwoordig veroorzaakt weinig of geen extra verontreinigingen⁸⁴. Bleekprocessen op basis van chloor werden vervangen door processen op basis van zuurstof peroxide en ozon, ontinkten in het recyclageproces zorgt voor de verwijdering van zware metalen.

Vochtige doekjes bestaan uit polyester stoffen die niet biologisch afbreekbaar zijn, wat bijdraagt aan microplasticvervuiling. Ze zijn veruit het meest voorkomende vreemde materiaal in toiletten. Bovendien bevatten ze hoge concentraties van desinfecterende middelen, geurstoffen en andere chemische

⁸⁴ Bron: <https://www.test.de/Toilettenpapier-Drei-klare-Sieger-1390020-0/>

toevoegingen. Vochtige doekjes vormen ook een fysisch probleem in op water gebaseerde sanitaire systemen: wanneer ze in het toilet worden doorgespoeld, raken ze in de rioolkanalen verstrikt, waardoor verstoppingen ontstaan⁸⁵.

Toiletten, recipiënten en leidingen worden regelmatig gereinigd, waarvoor detergenten, geur neutraliserende stoffen en parfums worden gebruikt. *Reinigingsproducten* kunnen natriumhypochloriet (NaClO – in bleekwater), oppervlakte-actieve stoffen, fosfaten, fosfonaten, enzymen, optische witmakers en siliconen bevatten. Om het risico van verontreiniging te beperken, dient men resoluut te kiezen voor 100% bioafbreekbare producten of producten met effectieve micro-organismen.

Strooiselmateriaal wordt in droogtoiletten gebruikt om vocht en geuren te absorberen en als visuele camouflage. Deze materialen kunnen bestaan uit zaagsel, houtsnippers, biochar, steenmeel (basalt, zeoliet, kleimineralen), houtas, compost of een mengsel hiervan.

Zagemeel en schavelingen van zuiver en onbewerkt/onbehandeld hout bevatten doorgaans weinig verontreinigende stoffen. In houtzagerijen wordt het zagemeel aan de machines afgevoerd naar containers of andere opslagvoorzieningen zodat het risico op contaminatie met andere vervuilende stoffen klein is. Bewerkt of behandeld hout kan een verscheidenheid aan verontreinigingen bevatten, zoals alkanen, alkenen, aromaten, terpenen, gehalogeneerde koolwaterstoffen, esters, aldehyden en ketonen.

Strooiselmateriaal zou volgens de studie van TDM schimmels (*Aspergillus*) kunnen bevatten, maar dit werd in die studie niet aangetoond.

Biochar kan zware metalen en organische verontreinigende stoffen bevatten zoals PCB's, dioxinen of polycyclische aromatische koolwaterstoffen (PAK's), afkomstig van de grondstof of als gevolg van de procesparameters en carbonisatiemethoden. Krause et al. (2021) schatten het risico op de aanwezigheid van deze verontreinigende stoffen in biochar laag in omdat moderne carbonisatiemethoden gestuurde processen zijn en omdat moet voldaan worden aan de vereisten van het Europees Biochar Certificaat.

Houtas kan zware metalen, zoals cadmium en zink, PAK's en dioxines bevatten, al naargelang welk hout (al dan niet met verontreinigingen) wordt verbrand, de houtkwaliteit, brandcondities (zuurstof, temperatuur, ...) (Janssens G., 2020).

De wisselende samenstelling en de concentraties zware metalen en arseen zijn knelpunten voor de toepassing van houtas als meststof. Door de wisselende samenstelling is zonder chemische analyse niet goed vast te stellen wat er aan de bodem wordt toegevoegd. Dit leidt ook tot een grote beperking vanuit de wetgeving: voor opname op de lijst van toegestane meststoffen is namelijk een constante samenstelling gewenst. Maar ook de relatief hoge concentraties aan zware metalen en arseen vormen hierin een belangrijk knelpunt (Oosterbaan A., 2013).

Omdat compost van menselijke mest doorgaans bestaat uit 1/3 feces en 2/3 toevoegstoffen (in volume), is de kwaliteit van de toevoegstoffen van groot belang. Naast het strooisel hebben we het dan vooral over *vers (groen) materiaal (gras, gehakseld snoeihout, gft)* dat wordt toegevoegd om het compostingsproces te optimaliseren.

⁸⁵ Zie resultaten onderzoek plastic in rivieren in Deel 2.

Groente-, fruit- en tuinafval kan bijvoorbeeld moeilijker te elimineren tomatenzaadjes en onkruidzaden bevatten.

Voorzichtigheid moet worden in acht genomen bij het gebruik van *bermmaaisel* omdat dit een verhoogde concentratie van zware metalen en PAK's kan bevatten (afhankelijk van de nabijheid van drukke verkeerswegen). Bermmaaisel bevat doorgaans ook heel wat stoorstoffen (onder de vorm van weggegooid afval). Het is een toegelaten inputstroom voor vergistingsinstallaties, onder bepaalde voorwaarden. In Vlaanderen: verplichte nacompostering (om een voldoende afdoding van plantpathogenen en onkruidzaden te kunnen garanderen)⁸⁶. In Wallonië: verplichte hygiëniserende (1u 70°C) + geen kiemkrachtige zaden⁸⁷.

Plantaardig materiaal dat behandeld werd met pesticiden kan uiteraard *residu's van pesticiden*, maar ook van PFAS, bevatten. PFAS's, perfluoralkyl fosfinezuren en fluortelomeeralcoholen worden gebruikt als inactief ingrediënt (hulpstof) in pesticiden. Het totale verbruik van actieve bestanddelen voor gewasbeschermingsmiddelen in de EEA bedraagt 5479 ton/jaar voor gewasbeschermingsmiddelen – 2% van het totale PFAS-verbruik (Aerts A, 2024). Bijna een kwart van alle actieve ingrediënten in conventionele pesticiden in de VS bestond uit organofluorinen en 14% uit PFAS. Voor actieve ingrediënten die in de afgelopen 10 jaar zijn goedgekeurd, was dit gestegen tot 61% organofluorinen en 30% PFAS (Donley et al., 2024).

FOD Gezondheid zegt daarover: "PFAS afkomstig van gewasbeschermingsmiddelen hebben niet noodzakelijk dezelfde impact op milieu of gezondheid als PFAS afkomstig van andere bronnen, gelet op de diverse groep van PFAS. Er moet benadrukt worden dat een werkzame stof slechts goedgekeurd wordt wanneer het niet als een zeer persistente en zeer bioaccumulerende stof wordt gekenmerkt. De wetgeving voor gewasbeschermingsmiddelen belet dus heel expliciet dat dergelijke stoffen kunnen worden verkocht en gebruikt."⁸⁸

Ook bij de productie van uit urine gerecycleerde meststoffen worden bepaalde toevoegstoffen gebruikt. Bij de productie van struviet ontstaat een kristallijne verbinding door de toevoeging van magnesiumzouten. Voor de abiotische stabilisatie van ureum in urine worden pH-regulatoren gebruikt (calciumhydroxide, schelpkalksteen, azijn, citroenzuur, zwavelzuur,...). Lactofermentatie biedt een biotische vorm van ureumstabilisatie door verzuring met melkzuurbacteriën.

Samenvattend, bij het toevoegen van chemicaliën aan urine moet er goed op gelet worden dat er geen kritische onzuiverheden worden overgebracht naar het uiteindelijke meststofproduct.

6.2.3 Geschiktheid voor gebruik in de landbouw

Bij het composteren van menselijke mest worden normaal gezien keukenafval en etensresten, groenafval, stro of andere oogstresten, biochar en klei toegevoegd om het composteringsproces te ondersteunen door:

- goede verhoudingen van nutriëntrijk en koolstofrijk materiaal,
- organische fracties die gemakkelijk afbreekbaar zijn en die stabiel zijn en bijdragen aan humificatie,

⁸⁶ Bron: Biogas-E, artikel 'OVAM wil vereisten voor de verwerking van bermmaaisel onder de aandacht brengen' van 07.06.2016. Berm- en natuurmaaisel dat middels een voorvergisting met nacompostering wordt verwerkt moet qua hygiëniseringsvereisten voldoen aan punt 7.1.3.3. van het Algemeen Reglement van de Certificering van organisch-biologisch afval tot grondstof.

⁸⁷ Bron: FOD Gezondheid, Lijst van toegelaten en niet-toegelaten grondstoffen voor de vergisting met het oog op de valorisatie van digestaat in de landbouw (versie 2.4 van 06/12/2024).

⁸⁸ <https://fytoweb.be/nl/gewasbeschermingsmiddelen/gebruik/professionele-gebruiker/pfas#risico>

- droge en vochtige materialen in evenwicht te brengen.

Deze combinatie heeft een positieve invloed op het ontbindingsproces en verbetert de kwaliteit van de compost. Materialen zoals keukenafval en etensresten dragen verder bij aan voedingsstoffen en vocht; groenafval verhoogt het C-gehalte van de compost; klei draagt mineralen bij, d.w.z. secundaire voedingsstoffen en sporenelementen die belangrijk zijn voor de plantengroei; en groenafval, stro en biochar verbeteren de beluchting in het composteringsmateriaal vanwege hun fysieke structuur.

De tabel in bijlage 12.2.4 geeft de nutriënten-inhoud van enkele toevoegstoffen.

Het belang van de toevoegstoffen en van compost in het algemeen ligt wellicht niet in de nutriënten-inhoud maar in het organisch materiaal dat aan verarmde landbouwgrond kan teruggegeven worden. De voordelen van koolstofopbouw in de bodem met behulp van compost worden besproken in paragraaf 7.1.1.4.

Bij het toepassen van gerecyclede meststoffen op basis van urine die zijn geproduceerd door ureumstabilisatie via pH-regulering, moet aandacht besteed worden aan de beschikbaarheid van de voedingsstoffen voor de plant. Een verdunning om het sterk alkalische of zure effect van de meststof te verzachten, kan nodig zijn voordat de meststof wordt aangebracht.

6.3 STOORSTOFFEN

Stoorstoffen in droogtoiletten bestaan uit hygiëneproducten, verpakkingsmateriaal en glas, evenals de inhoud van chemische toiletten.

Hygiëneproducten (zoals tampons, maandverband, luiers, condooms, enz.) belanden vaak in toiletten door onjuiste verwijdering. Deze materialen zijn grotendeels niet-biologisch afbreekbaar, maar de meeste kunnen worden verwijderd door de grondstoffen te zeven vóór het composteren en het extra zeven van de afgewerkte compost.

Glas, blikjes, wegwerpbare bekertjes en ander verpakkingsafval kunnen ook in de afvalcontainers van droogtoiletten terecht komen door onjuiste verwijdering. Om verwondingen bij oogsters of kwaliteitsverlies van het geoogste materiaal te voorkomen, mogen in Duitsland alleen composten die een fijne zeef hebben ondergaan (0–10 mm) en grotendeels vrij zijn van vreemde materialen, worden gebruikt in de groenteteelt. Om deze reden zijn goede voorlichting en bedieningsinstructies voor toiletgebruikers van vitaal belang om te voorkomen dat onjuist afgevoerde materialen worden opgenomen en om de productie van hoogwaardige recyclingmeststoffen te garanderen.

Draagbare *chemische toiletcassettes* worden veel gebruikt in caravans. Het is niet ongebruikelijk bij grote evenementen, snelwegserviceplaatsen, campings, enz., dat de inhoud van chemische toiletcassettes in (openbare) watertoiletten of droogtoiletten wordt leeggemaakt. Chemische toevoegvloeistoffen bevatten formaldehyde, paraformaldehyde, glutaraldehyde, glyoxal of quaternary ammonium compounds (QAC's) als biocidemiddelen. Alcoholen (met name npropanol) kunnen aan deze biociden worden toegevoegd om hun effectiviteit te vergroten. Vanwege de hoge concentraties aan stoffen die schadelijk zijn voor het milieu is de inhoud van chemische toiletten niet geschikt voor gebruik in de landbouw.

Om te voorkomen dat droogtoiletten besmet raken met inhoud van chemische toiletten, zijn informatie voor gebruikers, duidelijke etikettering en alternatieve verwijderingsopties voor chemische toiletinhoud nodig, samen met een campagne die het gebruik van biologisch afbreekbare producten aanbeveelt of voorschrijft. Duidelijke gebruiksaanwijzingen en alternatieve verwijderingsopties moeten worden geïnstalleerd om ervoor te zorgen dat er zo min mogelijk verontreinigingen in de inzamelingscontainers van droogtoiletten terechtkomen.

7 VERWERKINGSMETHODEN VOOR MENSELIJKE MEST

Krause et al. (2021) stellen dat de transformatie van sanitaire systemen van een lineair afvalmodel naar een circulair kringloopmodel gebaseerd is op technologieën die:

- het gebruik van water als spoel- en transportmiddel zoveel mogelijk vermijden,
- het terugwinnen van plantvoedingsstoffen mogelijk maken,
- materiaalstromen scheiden bij de bron

Onverdunde materiaalstromen maken het mogelijk voedingsstoffen, ziekteverwekkers of verontreinigende stoffen (bijv. zware metalen of medicijnresten) te kwantificeren en specifieke behandeling ervan te voorzien. Doel van de behandeling is het inactiveren van ziekteverwekkers en het elimineren van verontreinigende stoffen om uiteindelijk voedingsstoffen en organisch materiaal veilig te recycleren.

In dit hoofdstuk bespreken we enkele verwerkingsmethoden voor feces en urine. We staan ook stil bij mogelijke voor- en navolgende bewerkingen die pathogenen, farmaceutische residu's en andere gevaarlijke stoffen elimineren en de resultaten van deze bewerkingen.

7.1 VERWERKINGSMETHODEN VOOR FECES

Voor een goed begrip van de verwerkingsmethoden blijven we stil staan bij het algemeen proces, de verschillende varianten en de eindproducten, eerst in algemene zin (meer of minder uitgebreid) en nadien toegespitst op de verwerking van feces.

7.1.1 Composteringstechnieken en gebruik

7.1.1.1 Algemeen proces

Composteren is een proces waarbij micro-organismen allerlei biodegradeerbaar materiaal onder gecontroleerde omstandigheden en in aanwezigheid van zuurstof afbreken (BBT, 2024a), wat resulteert in de productie van een stabiel humusachtig product, d.w.z. compost. Het is het natuurlijke proces van het recyclen van organisch materiaal. Alles wat groeit, ontbindt uiteindelijk; composteren versnelt het proces simpelweg door een ideale omgeving te bieden voor bacteriën, schimmels en andere ontbindende organismen (zoals wormen, pissebedden en aaltjes) om hun werk te doen.

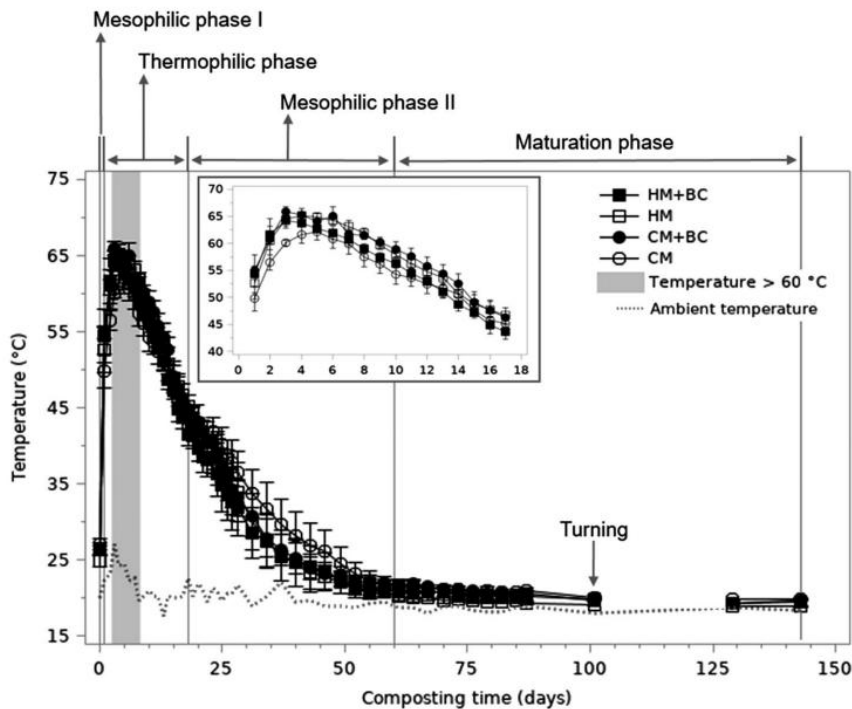
Een groot aantal verschillende micro-organismen zet organische stof door oxidatie met zuurstof om in CO₂ en water. Daarnaast ontstaan, afhankelijk van het uitgangsmateriaal (bv. aanwezige N- en S-verbindingen) een aantal restgassen, zoals ammoniak en vluchtige zwavelverbindingen, die aanleiding kunnen geven tot geurhinder. In vereenvoudigde vorm:

Organische stof + O₂ -> CO₂ + H₂O + restgassen + energie

De niet-biologisch afbreekbare organische en minerale fracties blijven onveranderd achter in het eindmateriaal.

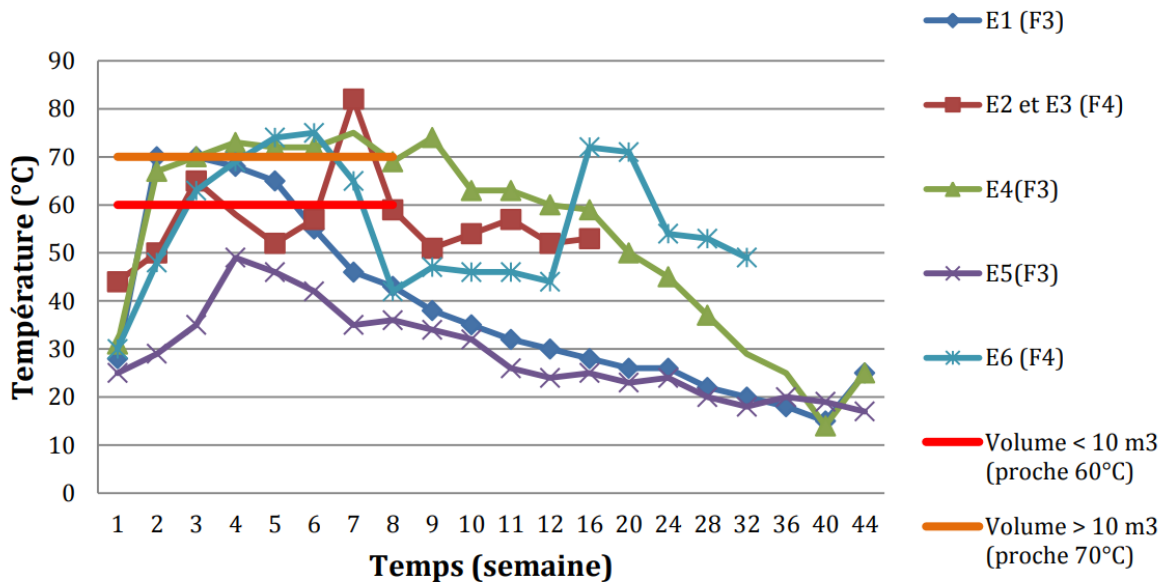
De energie die vrijkomt bij het afbraakproces, gaat voor een deel naar de stofwisselingsprocessen van de micro-organismen en de opbouw van nieuwe biomassa. Het grootste deel komt echter vrij als warmte. Hierdoor neemt de temperatuur in het compostierende materiaal toe, waardoor water uit het materiaal gaat verdampen en potentieel pathogene micro-organismen en onkruidzaden afsterven. De verdamping van water en de afbraak van organisch materiaal veroorzaken samen een aanzienlijke massa- en volumereductie van het compostierende materiaal. Bij langdurige compostering is de resterende massa niet groter dan één derde tot de helft van de oorspronkelijke massa. 30-50% van de droge stof wordt afgebroken. Een eindvochtgehalte van 20-40% en een volumereductie van 60% zijn haalbaar (BBT, 2024a).

Figuur 6 Temperatuursverloop bij compostering



Bron: (Castro-Herrera et al., 2022)

Figuur 7 Temperatuursverloop bij compostering



Bron: studie Toilettes Du Monde, 2017.

Een gecontroleerd composteringsproces kent een korte mesofiele fase (<45°C) in het begin, gevolgd door een langere thermofiele fase (>45°C) en een al of niet nog langer durende (na)rijpingsfase, zoals in de bovenste grafiek is weergegeven. De onderste grafiek toont aan dat de temperatuur op bepaalde momenten terug kan oplopen naar aanleiding van interventies, zoals het keren en bevochtigen van de composthoop.

De bedoeling van composteerinstallaties is zodanige procesomstandigheden te creëren dat de microbiële afbraak optimaal verloopt. Belangrijke procesparameters zijn: zuurstofgehalte, vochtgehalte, structuur (porositeit), temperatuur, C/N en pH.

Een C/N van 20-35/1 in het begin van het composteringsproces, wordt gewoonlijk als optimaal beschouwd. Bij een te lage C/N kunnen de micro-organismen niet voldoende lichaamseigen materiaal produceren (C tekort). Ze leggen minder stikstof vast. Zo komt het in minerale vorm vrij in het composterende materiaal. Dit kan nadien verloren gaan als gas (ammoniak) of ammonium- of nitraatzout in het percolaat.

Om een geschikte C/N te bekomen, is er bij het composteren van (de dikke fractie van) mest of andere C-arme (of zogenaamd 'groene') stromen steeds een bijmenging nodig van C-rijk organisch materiaal zoals stro of hout. Verder kan men ook hulpstoffen als bentoniet (een in de natuur voorkomende natrium-kleisoort) of zeoliet (een vulkanische kleisoort) toevoegen om de emissie van ammoniak door absorptie te verminderen. Een te hoge C/N begrenst dan weer de groei van de micro-organismen door het N-tekort, waardoor de compostering niet goed op gang komt (BBT, 2024a).

De pH van de te composteren materialen is hoger (tussen 8 à 9) en daalt tijdens de compostering om te stabiliseren tussen 6,5 en 7,5.

7.1.1.2 Best Beschikbare Technieken (BBT)

De procesvoering in grote composteerinstallaties wordt mee bepaald door het type verwerkte materialen (groenafval, gft-afval, OBA).

Compostering in open lucht wordt vooral bij groencompostering toegepast. Het te composteren materiaal wordt opgezet in rillen (driehoekige hopen met een hoogte van ca. 1,5 à 2,5m en een voetbreedte van 2,5 à 3m) en tafelhopen (trapeziumvormige hopen met een hoogte van ca. 3m en een voetbreedte van >10m). Omwille van het relatief grote buitenoppervlak zijn rillen extra gevoelig aan weersomstandigheden (regen, wind), wat kan verminderd worden door de rillen af te dekken met semi-permeabele doeken (BBT, 2024a). De beluchting van het compostierend materiaal gebeurt bij compostering in open lucht veelal via natuurlijke ventilatie. Wanneer de natuurlijke ventilatie niet volstaat om het compostierend materiaal van voldoende zuurstof te voorzien, kan overgegaan worden tot actieve (geforceerde) beluchting door middel van ventilatoren.

Het composteringsproces moet ertoe leiden dat de compost beantwoordt aan de vereisten inzake samenstelling, stabiliteit en hygiënisatie. Uit onderzoek bleek dat de afdoding van zo goed als alle schadelijke en pathogene organismen zich voltrekt binnen enkele uren tot enkele dagen na de start van het composteerproces. Enkel voor het zeer hitteresistente TMV (Tabaksmozaïekvirus)⁸⁹ bleek een composteerduur van 6 tot 11 weken noodzakelijk voor een volledige afdoding bij groencompostering. Deze periode ligt binnen de normale composteerduur van groencomposteringen⁹⁰.

Bij *compostering in gesloten systemen* komen halcompostering en tunnelcompostering (vooral bij gft) het meeste voor. Bij halcompostering gebeurt de compostering in een van de buitenlucht afgesloten hal. Het composterende materiaal wordt in de hal opgezet in hopen met een hoogte van ca. 2-4m. Er wordt gebruik gemaakt van automatisch gestuurde transportbandensystemen om de hopen op te zetten, en van automatische machines, b.v. een afgraafrad, voor het omzetten. Het materiaal wordt typisch opgezet in een langgerekte tafelhoop, die bestaat uit verschillende 'velden'. Bij elke omzetbeurt wordt het composterende materiaal overgezet naar een volgend 'veld', zodat het zich verplaatst in de lengterichting van de hal. De lucht uit de hal wordt afgezogen en gedeeltelijk opnieuw gebruikt voor de beluchting. De beluchtingsgraad die nodig is om de gewenste warmteafvoer te realiseren, is vaak dermate hoog dat de zuurstoftoevoer en de vochtafvoer geen beperkende factoren meer zijn. In de praktijk wordt het composteringsproces bij intensieve compostering daarom vaak in hoofdzaak op temperatuur geregeld.

⁸⁹ Het TMV kan de leden van negen plantenfamilies en op zijn minst 125 afzonderlijke soorten infecteren, waaronder tabak, tomaat, paprika (allemaal leden van de nuttige nachtschadefamilie), komkommer, hennep en een aantal sierbloemen. Bron: Wikipedia.

⁹⁰ Bron: <https://emis.vito.be/nl/bbt/bbt-tools/selectiesystemen/afsv/afvaltechnieken/composteren>

Zie ook het ARC (<https://ovam.vlaanderen.be/groenafval-algemeen-reglement-van-de-certificering>) dat in Vlaanderen wordt gehanteerd ter certificatie van compost. Hierin zijn welbepaalde tijd/temperatuur-verhoudingen bepaald voor een gegarandeerde hygiënisatie van de moeilijkst af te doden pathogenen m.n. TMV.



Bij Ecowerf (Leuven) verloopt de hygiëniserende en compostering van gft als volgt: 4 dagen boven 60°C + 10 dagen boven 55°C + 5 weken in de composteringshal met verwarmde beluchting bij min 45 °C + 5 weken narijpen; rijpheidstest + testen voor salmonella, listeria, menselijke en plantaardige pathogenen (bv tabaksmozaïekvirus)⁹¹.

Bij tunnelcompostering heeft de compostering plaats in rechthoekige tunnels met een lengte van 30-40m en een hoogte en breedte van 3-5m. Tijdens het verblijf in de tunnel wordt het materiaal niet omgezet. Wel kan gewerkt worden met 2 of meerdere composteringscycli, waarbij het materiaal tussentijds uit de tunnel gehaald wordt, en na menging en eventueel bevochtiging, in een volgende tunnel wordt ingebracht (het zogenaamde 'omtunnelen').



Als menselijke mest op industriële schaal zou gecomposteerd worden, zal dat wellicht in een aparte installatie moeten gebeuren. In ieder geval moet de compostruimte voor menselijke mest gescheiden worden van de compostering van andere materialen; in die zin is een tunnelcompostering (zoals bv. bij Verko) meer geschikt dan halcompostering⁹².

Er bestaan nog andere composteringstechnologieën, zoals: compostering in gesloten containers of boxen (inhoud 20 tot 40m³), compostering in langwerpige (open) cellen, in roterende trommels in gesloten torens⁹³.

7.1.1.3 Andere composteertechnieken

Toevoegen van extra bacteriën

Er bestaan allerlei producten op de markt die *geselecteerde bacteriën* bevatten die het compostproces zouden ten goede komen (Louis Bolk, 2018).

De 'Controlled Microbial Composting' (CMC)⁹⁴ is een techniek die microbiële processen aanstuurt en controleert. De volgende beginvoorwaarden zijn vereist (Lübke, 1995): zoveel mogelijk *verse* (max. 15% rottende) organische materialen, 10% klei-aarde, 10% afgewerkte compost, een vochtpercentage van 40-60%,

⁹¹ Bron: Ecowerf mondelinge mededeling van Ann Geens op 23/11/2023.

⁹² Bron: Ecowerf mondelinge mededeling van Ann Geens op 23/11/2023.

⁹³ Bron: VITO, BBT-studie composteerinstallaties, 2005.

⁹⁴ Deze composteertechniek is gebaseerd op de oorspronkelijke bevindingen van Dr. Ehrenfried Pfeiffer en is verder geperfectioneerd door het werk van Siegfried en Uta Lübke in Oostenrijk. Vandaag de dag levert het bedrijf (Compost Systems) van de familie Lübke nog steeds compostkennis en -technologie. Bron: Diver, S. (2004). *Controlled Microbial Composting and Humus Management: Luebke Compost ATTRA* — National Sustainable Agriculture Information Service <https://www.biolit-natur.com/media/lubke-kompost-und-biolit-vulkangesteinsmehl.pdf>

een maximaal soortelijk materiaalgewicht van 650kg/m³ en een C/N van 30:1. Wanneer alles goed gemengd is, worden op de tweede dag micro-organismen toegevoegd via de sproeiers van de keermachine. De composttrillen zijn slechts 1-1,4m hoog en 2,5m breed. CO₂-niveau (max.16 à 20%), temperatuur (max.65°C) en vochtigheidsgraad (40-60%) worden dagelijks gecontroleerd en bepalen de frequentie van het keren, waardoor een zuurstofrijke omgeving wordt behouden. In de eerste week wordt éénmaal per dag gekeerd, in de tweede week om de 2 dagen, in de derde week om de 3 dagen en wekelijks voor de verdere weken. Tussen het keren worden de composttrillen afgedekt met een gas doorlatend geotextiel dat beschermt tegen regen, zon en wind. De nitraat- en zwavelcyclus worden gemonitord om het ontgiftings- en nutriëntstabilisatieproces te controleren. Lübke beweert hierdoor een sneller procesverloop te bekomen: “1 week opstart, 2 à 3 weken thermofiele fase (50-65°C) en 3 à 4 weken mesofiele fase (30°C). Na 6 tot 8 weken is het compostingsproces in essentie klaar. Nuttige micro-organismen zorgen voor een gezonde compost (bv. door hygiënisering van rottende bestanddelen) en blijven ook verder actief in de bodem waaraan de compost is toegevoegd.” (Lübke, 1995).

Sommige compostingsbedrijven die bio-compost maken, sproeien het bacterie-preparaat EM over de compoststruggen als die voor de derde keer worden omgezet. Het voordeel van effectieve micro-organismen (EM) is dat er een bacterie in zit die zuurstof aanmaakt in zuurstofloze omstandigheden. Zuurstof is een voeding voor de andere bacteriën, die zich in de compost verder kunnen ontwikkelen. Door de aanwezigheid van deze bacterie hoeven de compoststruggen minder vaak omgezet te worden (Dussen, 2003).

Ander onderzoek (Greff et al., 2022) bevestigt dat onder optimale omstandigheden microbiële inoculanten de thermofiele fase van composting verlengen, de overvloed aan microbiële gemeenschappen reguleren, de mineralisatie van compostingsubstraten versnellen en de vorming van humus bevorderen. Als ze op landbouwgrond worden toegepast, induceren de uiteindelijke compostingsproducten positieve veranderingen in de bodem⁹⁵, stimuleren ze de kieming van zaden en verhogen ze uiteindelijk de productiviteit van gewassen.

Langdurige niet-kerende composting

Deze vorm van (hout)composting werd ontwikkeld door Jean Pain, in België bekend via het comité Jean Pain. De methode Jean Pain ligt aan de grondslag van de zogenaamde ‘biomeilers’ en de ‘Johnson-Su composting’, maar ook van de groencomposting die vandaag door professionele compostbedrijven wordt toegepast. We verwijzen naar de Stichting Biomeiler⁹⁶ en naar David C. Johnson PhD⁹⁷ voor meer informatie.

Nieuwe inzichten bevestigen dat bomen en planten, naarmate ze zich ontwikkelen, boodschappen uitzenden die de bodem informeren over hun onmiddellijke behoefte aan voedingsstoffen in kwaliteit en kwantiteit. In de bodem activeert en synthetiseert de microbiologie de gevraagde voedingsstoffen zonder tekorten en overschotten, zoals in de huidige landbouwpraktijken (Pain, 1972). De ervaring van Jean Pain werd verder onderbouwd door wetenschappelijk onderzoek, o.a. door het onderzoek van Dr. Elaine Ingham en Dr. Kris Nichols⁹⁸.

David Johnson vond een correlatie tussen plantengroei en de verhouding tussen schimmels en bacteriën in

⁹⁵ Het gaat over gunstige effecten van micro-organismen in de compost die doorwerken in de bodem. Deze conclusie van Greff et al. is gebaseerd op een uitgebreide literatuurstudie. Ze wordt bevestigd door onderzoek van Lübke, Johnson, Ingham en Nichols waarnaar verder in deze paragraaf wordt verwezen.

⁹⁶ Stichting Biomeiler: <https://biomeiler.nl/>

⁹⁷ David Johnson stelt zijn analyse van huidige landbouwproblemen en oplossingen voor in zijn ‘Static Pile Fungal Compost’-presentatie: <https://www.youtube.com/watch?v=cO2nGHq40Xc>

⁹⁸ Zie: Conferentie Bodemgezondheid, op Wereld Bodem Dag - 5 december 2022, Brussel.

een experiment met verschillende soorten compost en meststoffen. De planten groeiden zeer goed met een schimmel-dominante compost, verkregen in zijn Johnson-Su bioreactor, terwijl er geen correlatie werd vastgesteld tussen plantengroei en nutriënten (stikstof, fosfor, kalium). Hij ging ook na waar koolstof in de verschillende plant/bodemtesten naar toe gaat. In bacterie-dominante bodems met weinig organische koolstof werd slechts 3% van de koolstof door de plant opgenomen, terwijl in schimmel-dominante bodems met veel organische koolstof 56% van de koolstof door planten werd opgenomen⁹⁹.

We verwijzen naar het hoofdstuk met praktijkervaringen voor biomeilers (in paragraaf 11.2.4) en Johnson-Su bioreactoren (in paragraaf 11.1.6). Het kenmerkende van deze methoden is het opzetten in één keer, de langere composteertijd en het feit dat er niet gekeerd wordt.

Gehakseld snoeihout (tot de juiste diameter ≤ 4 mm) als basismateriaal zorgt door zijn porositeit voor goede aerobe condities ondanks de grotere hoogte en breedte van de composthopen. Eventueel worden die condities extra verzekerd door het plaatsen van verluchtungsbuizen.

De compostering van houtig materiaal verloopt sneller met de toevoeging van mest en/of urine als stikstofbron. Onderzoek (Fan et al., 2020) toonde aan dat biologische houtoxidatie (=compostering) met toevoeging van menselijke urine (overeenkomend met 1,2 % N droge basis van hout) het zuurstofverbruik met 64% en het gewichtsverlies met 47% verbeterde. Het opnieuw toevoegen van urine na een tijd gaf eveneens nog verdere verbetering in de compostering te zien.

Wormencompostering/wormenfiltratie

De strooiselworm, mestworm, compostworm of tijgerworm wordt aangetroffen in mest, composthopen, onder vochtige plantenresten en stenen, en in bodems die rijk zijn aan organisch materiaal. Hun gemiddelde levensduur is 1 tot 2 jaar. De wormen worden meestal niet langer dan 70 mm en zijn roodachtig van kleur. *Eisenia fetida* is een gekende soort, maar er zijn ook andere soorten: *Eisenia andrei*, *Lumbricus rubellus* (gewone blauwkopworm), *Dendrobaena*,...

Ze worden gebruikt bij het composteren (van menselijke mest), maar omdat *Eisenia fetida* niet kan overleven in verse ontlasting, is het noodzakelijk dat de wormen in een aangepaste omgeving kunnen geïntroduceerd worden (voldoende vochtigheid, geen licht, weinig urine,...) met voedselzones en nestgelegenheden.

Een studie met zes verschillende combinaties van ontlasting, aarde en bulkmateriaal (wormencompost) in verschillende lagen werd uitgevoerd om de beste omstandigheden voor biomassagroei en voortplanting van regenwormen te achterhalen. De resultaten gaven aan dat de combinatie (aarde, wormencompost, ontlasting en wormencompost - van onder naar boven) het beste was voor de groei van de wormbiomassa, wat wijst op de positieve rol van de bodemlaag in de groei van regenwormbiomassa (Yadav et al., 2010).

Zoals uit enkele praktijkvoorbeelden (zie hoofdstuk 11) blijkt, worden mestwormen vooral ingezet om menselijke mest voor te verteren bij 'in situ' verwerking in individuele toiletten, collectieve systemen of kleinschalige (langdurige, niet kerende) compostering. De wormcompostering bij 'in situ' verwerking van menselijke mest of toiletwater gebeurt bij lage temperaturen. Daarom wordt de wormencompost nadien nagecomposteerd, waardoor met toevoeging van vers groenmateriaal wel de nodige hygiënisatie-

⁹⁹ Johnson: "In de industriële landbouw wordt zo'n 11% van de koolstof door planten opgenomen. Theoretisch gezien is dus een vijfvoudige groei in de landbouwproductiviteit mogelijk."

temperaturen kunnen bereikt worden. In het geval van de Johnson-Su bioreactor worden de wormen pas toegevoegd nadat de thermofiele fase van de compostering voorbij is.

Wormen worden ook ingezet in grootschaliger systemen voor rioolwaterzuivering (wormenfiltratie) en slibcompostering (Bajsa et al., 2003). In composteerprocessen op grote schaal waar frequent gekeerd wordt, kunnen mestwormen niet overleven (Arora & Saraswat, 2021).

7.1.1.4 Toepassing van compost in de landbouw

Compost is een goede bron van alle voedingselementen (hoofd- en sporenelementen). Het risico op nutriëntenverliezen bij toepassing van compost is laag. Een deel van de nutriënten zit gebonden in de organische stof en de micro-organismen. Een ander deel zit geabsorbeerd op de organische stof.

In de compost zelf ontstaat een biologisch voedselweb, dat vergelijkbaar is met het bodemvoedselweb. Zo wordt met compost veel nuttige bodembioïologie op de bodem geënt. Compost kan ook bijdragen aan het natuurlijke ziekte-werende vermogen van de bodem (Willekens K, 2014).

Nog volgens Willekens (2014), zal compost, zeker als het een goed verteerd rijp product betreft, het bodemleven (microflora en regenwormen) minder activeren in vergelijking met verse plantaardige of dierlijke bemestingsvormen zoals verse mest of groenbemesting. Anderzijds gaat vertering van organisch materiaal in de bodem niet samen met wortelvorming. De biologie in de wortelomgeving strookt niet met de biologie die instaat voor de afbraak van vers organisch materiaal. Jonge compost wordt daarom best vóór het inzaaien van een groenbemester na een niet-kerende bodembewerking toegepast. De afbraak van onverteerde delen zet zich door onder het plantendek, zelfs in de winterperiode. Rijpe compost is een aardeachtige substantie die kort voor het planten of zaaien in de bouwvoor ondergebracht kan worden zonder nadelige invloed op de gewasontwikkeling. De hoeveelheid die kan toegepast worden is afhankelijk van de geldende bemestingsnormen en daarmee ook van de overige bemesting.

Compost wordt over het algemeen gezien als een manier om voedingsstoffen aan de bodem toe te voegen. Commerciële composteringsprocessen zijn vaak ontworpen voor snelheid en maximale productstroom. Deze focus zorgt ervoor dat het organisch materiaal hoofdzakelijk wordt 'verbrand' (en gestabiliseerd), maar dat er onvoldoende humusvorming kan optreden. Marc Verhofstede gebruikt een simpele test waarbij de compost met water vermengd wordt om het verschil tussen humuscompost en 'conventionele' compost te laten zien. Humuscompost blijft aan mekaar klitten terwijl het water licht bruin gekleurd wordt, terwijl 'conventionele' compost alle samenhang verliest en het water zwart kleurt (Verhofstede, 2023). Humuscompost wordt gevormd bij een langere compostering, waardoor de bodembioïologie langer kan inwerken en er na de afbraakfase ook een humus-opbouwfase volgt.

Op lichtere gronden met een gebrekkige structuur kan compost worden gebruikt waaraan klei werd toegevoegd. Dit leidt in het compostproduct tot de vorming van een 'bodemkruimel', dankzij de samenhang van organische en minerale bestanddelen. Met compost kunnen ook specifiek bepaalde (groepen van) organismen geïntroduceerd worden in de bodem (Willekens K, 2014). Bij giften van 45 ton boerderijcompost per ha per jaar werd al na 3 jaar een verhoging vastgesteld van de biomassa's bacteriën, actinomyceten en mycorrhize schimmels (ILVO, 2008-2011). Na 6 jaar toepassen van 50 ton boerderijcompost per ha per jaar (UGent, 2004-2009) waren er meer nuttige nematoden, vooral nematoden die zich voeden met bacteriën. Humus wordt gevormd bij een gunstige, aerobe (zuurstofrijke) microbiële activiteit tijdens de compostering en in de bodem. Wanneer de omstandigheden optimaal zijn, hechten microben de lange-keten

humusverbindingen aan de kleifraction, wat resulteert in kleihumuskruimels. Deze kleihumuskruimels zitten vol met 'hoekjes en gaatjes' die onderdak bieden aan bodem micro-organismen. Het enorme oppervlak en de negatieve lading die geassocieerd worden met kleihumus bieden uitwisselingsplekken voor kationen. Het opbouwen van bodemhumus is een van de weinige manieren waarop boeren de kationen-uitwisselingscapaciteit (CEC) van bodems daadwerkelijk kunnen vergroten. Klei-(lutum)deeltjes en humusdeeltjes hebben een negatieve lading, waardoor zij positief geladen nutriënten, zoals K, Mg, Ca, NH₄ en Na aantrekken en adsorberen. Door de adsorptie zijn de nutriënten beter beschermd tegen uitspoeling (NutriNorm, 2025).

De eigenschappen van compost

- Nutriënten komen traag vrij (met als gevolg een beperkt risico op uitspoelen)
- Verhoogt de waterretentie capaciteit van de bodem (houdt tot 50x meer water vast dan eigen gewicht)
- Ondersteunt micro-organismen en bodemleven
- Brengt lucht in de bodem
- Balanceert zuurtegraad bodem
- Helpt bodem om meer warmte op te slaan
- Verhoogt de bodemvruchtbaarheid

Zoals we verder zullen zien, is het compostingsproces in staat om:

- (teveel aan) chemische substanties en pollutanten grotendeels te immobiliseren en/of te degraderen
- pathogenen (van menselijke, dierlijke of plantaardige afkomst) af te breken

7.1.2 Compostering van menselijke mest

Historisch onderzoek naar sanitaire systemen bij ons en elders leert ons dat menselijke mest gewaardeerd werd als bemesting in de landbouw (King, 2011), (Decker, 2010), (Howard A, 1931). Meestal was men er zich van bewust dat één of andere vorm van 'bewerking' nodig was alvorens de mest kon toegepast worden. Dankzij de vooruitgang van wetenschappelijke kennis en technieken kan nu precies worden vastgesteld op welke manieren milieu- en gezondheidsrisico's van feces effectief gereduceerd kunnen worden.

7.1.2.1 Nuttige operationele toevoegstoffen

De *koolstofbron* bij compostering van menselijke mest zit in de toevoegingen van houtachtig plantaardig materiaal zoals *zagemeel, schavelingen, hakselhout, dorre bladeren en stro*.

De *stikstofbron* bij compostering van menselijke mest zit voornamelijk in de *urine en ook, maar in mindere mate, in feces*. Een compost van menselijke mest waar geen urine bij zit, zal dus veel minder stikstof bevatten. Een belangrijke toevoeging van stikstof bestaat uit vers plantaardig materiaal zoals *grasmaaisel, groen- en keukenresten, haagscheersel*. Grasmaaisel bevat van nature veel bacteriën, schimmels en gisten; in zuurstofrijke omstandigheden zullen thermofiele bacteriën zorgen voor de temperatuur ontwikkeling die beoogd wordt om bv. pathogenen te doden.

Bijkomende toevoegingen kunnen bestaan uit biochar, klei/leem (of bentoniet en zeoliet in poedervorm), basalt, micro-organismen of verse compost.

Onderzoek (Castro-Herrera et al., 2022) bevestigt dat *biochar* ontbindingsprocessen tijdens compostering kan stimuleren vanwege zijn hoge porositeit en oppervlakte, welke zorgen voor meer zuurstof in het composteringssmengsel. Dit blijkt ondermeer uit een verhoogde tijdsduur met thermofiele temperaturen van meer dan 55°C in koemestcompost met biochar. Biochar-toevoeging verminderde de verliezen van organisch materiaal (18–23%), koolstof (33–42%) en stikstof (49–100%) en verlaagde de hoeveelheid extraheerbaar ammoniak (32–36%) in de uiteindelijke compost. Bovendien houdt de complexe poreuze structuur van biochar water, oplosbaar organisch materiaal, gassen en voedingsstoffen vast en dient het als een microhabitat voor micro-organismen, wat zorgt voor betere omstandigheden voor hun metabolische processen (Lehmann & Joseph, 2009).

Voor de toevoeging van *klei* verwijzen we naar paragraaf 7.1.1.4.

Houtas kan beter niet aan de compost worden toegevoegd, ondanks de hoge kalium- en calciumconcentraties. Het is beter om dit materiaal apart te gebruiken als meststof voor de planten die er behoefte aan hebben¹⁰⁰.

Het voordeel van de inoculatie met *micro-organismen* is dat de kwaliteit van het composteringproces niet afhankelijk is van de hoeveelheid micro-organismen die toevallig aanwezig is (of niet is) in het te composteren materiaal. In het geval van menselijke mest die voorafgaandelijk gehygiëniseerd wordt aan hoge temperaturen (+70°C) zullen nog weinig of geen thermofiele bacteriën aanwezig zijn en kan het een voordeel zijn een microbiële starter te gebruiken. Wanneer echter voldoende hoeveelheden vers gemaaid gras worden toegevoegd, zal er doorgaans geen gebrek zijn aan thermofiele bacteriën. Het inoculeren van de juiste bacteriën kan ook gebeuren door aan de nieuw opgezette composthoop 10% nog actieve compost van een vorige compostering toe te dienen.

7.1.2.2 Theorie en praktijk van thuiscompostering

Om tot een veilige en gezonde compost te komen, moet de gebruiker van een droogtoilet zich wenden tot de theorie en praktijk van thuiscompostering van menselijke mest zoals die bijvoorbeeld werd ontwikkeld door de Amerikaan Joseph Jenkins in zijn 'Humanure Handbook' (Jenkins, 2019) en de Hongaarse Belg Joseph Orszàgh via zijn website 'Eautarcie'¹⁰¹.

Inzameling

Jenkins en Orszàgh vertrekken van een 'alles-in-één-emmer'-droogtoilet. Feces en urine gaan samen in hetzelfde opvangreceptiënt, samen met plantaardig strooiselmateriaal. Voor een effectieve vocht- en geurabsorptie moet minstens één volumedeel strooisel toegevoegd worden aan elk volumedeel feces of urine. De inhoud van het strooiseltoilet heeft op die manier de juiste koolstof/stikstofverhouding (C/N= 32) en de juiste vochtigheid voor compostering. De emmer van een strooiseltoilet is niet heel groot (15 tot 30L) omdat de compostering buiten plaats vindt en het gewicht nog te tillen moet zijn.

Infrastructuur

Het composteren gebeurt in relatief kleine compostvakken, in volume afgestemd op de vrijkomende hoeveelheid menselijke mest van een gezin, zodat bij voorkeur één vak groot genoeg is voor het volume van

¹⁰⁰ Houtas verhoogt de pH van de bodem, net zoals bekalking dat zou doen. Houtas bevat zware metalen en arseen. We verwijzen naar de bezwaren i.v.m. houtas die in paragraaf 6.2.2 werden beschreven. In de compost kan de gecombineerde aanwezigheid van ureum (bij ammoniakvorming) en houtas de pH zodanig verhogen dat het dodelijk wordt voor pathogenen (maar dan ook voor de thermofiele bacteriën die voor de hygiëniserende temperatuur ontwikkeling zorgen).

¹⁰¹ Website Eautarcie: <https://www.eautarcie.org/nl/05f.html>.

één jaar toiletgebruik. Het compostvak moet afgeschermd zijn van zon en regen om uitdroging of te natte compost tegen te gaan. Tegen de zijkanten van het compostvak en bovenaan wordt geïsoleerd met droog hooi of stro. Onderaan wordt gestart met een dikke strooisel laag (30cm) van plantaardig materiaal, dat een mengeling is van zowel structuurmateriaal (bv. hakselhout) als absorberend materiaal (bv. groencompost - om overtollig vocht te absorberen). Deze isolerende lagen zorgen ervoor dat de warmte zoveel mogelijk in de composthoop blijft, terwijl er toch zuurstoftoevoer langs alle kanten is. Voldoende zuurstoftoevoer is verder afhankelijk van de aanwezigheid van structuurmateriaal in de composthoop (via het strooisel of via toevoegingen van groen materiaal).

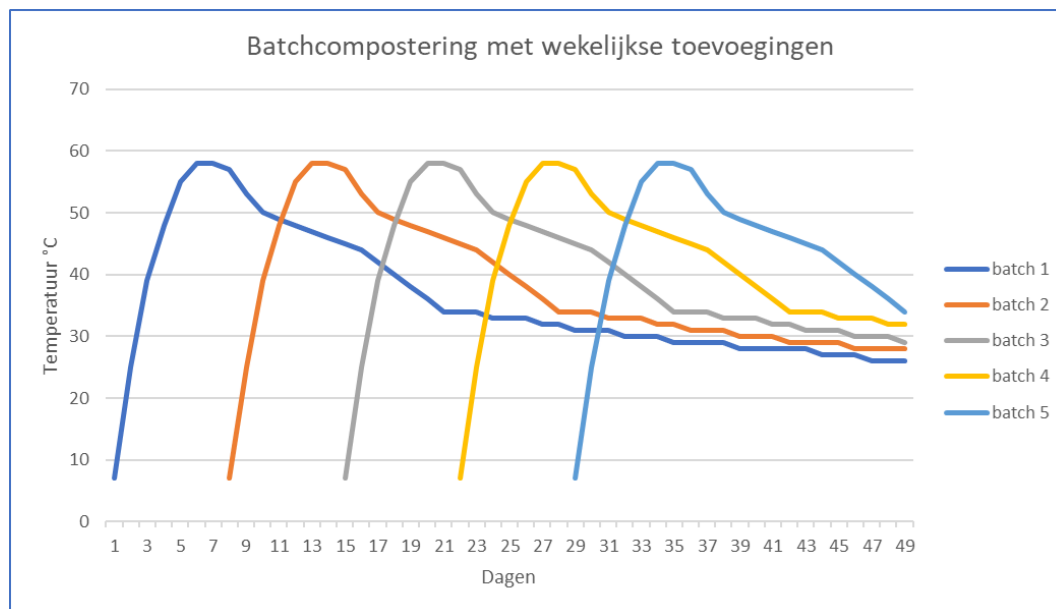
De minimale infrastructuur bestaat uit een drietal overdekte compostvakken: één vak voor de compostering in jaar 1, één vak voor de rijping in jaar 2 en één vak voor de opslag van droog isolerend materiaal. Na twee jaar kan het vak met de rijpe compost worden vrijgemaakt voor gebruik in jaar 3.

Batchcompostering en temperatuur ontwikkeling

Eén of tweewekelijks worden mest, groen materiaal en gft (eventueel aangevuld met wat kleipoeder of lavameel) bovenaan in de composthoop toegevoegd. Daartoe wordt eerst het afdek materiaal dat als isolatie dient aan de kanten van het compostevak geschoven, evenals een deel van de bovenste laag van de vorige keer. Zo kan de nieuwe batch in het middelste en warmste deel van het compostvak toegevoegd worden. De batches worden niet echt vermengd, maar liggen bovenop mekaar.

Bij batchcompostering in één compostvak zijn de verschillende compostfases tegelijk aanwezig (onder mekaar), wat zorgt voor een temperatuursverloop zoals hieronder grafisch is weergegeven.

Figuur 8 Temperatuursverloop bij thuiscompostering



Bron: ECOprojecten

Inoculatie van micro-organismen en compostwormen in de nieuwe toevoeging gebeurt mede vanuit de onderliggende lagen. Bij een ritme van één toevoeging om de 14 dagen, kent elke nieuwe batch zijn eigen thermofiele fase, zonder dat die onderbroken wordt. De thermofiele fase begint met temperaturen boven 45°C, een temperatuur die in optimale omstandigheden optreedt twee à drie dagen na de nieuwe toevoeging.

Om deze temperaturen te bereiken, dient voldoende vers/groen materiaal (dat gemakkelijk kan worden afgebroken door micro-organismen) worden toegevoegd aan het mengsel van feces, urine en strooisel afkomstig uit droogtoiletten. Volumegewijs drie tot vier maal de hoeveelheid menselijke mest. Hierdoor worden vrij gemakkelijk temperaturen van meer dan 50°C behaald gedurende minstens drie tot zeven dagen¹⁰². Zonder toevoeging van vers/groen materiaal blijft de temperatuurontwikkeling beperkt tot zo'n 35°C. De reden daarvoor is dat de cellulose en lignine van het strooisel moeilijker biologisch afbreekbaar zijn. De hypothese is dat door snel afbreekbare materialen toe te voegen en in een eerste fase een hoge temperatuurontwikkeling mogelijk te maken, de warmte in een tweede fase ervoor kan zorgen dat de cellulose toegankelijker wordt voor de bacteriën aanwezig in de compost. Deze hypothese wordt mogelijk ondersteund door het onderzoek naar voorbehandelingstechnieken voor anaerobe vergisting van dennenhout (Karami et al., 2022) waarbij bleek dat compostering een efficiënte en goedkope biologische voorbehandeling is om de biogasproductie uit zeer recalcitrant dennenhout te verbeteren.

De thuiscomposteerder kan de temperatuurontwikkeling zelf volgen door het gebruik van een eenvoudige compostthermometer. Te lage temperaturen zijn meestal het gevolg van te weinig groen materiaal of teveel /weinig vocht. Dit kan bij een volgende toevoeging gecorrigeerd worden.

Langere composteertijd

Naast deze en alle voorgaande voorwaarden voor een kwaliteitsvolle compostering, wordt er een langere composteertijd van 2 jaar in acht genomen. Deze termijn is afgeleid uit onderzoek¹⁰³ (WHO, 2006).

¹⁰² Gebaseerd op meer dan 10 jaar ervaring van ECOprojecten met het composteren van menselijk mest afkomstig van de eigen droogtoiletten. De hoogste temperatuur ooit, gemeten op 20 à 30cm diepte in de laatst toegevoegde batch in de composthoop, bedroeg 71°C. Zelfs in de winter halen we 50°C gedurende meerdere dagen. In de winter is het belangrijkste probleem niet zozeer lage buitentemperatuur, dan wel het vinden van voldoende groen materiaal dat nodig is voor voldoende temperatuurontwikkeling in de composthoop. De Wereldgezondheidsorganisatie stelt dat bij compostering gedurende minstens 1 week 50°C moet aangehouden worden (WHO, 2006).

¹⁰³ WHO (2006): p.84 metingen in 'on site treatments' in diverse landen en p.91.

Tabel 16 Aanbevelingen WHO voor opslagbehandeling van menselijke mest vooraleer te gebruiken

Treatment	Criteria	Comment
Storage; ambient temperature 2–20 °C	1.5–2 years	Will eliminate bacterial pathogens; regrowth of <i>E. coli</i> and <i>Salmonella</i> may be considered if rewetted; will reduce viruses and parasitic protozoa below risk levels. Some soil-borne ova may persist in low numbers.
Storage; ambient temperature >20–35 °C	>1 year	Substantial to total inactivation of viruses, bacteria and protozoa; inactivation of schistosome eggs (<1 month); inactivation of nematode (roundworm) eggs, e.g. hookworm (<i>Ancylostoma/Necator</i>) and whipworm (<i>Trichuris</i>); survival of a certain percentage (10–30%) of <i>Ascaris</i> eggs (≥4 months), while a more or less complete inactivation of <i>Ascaris</i> eggs will occur within 1 year (Strauss, 1985).
Alkaline treatment	pH >9 during >6 months	If temperature >35 °C and moisture <25%, lower pH and/or wetter material will prolong the time for absolute elimination.

^a No addition of new material.

Bron: WHO (2006)

Jenkins (2019) vermeldt een combinatie van factoren die ervoor zorgen dat micro-organismen in compost pathogenen afbreken: voedselcompetitie/voedselpiramide, inhibitie en antagonisme¹⁰⁴, consumptie, biologische warmteontwikkeling en de productie van antimicrobiële stoffen. Bij compostering worden pathogenen verminderd door verschillende processen, waaronder thermische vernietiging, concurrentie tussen inheemse micro-organismen en pathogenen, antagonistische relaties tussen organismen, de werking van antibiotica geproduceerd door bepaalde schimmels, natuurlijke afsterving in de compostomgeving, de productie van giftige bijproducten zoals gasvormige ammoniak en uitputting van voedingsstoffen (Wichuk & McCartney, 2010).

In compost is er dus meer aan het werk om pathogenen te vernietigen dan enkel temperatuur ontwikkeling. Alle factoren spelen des te meer mee wanneer de microbiële populatie heel divers is en dat is het geval bij temperaturen die niet te laag, maar ook niet te hoog liggen, alleszins beneden 60°C¹⁰⁵.

De combinaties van temperatuursverloop en tijd die bepalen wanneer pathogenen voldoende worden geëlimineerd, verschillen van bron tot bron, zoals blijkt uit de bespreking van wetgeving en normen in hoofdstuk 8 en uit de literatuur (Nasri B., 2018):

De maximale afbraak van organisch materiaal en de vernietiging van ziekteverwekkers vinden plaats tijdens de thermofiele fase bij een temperatuurbereik van ongeveer 50-65 °C (Bernal et al. 2009; Nataka et al. 2003). Een eerdere studie rapporteerde een optimaal temperatuurbereik voor compostering van 40-65 °C (de Bertoldi et al. 1983). Een recentere studie suggereerde 60 °C als de optimale temperatuur voor fecale afbraak (Zavala en Funamizu 2006). Bij temperaturen boven 65 °C neemt de compostactiviteit af, omdat de meeste thermofiele organismen bij deze temperatuur niet kunnen overleven (Germer et al. 2010).

¹⁰⁴ Antagonisme = tegenwerking. Ongunstige invloed van organismen op elkaar. Bijvoorbeeld bij de vorming van antimicrobiële stoffen (stoffen die de groei van micro-organismen remmen)

¹⁰⁵ Jenkins, 2019, p.97 en volgende.

De procesvoorwaarden voor hygiëniseren zijn doorgaans afgestemd op industriële compostingsprocessen van minder dan 4 maand, waarbij de grote volumes en de toegepaste technieken voor een hogere temperatuur ontwikkeling zorgen. Deze procesvoorwaarden zijn niet afgestemd op kleinschalige compostering, waar de langere composteertijd en inwerking van micro-organismen mede zorgen voor hygiëniseren, naast de temperatuur.

Thuis composteren in Wallonië en Brussel

Een enquête uit 2014 in Wallonië en Brussel bereikte 236 gezinnen met een droogtoilet¹⁰⁶. Het gaat over gezinnen van gemiddeld drie à vier personen die beschikken over een tuin (96%), en waarvan 41% niet is aangesloten op openbare riolering. De meerderheid (64%) van de respondenten gebruikt de compost van hun droogtoilet in de moestuin. Meer dan een kwart (27%) voert de compost op onbebouwd land (bijvoorbeeld aan de voet van bomen). De meeste respondenten (90%) hebben een droogtoilet uit ecologische overwegingen, 8% uit praktische overwegingen en 5% uit economische overwegingen.

Naast de voordelen ervaren de gebruikers van droogtoiletten ook enkele nadelen, waarvan de belangrijkste te maken hebben met de ledigingen: de frequentie van het ledigen (37%), het transport naar de composthoop (37%) en het schoonmaken van de emmer (31%). Het verkrijgen van koolstofrijk materiaal (bv. zaagsel) is een zorg voor bijna 20% van de respondenten. De geur van het toilet wordt door 9% van de respondenten genoemd en zou verband houden met slecht toiletbeheer (onvoldoende koolstof en/of leegmaken).

Van de gezinnen met een droogtoilet zou een derde zich geholpen weten met een praktische korte vorming rond het composteren van menselijke mest. Jammer genoeg gaat deze enquête niet in op het compostproces zelf.

Thuis composteren in Frankrijk

Het Franse Ecologische Sanitatie-netwerk (RAE) heeft, in samenwerking met de Franse openbare dienst voor niet-collectieve sanitaire voorzieningen (Service Public d'Assainissement Non Collectif, SPANC), een schatting gemaakt dat in 2014 ongeveer 5% van de niet-collectieve sanitaire voorzieningen uitgerust zijn met een waterloos strooiseltoilet (Nasri B., 2018). Dit type droogtoilet, een 'alles-in-één-emmer'-inzamelsysteem met toevoeging van strooisel, is het meest gebruikte systeem van droogtoiletten in Frankrijk. Dit systeem vereist discontinue (of batch-)compostering die in Frankrijk is gereguleerd (zie paragraaf 8.3), zij het minimaal.

Het onderzoek van Nasri et al. (2018) betrof thuiscompostering in compostbakken op twee sites in Zuid-Frankrijk en vier in Bretagne. Het is leerrijk en de moeite waard om uitgebreid te beschrijven, niet in het minst omdat zo'n onderzoek zeldzaam is. Het richtte zich vooral op het meten van percolaatwater, maar deed ook analyses op microbiologische en fysische parameters. Er werd een protocol gevolgd om bepaalde vergelijkingen mogelijk te maken:

- De houten compostbakken (minimaal 1 m³) zijn volledig gesloten aan de zijkanten en voorzien van een waterdicht deksel (om ongedierte buiten te houden en ter bescherming tegen weersomstandigheden).
- De compostbak werd gedurende zes maanden gevuld, gevolgd door nog één jaar compostering. Er werden stalen genomen van de compost na 6, 12 en 18 maanden.
- Het gebruikte strooisel in de toiletten is een mengsel van zaagsel en houtsnippers.

¹⁰⁶ Het ging bijna uitsluitend om strooiseltoiletten zonder urinescheiding; slechts 3 gebruikers hadden een droogtoilet met urinescheiding.

- Mengen van menselijke mest met keukenafval en groenafval was niet toegestaan. Hoewel deze toevoegingen relatief wijdverbreid zijn om de input te diversifiëren en compostering te vergemakkelijken, waren dergelijke toevoegingen verboden om analytische vertekeningen te voorkomen (vanwege verdunning, problemen met de correcte karakterisering ervan, enz.).
- Voor het studieprotocol zijn drie composteringen geselecteerd met 'minimaal' beheer en drie composteringen met 'geoptimaliseerd' beheer.
- Minimaal beheer: eenvoudige opslag en opeenvolgende ledigingen bovenop de hoop, niet mengen, eventueel afdekken met droge bladeren of zaagsel, spoelwater emmer wordt geleegd op de composthoop, geen verdere bijsturing van de vochtigheid.
- Geoptimaliseerd beheer: het mengen van de oppervlaktelaag met de vers aangebrachte mest is toegestaan, extra materiaal zoals droge bladeren of zaagsel mag toegevoegd worden, bewatering op basis van het waargenomen vochtgehalte is toegestaan, de inhoud van de compostbak kon tijdens het composteringsproces (na de eerste zes maanden) volledig gekeerd worden.
- Er werden twee typen compostbakken geïnstalleerd: twee zonder bodem en vier met waterdichte bodems waardoor het percolaat in een afgesloten container kon worden opgevangen. Er werden stalen genomen van het percolaatwater in het begin, midden en einde van de periode van zes maanden vulling van de compostbakken.

De analyse van de compoststalen en het percolaatwater leverde volgende resultaten op:

- De gemiddelde dagelijkse productie van uitwerpselen (feces + urine) per gezin was 1,8 tot 3,4 kg.
- De maximum temperatuur die werd gemeten ging in geen enkele compostbak boven 35°C.
- Alle pH-waarden hadden de neiging om te dalen en vervolgens te stijgen gedurende de 12 maanden van de composteringsfase (de eindwaarden varieerden tussen $5 < \text{pH} < 7$, wat vrij laag is).
- Een relatief hoog vochtgehalte tussen 58% en 76% voor alle locaties; locaties met minimaal beheer zien hun vochtgehalte afnemen, terwijl de locaties met geoptimaliseerd beheer hun vochtgehalte tussen 60 en 70% houden.
- Op alle onderzoek locaties waren de microbiologische waarden voor enterokokken en E. coli bevredigend, aangezien deze tijdens het composteringsproces de neiging hebben af te nemen. Op alle locaties neemt het aantal Clostridium perfringens-kolonies af, maar het aantal sporen blijft variabel. De continue composteringmethode die op alle locaties wordt toegepast, is mogelijk niet geheel ongunstig voor het behoud van de C. perfringens-bacterie in de omgeving. De duur van één jaar compostering maakt het niet mogelijk om het vermogen van het composteringsproces om C. perfringens te elimineren, te evalueren.
- De gemiddelde uiteindelijke C/N-ratio bedroeg 28,7 (terwijl normale C/N-ratio's voor afgewerkte compost tussen 10 en 20 liggen). De verkregen waarden voor de drie bemestingselementen stikstof-, fosfor- en kaliumverbindingen (NPK) lieten zien dat de geproduceerde compost een slechte meststof is (> 1%), maar dicht bij de referentievoorschriften (NFU 44-095 2004) voor het gebruik van de compost als bodemverbeterend middel liggen.
- Het percolaatwater bedroeg 0,9kg/dag, wat ongeveer de helft van de aangevoerde urine vertegenwoordigde. De resultaten van de microbiologische analyse tonen aan dat de hoeveelheid

enterokokken de drempelwaarden voor collectieve sanitaire normen voor microbiologische parameters overschrijdt, hoewel de gemeten E. coli-niveaus in de orde van grootte van de norm blijven.

Er kunnen verschillende interessante lessen worden getrokken uit dit onderzoek:

- Alhoewel het onderzoeksprotocol met het verbieden van de toevoeging van vers groen materiaal goede bedoelingen had, heeft dat belet dat de nodige temperatuurontwikkeling (>50%) voor hygiënisatie van de compost werd bekomen. Dat is slechts mogelijk door het toevoegen van snel composteerbare materialen zoals vers gemaaid gras, groen tuinafval en keukenresten.
- Feces en urine zijn stikstofrijke materialen (C/N van 8, resp. <1) in vergelijking met koolstofrijk houtzaagsel (C/N van 50-150) of droge bladeren (C/N van 60). De toevoeging van 30% zaagsel of 25% zaagsel en 5% droge bladeren (zoals de praktijk was in de onderzochte composteringen) bij de dagelijks gemiddelde hoeveelheid geproduceerde feces en urine van een persoon, geeft een initiële C/N van gemiddeld 36 tot 32. De lage temperatuurontwikkeling (<35°C) en de kleine reductie van de initiële C/N na 1,5 jaar compostering (28,7) wijzen op een beperkte bacteriële activiteit met een lage afbraak van koolstof omdat de toegevoegde koolstof moeilijk afbreekbaar is.
- De onderzoekers zeggen daarover: “De initiële stijging en de verhoogde temperatuurperiode worden veroorzaakt door exotherme reacties die verband houden met microbiële afbraak van het gemakkelijk biologisch afbreekbare organische materiaal in de compostgrondstof. De daaropvolgende temperatuurdaling vindt plaats door een afname van de microbiële activiteit, aangezien gemakkelijk biologisch afbreekbaar substraat wordt verbruikt en meer biologisch resistente verbindingen, zoals cellulose en lignine, overblijven (Wichuk en McCartney 2010).”
- Door het verbieden van de toevoeging van structuurmateriaal (zowel groen als houtig) en van vochtregulatie, de beperkte toevoeging van strooiselmateriaal (31 gewichts%) en de gesloten compostbakken, is het twijfelachtig of er voldoende aerobe condities aanwezig konden zijn.
- Door de lage temperatuurontwikkeling is er weinig vocht verdampt en bleef een te hoog vochtigheidspercentage behouden, zelfs na 1,5 jaar composteren. Bovendien kon door het ontwerp van volledig gesloten compostbakken het eventuele verdampende vocht moeilijk ontsnappen en is het mogelijk als condensaat terug naar de percolaatopvang gelopen.

Bedenkingen bij theorie en praktijk

De hierboven beschreven composteerprincipes, die door Jenkins en Orszàgh werden ontwikkeld voor de thuiscompostering van menselijke mest, zouden moeten leiden tot een veilige en gezonde compost die overal kan toegepast worden. Indien men deze principes niet volledig kan naleven, zegt Jenkins, wordt de compost beter niet toegepast in moestuinen, maar kan die bijvoorbeeld wel dienen als bemesting van klein fruit of bomen, bloemenperken, borders, enz. Hetzelfde geldt ook indien er een strenger voorzorgsprincipe gehanteerd wordt.

We hebben geen wetenschappelijk onderzoek gevonden dat de reductie van pathogenen en medicijnresten met de door Jenkins en Orszàgh aanbevolen technieken voor kleinschalig composteren van menselijke mest aantoonde. Wel is er oud onderzoek te vinden over types composttoiletten die ‘composteren’ met minimale interventie door onder het toilet afgesloten opslagruimte te voorzien. De meeste studies rapporten lage composteringstemperaturen, anaerobe omstandigheden en overmatige vloeistofophoping als de

belangrijkste problemen in dit type composttoiletten (Nasri B., 2018). In andere systemen met compostering in aparte compostbakken in de buitenlucht, bleek de composthoop aeroob in het bovenste gedeelte en anaeroob in het onderste gedeelte. Uit de telling van totale colibacteriën bleek dat noch de compostbak, noch continu composteren de vorming van fecale colibacteriën tot acceptabele niveaus reduceerde. Uit een analyse van de as en de chemische oxidatievraag (CZV) bleek bovendien dat de compostering niet volledig was (Smith, 1981). Dat is niet echt verwonderlijk te noemen, gezien in de beschreven systemen de basisvoorwaarden voor een goede compostering (aeroob, C/N ratio, vochtregulatie, langere compostering,...) niet aanwezig waren.

Nasri et al. (2018) stellen dat het composteringsproces goed gekend is dankzij grootschalige compostering, maar dat de toepasbaarheid van het onderzoek op kleinschalige compostering onzeker is (Chapman 1993). *“Ondanks de voordelen blijft het gebrek aan kennis en bewustzijn van composttoiletten een belemmering voor de acceptatie en implementatie ervan. Vanaf de jaren zeventig, toen onderzoek naar afvalwaterzuivering veel aandacht kreeg en grote ontwikkelingen doormaakte, is het onderwerp composttoiletten verwaarloosd door de sanitaire gemeenschap, inclusief onderzoekers en professionals (Anand en Apul 2014). Dit alles onderstreept de noodzaak om de status van composttoiletten te evalueren en deze technologie onder de aandacht te brengen, zodat ze beter kunnen worden geëvalueerd voor mogelijke toepassing als alternatief duurzaam sanitair systeem.”*

Het gebrek aan wetenschappelijk onderzoek m.b.t. kleinschalige composteringstechnieken die wel aan de basisvoorwaarden voor goede compostering voldoen, is wellicht een lacune die hopelijk kan ingevuld worden door nieuw onderzoek in de toekomst.

7.1.2.3 Compostering op grotere schaal

Menselijke mest afkomstig van droogtoiletten op festivals of van publieke droogtoiletten wordt in Duitsland op een drietal plaatsen op *industriële schaal* gecomposteerd. Dit gebeurt volgens de geldende wettelijke regels en normen, zoals bv. beschreven in het kader van het proefproject Finizio - ZirkulierBAR (praktijkvoorbeelden in paragraaf 11.1.1 en paragraaf 11.3.1).

In Frankrijk kan gescheiden ingezamelde menselijke mest van festivals ter plaatse worden gecomposteerd of worden afgevoerd naar erkende (industriële) composteringsinstallaties. Een deel van het rioolwaterzuiveringsslib (dat ook menselijke mest bevat) wordt nagecomposteerd (zie paragraaf 8.3).

De compostering van menselijke mest op grotere schaal maakt gebruik van de best beschikbare technieken voor compostering. Mogelijke voor- en nabewerkingen worden hierna beschreven..

Urinescheiding

Bij de verwerking van menselijke mest *op grote schaal* zijn er verschillende redenen die voor een urinescheiding pleiten, zoals de mogelijkheid om:

- medicijnresten in de compost te reduceren (omdat de meeste medicijnresten met de urine worden uitgescheiden)
- medicijnresten in urine met aangepaste technieken te verwijderen (zie paragraaf 7.2).

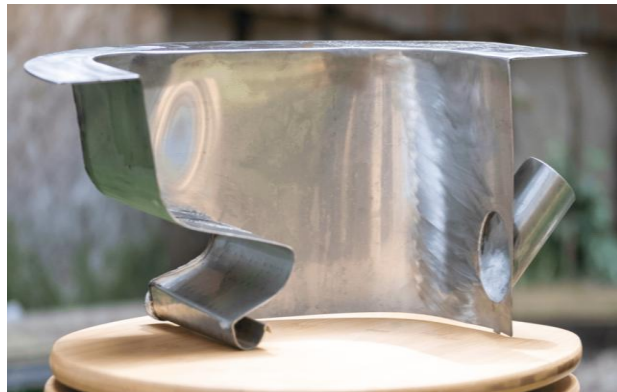
- verschillende types meststoffen te produceren al naargelang de vraag voor landbouwkundig gebruik (zie paragraaf 6.1.3).

De aparte inzameling van urine en feces verzameld in droogtoiletten geeft de mogelijkheid tot een efficiëntere verwerking, aangezien 1) er geen kruiscontaminatie of verdunning optreedt en 2) de verwerking kan gericht worden op de specifieke verontreinigende eigenschappen van elke fractie. Dit zal op zijn beurt ook de kwaliteit van de afgeleide meststoffen verbeteren.

In de praktijk bestaan er verschillende systemen van urinescheiding. De systemen die urine (zo veel als mogelijk) *zuiver* willen opvangen voorzien aan de voorzijde een apart urine opvangbakje of een capillair systeem. In andere systemen loopt de urine door een rooster in het verzamelrecipiënt en wordt in het onderste gedeelte apart opgevangen/afgevoerd. In deze systemen is de urine in contact geweest met feces en zijn beide fracties *gecontamineerd* met pathogenen.



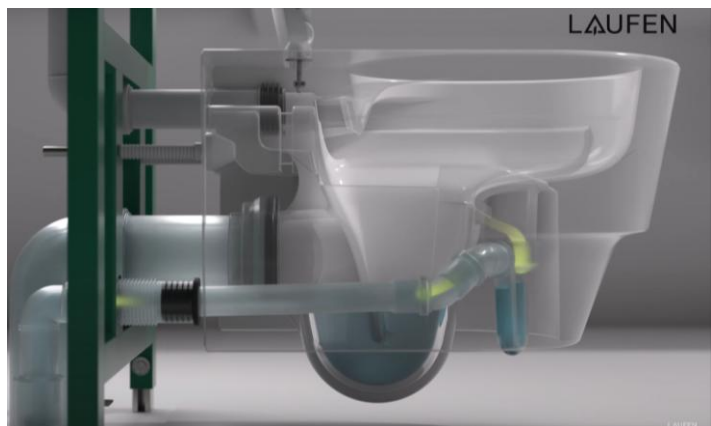
Urinescheiding met opvangbakje



Capillaire urinescheiding Finizio (doorsnede)



SAVE! Toilet (Laufen)



Capillaire urinescheiding SAVE! toilet (doorsnede)



Festivalcontainer 240L van Finizio met urinedrainage



30L toiletemmer met urinedrainage

Voorafgaandelijke hygiëniseratie

Een voorafgaandelijke hygiëniseratie van menselijke mest kan wenselijk zijn om veilige werkomstandigheden te creëren bij inzameling, voorlopige opslag en verdere verwerking. Bovendien beantwoordt dit aan de Europese regelgeving die eist dat dat compost en digestaat met dierlijke bijproducten een warmtebehandeling hebben ondergaan van 70°C gedurende minimaal 1 uur. Uiteraard zal ook de compostering zelf, die na de voorafgaandelijke hygiëniseratie van de menselijke mest wordt opgezet met de nodige toevoegstoffen, voor een (tweede) hygiëniseratie zorgen.

De overleving van micro-organismen in de omgeving is afhankelijk van veel factoren, waaronder temperatuur, pH, watergehalte, d.w.z. vochtigheid, zonnestraling, antagonisten en beschikbaarheid van voedingsstoffen. Er bestaat een breed scala aan behandelingsmethoden waarmee pathogenen kunnen worden gedood of geïnactiveerd: hittebehandeling zoals pasteurisatie, thermofiele compostering of carbonisatie, toevoeging van alkalische of zure behandeling met geschikte additieven, bijvoorbeeld ureum of melkzuurbacteriën, en drogen (Krause, Häfner, Augustin, Harlow, et al., 2021).

Annika Nordin en collega's in Zweden hebben ureum en houtas gebruikt om menselijke ontlasting te 'ontsmetten'. Ureum verhoogt de concentratie ammoniak en as verhoogt de pH. Zowel hoge ammoniakgehalten als een hoge pH zijn dodelijk voor alle levensvormen, inclusief de meest resistente pathogenen en wormen (Nordin, 2010).

Warmtebehandeling is waarschijnlijk het meest aanbevolen proces voor het ontsmetten van vaste stoffen die feces bevatten. De WHO beveelt een warmtebehandeling aan van 50°C gedurende 1 week of van 55–60 °C gedurende meerdere dagen (minimaal 3 dagen) met constante temperatuurbewaking (WHO, 2006).

Figuur 9 Relatie tussen temperatuur en tijd om bepaalde pathogenen te elimineren

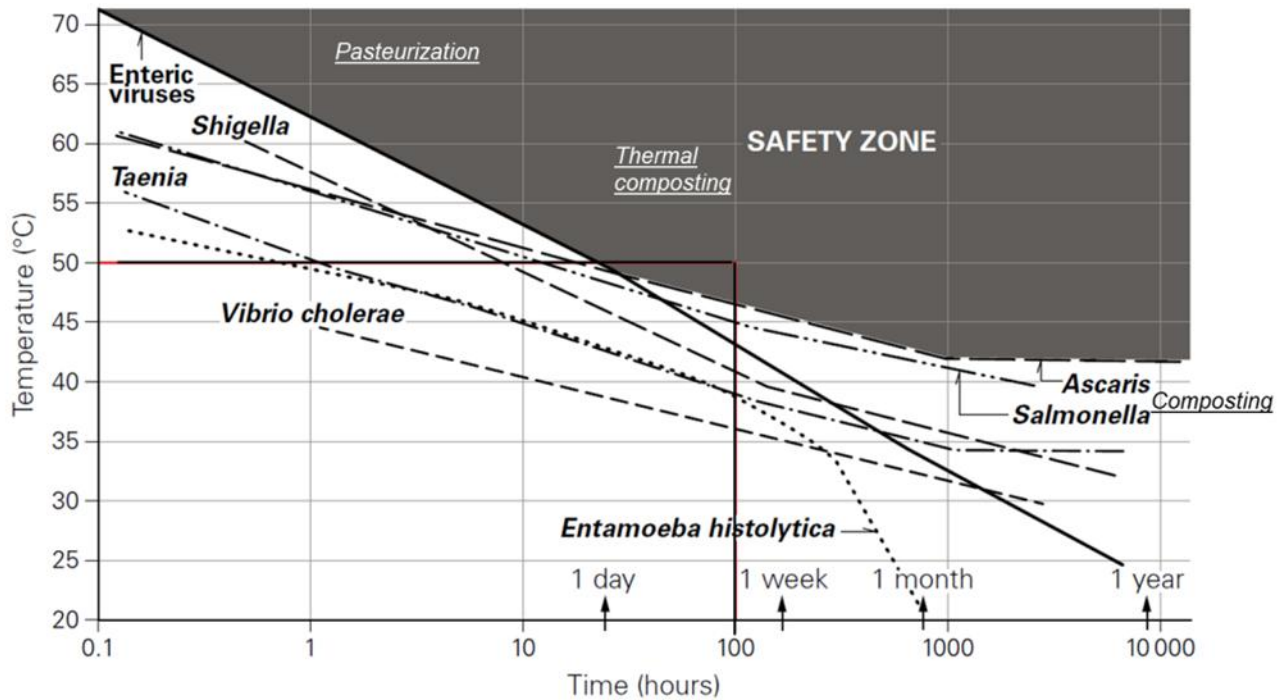


Figure 1. Relationship between temperature and time required to inactivate certain pathogens (according to Feachem et al., 1983, graphic adopted from Vögeli et al., 2014; corresponding combinations of time and temperature for the described possible treatments are indicated)

Bron: (Krause et al., 2015)

De hygiëniserende van menselijke mest kan gebeuren in een gesloten container met een beluchtingsstelsel. Finizio (zie paragraaf 11.1.1) gebruikt deze container om de menselijke mest die op festivals wordt ingezameld op te slaan en (voorafgaandelijk aan de eigenlijke compostering) te hygiëniseren.



De gesloten hygiëniserende container van Compost Systems

De container wordt van bovenaf gevuld met menselijke mest en stro (als bijkomend structuurmateriaal om voldoende porositeit te waarborgen). Na het sluiten van het deksel start het proces automatisch en de temperatuur stijgt in de kortst mogelijke tijd tot het voor hygiëniserende vereist niveau. Een membraan in het deksel houdt geuren voor 95% tegen, maar laat CO₂ en waterdamp passeren. Om de 1 à 2 dagen moet het percolaatwater afgelaten worden. Nadat het proces voltooid is, wordt de container leeg gemaakt met de haaklift¹⁰⁷.

Mengen van menselijke mest en toevoegstoffen

Mengen is nodig om alle materialen (menselijke mest, groen materiaal, structuurmateriaal, ...) goed onder mekaar te verdelen om de gewenste porositeit te verkrijgen.

Om al die materialen te mengen gebruikt men de *lasagne-techniek* bij niet-kerende composteringstechnieken (relatief dunne lagen mest afwisselen met plantaardig structuurmateriaal, vers groen materiaal en eventuele andere toevoegstoffen). Bij *mechanisch mengen* worden de verschillende materialen beter onder mekaar verspreid, wat wellicht meer garanties geeft op goede aerobe omstandigheden (geen te dikke lagen van welk materiaal dan ook).

Nabewerking

Omdat bij grote evenementen en in openbare toiletten, niet-composteerbare vreemde stoffen, vooral vochtige doekjes, artikelen voor menstruatiehygiëne en verpakkingsafval - zelfs ondergoed - in de toiletten worden gegooid, is er ook een nabewerking nodig. Dergelijke stoffen worden verwijderd met zeeftechnieken. Via een lader wordt de trilzeef van bovenaf gevuld met compost. Vochtige doekjes, maar ook grotere brokken klei en groenafval, blijven in de zeef steken en worden op deze manier in belangrijke mate uit gesorteerd. Het grootste deel van de zeefoverloop gaat naar de afvalverbranding, terwijl een klein deel terug gaat als inoculant in de volgende compostering.

¹⁰⁷ Bron: Compost Systems: <https://www.compost-systems.com/en/solutions/container-composting>

7.1.3 Reductie van milieu- en gezondheidsrisico's

7.1.3.1 Reductie van pathogenen

In de studie van Toilettes Du Monde (TDM, 2017) werden verschillende composteringen van menselijke mest afkomstig van festivals¹⁰⁸ geanalyseerd. De mest werd ofwel zelf gecomposteerd door de aanbieder van de droogtoiletten¹⁰⁹, ofwel gecomposteerd in collectief-private composterings-installaties¹¹⁰. Het betreft dus veldonderzoek, geen labotesten.

Uit de studie zijn volgende resultaten gebleken:

- Na 4 maanden compostering van menselijke feces en urine gemengd met strooisel zijn de initiële niveau's van E.coli, Enterokokken en C.perfringens (zie paragraaf 6.1.1) teruggebracht naar niveau's onder de Franse normen¹¹¹. De resultaten van collectief-private composterings-installaties zijn beter voor alle parameters, behalve Enterokokken (wel binnen de normen); deze compost kan overal toegepast worden. Sommige compost die is gemaakt door toiletaanbieders kan evenwel niet toegepast worden voor de teelt van groenten.
- De compost gemaakt door toiletaanbieders bleek te vochtig, o.m. door toevoegingen van urine en te weinig toevoegen van organisch materiaal, maar wellicht ook door het niet afschermen van regen en het niet keren van de compost.
- De compost gemaakt door toiletaanbieders geeft na 12 maanden compostering een verdere vermindering van Enterokokken te zien, terwijl E.coli, C.perfringens en SRB doorgaans gelijk blijven, verder verminderen of opnieuw een stijgend kiemgetal te zien geven¹¹² (nog steeds binnen de normen, behalve voor één). Er zijn geen metingen (op 12 maanden) beschikbaar voor de compost afkomstig van collectief-private composterings-installaties. Aangezien toiletaanbieders doorgaans 'minder veilige' composteringsprocessen hanteren, moeten zij een langere opslagtijd (2 jaar) in acht nemen vooraleer de compost toe te passen.
- Het temperatuursverloop van de meeste composteringen toont dat een temperatuur van meer dan 60°C gedurende minstens 5 weken wordt aangehouden (met maximale temperaturen van 80°C en 74°C).
- Er werd in volume 2 tot 5 maal meer organisch materiaal aan de menselijke mest toegevoegd bij composteringen van toiletaanbieders, terwijl dat bij collectief-private composteringen nog veel meer het geval was (13 tot 15 maal). In feite werd bij collectief-private composteringen van gehakseld snoeihout of van stro uit kippenstallen menselijke mest en urine gebruikt als toevoegsel om de C/N-ratio en vochtigheidsgraad te verbeteren.

¹⁰⁸ De menselijke mest werd via droogtoiletten ingezameld; de aparte urinoirs werden hoofdzakelijk voor en door mannen gebruikt. De menselijke mest bevat dus, naast feces en strooiselmateriaal, ook urine.

¹⁰⁹ Deze private composteringsinstallaties zijn ingeplant volgens de regels die gelden voor ANC-gebied (meer dan 35 m van een put, geen nabijheid van een waterloop en meer dan 3 m van eigendoms-/gebouw-/boom-/weggrenzen). Compostering met minimaal beheer: geen waterdichte vloer (infiltratie in bodem), geen vochtregulatie en nauwelijks omzettingen van de composthoop. Er wordt wel een lange opslagtijd van 24 maanden gerespecteerd alvorens de compost wordt gebruikt.

¹¹⁰ Deze collectief-private composteringsinstallaties vallen doorgaans niet onder de IPCE-norm (2.000kg/dag) voor vergunde installaties (maar proberen er wel aan te voldoen). Het composteringsproces wordt gedurende 5 à 8 maanden opgevolgd met temperatuurcontrole, vochtregulering en frequente omzettingen van de compost. Deze installaties hebben een waterdichte vloer, maar geen overkapping.

¹¹¹ Deze normen werden besproken in paragraaf 8.3.

¹¹² Als mogelijke verklaring voor de opnieuw stijgende kiemgetallen bij 12 maanden compostering denken de onderzoekers aan een besmetting door een foute procedure bij de staalname of aan een 'bubbel' onverteerde uitwerpselen (de compost werd immers in deze gevallen niet gekeerd).

- De organische materialen¹¹³ (toevoegstoffen bij de compostering) bleken zelf ook microbiologisch belast te zijn, maar doorgaans in minder mate dan de menselijke mest. De microbiologische belasting van de menselijke mest werd daardoor minder ‘verdund’ dan kon worden verwacht, maar het verdunningseffect bedroeg toch >70%. De concentraties van pathogenen in het uitgangsmateriaal (na menging) van private en collectief-private composteringen bleek geen duidelijk verschil in verdunning op te leveren.
- De reductie van pathogenen tussen het uitgangsmateriaal (na menging) en de compost (na 4 maand) bedraagt maximaal 99,99%. In de kleinste batch is er een stijging van E.coli en SRB tussen het uitgangsmateriaal (na menging) en de compost (na 4 maanden) en een beperkte reductie van Enterokokken (in vergelijking met grotere batches).

De verschillen in procesopvolging en -beheer, composteerduur en de aard/hoeveelheid van de toevoegstoffen in de composteringen die deze studie onderzocht, zijn groot. Details zijn terug te vinden in de samenvattende tabel in bijlage 12.3.1.

Een Duits onderzoek (Werner KA, 2022) beoordeelde het effect van thermofiele compostering op fecale indicatoren, de bacteriële gemeenschap en antibiotica resistente genen en kwam tot de conclusie dat thermofiele compostering een veelbelovende aanpak is voor het produceren van hygiënisch veilige organische meststoffen.

In een veldonderzoek werd de inhoud van droogtoiletten samen met groen maaisel en stro, en met of zonder biochar gemengd en opgezet in vier verschillende composteringstesten¹¹⁴. Stalen van rijpe compost (na 5 maanden compostering) toonden lage niveaus van Escherichia coli, in overeenstemming met de Duitse regelgeving voor meststoffen. In één staal werd de drempelwaarde voor Salmonella spp. overschreden. De resultaten onthullen het belang van voldoende hoge temperaturen die gedurende een voldoende lange periode aanhouden tijdens de thermofiele fase van composteren om Salmonella te reduceren tot niveaus die voldoen aan de criteria voor meststoffen. In de composthopen zonder biochar werd 60°C enkel onder het oppervlak bereikt, wat aangeeft dat de beluchting en dus de zuurstoftoevoer onvoldoende was binnen de hoop. De biochar compost bereikte helemaal geen 60°C. De onderzoekers denken dat de beperkte temperatuur ontwikkeling verband houdt met het gebrek aan gemakkelijk afbreekbare organische verbindingen om het composteringsproces op te starten.

Kweek van bacteriën uit de rijpe compost resulteerde in 200 isolaten met 36,5% soorten van bioveiligheidsniveau 2 (BSL-2)¹¹⁵. De meerderheid staat bekend als opportunistische pathogenen die eveneens in andere omgevingen (zoals de bodem) voorkomen. Bacillus en Brucella bleken de meest voorkomende geslachten binnen de isolaten te zijn, gevolgd door Serratia en Pseudomonas. Van de gevaarlijker soorten werden alleen B. cereus en P. aeruginosa geïdentificeerd, terwijl Acinetobacter of Enterococcus spp. niet konden worden geïsoleerd. Bovendien werden er slechts twee Staphylococci gevonden, en geen van hen werd geïdentificeerd als de ernstige en vaak multiresistente nosocomiale pathogeen S. aureus.

¹¹³ Alle toevoegstoffen waren belast met E.coli, enterokokken en SRB (in mindere mate). Bij vier composteringen betrof het stro en strooisel uit kippenstallen (wat de microbiologische belasting verklaart). Bij twee andere composteringen ging het over moestuinafval en gehakseld groenafval (er werd geen verklaring gegeven voor de microbiologische belasting hiervan).

¹¹⁴ In totaal werden vier verschillende composthopen opgezet: van elke compostering met/zonder biochar werden twee hopen opgezet met een interval van 2 weken.

¹¹⁵ Biosafety Levels (BSL): risico-niveaus voor laboranten met bepaling van voorzorgsmaatregelen en vereiste infrastructuur voor elk niveau. Er bestaan 4 niveaus, waarvan het vierde niveau de meest gevaarlijke microben bevat. De microben van BSL 2 vormen een matig gevaar voor laboranten en het milieu. Ze zijn doorgaans inheems en worden geassocieerd met ziekten van verschillende ernst.

Een kwart van de geïsoleerde BSL-2-stammen vertoonde multiresistentie tegen verschillende klassen antibiotica. Moleculaire analyse van totaal DNA voor en na compostering onthulde veranderingen in de samenstelling van de bacteriële gemeenschap en antibiotica resistente genen. Groepen met veel menselijke pathogenen namen af tijdens het composteren, zoals Pseudomonadales, Bacilli met Bacillus spp. of Staphylococcaceae en Enterococcaceae. Er bleek een afname van het aantal detecteerbare antibiotica resistente genen van 15 vóór tot 8 na het composteren.

In het kader van het project ZirkulierBAR¹¹⁶ werden in totaal 11 compoststalen geanalyseerd over de periode juli 2022 tot februari 2024 om de kwaliteit van recyclingproducten afkomstig van droogtoiletten voor gebruik in de land- en tuinbouw vast te stellen (Mühlenberg J., 2024). De analyse omvatte een beoordeling van het nutriëntengehalte, hygiëneparameters en aanwezige verontreinigende stoffen, waaronder zware metalen, polycyclische aromatische koolwaterstoffen (PAK's), polychloorbifenylen (PCB's), geperfluoreerde tensiden (PFT's) en farmaceutische residuen¹¹⁷.

De resultaten¹¹⁸ voor de *hygiëneparameters* geven voor *Salmonella*, *E.coli* en *Enterokokken* waarden onder de grenswaarden van de DIN SPEC 91421 voor alle compoststalen, behalve twee¹¹⁹. Voor deze hygiëneparameters, die sinds lang ook terug te vinden zijn in de Duitse meststoffen verordening (DüMV), de Bioabfallverordnung (BioAbfV) en de Duitse verordening inzake dierlijke bijproducten (TierNebV), kan gezegd worden dat de grenswaarden gerespecteerd werden.

Voor *Clostridium Perfringens* werden wel aanwezigheden vastgesteld waar er volgens de DIN SPEC geen mogen zijn. Jana Mühlenberg: *“Clostridium perfringens en somatische colifagen komen in andere Duitse regelgevingen niet voor. Voor Clostridium perfringens werd in de DIN SPEC een grenswaarde van 0 CFU/g gespecificeerd. Omdat Clostridium perfringens in principe overal in de bodem kan voorkomen, ook als deze niet behandeld is met gerecyclede meststof uit droogtoiletten, kan de 0 hier niet gehandhaafd worden. De laboratoria hanteren ook een kwantificeringslimiet van 10 CFU/g, dus de limiet van 0 moet hier zeker worden herzien. Ook in de voedingssector gelden er grenzen die aanzienlijk hoger liggen. Helaas zijn we op het gebied van somatische colifagen nog niet methodologisch ver genoeg gevorderd om hierover waarden te kunnen verstrekken.”*¹²⁰

In een Zwitsers pilootproject in Uster¹²¹ werden twee compoststalen onderzocht afkomstig van de compostering van menselijke mest. Het composteringsproces duurde 12 weken, met temperaturen van 60-65°C gedurende meer dan drie weken. De resultaten voor de hygiëneparameters geven aan dat er geen Salmonella werd gevonden en dat de waarden voor E.coli (0-20 KVE/g) en Enterokokken (<100KVE/g) ruim onder de grenswaarden van de DIN SPEC 91421 zitten. De resultaten voor Clostridium perfringens (<100KVE/g)

¹¹⁶ ZirkulierBAR is een recent afgesloten 3-jarig onderzoeksproject in Eberswalde, bij Berlijn, dat focust op de circulaire verwerking van menselijke mest, in samenwerking met onderzoeksinstituten, lokale overheden en bedrijven. <https://zirkulierbar.de/>

¹¹⁷ Deze parameters werden geanalyseerd volgens de specificaties van DIN SPEC 91421 (zie paragraaf 8.2.2). De analyse op organische verontreinigende stoffen, farmaceutische residuen en hygiëneparameters werd uitgevoerd door geaccrediteerde laboratoria met behulp van wettelijk voorgeschreven methoden. De farmaceutische residuen, met uitzondering van bèta-estradiol, werden geanalyseerd met behulp van geaccrediteerde interne methoden (LC-MS/MS na extractie). Bèta-estradiol werd gemeten met behulp van een interne GC-MS/MS-methode na derivatisering.

¹¹⁸ De data zijn beschikbaar in een aparte Excel (<https://data.mendeley.com/datasets/fjv2bf6mh2/2>) maar kunnen omwille van de grootte moeilijk in dit rapport worden opgenomen.

¹¹⁹ Oorzaak waren problemen met het verwerkingsproces voor de hygiënisering en met de compostering. (Medeling van Jana Mühlenberg, d.d.27/1/25.)

¹²⁰ Schriftelijke mededeling van Jana Mühlenberg aan ECOprojecten op 27/1/25.

¹²¹ VaLoo: Composting Impact Project (Uster, 2022-2025): <https://va-loo.ch/articles/valoo-impact-projekt-kompostierung-uster/>

zijn gelijklopend met de resultaten van Mühlenberg (Carpentier, 2025).

In een 185-dagen thermofiel composteringsexperiment werden vier verschillende mengsels van menselijke uitwerpselen of rundermest, al dan niet gemengd met biochar (en andere toevoegstoffen zoals keukenafval, stro en zaagsel) naast mekaar opgezet¹²² (Castro-Herrera et al., 2022).

Lage N (<47%), P (<9%), K (<11%), Ca (<18%) en Mg (<21%) verliezen en het temperatuurprofiel duiden op een goed functionerend thermofiel composteringsproces en een uiteindelijk compostproduct dat vrij is van pathogenen.

De composttemperatuur was >60 °C gedurende 5 tot 8 opeenvolgende dagen voor de mengsels met menselijke uitwerpselen, menselijke uitwerpselen + biochar, rundermest en rundermest + biochar. Het compostmengsel met rundermest en biochar bereikte een significant hogere temperatuur dan dezelfde variant zonder biochar, met een maximumwaarde van 65,9 °C op dag 6. Voor alle compoststalen gaven uiteindelijke kiemindexwaarden >100% compostrijpheid en de afwezigheid van fytoxische stoffen aan. Castro-Herrera D. et al. (2022): "De tijdsduur met thermofiele temperatuur ≥60 °C gedurende een ononderbroken periode van 6 dagen suggereert een hygiënisch veilige behandeling van de menselijke mest. Dit geldt ook voor de meest hardnekkige menselijke pathogeen, de (eitjes van de) spoel- of rondworm (*Ascaris lumbricoides*).” Daarbij verwijzen Castro-Herrera naar onderzoek van Berendes et al. (2018), Jenkins (2005), Piceno et al. (2017), Preneta et al. (2013) en Szabová et al. (2010).

Een experiment met wormencompostering werd uitgevoerd op menselijke uitwerpselen afkomstig van bergbeklimmers op Mount McKinley (Denali, 2014). Zo'n 14 kg aan menselijke ontlasting en toiletpapier werd in de controlebak geplaatst en verder met rust gelaten van 2012 tot en met 2014. Aan de onderzoeksbak werd 42 kg aan ontlasting en toiletpapier toegevoegd en een gelijk gewicht aan tuincompost, samen met een voldoende hoeveelheid lokale wormen (*Dendobaena octaedra*). Meerdere kilo's aan etensresten, oude bladeren en water werden twee keer later aan de onderzoeksbak toegevoegd om voldoende vocht te behouden en extra voedsel voor de wormen te bieden.

Een belangrijk aspect van de pilotstudie was dat het verwerkte afval weinig of geen urine bevatte (als het menselijk afval te veel urine bevat, zouden de zouten en ammoniak erin dodelijk zijn geweest voor de wormen).

De resultaten na 2 jaar gaven vrijwel niet-detecteerbare niveaus van fecale coliformen en *E.coli* aan (afbraak van 99,99% van de pathogenen). Andere schadelijke pathogenen, waaronder virussen, protozoa en haakwormen werden niet onderzocht. Wat de controlebak betreft, was tijd alleen niet voldoende om het afval te composteren.

7.1.3.2 Reductie van zware metalen

In een Chinese studie (Wang M., 2022) werd de biobeschikbaarheid gemeten van zware metalen gedurende de compostering van rijststro en varkensmest. Het rijststro (C/N= 72,35) en varkensmest (C/N= 16,74) werden gemengd in een verhouding van 3:7 tot een C/N= 33. Drie verschillende composteringen werden opgezet: een

¹²² De compostering werd uitgevoerd in een overdekte faciliteit met een omgevingstemperatuur die varieerde van 15,0 tot 27,0 °C. Compostbestanddelen bestonden uit +/- 250kg menselijke mest (met zaagsel 10:1) of rundermest (met zaagsel 4:1), 430kg groenteafval (voornamelijk kool plus schillen van uien, aardappelen en wortelen), 20kg teffstro en zaagsel, met en zonder 27kg biochar.

compostering met 3% biochar toevoeging (BC), een compostering met 3% kalk toevoeging (LM) en een compost zonder extra toevoegingen (CK). In de rijpingsfase van de compostering (stalen genomen na 28, 35 en 42 dagen compostering) werden in de CK-compost reducties in biobeschikbaarheid vastgesteld voor Zn (3%), Cu (22%), Pb (8%) en Cr (2%). Zowel biochar als kalk bevorderden de transformatie van de zware metalenfracties en reduceerden de biobeschikbaarheid doorgaans nog meer; vooral kalk verbeterde de immobilisatie van de vier beschouwde zware metalen Zn (15%), Cu (27%), Pb (19%) en Cr (4%).

De concentraties van zware metalen in feces en urine zijn vrij laag, zo bleek uit de bespreking in paragraaf 6.1.2.1. Uit de analyse van 11 compoststalen afkomstig van de inhoud van droogtoiletten (Mühlenberg J., 2024) bleek het gehalte aan zware metalen iets hoger te liggen (behalve voor zink) dan in feces en urine. Dat wijst mogelijk op de extra instroom van zware metalen via de toevoegstoffen. Uit de vergelijking met de FOD-normen (zie Tabel 18) kan alvast worden afgeleid dat de gemiddelde waarden over de 11 compoststalen onder de normen liggen.

7.1.3.3 Reductie van medicijnresten

In een Nederlands onderzoek van Wageningen Universiteit en Wetsus (Butkovskiy et al., 2016) werd het digestaat van een up-flow anaerobe slib bed (UASB) reactor, die werkt op bron gescheiden toiletafvalwater, gecomposteerd met houtsnippers. De aanwezigheid van pathogenen, zware metalen en microverontreinigingen in de compost werd onderzocht. Estron, diclofenac, ibuprofen, metoprolol, carbamazepine, galaxolide en triclosan werden toegevoegd aan een mengsel van UASB-slib en afvalhout. Hun concentraties werden gedurende 92 dagen compostering bij gecontroleerde temperatuurcondities gemonitord. Alle bestudeerde microverontreinigingen werden verwijderd met verschillende snelheden, met een algehele verwijdering variërend van 99,9% voor ibuprofen, diclofenac en estron tot 87,8% voor carbamazepine. Accumulatie van methyltriclosan als bijproduct van triclosan-afbraak werd waargenomen.

In Zweden wordt jaarlijks 211.000 ton rioolslib (drooggewicht) geproduceerd, waarvan ongeveer 39% wordt uitgereden op landbouwgrond. Zweedse wetenschappers (Dalahmeh et al., 2022) onderzochten de degradatie van 3 hormonen, 12 antibiotica en 30 farmaceutisch werkzame stoffen tijdens open opslag van vergist en gedroogd rioolslib, met en zonder compostering (363 dagen slibcompost¹²³). Dit gaf volgende resultaten:

- Open opslag (*zonder compostering*) bereikte een effectieve verwijdering van hormonen (85%) en antibiotica (95%), maar lagere verwijdering van medicijnresten (34%), gedurende het studiejaar.
- *Opslag met compostering* resulteerde na een jaar in de volledige afbraak van hormonen en antibiotica, terwijl 95% van de medicijnresten verwijderd werd¹²⁴. Uit studies blijkt dat de resterende 5% nog effectief kan worden afgebroken door de bodemmicroflora na toediening aan de bodem.
- De halfwaardetijd van oestrogeen in slibcompost was 100 dagen. De halfwaardetijd van de andere stoffen lag daar meestal ver onder, behalve voor Ibuprofen (156 dagen), cafeïne en paracetamol. De eerste-orde degradatieconstante (K) was het laagst voor ibuprofen (0,0045/dag) en het hoogst voor oxazepam (0,0805/dag). Zie tabel in bijlage 12.3.1.

¹²³ Bij de compostering van het vergist rioolslib werden 61,8 ton slib en 21,7 ton gehakseld snoeihout in eerste instantie gemengd en vervolgens eenmaal per week gemengd/omgedraaid gedurende week 1-3, eenmaal per drie weken gedurende week 4-13 en nog eens na 6 maanden opslag. De opslagperiode was één jaar. De temperatuur in de compostrijf bleef boven de 60 °C tot dag 110.

¹²⁴ De medicijnresten na één jaar bedroegen 5% (730 ng/g as) van de oorspronkelijke input (13.000 ng/g as).

- Meer dan 75% van de antibiotica werd binnen 26 dagen na compostering afgebroken en 93% binnen 180 dagen na compostering. Ook de andere medicijnresten werden effectief afgebroken tijdens het composteren: met 41% tijdens de eerste 26 dagen van composteren, 85% tijdens de eerste 180 dagen en 95% tijdens één jaar van composteren.

De auteurs trekken de conclusie dat compostering van slib effectief is in het afbreken van de hormonen, antibiotica en medicijnresten. Composteren gedurende zes maanden is een methode om een hoge verwijdering van farmaceutica in slib te bereiken. Opslag van slib gedurende zes maanden is niet voldoende voor het verwijderen van farmaceutische residuen vóór toepassing op het land.

In een Duits onderzoek (Häfner et al., 2023) werd een compost gemaakt van menselijke mest toegepast in een veldexperiment (zie ook paragraaf 10.1.2). De compost werd voorafgaandelijk gescreend op medicijnresten. De menselijke mest was afkomstig van mobiele droge toiletten van verschillende festivals in Noord-Duitsland. In deze droogtoiletten worden de vloeibare en vaste uitwerpselen samen verzameld, gemengd met zaagsel en toiletpapier. De urine loopt echter door de vaste stof en wordt verzameld in een tank en apart verwerkt. Daarom wordt de verzamelde fecale stof gedeeltelijk verrijkt met de stikstof die urine bevat. Zo bestaat de menselijke mest uit een mengsel van menselijke uitwerpselen (~30% Vol.), toiletpapier (~13% Vol.), zaagsel (~50% Vol.) en stro dat wordt gebruikt als drainagemateriaal in de opvangbakken (~7% Vol.). De compostering werd uitgevoerd door een professioneel compost producerend bedrijf. In totaal werden ~40 t (~30 m³) menselijke mest gemengd met 4,25 t (~10,2 m³) groen maaisel en 0,7 t stro (~3 m³) als structuur materiaal, en gerangschikt in twee compostrijen. Tijdens het 6 maanden (180 dagen) durende composteringsproces werd de temperatuur constant gecontroleerd op drie locaties in de compostrij en drie op het oppervlak; dit bleef op >55 °C gedurende de eerste 42 dagen, en >40 °C gedurende de resterende duur van het proces. Het eindproduct werd gemengd, gezeefd en opgeslagen onder een plastic afdekking tot verder gebruik. Een staal van het compost werd via LC-HRMS-techniek¹²⁵ gescreend op 433 componenten.

Deze eerste screening bracht de aanwezigheid van een breed scala aan chemische verbindingen aan het licht, van farmaceutische producten tot rubberadditieven, vlamvertragers, UV-filters, corrosie-inhibitoren en insectenwerende middelen (zie bijlage 12.3.3). Er werden 20 stoffen gedetecteerd, waarvan 11 farmaceutische verbindingen. De stoffen die in de hoogste concentraties werden gevonden waren difenhydramine, gevolgd door salicylzuur, gemfibrozil en allopurinol (108-20,6 µg/kg DS).

Een tweede screening gaf licht afwijkende resultaten in vergelijking met de eerste screening. Voor difenhydramine, salicylzuur en allopurinol waren de metingen lager. Andere verbindingen leken onder de detectielimiet te liggen (gemfibrozil en naproxen), terwijl carbamazepine (CBZ) opduikt met een concentratie van 7,8 µg/kg DS, en er meerdere vormen van CBZ werden gedetecteerd (som CBZ = 10,1 µg/kg DS). Van de 21 geteste verbindingen lagen er 11 onder de detectielimiet in de tweede analyse. Ibuprofen werd niet gedetecteerd in de eerste screening, maar verscheen in een lage concentratie (0,8 µg/kg DS) in de aangepaste vastefase-extractiemethode.

De totale farmaceutische belasting in de compost bleek volgens de twee analyses enkele malen lager te zijn dan de waarden die werden gerapporteerd voor rioolslib (Krause et al., 2021). In rioolslib bijvoorbeeld benaderden de maximale concentraties van CBZ 680 µg/kg DS en 3.237 µg/kg DS voor ibuprofen. De gemiddelde waarde voor CBZ (22,8 µg/l) en Ibuprofen (957 µg/l) in menselijke urine (zie bijlage 12.2.3) is voor

¹²⁵ Vloeistofchromatografie gekoppeld aan hoge-resolutie massaspectrometrie

CBZ meer dan tweemaal hoger, en voor Ibuprofen meer dan 1.000 keer hoger, dan in de compost¹²⁶. Aangezien een deel van de urine is achter gebleven in de mest en mee gecomposteerd werd, kan de vergelijking zowel duiden op het reducerend effect van de compostering als op lagere concentraties (dan wanneer alle urine zou gecomposteerd zijn) in de beginfase van de compostering.

Over het algemeen komen de lage concentraties van geneesmiddelen en andere chemicaliën overeen met de bevindingen van Dalahmeh et al. (2022) en andere onderzoeken (Butkovskiy et al., 2016), waarin is aangetoond dat compostering de concentraties van farmaceutische verbindingen aanzienlijk verlaagt in vergelijking met het moeder materiaal, en leidt tot volledige afbraak van de meeste stoffen en hormonen.

In het reeds eerder aangehaalde onderzoek van Jana Mühlenberg (2024) konden een 10-tal *medicijnresten* worden gedetecteerd/gekwantificeerd in compoststalen van menselijke mest (in totaal voor 0,096mg/kg DS)¹²⁷, waarbij de gemeten concentraties kort bij de detectiegrens liggen (enige ‘uitschieter’ – 0,075-0,11mg/kg DS - betreft het antibioticum doxycycline in een 3-tal stalen). Voor een 100-tal andere medicijnresten werd de detectie/kwantificatielimiet niet overschreden.

Voor medicijnresten worden in de DIN SPEC geen grenswaarden gespecificeerd, aangezien in andere hierboven genoemde regelgevingen ook geen grenswaarden zijn gespecificeerd of omdat farmaceutische resten helemaal niet worden genoemd. Mühlenberg et al. zochten naar de 5 indicatorstoffen die genoemd worden in DIN SPEC 91421. Tijdens het project bleek dat verschillende instanties verschillende voorkeuren hebben over welke stoffen in aanmerking te nemen. De bevindingen zullen wellicht tot een wijziging van de DIN SPEC grenswaarden leiden die rekening houdt met de relevantie, het voorkomen en de bepalingsgrenzen van laboratoria.

In tegenstelling met de bevindingen van Mühlenberg werden in de studie van Schinkel (2025) wel concentraties boven de detectielimiet vastgesteld voor ciprofloxacin (0,048mg/kg)¹²⁸ en carbamazepine (0,032mg/kg) in compost van menselijke mest. Bovendien werden nog andere medicijnresten gevonden die in de studie van Mühlenberg, waarin toch een 100-tal stoffen aan bod kwamen, niet werden bemeaten. Alles samen genomen werden zo’n 0,350mg medicijnresten per kg compost gemeten, waarvan de belangrijkste concentraties metformine¹²⁹ (0,113mg/kg) en amisulpride (0,070mg/kg) bleken te zijn¹³⁰.

In een Zwitsers pilootproject in Uster (Carpentier, 2025) werden de inhoud van droogtoiletten en de compost ervan tijdens de projectperiode tweemaal geanalyseerd op de aanwezigheid van medicijnresten: bij de eerste proefneming werden 9 op 22 stoffen positief gescreend en bij de tweede proefneming 7 op 100. In de eerste proefneming werden zo’n 0,450mg/kg DS medicijnresten gemeten in het ruwe materiaal (feces en urine, gemengd met strooisel). De belangrijkste bijdragen kwamen van carbamazepine, diclofenac, hydrochlorothiazide en ciprofloxacin (zie bijlage 12.3.4). Daarvan werd nog zo’n 0,026mg/kg DS gedetecteerd na compostering. Tijdens de tweede proefneming werden meer stoffen geanalyseerd, waardoor cotinine en nicotine (afkomstig van tabak) als belangrijkste stoffen in beeld kwamen.

¹²⁶ Krause gaat ervan uit dat 1 l urine correspondeert met 1 kg droge stof.

¹²⁷ Jana Mühlenberg: “Ik wil alleen benadrukken dat de laboratoria de kwantificeringsgrens aangeven, niet de detectiegrens”. (Mededeling van 27/1/25.)

¹²⁸ Indien uitgegaan wordt van een DS-gehalte van 50%, moeten deze waarden met twee worden vermenigvuldigd om vergelijkbaar te zijn met de cijfers van Mühlenberg.

¹²⁹ Metformine is een bloedglucoseverlagend middel voor diabetes mellitus type 2.

¹³⁰ Amisulpride is een atypisch antipsychoticum. Het wordt gebruikt bij de behandeling van schizofrenie.

De mate waarin farmaceutische resten worden afgebroken tijdens het composteren van droogtoiletresten is moeilijk precies te beoordelen omwille van twee redenen. Ten eerste is een representatieve bemonstering van het ruwe materiaal zeer moeilijk. Het ruwe materiaal is niet zo goed vermengd en daardoor op diverse plaatsen meer belast dan op andere. De rijpe compost daarentegen is goed gemengd en het monster is representatief voor de hele hoop. Ten tweede werd de inhoud van droogtoiletten (13 à 16 vol%) in dit pilootproject gecomposteerd samen met 63 à 70 vol% groenafval (gehakseld snoeihout, grasmaaisel, paardenmest en riet), 17-9 vol% rijpe compost en 4-9 vol% klei-aarde om de compostkwaliteit te verbeteren. In gewicht is het aandeel van de inhoud van droogtoiletten belangrijker, maar dat neemt niet weg dat een verdunning optreedt, ongeacht de afbraak van de werkzame stoffen door het compostingsproces.

In de reeds eerder vermelde Franse studie van Toilettes Du Monde (TDM, 2017) werd de aanwezigheid van *drugs* in de ingezamelde stoffen (urine uit urinoirs, vloeistof en feces uit droogtoiletten) nagezien. De resultaten laten een over het algemeen hoge concentratie zien van MDMA (ecstasy) en zijn metaboliet MDA, gevolgd door amfetamine, codeïne, morfine, ketamine en cocaïne. Het simpelweg enkele maanden bewaren van urine verlaagt de concentratie van de drugs niet significant. De resultaten voor feces waren in dit rapport nog niet beschikbaar.

In een gerelateerde Franse studie (Koanda et al., 2015) werd nagegaan of verschillende medicinale microverontreinigingen (niet-steroïde anti-inflammatoire geneesmiddelen, pijnstillers, antibiotica, hormonen, enz.) en narcotica (families van opiaten, cocaïne, amfetaminen en cannabinoïden) in menselijke mest afkomstig van festivals al of niet werden gereduceerd in co-compostingsproeven op labo-schaal. De resultaten verkregen na 3 weken compostering laten een significante biologische afbraak zien (meer dan 75%) van meer dan 2/3 van de microverontreinigingen geanalyseerde geneesmiddelen (MPP) (diclofenac, ketoprofen, ciprofloxacin, paracetamol, propranolol, econazol en ibuprofen) evenals voor geanalyseerde verdovende middelen zoals morfine, amfetamine en MDMA (MethylenedioxyMethAmphetamine of extase). Bepaalde moleculen vertonen echter kenmerken van persistentie in de bestudeerde residuen; dit is het geval met salicylzuur, erythromycine, ketamine, norketamine, tramadol en MDA (methylenedioxyamphetamine), een afbraakproduct van MDMA.

7.1.3.4 Reductie van pesticiden

Vergelijkingen van pesticideconcentraties vóór en na compostering toonden aan (Büyüksönmez et al., 2000) dat organochloorverbindingen het meest resistent zijn tegen biologische afbraak tijdens compostering. Op enkele uitzonderingen na, ontbinden pesticiden in andere categorieën matig tot zeer goed. Studies die de afbraakmechanismen volgden, geven aan dat mineralisatie slechts een klein deel van het verdwijnen van pesticiden verklaart. Andere prominente factoren zijn onder meer gedeeltelijke afbraak tot secundaire verbindingen, adsorptie, humificatie en vervluchtiging. Over het algemeen suggereren onderzoeksresultaten dat het patroon van de afbraak van pesticiden tijdens compostering vergelijkbaar is met de afbraak die in bodems wordt waargenomen. Met enkele belangrijke verschillen kan compostering worden beschouwd als een biologisch actieve bodemomgeving waarin de afbraak wordt versneld. Zoals sommige studies echter opmerkten, versnelt compostering niet altijd de afbraak van alle pesticiden. De aard van het pesticide, de specifieke compostingsomstandigheden en -procedures, de aanwezige microbiële gemeenschappen en de duur van de compostering beïnvloeden de mate en de mechanismen van afbraak.

Pesticiden uit de organochloorgroep, zoals dichloordifenyiltrichloorethaan (DDT), lindaan, endrin, aldrin, dieldrin, endosulfan en heptachloor, maken deel uit van de verbindingen die vermeld staan in het Verdrag van Stockholm inzake POP's en zijn wereldwijd verboden of aan beperkingen onderworpen vanwege de risico's voor het milieu en de menselijke gezondheid. Deze oude pesticiden zijn echter zeer persistent met lange halfwaardetijden en worden nog steeds aangetroffen in de bodem en sediment. Een review studie (Lin et al., 2022) vat de resultaten samen van enkele recente studies naar de bioremediatie van organochloor- en organofosfaatpesticiden door middel van biologische behandelingsmethoden. Bioremediatie van organochloor (DDT, aldrin, lindaan, α - en β -endosulfan) verloopt trager dan organofosfaatpesticiden (foraat en chloorpyrifos), wat te wijten is aan hun hogere toxiciteit. Egbe et al. (2021) rapporteerden dat organochloorpesticiden het aantal bacterie- en schimmelsoorten verminderden wanneer ze aan landbouwgrond werden toegevoegd, wat impliceert dat deze verbindingen giftig zijn voor sommige micro-organismen. Bioremediatie toonde ook een hoge verwijderingsefficiëntie. Ali et al. (2014) rapporteerden dat compostering gelijktijdig meerdere bestaande pesticiden (aldrin, α -endosulfan, β -endosulfan, lindaan) kon afbreken en een hoge afbraakefficiëntie van 80-87% kon bereiken na 100 dagen composteren. De meeste moderne pesticiden zijn organische chemicaliën die biologisch afbreken (Chaudhari et al., 2023). Pesticiden die op de bodem worden aangebracht, kunnen een jaar of langer werkzaam zijn. In sommige gevallen vormt een tekort aan gemakkelijk afbreekbaar organisch materiaal in de bodem een slechte voedingsbodem voor microben om pesticiden af te breken. Chemische verontreinigende stoffen in residuen of in bodems waaraan verontreinigde residuen zijn toegevoegd, kunnen worden verminderd door verschillende microbiële gemeenschappen en thermofiele omstandigheden te gebruiken tijdens het composteren (Huang et al., 2018; Wirsching et al., 2020).

Uit onderzoek van VLACO¹³¹ blijkt dat bijvoorbeeld clopyralid een meer persistent herbicide is. Het wordt gebruikt voor o.a. onkruidbestrijding op particuliere gazons, grasvelden, (paarden)weides en graanvelden¹³². Clopyralid is moeilijk opspoorbaar via de klassieke chemische onderzoeken omdat de concentraties van clopyralid in compost zeer laag zijn. Daarom breidde VLACO de kwaliteitsopvolging uit met biotoetsen, dit zijn testen waarbij specifieke planten worden gebruikt om zeer lage concentraties van stoffen te bepalen. Twee groentefamilies zijn gevoelig voor zelfs zeer lage concentraties van deze herbicideresidu's. De vergroeiingen worden meestal vastgesteld bij tomaat, aardappel, paprika en peper en in de familie van de vlinderbloemigen, bij erwten en bonen. Er wordt soms ook oogstvermindering vastgesteld. De concentraties in compost, aangetoond in biotoetsen, zijn gemiddeld 50 maal lager dan de MRL voor voeding.

¹³¹ VLACO: <https://vlaco.be/nieuws/clopyralid-blijkt-erg-persistent-herbicide>

¹³² Sinds 2020 is de verkoop en het niet-professioneel gebruik van selectieve herbiciden die minstens één werkzame stof van synthetische oorsprong bevatten, verboden. Het gaat dan vooral om producten met pyridinecarboxyleenzuren en een groep herbiciden met als meest bekende stoffen aminopyralid, clopyralid, fluroxypyren en triclopyr. (Bron: VLACO)

7.1.3.5 Reductie van microplastics

De OZO-composteerinstallatie (Ostrava, Tsjechië) verwerkt jaarlijks 15.000 ton stedelijk groenafval (gft?) van huishoudens en inzamelpunten compost. De compostering vindt plaats in rijen die zijn afgedekt met folie om geurlekkage te voorkomen en de vochtigheid te optimaliseren. Voor de studie van de effecten van compostering op microplastics (Růžičková J., 2022) werden op vier tijdstippen monsters genomen: aan het begin van de compostering (15 april 2020), drie maanden later (15 juli 2020) – de standaardtijd voor compost om te rijpen in de composteerinstallatie – en na zes maanden (17 oktober 2020). Het laatste tijdstip was nog een jaar later (12 oktober 2021).

In de monsters werden ten minste 41 organische kunststofverbindingen aangetroffen, met concentraties die sterk varieerden van 0,15 tot 143,9 mg/kg voor het inputmateriaal, van 0,62 tot 24,2 mg/kg voor compost van drie maanden, van 0,08 tot 10,0 mg/kg gedurende zes maanden en van 0,06 tot 7,4 mg/kg gedurende 18 maanden. De drogestofconcentratie van alle verbindingen in de rijpe compost (zes maanden) was 122,6 mg/kg DS, wat in goede overeenstemming is met Braun et al. (2021), die de maximale concentratie van 120 mg/kg DS in compost kwantificeerden. De concentraties van polymere verbindingen namen na drie maanden af met 33 tot 84%, terwijl de afname voor additieven 68% bedroeg. Na 18 maanden was het verlies hoger dan 82%, behalve voor polypropyleen (slechts 70%). De uitloogbaarheid van polymere verbindingen nam na drie maanden compostering af tot een kwart voor de meeste polymeren (behalve polypropyleen en polyethyleen) en tot een derde voor additieven.

Een recente Chinese studie (Dazhuang D., 2025) onderzocht de ecologische risico's en afbraakmechanismen van microplastics in compost. Eerdere studies hebben aangetoond dat de hoge temperaturen, verhoogde luchtvochtigheid en zuurstofrijke omstandigheden die kenmerkend zijn voor compostering de veroudering en afbraak van microplastics kunnen versnellen. Evenzo rapporteerden Sun et al. een significante afname van zowel de hoeveelheid als de deeltjesgrootte van microplastics tijdens het composteren, gepaard gaand met een afname van hun koolstofgehalte (Sun et al., 2021).

Naast traditioneel composteren zijn innovatieve methoden onderzocht om de afbraak van microplastics te verbeteren. Chen et al. gebruikten hyperthermofiele compostering (hTC) voor in-situ biodegradatie van microplastics in slib, waarmee een verwijderingspercentage van 43,7% werd bereikt na 45 dagen - de hoogste gerapporteerde biodegradatie van microplastics tot nu toe (Chen et al., 2020).

Dazhuang et al. (2025) deden een experiment met het toevoegen van ijzermineralen (magnetiet) in de compostering van rioolwaterzuiveringsslib met 115.000 MPs/kg DS, waarvan 95% microplastic deeltjes kleiner dan 200µm. De reductie-efficiëntie van de microplastics bij gewone compostering bedroeg 6,49% vergeleken met het ruwe slibmonster. De reductie-efficiëntie van de microplastics bij compostering met toevoeging van ijzermineralen bedroeg 35,93% (na 36 dagen), wat 5,53 keer beter was dan de reductie-efficiëntie van gewone compostering. Wat hiermee werd aangetoond, is dat een groot aantal thermofiele ijzer reducerende bacteriën in thermofiele compostering het redoxproces van ijzer kunnen bevorderen, wat leidt tot de productie van hydroxylradicalen bij compostering en de versnelling van de veroudering van microplastics.

7.1.3.6 Reductie van andere pollutanten

In het reeds eerder aangehaalde onderzoek van Jana Mühlenberg (2024) werden ook de concentraties van *organische pollutanten*, zoals perfluortensiden¹³³ (PFT's), dioxines, PCB's en PAK's onderzocht. Alle compoststalen van menselijke mest bleven onder de Duitse grenswaarden.

Voor PFAS is de Duitse norm gesteld op 0,1mg of 100µg/kg DS. De concentraties in de compoststalen van menselijk mest bleven onder 0,01mg of 10µg/kg DS, te vergelijken met de Vlaamse toetsingswaarde voor compost van 15µg/kg DS.

Voor dioxines bleven de compoststalen van menselijk mest ruim onder de Duitse norm van 30ngTEQ/kg DS en onder de 20ngTEQ/kg DS uit het voorgestelde Vlaamse normenkader voor compost van droogtoiletten (FOD VVVL).

Voor PCB's bleven de compoststalen van menselijk mest ver onder de Duitse norm van 0,1mg/kg DS.

Voor PAK's bleven de compoststalen van menselijk mest ruim onder de Duitse norm van 6mg/kg DS en onder de 20mg/kg DS uit het voorgestelde Vlaamse normenkader voor compost van droogtoiletten (FOD VVVL).

Een Amerikaanse studie (Timshina et al., 2024) onderzocht het lot van 40 PFAS in compost van voornamelijk keukenafval (met een beetje tuinafval) dat werd opgehaald bij huishoudens, restaurants en koffieshops. Het keukenafval bevatte ook composteerbare voedselverpakking van plantaardige vezels, zoals papieren borden en bekertjes van plantaardig plastic omdat deze producten doorgaans bij de bron samen met groente- en fruitafval worden afgevoerd. Bij het opzetten van de composthopen werd gehakseld snoeihout bijgemengd. Elk van deze materialen werd vooraf gescreend op 40 PFAS, wat concentraties opleverde van minder dan 1 ng/g in houtsnippers en voedselafval en van 1380 ng/g in percolaat van de gebruikte composteerbare verpakking dat in contact kwam met het voedsel. Dit bevestigde dat deze verpakkingen doorgaans de grootste PFAS-bron zijn in gft-compost, met concentraties die tot drie ordes van grootte hoger liggen dan die in mulch en voedselresten zonder verpakking.

De concentraties van de beoogde Σ PFAS namen toe met toenemende rijpingsleeftijd (van 3 tot 12 maand) van de compost (12,6–84,3 µg/kg DS). Van de 15 in compost gekwantificeerde PFAS-groepen leidden perfluorcarbons (PFCA's) met een korte keten – met name C5- en C6-PFCA's – de stijgende trend, wat suggereert dat precursor-PFAS door aerobe afbraak biotransformatie ondergaan naar uiteindelijke PFAS-groepen. Verschillende precursor-PFAS-groepen werden ook gemeten, waaronder fluortelomeercarbonzuren (FTCA's) en polyfluorfosfaatdiesters (PAP's).

Omdat de meeste gerichte analysemethoden en voorgestelde regelgeving echter prioriteit geven aan de uiteindelijke PFAS-groepen, zou het testen van volledig gerijpte compost de meest relevante momentopname opleveren van PFAS die op het land kan worden toegepast.

In het project 'Bodemverbetering met slibcompost', dat wordt uitgevoerd op Proefboerderij de Marke in Hengelo, is op kleine schaal onderzocht of en hoe zuiveringsslib in de vorm van slibcompost opnieuw kan worden toegepast als meststof en bodemverbeteraar in de landbouw¹³⁴.

¹³³ Geperfluoreerde oppervlakreactieve stoffen (PFT's) zijn, binnen de uitgebreide klasse van PFAS, de groep stoffen die de grootste risico's voor de gezondheid vormen. Hiertoe behoren PFOS en PFOA.

¹³⁴ Brochure Slibcompost, uitgegeven door de Provincie Gelderland, LTO Noord, Waterschap Rijn en IJssel en STOWA in 2019.

Slibcompost wordt bereid door zuiveringsslib te mengen met twee groenstromen: bermmaaisel en sloot/taludmaaisel. In de proefopzet werd geëxperimenteerd met verschillende composteringstechnieken: de klassieke compostering in rillen en de Bokashi fermentatietechniek. Slibcompost werd gedurende een 3-tal jaren jaarlijks op de proefvelden worden ondergewerkt (2,5 kg/m², in totaal 640 kg/jaar) voor een cultuur van snijmais.

Uit de analyseresultaten blijkt dat de gehalten van alle *metalen* in het zuiveringsslib onder de toetsingswaarde zitten. Hoewel geen normoverschrijdingen in het zuiveringsslib zelf kon worden geconstateerd, was zowel in deze slibcompost als in slib-Bokashi een lichte overschrijding van het gehalte aan chroom, koper en zink waar te nemen.

Naast anorganische stoffen werd ook een analyse uitgevoerd van de belangrijkste ca. 300 *organische microverontreinigingen inclusief PFAS stoffen*. Ook hiervoor geldt dat er geen sprake is van normoverschrijding, waardoor de toepassing van slibcompostproducten vooralsnog zonder extra risico's kan worden ingezet. Het is natuurlijk wel van belang de gehalten aan zowel metalen als organische microverontreinigingen te monitoren en de metingen de komende jaren te herhalen, temeer daar ook de kwaliteit van slib en groenstromen elk jaar anders is.

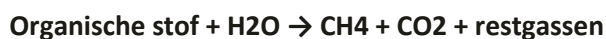
In een review-studie (Lin et al., 2022) m.b.t. compostering en de toepassing ervan bij bioremediatie van organische verontreinigingen worden reductiepercentages voor PAK's vanuit verschillende studies gepresenteerd. Composteren reduceert PAK's in rioolwaterzuiveringsslib (met initiële concentraties van 6-16mg PAK's/kg slib) met 60-75% al naargelang de verschillende studies (met composteertijden variërend van 39 tot 110 dagen).

7.1.4 Vergisting

7.1.4.1 Algemeen proces

Vergisten is een proces waarbij biodegradeerbaar materiaal onder gecontroleerde omstandigheden en onder anaerobe condities (in afwezigheid van zuurstof) door micro-organismen wordt omgezet en afgebroken. Het vergistingsproces gaat gepaard met productie van biogas, dat als energiebron kan worden aangewend. Het overblijvende digestaat kan dienst doen als meststof of het kan nabehandeld worden in functie van het beoogde gebruik bv. via droging of compostering (BBT, 2024b).

Biogas is een mengsel van CH₄ (typisch 50 tot 70 %), CO₂ en restgassen (o.a. H₂S, NH₃, N₂ en H₂)¹³⁵. De afbraakreacties tijdens het vergistingsproces kunnen in vereenvoudigde vorm als volgt worden weergegeven:



Het vergistingsproces verloopt in vier fases die geleidelijk in elkaar overlopen: de hydrolyse, de acidogene fase of fermentatie, de acetogene fase en de methanogene fase. Bij de verschillende fasen zijn verschillende soorten micro-organismen betrokken. Het is belangrijk dat deze in voldoende hoeveelheden en in

¹³⁵ In Vlaanderen is het gemiddelde methaangehalte van biogas van de agrarische vergisters 56,4%. (Bron: INAGRO)

evenwichtige verhoudingen aanwezig zijn. Schommelende belastingen en plotselinge wijzigingen in substraatsamenstelling moeten vermeden worden, omdat dit het microbiologisch evenwicht kan verstoren.

Het gevormde biogas wordt uit de fermentors opgevangen, en eventueel ontdaan van verontreinigingen die hinderlijk kunnen zijn voor de energetische valorisatie. Om variaties in de biogasproductie op te vangen, is het meestal noodzakelijk om een kleine biogasopslag te voorzien. Bovendien moet een gasfakkel aanwezig zijn om in geval van nood een (tijdelijke) overmaat aan biogas te kunnen wegwerken.

De meest gangbare praktijk om energie uit biogas op te wekken, is door het te verbranden in een gasmotor met warmtekrachtkoppeling (WKK). Afhankelijk van het concept is een deel van de (of alle) warmte en de elektriciteit nodig voor het vergistingsproces zelf. Zo heeft de biogasreactor zelf een warmtevraag om op temperatuur te blijven. Afhankelijk van het proces zal een temperatuur van 32 - 42°C (mesofiel) of 48 - 55°C (thermofiel) worden aangehouden. Voor de digestaatbehandeling wordt soms ook gekozen voor drogen en/of indampen, waarbij het grootste deel van de geproduceerde warmte wordt gebruikt, of waarbij de geproduceerde warmte van de WKK zelfs ontoereikend is.

Een alternatief is biogas opzuiveren tot aardgaskwaliteit waardoor het rechtstreeks geïnjecteerd kan worden in het aardgasnet of gebruikt kan worden als transportbrandstof. In dit geval spreken we niet meer van biogas, maar van biomethaan.

Na de eigenlijke vergistingsstap kan het vergiste materiaal (digestaat) ofwel direct toegepast worden in de landbouw ofwel eerst nog verder worden ontwaterd, gedroogd of gecomposteerd. Er treedt veel minder massaverlies op bij vergisting dan bij compostering: in de regel heeft digestaat een massaverlies van 5 - 10% ten opzichte van het inputmateriaal.

Naargelang het drogestofgehalte (DS) in de reactor wordt er onderscheid gemaakt tussen natte (DS < 20%) en droge (DS > 20%) vergisting. Droge vergisting wordt voornamelijk toegepast bij de vergisting van gft-afval en andere relatief droge substraten, zoals bermmaaisel. Bij natte vergisting zijn het inputmateriaal en digestaat verpompbaar.

Vergistingsinstallaties kunnen ingedeeld worden op basis van de gebruikte inputstromen:

- Landbouw- en industriële vergisters:
 - met of zonder covergisting van mest;
 - met of zonder covergisting van dierlijke bijproducten andere dan mest;
- Vergisting van gft-afval (met maximaal 25% organisch-biologisch afval).

Er is ook een onderscheid tussen grootschalige en kleinschalige installaties. Een biogasinstallatie met een geïnstalleerd vermogen tot en met 200 kW_{el} en een vergisting van maximaal 5.000 ton/jaar bedrijfseigen reststromen valt onder de categorie kleinschalige vergisting, ook pocketvergisting genoemd. Het zijn overwegend monovergisters die slechts één inputstroom hebben. In 2018 waren er in Vlaanderen 59 installaties die onder deze definitie vielen; 80% ervan bevindt zich op landbouwbedrijven, de rest zijn vooral

vergisters die op rioolwaterzuiveringsslib werken¹³⁶. Vlaanderen telde in 2022 138 groot- en kleinschalige biogasinstallaties, waarvan 55 pocketvergisters¹³⁷.

De kleinschalige be- en verwerking van keukenafval en etensresten staat volop in de belangstelling. Er verschijnen steeds meer nieuwe apparaten op de markt die vergisten, composteren, drogen of vernalen.

Het doel van deze apparaten is in de meeste gevallen het keukenafval en etensresten om te zetten in energie of in een bodemverbeterend middel, te lozen in de riolering of te converteren tot een geurloze droge fractie om geurhinder te vermijden. Helaas blijkt dat de meeste kleinschalige verwerkingsmethoden er niet in slagen om een stabiele en veilige compost of digestaat te produceren en ook relatief veel energie verbruiken. Ze mogen ook geen risico vormen voor volksgezondheid en milieu.

Wanneer er een biologische behandeling van het keukenafval en etensresten plaatsvindt dient het eindproduct van deze apparaten te beschikken over een keuringsattest, wanneer het als bodemverbeteraar wordt toegepast. Kleinschalige systemen om keukenafval en etensresten te verwerken voldoen meestal niet aan de vereisten van het Algemeen Reglement van de certificering waardoor het eindproduct niet in aanmerking komt voor een keuringsattest. Hierdoor blijft het eindproduct een afvalstof.

Keukenafval en etensresten worden volgens de verordening dierlijke bijproducten beschouwd als categorie 3 materiaal. Voor de biologische behandeling van dierlijke bijproducten moet er ook een erkenning worden afgeleverd conform de Verordening dierlijke bijproducten (VO 1069/2009). De vereisten van een dergelijke erkenning zijn niet haalbaar voor deze kleine installaties.¹³⁸

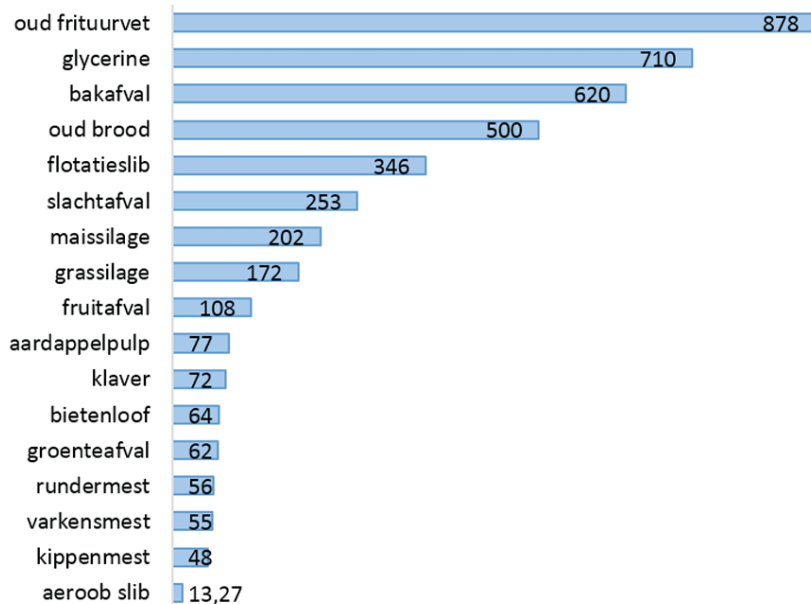
Er bestaat een federale lijst van toegelaten inputstromen voor vergisting (zie verder: paragraaf 3.1.4.2). Hieronder een overzicht van het gemiddeld biogaspotentieel van diverse inputstromen:

¹³⁶ INAGRO, Brochure kleinschalige vergisting, 2022

¹³⁷ Biogas-E, rapport 'De Vlaamse biogassector in 2022'. Dit rapport geeft een overzicht van de volledige biogassector met inbegrip van agro-industriële vergisters, gft-vergisters, biogasproductie uit rioolwater- of industriële afvalwaterzuiveringsinstallaties, en de recuperatie van biogas uit stortplaatsen.

¹³⁸ Bron: OVAM, <https://ovam.vlaanderen.be/kleinschalige-systemen-om-keukenafval-en-etensresten-te-verwerken>

Figuur 10 Biogasopbrengst (Nm³/ton)



Bron: INAGRO, Brochure kleinschalige vergisting, 2022.

Hoewel in theorie alle biomassastromen vergistbaar zijn, zullen niet alle biomassastromen technisch (en ook economisch) interessant zijn om te vergisten. De kenmerken van de biomassa beïnvloeden het technische rendement van de biogasinstallatie. De chemische karakteristieken bepalen de hoeveelheid, de kwaliteit van het geproduceerde gas en de verblijftijd in de reactor. Zo hebben vetrijke producten een groter biogaspotentieel dan groenteafval. Hoeveel biogas een biomassastroom uiteindelijk opbrengt, hangt af van de energetische waarde en de verteerbaarheid van de biomassa. Elk inputmateriaal heeft een ander biogaspotentieel en kan bijvoorbeeld sterk fluctueren in functie van de versheid. Zo verliest varkensmest binnen de eerste dagen al een significant aandeel van zijn biogaspotentieel.

De fysieke karakteristieken van de biomassa bepalen de technologie en voorbehandeling die nodig zijn voor de vergisting, want niet elke technologie is geschikt voor elk type inputmateriaal. Terwijl runder- en varkensmest verpompbaar zijn en in de regel geen voorbehandeling nodig hebben, moeten andere agrarische inputmaterialen, zoals groenteresten, wel een voorbehandelingsstap doorlopen. Groenteresten moeten in de regel versnipperd, gewassen en verpompbaar gemaakt worden voordat ze in de vergister kunnen.

7.1.4.2 Vergisting van menselijke mest

Het wordt algemeen erkend dat het biogaspotentieel van menselijke feces niet zo hoog is in vergelijking met bijvoorbeeld schapenmest of varkensmest.

Co-vergisting leidt vaak tot betere resultaten dan monovergisting zo blijkt uit onderzoek.

In een onderzoek van biogasopbrengst voor diverse combinaties van feces en rijststro (Adjama et al., 2022) toonden de resultaten aan dat de toevoeging van rijststro¹³⁹ aan menselijke ontlasting een significant effect had op de biogasopbrengst. Een 50:50 verhouding was het beste voor de methaanproductie. Meer dan 60% feces gaf meer ammoniak en een hogere pH, terwijl meer dan 60% rijststro meer CO₂ en een lagere pH gaf, beide effecten leidend tot verminderde activiteit van methaanvormende bacteriën, en dus een lagere methaanproductie.

In een ander onderzoek (Poocheera et al., 2014) werd de co-vergisting van menselijke feces en organisch afval (voedselresten) in verschillende mengverhoudingen (1:0, 2:1, 1:1, 1:2, 0:1) bestudeerd. De test met twee delen menselijke feces op één deel voedselresten bracht 0,59 m³ biogas op per kilogram vluchtige stof (VS), of omgerekend 81,13m³/ton vers mengsel. De test met enkel feces, zonder voedselresten, bracht 71,5m³/ton verse feces op.

Tijdens de biogasproductie kan menselijke urine worden gebruikt als biokatalysator (Sayeed, 2023), wat de biogasproductie tot 30% kan verhogen: 0,77 m³ biogas/kg VS (of omgerekend 106 m³/ton vers mengsel). De biogasproductie kan het hoogst zijn in de verhouding 2:5:2 van organisch afval (menselijke ontlasting + voedselresten), menselijke urine en water, waarbij de verhouding van menselijke ontlasting en voedselresten 2:1 is. Voor het genereren van maximaal biogas is het geschikte pH-bereik 6,5-8 en de temperatuur 30 tot 38 graden Celsius. De geschikte C/N die de biogasproductie verbetert, is 25-30.

Houtzaagsel of -schavelingen (in strooiselmateriaal) worden moeilijk afgebroken door anaerobe bacteriën. Uit talrijke onderzoeken is gebleken dat de voorbehandeling ervan een essentiële stap is, om de structuur van de cellulose te wijzigen en de omzetting in eenvoudige suikers met een hoog moleculair gewicht, zoals koolhydraten, door enzymen te vergemakkelijken. Elke voorbehandeling heeft zijn eigen effect(en) op de cellulose, hemicellulose en lignine; de drie hoofdcomponenten van lignocellulose biomassa. In een onderzoek van Griet Zeeman (Hendriks & Zeeman, 2009) werden de verschillende effect(en) van verschillende voorbehandelingen op de drie hoofdcomponenten van de lignocellulose biomassa besproken om de verteerbaarheid ervan te verbeteren. Stoomvoorbehandeling, kalkvoorbehandeling, vloeibare heet water voorbehandelingen en ammoniak gebaseerde voorbehandelingen zijn voorbehandelingen met een hoog potentieel. De belangrijkste effecten zijn het oplossen van hemicellulose en verandering van de ligninestructuur, wat zorgt voor een verbeterde toegankelijkheid van de cellulose voor hydrolytische enzymen.

7.1.4.3 Reductie van milieu- en gezondheidsrisico's

Uit een reeds eerder geciteerde studie (Dalahmeh et al., 2022) nemen we enkele bevindingen over. Vergisting van slib biedt stabilisatie en het extra voordeel van verminderde biologische activiteit in de biomassa (Chen et al., 2016). Het is echter aangetoond dat vergisting niet voldoende is voor *het verwijderen van farmaceutica* met verwijderingsrendementen van >80% reductie voor 5 van de 23 farmaceutica en >30% reductie voor nog eens 3 van de 23, terwijl de resterende met minder dan 30% werden gereduceerd (Malmborg en Magnér, 2015). In een vergistingsexperiment van fecale slib toonden Gros et al. (2020) aan dat van de 17 stoffen slechts twee (oxazepam en losartan) een verwijdering van ≥50% vertoonden, zeven stoffen

¹³⁹ In dit onderzoek werd het rijststro fijn vermalen als voorbehandeling.

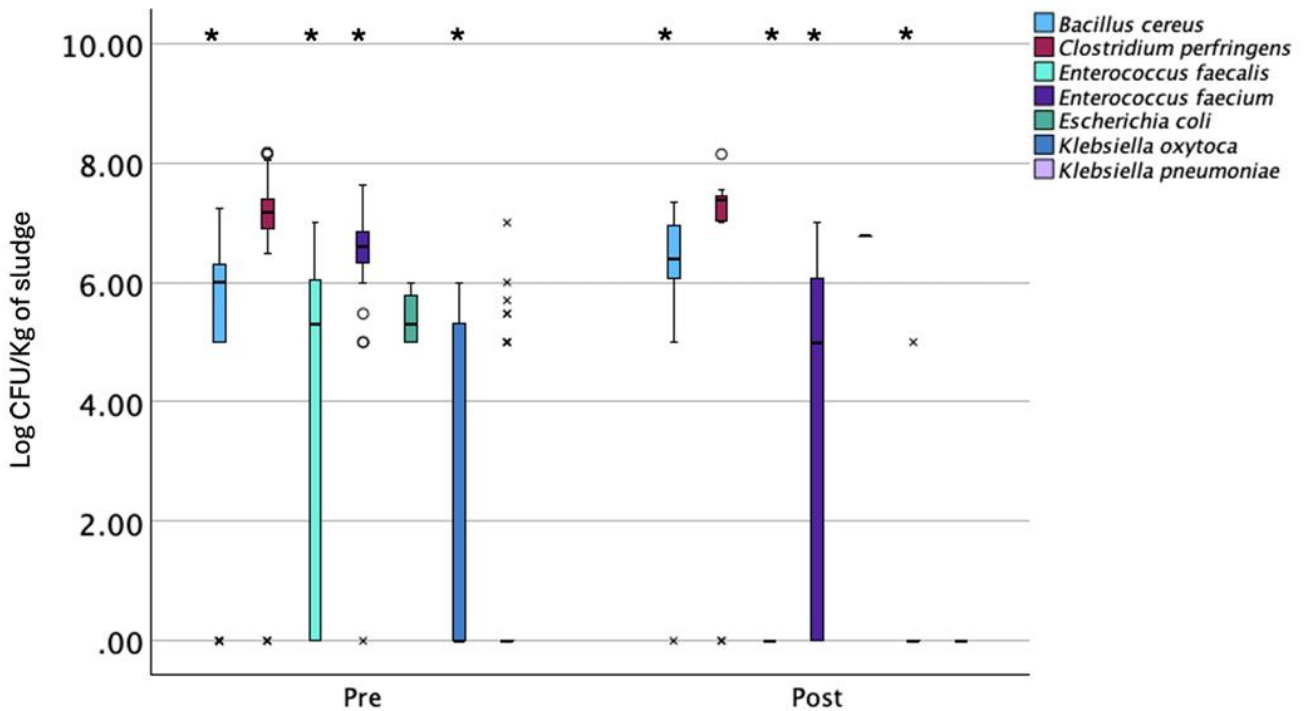
(atenolol, metoprolol, carbamazepine, lamotrigine, venlafaxine, valsartan en lidocaïne) werden verwijderd met 10–37%. De overige acht stoffen werden slecht verwijderd (<10%).

In een rapport van het Umweltbundesamt (German Environment Agency/UBA) over antibiotica en antibioticaresistentie in het milieu (Adler N., 2018) werd gesteld dat meststoffen, vloeibare mest, stalmest, fermentatieresten, rioolslib en afvalwater, voorafgaand aan hun gebruik als landbouwmeststof, over het algemeen niet geverifieerd worden op antibioticaresistentie, antibioticaresistente bacteriën of -genen. In het kader van de circulaire economie zouden hiervoor kosteneffectieve en eenvoudig te gebruiken meetmethoden moeten worden ontwikkeld en wettelijk worden vastgelegd, en zouden specifieke parameters moeten worden gecontroleerd. De auteurs stellen dat continue systemen voor de opslag van mest, bijvoorbeeld in biogasinstallaties, bijzonder kritisch zijn. Hierbij wordt de mest gedurende lange perioden heen en weer verplaatst zonder het systeem volledig leeg te maken. Dit maakt de ontwikkeling en verspreiding van een reservoir van multiresistente bacteriën mogelijk. De ontwikkeling van antibioticaresistenties in biogasinstallaties die met verontreinigde mest werken, zou regelmatig gemonitord moeten worden. Niet te onderschatten zijn de lage concentraties van fluoroquinolonen zoals enrofloxacin en het actieve transformatieproduct ciprofloxacin, omdat deze zeer effectief zijn en daarom ook in zeer beperkte doseringen actief zijn in vergelijking met veel andere antibiotica. Ook is het mogelijk gebleken om grote hoeveelheden antibiotica te documenteren in fermentatieresten die ontstaan door de fermentatie van de aangetaste mest in biogasinstallaties (Ratsak, 2013).

In een recente studie (Franchitti et al., 2024) werd kennis verkregen over de aanwezigheid van humane pathogenen en antimicrobiële resistentie in rioolzuiveringsslib, voor en na de anaerobe vergisting. De bemonsteringscampagne werd uitgevoerd van november 2021 tot juni 2022 in twee RWZI's in Noord-Italië. Er werden vijftig slibmonsters verzameld. In totaal werden 231 verschillende bacteriesoorten geïdentificeerd in de monsters. Firmicutes en Proteobacteria waren de meest vertegenwoordigde stammen (respectievelijk 103 en 84 soorten); de meest voorkomende geslachten waren *Clostridium*, *Enterococcus*, *Bacillus* en *Staphylococcus*, dat tot de stam Firmicutes behoort, en *Acinetobacter*, een Proteobacterium. De meest voorkomende bacteriële pathogenen zijn *Bacillus cereus*, *Clostridium perfringens*, *Enterococcus faecium*, *Enterococcus hirae*, *Enterococcus faecalis*, *Paraclostridium bifermentans*, *Klebsiella oxytoca*, *Clostridium butyricum* en *Acinetobacter lwofii*. In de schimmelmicrobiële gemeenschap zijn de meest voorkomende de geslachten *Candida* en *Saccharomyces*.

De anaerobe vergisting veroorzaakt een verschuiving in de microbiële samenstelling van het slib (zie figuur). Zij vermindert de *B. cereus*-concentratie niet significant, maar verhoogt deze juist. *Clostridium perfringens* lijkt niet te worden beïnvloed. De concentraties van *E. faecalis*, *E. faecium* en *K. oxytoca* daarentegen worden significant verlaagd, terwijl *K. pneumoniae* ook zelden werd waargenomen in de influent.

Figuur 11 Concentraties pathogene bacteriën in influent en effluent van vergist zuiveringsslib



In de boxplot worden de concentraties van geselecteerde bacteriesoorten voor en na vergisting gerapporteerd. Significante verschillen in de concentratie van de pathogene bacteriën (Mann-Whitney U-test, $p < 0,05$) tijdens vergisting worden gemarkeerd met *.
Bron: Franchetti et al. (2024)

Zeven pathogene bacteriesoorten werden geïsoleerd en getest op gevoeligheid voor clindamycine, meropenem, norfloxacin, penicilline G en tigecycline. Van de isolaten van *Clostridium perfringens* en *Bacillus cereus* waren respectievelijk 67 en 50% resistent tegen clindamycine. Twee isolaten van *B. cereus* en twee van *C. perfringens* waren ook resistent tegen andere antibiotica, wat multiresistentie aantoonde. Anaerobe vergisting is de belangrijkste oorzaak van een vermindering van sommige antibiotica resistente genen (1 Log), maar er waren nog steeds resistente bacteriën aanwezig.

Digestaat kan rechtstreeks op het land worden toegepast, mits voldaan wordt aan de geldende mestregelgeving (mestdecreet), aan de afvalstoffenwetgeving (afvalstoffendecreet, VLAREMA en Besluit Dierlijke Bijproducten) en aan het KB van 07/01/98 (handel in meststoffen, bodemverbeterende middelen en teeltsubstraten). Indien er dierlijke bijproducten worden mee-vergist, moet het digestaat gehygiëniseerd worden (1u op 70°C of een alternatieve gevalideerde methode)¹⁴⁰.

Daarnaast is het ook mogelijk om het digestaat verder te behandelen, al dan niet voorafgegaan door scheiding in een dikke en een dunne fractie, bv. door navergisten, drogen (banddroger, peddeldroger, wervelbeddroger, beddroger of flashdroger), composteren/biothermisch drogen, bekalken, korrelen (na drogen). Eventueel kan

¹⁴⁰ Bron: <https://ibbt.emis.vito.be/content/digestaatbehandeling>

ook ter hoogte van deze processtappen hygiëniseren worden toegepast.

Het Algemeen Reglement van de Certificering (van organisch-biologisch afval tot grondstof) voorziet dat bermmaaisel na vergisting verplicht moet nagecomposteerd worden, omdat de afdoding van plantpathogenen en onkruidzaden zou worden gegarandeerd.

7.1.5 Bokashi fermentatie

Bokashi fermentatie is een anaeroob proces en gebeurt dus afgesloten van de lucht. Het bewaart tijdelijk organische stof, koolstof, energie en nutriënten. Het proces verloopt min of meer bij omgevingstemperatuur, in tegenstelling tot bij compostering waar de temperatuur flink stijgt. Fermenteren kan in een fermentatiekuil waarin alles als een lasagne opgebouwd wordt of waarin alles goed onder elkaar wordt gemengd. Maar het kan ook in kubiteainers. Het gefermenteerd product wordt bokashi genoemd, wat in feite een Japans woord is voor 'goed gefermenteerd organisch materiaal'.

Het basisrecept voor bokashi is 1 ton vers organisch materiaal met 2 liter Microferm toegevoegd. Dat is een mengsel van melkzuurbacteriën, gisten en schimmels dat Agriton op de markt heeft gebracht. Als er geen micro-organismen worden toegevoegd die de fermentatie bevorderen, ontstaat er bij het uitsluiten van zuurstof ongewenste en soms zelfs schadelijke verrotting. Zeeschelpenkalk kan toegevoegd worden om een minder zuur eindproduct te krijgen, of klei om het bufferend vermogen te verhogen. Belangrijke randvoorwaarden zijn een droge stofgehalte van minstens 25% en een C/N van ongeveer 20/1. Groenteresten worden dus best gemengd met stro of stalmest.

Na zes tot acht weken luchtdicht afsluiten, volgt in principe een gebruiksklaar product, maar het kan eventueel nog twee jaar liggen voor gebruik. Bokashi kan makkelijk toegepast worden met een mestverspreider. Het product moet minstens enkele weken vóór het zaaien toegepast worden om de bodem de tijd te geven de bokashi te verwerken (in feite begint hier het composteringsproces). Als de toepassing te dicht bij het zaaien gebeurt, dan kan dit een remmend effect geven op het opkomend gewas. Dit geldt ook voor niet uitgerijpte compost¹⁴¹.

Bij composteren wordt tijdens het composteerproces gemakkelijk afbreekbare organische stof afgebroken tot stabiele humus. Bij Bokashi wordt deze afbraak uitgesteld: in de Bokashi-kuil of –emmer blijft de organische stof behouden. Echter, de organische stof wordt alsnog – weliswaar uitgesteld – afgebroken nadat het materiaal op het land is uitgereden of in de tuin is uitgespreid (of in het compostvat wordt gegooid), - en dus in contact komt met zuurstof. Dan start het afbraakproces waarbij het materiaal zuurstof en stikstof onttrekt aan de bodem. Volgens VLACO is er geen onderzoek dat aantoont dat onkruidzaden en plantenziektes in het Bokashi-proces effectief worden afgedood¹⁴².

Gezien er geen hoge temperatuur ontwikkeling voorkomt bij het fermenteren, stelt zich de vraag of fermentatie voldoende hygiëniseren met zich meebrengt om veilig als meststof gebruikt te kunnen worden of dat het enkel een bewaarstechniek is om afvalstoffen in afwachting van compostering te verwerken.

¹⁴¹ Bron: Proeftuinnieuws artikel, 'Verschillen tussen composteren en fermenteren in kaart gebracht', januari 2018.

¹⁴² Bron: <https://vlaco.be/sites/default/files/generated/files/news/vlaco-factsheet-bokashi-voor-kringloopzine.pdf>

Er zijn enkele aanbieders van droogtoiletten voor festivals¹⁴³ die de ingezamelde menselijke mest verwerken met een combinatie van fermentatie (1^e stap) en compostering (2^e stap). Volgens hen is er bij fermentatie wel sprake van een vorm van hygiënisatie: *“Tijdens de fermentatie daalt de pH-waarde, voornamelijk door de productie van melkzuur, naar ongeveer 4, wat bijdraagt aan de ‘zuurhygiënisatie’. Ziekteverwekkers kunnen niet overleven in zulke zure omstandigheden. Er ontstaat een substraat waarin veel van de oorspronkelijke voedingsstoffen bewaard zijn gebleven en dat na daaropvolgende compostering een zeer vruchtbare en hoogwaardige humusmeststof oplevert – à la terra preta. Er moeten wel micro-organismen worden toegevoegd die de fermentatie bevorderen, zoniet ontstaat er bij het uitsluiten van zuurstof ongewenste en soms zelfs schadelijke verrotting. Het is belangrijk dat fermentatie geen vervanging is voor composteren. Het composteren gebeurt altijd achteraf.”*¹⁴⁴ Uit deze praktijk blijkt dat fermentatie gebruikt wordt om de kwaliteit van het uiteindelijk compostproduct te verbeteren. Het zou ons echter in dit onderzoek te ver leiden om op zoek te gaan naar vergelijkend onderzoek naar kwaliteitsverschillen in compost.

In een masterproef aan de universiteit van Gent (De_Heyn, 2022) werd fermentatie uitgetest op paardenmest om na te gaan wat het effect was op het overleven van wormeieren (Cyathostominae spp.) na 3,5 maanden fermentatie. In 2 van de 3 fermentatietests werden geen infectieuze larven meer terug gevonden, wat kan duiden op een positief effect op het afdoden van deze larven. In de derde test werden 0 tot 0,461 larven per gram fermentatiemateriaal teruggevonden, maar hier was geen éénduidige verklaring voor. Enkele bronnen (SuperGrowth, 2021) vermelden dat het wel mogelijk is om parasieten uit te schakelen tijdens het fermentatieproces, anderen beweren van niet (Vermeij et al., 2018) en er zijn ook enkelen die het effect in twijfel trekken (Burch et al., 2018; VLACO, 2020).

7.1.6 Zuivering met planten

Fytoremediatie

In een rapport van STOWA (Laan, 2019) werden de mogelijkheden van fyto-remediatie van zware metalen in zuiverings-slib verkend. Er werd gekeken of planten-, paddenstoelen- of diersoorten in staat waren om metalen uit het slib te verwijderen en daarmee wegen te openen naar hergebruik van slib in de landbouw. Met name gehalten van koper en zink zijn te hoog. Nederland hanteert de strengste normen in Europa. Het tegenvallende resultaat van dit onderzoek wordt veroorzaakt door het feit dat de biobeschikbaarheid van metalen erg laag is door het hoge gehalte aan organische stof in slib.

Voor een grootschalige diffuse zware metalen verontreiniging is het kweken van hyper-accumulerend gewas de enige verwijderingstechniek die praktisch uitvoerbaar is, volgens EMIS/VITO:

“Naar verwachting zullen wellicht voldoende resultaten worden geboekt (tot rond de achtergrondwaarde). De maatregel duurt echter meerdere seizoenen, mogelijk decennia (nog verder onderzoek nodig). In-situ zal de techniek voornamelijk gebruikt worden voor lichte grootschalige diffuse verontreinigingen zoals het aanbrengen van gft-compost, zuiverings- of baggerslib. Grassen en klaver blijken ideaal te zijn voor fyto-remediatie omdat ze een vezelachtig wortelstelsel hebben dat een continue compacte rhizosfeer (d.i. de bodem in de onmiddellijke omgeving van de plantenwortels) vormt. Dit geeft tevens het bijkomend voordeel

¹⁴³ Kompotoi in Zwitserland (<https://www.kompotoi.ch/>) en Goldeimer in Duitsland (<https://goldeimer.de/>).

¹⁴⁴ Goldeimer: https://goldeimer.de/pages/fermentation?_pos=1&_psq=fermentation&_ss=e&_v=1.0

dat de bodem beschermd wordt tegen water- en winderosie. De literatuur maakt melding van de volgende grassen: alfalfa, klaver, zwenkgras, bermudagrass en raaigras.

Deze techniek is al op grote schaal toegepast voor de sanering van grondwater verontreinigd met metalen en de lichtere fracties van BTEX, minerale olie en gechlloreerde koolwaterstoffen. Deze fracties zijn mobiel, oplosbaar en biologisch afbreekbaar. Fytoremediatie wordt ook toegepast voor de sanering van bodemverontreiniging met PAK's, PCB's en andere persistente organische pollutanten die minder mobiel, oplosbaar, biologisch afbreekbaar en beschikbaar zijn."¹⁴⁵

Om komaf te maken met een historische PFAS-vervuiling door blusschuim (provincie Antwerpen), werden in 2024 1.500 wilgen aangeplant en werd hennep gezaaid op en naast de oefenplaats voor brandbestrijding. Wilgen en hennep trekken PFAS uit de grond en slaan deze op in hun blad. Omdat de wortels van een wilg tot op het grondwaterniveau doorgroeien, kan deze boom per dag tot 200 liter water uit de grond opzuigen. Het water stroomt naar de bladeren en verdampt. De PFAS blijft achter in de bladeren. Die worden 'geoogst' nog voor ze op de grond kunnen vallen. Daarna worden de bladeren experimenteel behandeld met technologieën waarbij de PFAS wordt vernietigd. Hennep pakt vooral de PFAS-vervuiling in het minder diepe, vaste deel van de bodem aan. Afgezien van de bladeren kunnen stengels en takken wel gerecycleerd worden. Nadeel is dat het veel tijd vergt, soms meerdere jaren. Het project zit nog in een studiefase; het is nog drie jaar wachten op de eerste resultaten.¹⁴⁶

Percolatievelden met beplanting

Natuurlijke waterzuivering steunt op de zelfzuiverende processen van water, bodem en planten. Deze afvalwaterzuiveringstechniek maakt geen gebruik van extra kunstmatige toevoer van energie of andere noodzakelijke stoffen. Meest bekend bij ons zijn de helofytenfilters.

Helofyten zijn planten die ingeworteld zijn in de bodem maar met een relatief groot deel boven de wateroppervlakte uitsteken. Mattenbies, lisdodde en riet zijn de meest gebruikte planten voor deze filters. Riet geniet de voorkeur omwille van zijn gunstige eigenschappen voor waterzuivering. Door het uitgebreide wortelstelsel en de grote hoeveelheid biomassa heeft riet een groot leefoppervlak voor bacteriën en andere micro-organismen. Deze zorgen voor een aanzienlijk deel van de zuiverende werking. Er bestaan drie types van helofytenfilters¹⁴⁷:

- vloeivelden: helofytenfilters met oppervlaktestroming;
- wortelzone-velden: helofytenfilters met onderstroming;
- percolatievelden of infiltratievelden: helofytenfilters met verticale stroming.

Best wordt voor de effectieve zuivering een voorbezinker (bv. septische put) geplaatst om de zwevende stoffen te verwijderen. Dit voorkomt ophoping en eventueel verstopping van het systeem.

Vanwege het geringe energieverbruik (verpompen) en het natuurlijk ogend systeem is de helofytenfilter een aantrekkelijke techniek voor kleinschalige afvalwaterzuivering. Het systeem vergt weinig onderhoud of controle. Er is geen slibproductie. Nadeel van dit systeem is de langere startfase voordat een volwaardig wortelstelsel is opgebouwd. De benodigde vrije ruimte is relatief groot (tot 5 m²/IE[1] voor een wortelzone rietveld) en de zuiverende werking is seizoen afhankelijk.

¹⁴⁵ Bron: <https://emis.vito.be/nl/tools/waboss/technieken/fyto remediatie>

¹⁴⁶ Bron: <https://vilt.be/nl/nieuws/wilgen-hennep-en-enzymes-halen-pfas-uit-bodem-en-grondwater-in-wereldwijd-uniek-saneringsproject>

¹⁴⁷ Bron: EMIS/VITO: <https://emis.vito.be/nl/bbt/bbt-tools/selectiesystemen/wass/technieken/kleinschalige-biologische-zuivering>

Sectoren waarin helofytenfilters worden toegepast zijn bijvoorbeeld slachthuizen, diepvriesbedrijven, melkveebedrijven, conservenbedrijven, aardappelverwerkende en groente verwerkende bedrijven, tabaksbedrijven, Maar ze worden ook vaak toegepast voor de zuivering van huishoudelijk afvalwater (zie praktijkvoorbeeld 'Leaudegem' in paragraaf 11.1.4).

Plantensystemen kunnen toegepast worden voor de verwijdering van o.a. de volgende parameters CZV (85-90%), BZV (90-95%), ZS (70-90%), N (>50%) en P (25-65%). Het zuiveringsrendement is sterk afhankelijk van de dimensionering (mate van belasting).

Een Marokkaanse studie (El Fanssi S., 2019) liet goede prestaties zien van zowel de verticale bedden als de horizontale bedden wat betreft de reductie van organische stof (95% BZV5, 93% CZV), zwevende stoffen (91% TSS) en nutriënten (67% N_{tot}, 62% P_{tot}). De reductie van fecale vervuilingsindicatoren heeft zeer belangrijke waarden bereikt, die respectievelijk variëren rond 4,4 log-eenheden voor totale coliformen, 4,3 log-eenheden voor fecale coliformen en 4,1 log-eenheden voor fecale streptokokken.

7.1.7 Pyrolyse, vergassing en verbranding

Onder *pyrolyse* wordt het organisch materiaal in afwezigheid van zuurstof thermisch ontleedt. *Vergassing* is een thermisch proces waarbij het organisch materiaal maximaal wordt omgezet in een gasvormige fase (syngas). Deze omzetting gebeurt door een partiële verbranding/oxidatie van de aanwezige koolstof. Zo kan vergassing, op basis van de luchttoevoer, gesitueerd worden tussen pyrolyse en verbranding. *Afvalverbranding* is de oxidatie van brandbaar materiaal aanwezig in de afvalstromen. Tijdens het verbrandingsproces ontstaan rookgassen waaruit energie kan worden teruggewonnen.

Biochar is een eindproduct van pyrolyse (en vergassing); vliegassen, bodemassen en slakken zijn een eindproduct van afvalverbranding.¹⁴⁸

Een studie (Bleuler et al., 2021) onderzocht het potentieel van biochar afkomstig van een droogtoiletsubstraat als bodemverbeteraar. Het substraat bestond uit urine, ontlasting en (+/-25%) houtsnippers en werd 10 min. gepyrolyseerd bij 500–650 °C. De biochar bevatte 25g N/kg DS, 33g P/kg DS en 21g K/kg DS. De biochar voldeed aan de Europese regelgeving (EBC) voor PAK's, PCB's, dioxinen en zware metaalconcentraties, behalve Zn en Ni. De kieming van zoutbestendige gerst werd niet beïnvloed door biochar-doses <50% DS, terwijl de kieming van zoutgevoelige sla werd geremd bij doses ≥2% DS, wat aangeeft dat de biochar zoutstress veroorzaakte.

Op basis van deze resultaten wordt urinescheiding aanbevolen om het zoutgehalte van de biochar te verminderen.

Bleuler et al. sommen enkele voordelen op van de pyrolyse van droogtoiletsubstraat tot biochar:

- vrij van pathogenen door de hoge procestemperatuur.
- kan gebruikt worden als meststof (bevat voldoende nutriënten).
- koolstofvastlegging: 60% blijft na 100 jaar in de bodem vastgehouden. Door het pyrolyseren van menselijke ontlasting zou ongeveer 0,11% van de menselijke koolstofuitstoot kunnen worden geneutraliseerd.

Het pyrolyseproces wordt doorgaans opgestart met externe energie, maar recupereert daarna energie uit de gassen die vrijkomen uit het gepyrolyseerde substraat. Als het inputmateriaal niet te nat is (maximaal 55%

¹⁴⁸ Bron: EMIS/VITO

vocht) kan het zonder externe energie gepyrolyseerd worden. Pyrolyseren stoot minder CO₂ uit ten opzichte van verbranding met energierecuperatie.¹⁴⁹

Een andere studie (Koulouri M. E., 2024) onderzocht het potentieel voor koolstofvastlegging voor fecale slibbehandelingssystemen met co-pyrolyse van menselijke ontlasting en houtbiomassa. Over het algemeen verbeterde co-pyrolyse de koolstofbinding en biochar stabiliteit, waardoor het koolstofvastleggingspotentieel werd verbeterd in vergelijking met pyrolyse van zuivere fecale grondstoffen. Biochar geproduceerd uit 50: 50 fecaal slib en houtsnippers bij 550 °C hadden de hoogste koolstofretentie (41,1%); deze grondstofmengverhouding komt overeen met ~30 g droog hout toegevoegd aan toiletten als afdek materiaal (per gebruiker per dag), op basis van de verwachte dagelijkse uitscheidingshoeveelheden. De geproduceerde biochar is geschikt voor langdurige koolstofopslag. De biochar-eigenschappen bleken meer afhankelijk te zijn van de samenstelling van de grondstof dan van de pyrolysetemperatuur – op voorwaarde dat de bereikte temperatuur voldoende was om de voltooiing van de belangrijkste pyrolytische reacties (≥500 °C) te garanderen.

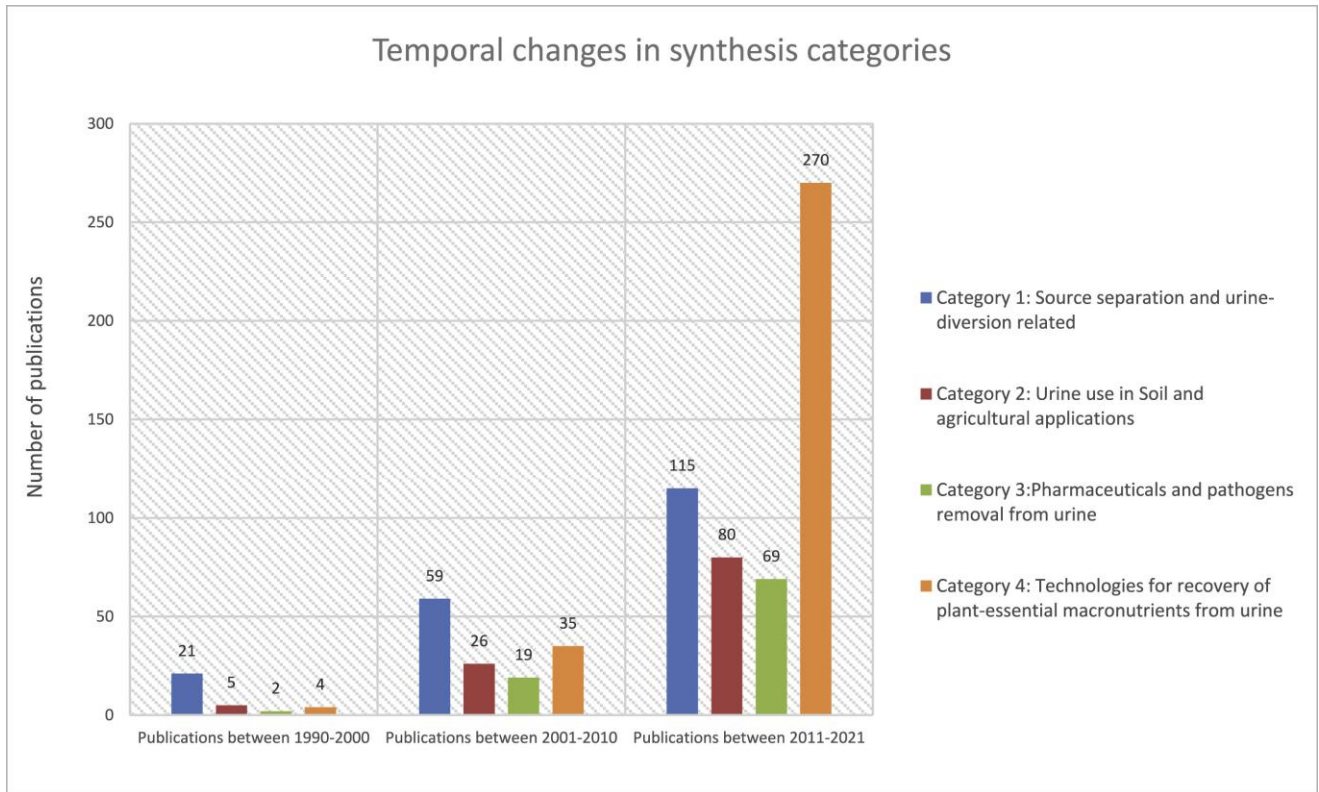
7.2 VERWERKINGSMETHODEN VOOR URINE

Wetenschapsonderzoek (meta-analyse) wees uit dat er in de recente periode 2011–2021 een enorme toename is geweest van wetenschappelijke publicaties m.b.t. urine-recyclingtechnologieën vergeleken met de periode 1990–2010 (Aliahmad et al., 2022). In het recentste decennium vonden de onderzoekers meer dan 500 wetenschappelijke publicaties, en dan vooral in China. Mogelijk speelt het historisch gebruik van menselijke mest in China een rol in de vernieuwde belangstelling.

Het onderzoek spitst zich toe op urinescheidingstechnieken, het gebruik van urine in de landbouw, de verwijdering van pathogenen en farmaceutische residu's in urine en (vooral) op terugwinning van nutriënten. Binnen deze laatste categorie alleen al werden twaalf verschillende fosforrecyclingtechnologieën gevonden.

¹⁴⁹ Bron: <https://www.vnci.nl/chemie-magazine/actueel/artikel/verhitten-zonder-zuurstof-de-opmars-van-pyrolyse>

Figuur 12 Wetenschappelijke publicaties m.b.t. urine-recyclingtechnologieën



Bron: Aliahmad et al., 2022

Voor de abiotische stabilisatie van ureum in urine worden pH-regulatoren gebruikt. Calciumhydroxide verhoogt de pH tot waarden rond de 12,5, waarbij de hydrolyse van ureum tot NH_4^+ door het enzym urease wordt geremd. Ureumhydrolyse kan ook worden geremd door zuren toe te voegen (bijv. citroenzuur of zwavelzuur).

Lactofermentatie met suiker of melasse en lactobacillus biedt een biotische vorm van ureumstabilisatie door verzuring met melkzuurbacteriën. Tijdens dit proces wordt melkzuur geproduceerd en bij de resulterende lage pH-waarden wordt ureumhydrolyse voorkomen. Op deze manier kan de ureum in de urine maandenlang worden bewaard.

Er zijn verschillende processen onderzocht op hun effectiviteit om farmaceutische stoffen in urine te verwijderen. Özel-Duygan et al. toonden aan dat een klein deel van de farmaceutische stoffen wordt verwijderd tijdens de opslag, een groter deel tijdens biologische behandeling, d.w.z. nitrificatie. Uitgebreide verwijdering onder de detectielimiet kan worden bereikt met actieve kool (Krause et al., 2021).

7.2.1 Lageren/opslaan

Wanneer urine wordt blootgesteld aan de lucht wordt er ammoniak (NH_3) gevormd die vervluchtigt, waardoor stikstof verloren gaat. Het is dus belangrijk om de urine snel in een afgesloten container te bewaren om stikstof verliezen te voorkomen en de bemestingswaarde optimaal te houden.

De WHO raadt aan om urine gedurende zes maanden in een gesloten container te bewaren. Het enzym urease zorgt ervoor dat er in de urine een afbraakproces op gang komt, waarbij de pH-waarde verschuift naar een alkalisch milieu. Als urine ziektekiemen bevat, worden deze gedood omdat ze niet kunnen overleven in het alkalische pH-bereik.

Opslag in afgesloten containers gedurende 3 maanden zorgt ervoor dat mogelijke E.coli bacteriën en Enterokokken in urine grotendeels vernietigd worden door een spontaan stijgende pH-waarde. Het eenvoudigweg opslaan van urine gedurende meerdere maanden vermindert echter niet significant de mogelijke restproducten van drugsgebruik. Onderzoek van Toiletttes du Monde vond in urine afkomstig van festivals over het algemeen hoge concentraties MDMA (ecstasy) en zijn metaboliet MDA, gevolgd door amfetamine, codeïne, morfine, ketamine en cocaïne. Alleen morfine en MDMA lijken in de loop van de tijd af te breken of te biotransformereren (TDM, 2017).

Na de vereiste opslagtijd voor hygiënisatie is de urine, verdund met water, klaar om toegepast te worden als vloeibare meststof. De verdunningen worden berekend in functie van de bemestingsbehoeften en -frequenties voor een specifieke teelt.

Uit onderzoek is gebleken dat de meeste stikstofverliezen optreden bij het toedienen van de urine aan de bodem (Noe-Hays, 2023). Ammoniakvervluchtigingsverliezen in al deze scenario's varieerden van 5% tot 34% van de totale toegepaste N en waren over het algemeen lager dan of vergelijkbaar met de verliezen van vloeibare mest die in andere onderzoeken werden gerapporteerd. De proeven identificeerden enkele belangrijke factoren voor het verminderen van ammoniakvervluchtiging:

- De toepassingsmethode had de grootste impact op ammoniakverliezen; net als bij mest vermindert verminderde blootstelling aan lucht de ammoniakvervluchtiging aanzienlijk. Daarom raden de onderzoekers aan om niet te sproeien of spuiten, maar in plaats daarvan dicht bij of direct in de grond te brengen, wat de verliezen tot wel 80% kan verminderen.
- De resultaten toonden ook aan dat irrigatie of regenval tijdens toepassing de ammoniakverliezen tot wel de helft verminderde.
- Urinevoorbehandelingen die stikstof in ureumvorm houden in plaats van in ammoniakvorm, kunnen ammoniakverliezen verminderen. In de proef verloor urine die met een lage pH was behandeld minder ammoniak dan ureumpellets.

7.2.2 Fermenteren

Een fermentatie kan gestart worden door siroop of suiker en effectieve micro-organismen (EM) toe te voegen. Zo wordt ammoniakvorming voorkomen. Fermentatie leidt bovendien tot meer plantopneembare N-vormen¹⁵⁰.

¹⁵⁰ Bron: Goldeimer (Duitsland)

Andere fermentatietechnieken werken met toevoeging van melkzuurbacteriën en rhizobacteriën, waardoor de urine een biostimulerende werking krijgt (zie praktijkvoorbeeld in paragraaf 11.2.3).

Wat betreft de afbraak van medicijnen d.m.v. fermentatie met melkzuurbacteriën heeft een labotest met vier medicijnen (Vijn M., 2020) geen duidelijke concentratieafname van carbamazepine en naproxen gevonden. Voor diclofenac was er sprake van een lichte afname in concentratie, maar waarschijnlijk niet als gevolg van biologische afbraak. Voor ibuprofen is de grootste afname in de concentratie waargenomen, maar er kon niet met zekerheid worden vastgesteld of dit het gevolg is van biologische afbraak, andere (abiotische) processen of meetonzekerheid. Fermentatie met melkzuurbacteriën lijkt daarmee geen goede methode om medicijnen in urine af te breken.

7.2.3 Verwerking volgens het VUNA-proces

Het VUNA-proces (Valorization of Urine Nutrients in Africa) werd in 2015 ontwikkeld aan het Zwitserse Federale Instituut voor Aquatische Wetenschap en Technologie (EAWAG) en op de markt gebracht door VUNA GmbH (Dübendorf, Zwitserland). AURIN is de eerste urinemeststof ter wereld met volledige goedkeuring in Zwitserland, Liechtenstein en Oostenrijk en kan dus vrij verkocht en toegepast worden.

Het VUNA-proces bestaat uit opeenvolgende stappen:

- gescheiden inzameling van urine en opslag in gesloten tanks
- beluchte bioreactor waar urine biologisch wordt genitrificeerd tot een $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ -verhouding van 1:1
- filtratie door geactiveerde koolstof (om medicijnresten en hormonen te verwijderen)
- productie van een concentraat door distillatie (volumereductie van 95-97%)

Het eindproduct is een vloeibare meststof die alle noodzakelijke voedingsstoffen bevat die nodig zijn voor de plantengroei, zoals stikstof (4,2%), fosfor (0,4%) en kalium (1,8%), evenals een veelvoud aan sporenelementen zoals ijzer, zink en boor.

De meeste farmaceutische resten worden uitgescheiden via de urine (en niet via de feces). Experimenten hebben aangetoond dat langdurige opslag niet voldoende is om farmaceutica te verwijderen. Niettemin zijn processen die plaatsvinden tijdens nitrificatie, geschikt om bepaalde farmaceutica te verwijderen. Vrijwel alle farmaceutica worden verwijderd door de actief koolfilter.

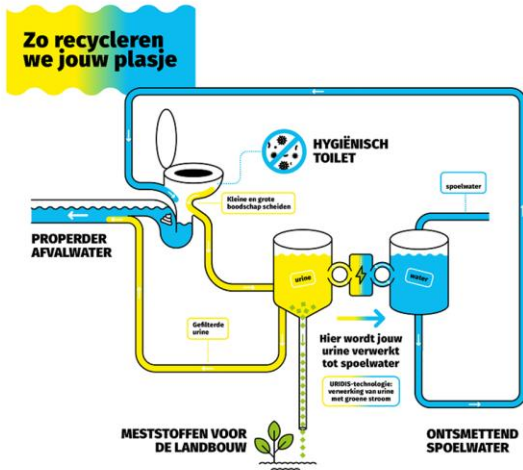
Terwijl sommige pathogenen kunnen worden uitgescheiden via de urine, worden andere geïntroduceerd door kruisbesmetting met ontlasting tijdens het verzamelen van urine. De levensvatbaarheid van representatieve pathogenen werd geëvalueerd tijdens de urinebehandeling. Er is gedeeltelijke desinfectie door urineopslag en nitrificatie. Er wordt aangenomen dat distillatie alle pathogenen elimineert vanwege de hoge temperaturen.

7.2.4 Elektrochemische verwerking

De Paepe onderzocht in haar doctoraat de elektrochemische verwerking van urine om de waarde ervan (drinkbaar water, plantvoedingsstoffen, voeding voor micro-organismen) maximaal te benutten.

Het sluit aan bij de trend om afvalwater lokaal te behandelen op het niveau van een gebouw of industriële site¹⁵¹.

Figuur 13 Elektrochemische verwerking van urine



Bron: Hydrohm (Gent)

Eenzijds kan de urine verwerkt worden om P terug te winnen en anderzijds om het zout uit de urine te gebruiken als ontsmettend spoelwater voor de toiletten. In de elektrochemische cel wordt hydroxide gegenereerd, wat zorgt voor een hoge pH. De urine wordt door de hoge pH ogenblikkelijk gestabiliseerd en de fosfor slaat neer als een calciumfosfaat precipitaat. Vervolgens wordt het zout Chloride door een selectief membraan getrokken en met behulp van een elektrochemisch proces omgezet tot een desinfectans.

7.2.5 Struvietwinning

Fosforrecuperatie, in de vorm van struviet (magnesiumammoniumfosfaat), wordt toegepast in de afvalwaterzuiveringssector. Zo wordt deze techniek in Vlaanderen toegepast in aardappel-/groenteverwerkende bedrijven. Struvietproductie uit rioolwater, urine, mest of digestaat kan ook. Bij de productie van struviet ontstaat een kristallijne verbinding door de toevoeging van magnesiumzouten. Naast fosfor wordt eveneens stikstof, aanwezig in opgeloste vorm ($N-NH_4$), uit het afvalwater gehaald. In een tweede stap vindt de groei en de oogst van de struvietkorrels plaats. Bij een verwijderingspercentage van 80% in de eerste stap en 75% oogst in de tweede stap, komt dit neer op een totaal verwijderingspercentage van 60%.

GMB BioEnergie ontwikkelde in 2010 Europa's eerste urineverwerkingsfabriek: SaNiPhos (Zutphen, Nederland). Zij ontwikkelden de techniek om fosfaat en stikstof uit urine te winnen¹⁵². In Nederland is struviet

¹⁵¹ Bron: H2O Actueel, Gentse innovatie combineert hygiënisch toiletgebruik met terugwinnen van grondstoffen uit urine, 09 februari 2022.

¹⁵² Het Waalse fosfatenbedrijf Ecophos, met 300 werknemers en fabrieken in Duinkerke, Rotterdam en Bulgarije, is in 2020 failliet gegaan. De installatie in Duinkerke haalde struviet uit urine.

een van de eerste grondstoffen die op relatief grote schaal teruggewonnen wordt uit de rioolwaterzuivering. Verschillende bronnen lozen op het riool: huishoudens, zorginstellingen, ziekenhuizen en bedrijven. Het afvalwater dat bij de RWZI aankomt, is dan ook een mengstroom van verschillende afvalstromen van verschillende samenstelling.

Een studie van het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM) in Nederland onderzocht de stand der kennis over de aanwezigheid van medicijnresten, pathogenen en antibioticaresistentie in struviet (Spijker, 2017). Wat medicijnresten betreft, bevelen de onderzoekers aan om extra metingen te doen. Een aantal stoffen worden genoemd die als richtlijn gebruikt kunnen worden. De literatuurstudies wijzen op een preferente opname van tetracyclines (antibiotica zoals: tetracycline, erythromycine en norfloxacin, doxycycline, oxytetracycline en chlortetracycline) in struviet. Als er inderdaad structureel medicijnresten voorkomen in het struviet, dan moet onderzocht worden of dit bij toepassing risico's kan vormen voor milieu of volksgezondheid.

Risico op effecten van pathogenen wordt niet waarschijnlijk geacht, maar kan niet worden uitgesloten. Hoewel aanwezigheid van resistentie is aangetoond in in- en effluent van RWZI's (zie paragraaf 6.1.2.2), is het om een inschatting te kunnen maken van eventuele risico's van het toepassen van het struviet van Waternet nodig om inzicht te krijgen in de mogelijke aanwezigheid van antibioticaresistentie in het struviet. Dit is op basis van bestaande kennis niet mogelijk.

AquaFin heeft in Leuven een proefinstallatie om fosfor terug te winnen uit rioolwater. Fosfor kan uit vergist zuiveringslib en slibwaters teruggewonnen worden in de vorm van struviet maar veel efficiënter nog uit urine. De installatie van AquaFin in Leuven is in staat om 20% van het fosfor uit het slib te halen en circa 60 à 70% procent van de struvietkristallen die zich vormen te recupereren.

In 2015 werd in samenwerking met Rock Werchter menselijke urine, opgevangen in vacuüm urinoirs, verwerkt in de struvietinstallatie. Tijdens Rock Werchter heeft AquaFin evenveel struviet kunnen recupereren als normaal op een volledige maand in de zuiveringsinstallatie.

De installatie van AquaFin in Leuven is al enkele jaren niet meer in werking.

8 WETGEVING EN NORMEN

Het wettelijk kader voor de verwerking en het gebruik van meststoffen van antropogene oorsprong is momenteel onbestaand. Bestaande wetten, normen en specificaties zijn alleen van toepassing op meststoffen die zijn geproduceerd uit substraten van plantaardige of dierlijke oorsprong, maar niet uit antropogene substraten. Ook op Europees niveau ontbreekt er een normatieve of wettelijke regeling voor meststoffen van menselijke oorsprong. Als gevolg hiervan is er momenteel weinig marktaanbod van menselijke meststoffen. 's Werelds eerste meststof uit menselijke urine werd in 2018 in Zwitserland goedgekeurd.

8.1 BELGIË

De meeste meststoffenwetgeving is in België geregionaliseerd, maar toch speelt ook de federale overheid een rol. We lijsten de relevante wetgeving en het beleid voor het integreren van grondstoffen van menselijke oorsprong per bevoegdheidsniveau op.

8.1.1 Vlaanderen

8.1.1.1 Inleiding

In het huidig sanitair systeem komen feces en urine in het (afval)water terecht. De bevoegdheid ligt bijgevolg bij de VMM en de beheerder van de openbare rioolwaterzuivering (AQUAFIN). Echter, wanneer feces en urine niet via de openbare riolering worden afgevoerd (zoals bij droogtoiletten), is het de facto een afvalstof die onder de bevoegdheid van de OVAM valt.

Menselijke mest komt niet voor in de lijst van organisch-biologische afvalstoffen die als bijproduct of eindeafval in aanmerking kunnen komen voor gebruik als meststof of bodemverbeterend middel¹⁵³.

We vinden menselijke mest ook niet in de lijst van toegelaten grondstoffen voor de valorisatie van digestaat in de landbouw¹⁵⁴. De wetgeving Dierlijke Bijproducten is enkel van toepassing op dierlijke mest en niet op mest van antropogene oorsprong.

Relevante Vlaamse wetgeving, die op één of andere manier een referentiekader aanreikt, wordt hierna besproken.

8.1.1.2 Actie-, uitvoerings- en beleidsplannen

Het beheer van organisch-biologische afvalstoffen komt aan bod in vele actieplannen en samenwerkingsplatformen. De woorden 'menselijke mest' en 'droogtoilet' komen niet voor in deze plannen. We zochten de relevantste raakpunten.

Het *Uitvoeringsplan Huishoudelijk Afval*¹⁵⁵ bevat een actie (nr.27) omtrent (wegwerp)luiers en incontinentiemateriaal: "De OVAM zal de kansen en belemmeringen onderzoeken van nieuwe concepten voor

¹⁵³ VLAREMA, bijlage 2.2, Afdeling 1. Zie bespreking onder paragraaf 8.1.1.4.

¹⁵⁴ Bij de niet toegelaten grondstoffen bepaalt FOD Volksgezondheid (Comité Meststoffen):
-organische afvalstoffen die luiers bevatten, afkomstig van de selectieve inzameling bij huishoudens
-slib van septische tanks

¹⁵⁵ Dit uitvoeringsplan geldt tot eind 2022 maar blijft gelden zolang het niet vervangen wordt door een ander plan.

herbruikbare luiers, alsook voor het sluiten van de materiaalketen van wegwerpluiers en incontinentiemateriaal.”

Vlaanderen was sinds 1992 ingedeeld in groenregio's en gft-regio's, waarin respectievelijk selectieve inzameling van louter groenafval, of van gft-afval en groenafval dient te gebeuren. Vanaf 1 januari 2024 vervalt deze indeling en zijn lokale besturen verplicht om een selectieve inzameling van alle bioafval aan te bieden. In Actie 32 onderzoekt de OVAM of het haalbaar is om de sorteerregels voor gft-afval uit te breiden met keukenafval dat dierlijke bijproducten van categorie 3 bevat (vlees- en visresten, sauzen, eierschalen, mest van vleesetende huisdieren). Sinds 2019 luidt de nieuwe definitie van gft-afval: *“Keuken- en tuinafval dat afkomstig is van het gescheiden ingezamelde organische deel van het huishoudelijk afval. Het omvat composteerbaar keukenafval, dus ook vlees- en visresten, bereide etenswaren, enz. en het gedeelte van het tuinafval dat bestaat uit niet-houtig, fijn materiaal.”*¹⁵⁶

Het *Lokaal Materialenplan 2023-2030* vervangt het uitvoeringsplan voor huishoudelijk afval en gelijkaardig bedrijfsafval 2016-2022. Concreet werkt het plan aan een verdere afbouw van de hoeveelheid restafval onder andere door de veralgemeende inzameling van bioafval en een aanvaardingsplicht voor wegwerpluiers gekoppeld aan een selectieve inzameling. Vanuit de Vlaamse overheid is steun voorzien voor de bouw van een pilootinstallatie voor de recyclage van luierafval. Als een dergelijke installatie voldoende voordelen biedt bij het recycleren van luiers, zal de invoering van een aanvaardingsplicht overwogen worden.

Het *Actieplan voedselverlies en biomassa(rest)stromen circulair 2021-2025*¹⁵⁷ wil een oplossing bieden voor het verlies van 'natuurlijk kapitaal' in de ganse keten, het aanbieden van recycleerbare organisch-biologische stromen voor verbranding, het behoud van de bodemkwaliteit (met focus op organische koolstof). Eén van de acties is het verhogen van het aanbod aan vergistbare en composteerbare reststromen voor de productie en de toepassing van meer organische bodemverbeteraars/meststoffen. Dierlijke mest is ook een reststroom, en wordt meegenomen in dit actieplan voor zover het samen met andere biomassa(rest)stromen wordt verwerkt. Faciliteren van boerderijcompostering is een andere actie. Nergens wordt het selectief inzamelen van menselijke mest, bijvoorbeeld bij duurzame festivals, vermeld.

In het *Vlaams Klimaatadaptatieplan 2030* vinden we onder Actie 4 'Waterverbruik verminderen' niets terug over het waterverbruik van spoeltoiletten. Onder Actie 9 'Klimaatlimme landbouw' vinden we: *“In functie van het herstel van de bodemkwaliteit wordt het gebruik van organische meststoffen binnen de wettelijke bemestingsnormen aangemoedigd.”*¹⁵⁸ Zoals we hebben gezien, is menselijke mest niet gedefinieerd als organisch-biologische instroom voor compostering.

Het woord 'mest' komt vaak voor in het *Actieplan Transitie Nutriëntenrecuperatie in Vlaanderen 2020-2025* van NutriCycle Vlaanderen¹⁵⁹, maar nergens in verband met menselijke mest. Toch vinden we een actie waarin sprake is van struvietwinning uit afvalwater afkomstig van residentiële woningen of bedrijfsgebouwen¹⁶⁰. Er

¹⁵⁶ Bron: <https://vlaco.be/vlaco-vzw/faq/wat-houdt-de-definitie-van-gft-afval-sinds-2019-in>

¹⁵⁷ Dit plan zal verlengd worden tot 2030, tot ook lokaal materialenplan afloopt.

¹⁵⁸ Vlaams Klimaatadaptatieplan 2030, Actie 9: Klimaatlimme landbouw

¹⁵⁹ NutriCycle Vlaanderen biedt een online platform aan dat informatie, initiatieven en projecten rond nutriëntenrecuperatie bundelt. NCV heeft als missie om meer nutriënten uit reststromen (waaronder mest) te recupereren.

¹⁶⁰ NutriCycle Vlaanderen, Actieplan (2022), Actie 4.1 NPK-winning uit afvalwater.

wordt daarin verwezen naar de demosite van de Nieuwe Dokken in Gent, waar menselijke mest wordt vergist om biogas terug te winnen en uit het effluent van de vergistingsinstallatie struviet wordt gewonnen (zie bespreking onder paragraaf 11, Praktijkervaringen).

In 2020 zag ook een *Vlaams beleidsplan bio-economie* het licht. Bij de omschakeling naar een circulaire economie speelt de bio-economie een belangrijke rol¹⁶¹.

De werkagenda Bio-economie onder Vlaanderen Circulair¹⁶² richt zich op het grote economische potentieel voor bio-economische activiteiten buiten de voedings- en watersector. Dus wordt de focus gelegd op alle initiatieven voor nieuwe non-food producten, en duurzame valorisatie van organische rest- en nevenstromen. Het beleid legt de klemtoon op onderzoek en innovatie. Een 'Monitor van de Vlaamse Bio-economie' wordt jaarlijks vernieuwd en verfijnd.

Volgens de monitor van 2022 is biomassa afkomstig van antropogene productie (landbouw), natuurbeheer, biologisch afval en afvalwaterverwerking. Men spreekt over plantaardige en dierlijke biomassaproduktie, over de verwerking van biomastromen en over de consumptie van biomassa door gezinnen, maar elke expliciete verwijzing naar de volgende stap in de circulaire bio-economie, met name de verwerking van menselijke mest met het oog op de recyclage van nutriënten en organische koolstof, ontbreekt. Een impliciet spoor vinden we bij de vermeldingen over fosforrecuperatie uit het slib van RWZI's en in verband met de verwerking van afvalwater¹⁶³.

8.1.1.3 Het materialendecreet

"De doelstelling van het decreet van 23 december 2011, art.4, §2 en §3, is maatregelen vast te stellen om een circulaire economie te bevorderen en om materiaalkringlopen tot stand te brengen waarbij:

- 1° de gezondheid van de mens en het milieu beschermd worden door afvalproductie en de negatieve gevolgen van afvalproductie en -beheer te voorkomen of te verminderen;
- 2° de uitputting van hernieuwbare en niet-hernieuwbare hulpbronnen, de verspilling van materialen en energie in het algemeen en de schadelijke gevolgen voor mens en milieu, verbonden aan materiaalgebruik en -verbruik, worden tegengegaan.

Er wordt gestreefd naar het beste resultaat voor milieu en gezondheid, rekening houdend met de effecten die optreden tijdens de volledige levenscyclus, om ervoor te zorgen dat het beheer van materiaalkringlopen en afvalstoffen geen gevaar oplevert voor de gezondheid van de mens en geen nadelige gevolgen heeft voor het milieu, zonder risico voor water, lucht, bodem, fauna en flora en klimaat op te leveren, zonder geluids- en geurhinder te veroorzaken en zonder schade aan natuur- en landschapsschoon te berokkenen."

De definitie 'bioafval' cf. art 3, §1, 9°/1 is: "... biologisch afbreekbaar tuin- en plantsoenafval, levensmiddelen- en keukenafval van huishoudens, kantoren, restaurants en andere voedingsdiensten, groothandels, kantines, cateringfaciliteiten en winkels, en vergelijkbare afvalstoffen van de levensmiddelenindustrie."

¹⁶¹ ILVO-onderzoek: Eén derde van de toegevoegde waarde van de Vlaamse industriële sectoren wordt in de bio-economie gerealiseerd. (Bron: Trends, Kanaal Z, 14-01-2025)

¹⁶² Geleid door het Departement EWI en ILVO. Er zijn 6 werkpaden waaronder het sluiten van nutriëntenkringlopen, gekoppeld aan de productie van groen gas en het sluiten van de koolstofcyclus.

¹⁶³ Monitor van de Vlaamse bio-economie: update 2019-2020 (okt.2023): p.149 en p.169.

De definitie 'stedelijk afval' cf. art 3, §1, 25°/2 is: "... gemengd afval en gescheiden ingezameld afval van huishoudens, met inbegrip van papier en karton, glas, metaal, plastic, bioafval, hout, textiel, verpakkingen, afgedankte elektrische en elektronische apparatuur, afgedankte batterijen en accu's, grofvuil, met inbegrip van matrassen en meubels, en gemengd afval en gescheiden ingezameld afval uit andere bronnen dan de voormelde bronnen als de aard en samenstelling van dat afval vergelijkbaar zijn met de aard en samenstelling van afval van huishoudens. Stedelijk afval omvat geen afval van productie, landbouw, bosbouw, visserij, septische tanks en het riolerings- en zuiveringsstelsel, met inbegrip van zuiveringsslib, afgedankte voertuigen of bouw- en sloopafval."

Artikel 36 bepaalt de voorwaarden voor een einde-afvalstatus¹⁶⁴:

Afvalstoffen worden niet langer als afvalstoffen beschouwd als ze een behandeling voor recyclage of andere nuttige toepassing hebben ondergaan en ze voldoen aan al de volgende voorwaarden:

- 1° de stof of het voorwerp is bestemd om te worden gebruikt voor specifieke doelen;*
- 2° er is een markt voor of vraag naar de stof of het voorwerp;*
- 3° de stof of het voorwerp voldoet aan de technische voorschriften voor de specifieke doelen, vermeld in punt 1°, en aan de voor producten geldende wetgeving en normen;*
- 4° het gebruik van de stof of het voorwerp heeft over het geheel genomen geen ongunstige effecten op het milieu of de menselijke gezondheid.*

Als er voor een specifiek materiaal geen Europese criteria zijn vastgelegd, kan de Vlaamse Regering specifieke criteria uitwerken die moeten garanderen dat een stof voldoet aan de voorwaarden, vermeld in artikel 36. De OVAM is bevoegd voor het behandelen van aanvragen en het afleveren van een grondstofverklaring.

Deze algemene regels werden verder uitgewerkt in het VLAREMA.

8.1.1.4 VLAREMA

Besluit van de Vlaamse Regering van 17 februari 2012 tot vaststelling van het Vlaams reglement betreffende het duurzaam beheer van materiaalkringlopen en afvalstoffen.

Bioafval is sinds januari 2024 een huishoudelijke afvalstof die gescheiden moet worden ingezameld (art. 4.3.1.). Deze maatregel geeft uitvoering aan actiepunt 22 van het 'Lokaal Materialenplan 2023-2030' om te voldoen aan de herziene EU kaderrichtlijn afvalstoffen.

Groenafval enerzijds en keukenafval en etensresten anderzijds zijn bedrijfsafvalstoffen die gescheiden moeten worden aangeboden (art. 4.3.2.). Het verbranden of storten van afzonderlijk ingezamelde afvalstromen is verboden, tenzij de minister een gemotiveerde individuele afwijking toestaat (Afdeling 4.5.).

De definitie van compost in VLAREMA (art.1.2.1., §2, 16°) is: het stabiele, gehygiëniseerde en humusrijke eindproduct van de compostering van selectief ingezameld organisch-biologisch afval en ander biologisch materiaal.

De vervoerder van afvalstoffen moet beschikken over een registratie voor het vervoer van afvalstoffen (Afdeling 6.1.2).

¹⁶⁴ Dit is in overeenstemming met artikel 6 van de Europese kaderrichtlijn afvalstoffen.

VLAREMA, bijlage 2.2, Afdeling 1, bevat een gedetailleerde en limitatieve lijst van materialen die als bijproduct of einde-afval in aanmerking kunnen komen voor gebruik als meststof of bodemverbeterend middel. Deze lijst bevat bijvoorbeeld:

- gft- en groencompost
- eindmateriaal van de biologische behandeling van organisch-biologische bedrijfsafvalstoffen
- boerderijcompost
- behandeld zuiveringsslib

Compost vereist een keuringsattest afgeleverd door VLACO vzw of een andere daarvoor erkende instelling (zie verder in paragraaf 8.1.1.7). De Certificeringscommissie Meststoffen - Bodemverbeterende Middelen houdt toezicht op de certificering.

In de lijst is het eindproduct van compost gemaakt met menselijke mest niet opgenomen. Bijgevolg kan deze compost op dit moment het statuut afvalstof niet verliezen.

Voor organisch-biologisch afval voor gebruik als bodemverbeterend middel, meststof of bouwstof dat niet op de lijst van VLAREMA bijlage 2.2 staat, moet een grondstofverklaring worden aangevraagd. Hierin toetst de OVAM het materiaal aan de definitie van afvalstof en aan de Europese voorwaarden uit de Kaderrichtlijn afval voor einde-afval of voor bijproduct.

Bij het verlenen van een grondstofverklaring voor struviet worden bij de OVAM enkel de milieuhygiënische aspecten van het gebruik ervan beoordeeld. Het gehalte aan zware metalen, droge stof, organische stof en de pH worden als parameters opgevolgd. De struviet dient te voldoen aan de samenstellingsvoorwaarden inzake maximumgehalten voor verontreinigde stoffen zoals beschreven in bijlage 2.3.1 van VLAREMA (Schollier C., 2015).

Voor andere types eindgebruik (dus niet als bodemverbeterend middel of meststof of bouwstof) kan de houder van het materiaal (producent van de beoogde grondstof of gebruiker) op basis van een zelfbeoordeling beslissen of aan de voorwaarden in artikel 36 of 37 van het Materialendecreet is voldaan (afdeling 2.6 VLAREMA). De zelfbeoordeling moet gebeuren op basis van een handleiding van de OVAM.

VLAREMA, Bijlage 2.3.1.A en Bijlage 2.3.1.B bevatten de voorwaarden inzake samenstelling en gebruik als meststof of bodemverbeterend middel. De normen voor maximale gehalten aan metalen, PAK's en andere organische stoffen, voor vaste stoffen en vloeistoffen zijn opgenomen in bijlage 12.4.1 van deze studie. VLAREMA Bijlage 2.3.1.C bepaalt de gebruiksvoorwaarden voor maximaal toelaatbare bodemdosering van dezelfde verontreinigende stoffen per hectare.

VLAREMA Artikel 2.3.3.4 bepaalt dat producenten van de volgende afvalstoffen een *informatiefiche* dienen op te maken:

1° organisch-biologische afvalstoffen die door biologische verwerking worden omgevormd tot bodemverbeterende middelen of meststoffen, met uitzondering van:

- a) gft-afval;
- b) groenafval;

c) andere afvalstoffen die zijn ingedeeld in risicoklasse 1 van het Algemeen Reglement van de Certificering, vermeld in artikel 2.3.3.3, §6;

d) bedrijfseigen organisch-biologische afvalstoffen die op het bedrijf zelf door middel van biologische verwerking worden omgevormd tot bodemverbeterende middelen of meststoffen;

2° materialen die rechtstreeks worden aangewend als bodemverbeterende middelen of meststoffen, waarvoor een grondstofverklaring vereist is overeenkomstig de bepalingen van artikel 2.3.1.3 of bijlage 2.2. De informatiefiche voor de afvalstoffen wordt minstens zesmaandelijks herzien. De minister bepaalt de minimale onderdelen van de informatiefiche. Afvalstoffen waarvoor de opmaak van een informatiefiche verplicht is, mogen enkel worden aanvaard bij biologische verwerking met het oog op de omvorming tot bodemverbeterende middelen of meststoffen, of toegepast worden wanneer de verwerker/gebruiker beschikt over een informatiefiche die niet ouder dan 6 maanden is.

Een organisch-biologische afvalstof die over een informatiefiche moet beschikken, en waarvan de producent weet of redelijkerwijs kan aannemen dat ze verontreinigende stoffen bevat die niet vermeld zijn in bijlage 2.3.1, kan worden omgevormd tot, of aangewend worden als, bodemverbeterend middel of meststof, op voorwaarde dat ze bij het gebruik, al dan niet voorafgegaan door omvorming, geen ongunstige effecten op het milieu of de menselijke gezondheid heeft. De effecten op het milieu of de menselijke gezondheid worden beoordeeld conform een code van goede praktijk die op voorstel van de OVAM wordt vastgesteld door de minister.

In een allereerste versie van de informatiefiches voor afvalstoffen, een Ministerieel Besluit dat nog uit moet komen, wordt gevraagd of de afvalstof andere (an)organische verontreinigingen kan bevatten dan die vermeld in Bijlage 2.3.1 van het VLAREMA, m.n.:

- 'substances of very high concern' (SVHC) in de autorisatie of restrictielijst van REACH
- toegelaten en niet-toegelaten gewasbeschermingsmiddelen
- Europese verordening EU 2019/1021 van 20 juni 2019 betreffende persistente organische verontreinigende stoffen (stoffen vermeld in bijlage 1)

Voor deze verontreinigingen wordt in de informatiefiche een cut off waarde voorgesteld waarboven steeds een risicoanalyse moet worden uitgevoerd, namelijk:

- 15 µg/kg DS voor individuele organische verontreinigingen in de afvalstof
- 1.000 µg/kg DS voor individuele anorganische verontreinigingen in de afvalstof

8.1.1.5 Luiers en incontinentiemateriaal

VLAREMA verplicht producenten van wegwerpluiers¹⁶⁵ al enkele jaren om bij de OVAM een collectief plan in te dienen waarin zij zich engageren voor ecodesign, hergebruik, nuttige toepassing, recyclage en sensibilisering. In het luierplan werkt de OVAM samen met luierproducenten, de recyclagesector (Denuo), de retailers (Comeos) en het kenniscentrum VKC-Centexbel aan het duurzamer maken van luiers. Daarbij wordt zowel gekeken naar de eco-efficiëntie van wegwerpluiers versus herbruikbare luiers, als de recyclagemogelijkheden van incontinentiemateriaal. Einde-afvalcriteria werden opgesteld om de OVAM toe te laten een

¹⁶⁵ Luiers en ander incontinentiemateriaal vertegenwoordigen ruim 11% van het Vlaamse restafval, goed voor meer dan 100.000 ton.

grondstoffenverklaring af te leveren. De einde-afvalcriteria¹⁶⁶ en het analytisch kader¹⁶⁷ werden omgezet in Vlaamse wetgeving.

De OVAM heeft in de periode 2020-2021 vier onderzoeken uitbesteed om de recyclagemogelijkheid voor luiers in Vlaanderen te analyseren. In het kader van dat onderzoekswerk werden ondermeer de einde-afvalcriteria en het analytisch kader bepaald. Deze bieden eveneens interessante aanknopingspunten voor de verwerking van menselijke mest.

In het rapport over einde-afvalcriteria (Vanderreydt, 2021) worden criteria bepaald voor de inputstromen, het verwerkingsproces, de outputstromen en de toepassingsmogelijkheden:

- Voor het inputmateriaal wordt in eerste instantie gefocust op de verwerking van luiers en incontinentiemateriaal afkomstig van kinderdagverblijven, huishoudens, rusthuizen en woonzorgcentra. Zodra de recyclage van dit inputmateriaal en de controle op de veiligheid van de teruggewonnen materialen vlot verloopt, kan overwogen worden om de scope uit te breiden naar afval afkomstig van ziekenhuizen (inclusief materniteit).
- Het verwerkingsproces dat gebruikt wordt om luiers en incontinentiemateriaal te behandelen moet minstens voldoen aan de eisen van sterilisatie¹⁶⁸ voor al de outputstromen die het verwerkingsproces verlaten. Indien de toegepaste verwerkingstechnologie een slurry produceert, mag deze niet gemengd worden met RWZI-slib.
- Voor de resten van geneesmiddelen en hormonen in bodemverbeterend middel wordt een grenswaarde gesteld van 100 µg/kg DS voor geneesmiddelen (inclusief hormonen), telkens per individuele actieve stof. In de bodem is de grenswaarde 1 µg/kg DS (per geneesmiddel of hormoon). De betreffende stoffen zijn:

¹⁶⁶ Zie hiervoor: *Einde-afval criteria voor wegwerpluiers*, OVAM, 2021.

¹⁶⁷ Zie hiervoor: *Medicijnresten en hormonen in luiermateriaal*, Compendium voor monsterneming en analyse in uitvoering van het Materialendecreet en het Bodemdecreet, CMA/3/M, BS van 22 september 2023.

¹⁶⁸ Voor vochtige stoomsterilisatie is deel 3 van EN ISO 1138 van toepassing (EN, 2009): minimaal 30 minuten bij 121°C of equivalent (e.g. 7 minuten bij 134°C, etc.).

Tabel 17 Medicijnresten bij luierreyclage

Activiteitscategorie	Aantal	Geneesmiddel
NSAID ¹¹ , pijnstillers	4	Acetylsalicylzuur , Diclofenac, Ibuprofen, Naproxen
Antibioticum	4	Amoxicilline, Clarithromycine, Sulfametoxazol, Trimethoprim
Geneesmiddel tegen epilepsie	2	Carbamazepine, Gabapentine
Hormoon	2	Estriol, Estron (=oestron of E1)
Bloeddrukverlagend middel	2	Hydrochloorthiazide, Metoprolol
Anti-jichtmiddel	1	Allopurinol
Cytostaticum	1	5-Fluorouracil
Bloedglucoseverlagend middel	1	Metformine
Bèta-blocker	1	Sotalol
Totaal	18	

NSAID's: niet-steroïdale anti-inflammatoire middelen

Bron: Einde-afvalcriteria voor luierreyclage (Vanderreydt, 2021)

Periodieke metingen van de microbiologische activiteit van de outputstromen moeten aantonen dat er geen microbiologische activiteit is.

- Teruggewonnen materiaal uit luierreyclage is toegelaten als bodemverbeterend middel mits voldaan is aan alle bestaande milieu- en productnormering terzake én het teruggewonnen materiaal een toegevoegde landbouwkundige waarde biedt voor de bodem.

Aan het Compendium voor monsterneming en analyse in uitvoering van het Materialendecreet en het Bodemdecreet werd eind 2023 een deel (CMA_3_M)¹⁶⁹ toegevoegd over medicijnresten en hormonen in luiermateriaal. De limietwaarde die we hierin terugvinden bedraagt echter 250 µg/kg DS voor elke medicijnrest en 200 µg/kg DS voor elk hormoon¹⁷⁰. De monsterneming en analyse worden beschreven voor slechts 16 van 18 stoffen die opgelijst werden in de einde-afvalcriteria¹⁷¹.

In VLAREMA Bijlage 5.2.15.A zijn deze grenswaarden voor geneesmiddelen en hormonen i.v.m. recyclage van wegwerpluiers opgenomen. In VLAREMA Bijlage 5.2.15.B werden de voorwaarden voor afwezigheid van pathogenen gepreciseerd zoals werd aangegeven in het Compendium voor monsterneming en analyse (deel CMA_4_B).

8.1.1.6 VLAREM

VLAREM I bepaalt welke klasse van vergunning van toepassing is, dit is omschreven in bijlage 1 van rubriek 2.2.3.

¹⁶⁹ Verschenen in het Belgisch Staatsblad van 22 september 2023.

¹⁷⁰ Verschilt van de grenswaarde van de einde-afvalcriteria. Het compendium stelt dat: 'Deze limietwaarden zijn gebaseerd op wat veilig wordt geacht en wat analytisch met hoge nauwkeurigheid meetbaar is.'

¹⁷¹ Acetylsalicylzuur en Amoxicilline ontbreken in het compendium.

VLAREM II beschrijft de sectorale milieuvorwaarden voor composteer- en vergistingsinstallaties van organisch biologisch afval in Subafdeling 5.2.2.3 rond de aanvaarding, opslag en behandeling van groenafval, gft-afval en OBA. Hier staat ondermeer de bepaling dat composteerinstallaties met een composteerruimte groter dan 10 m³ dienen voorzien te zijn van een vloestofdichte vloer, die is uitgerust met een afwateringssysteem.

In VLAREM III, hoofdstuk 3.14.4.1 staan de algemene bepalingen voor de biologische behandeling van afval die van toepassing zijn op industriële installaties met een mogelijk grote impact op het milieu. Deze zijn onderworpen aan de Europese Richtlijn inzake Industriële Emissies (RIE 2010/75/EU). Hieronder vallen grote composteringsinstallaties en waterzuiveringsinstallaties. Voor geleide emissies naar lucht die afkomstig zijn van de biologische behandeling van afval, worden emissiegrenswaarden en meetfrequenties opgelegd (art. 3.14.4.1.3).

Thuiscompostering en boerderijcompostering, op basis van enkel (bedrijfs)eigen *plantaardig* uitgangsmateriaal en wanneer de compost uitsluitend bestemd is voor de eigen percelen, is niet onderworpen aan de VLAREM-wetgeving terzake¹⁷².

Bijgevolg is het verwerken van *ander biologisch afbreekbaar afval* zoals dat van droogtoiletten niet vrijgesteld van een omgevingsvergunning voor rubriek 2. De toepasselijke indelingsrubriek is dan 2.2.3.f). andere biologische behandelingsinstallaties van niet-gevaarlijke afvalstoffen. Dit is onmiddellijk (geen onderdrempel) een klasse 2 rubriek (vanaf 25 m³ klasse 1). Echter gezien op dit ogenblik er geen mogelijkheid is om de gemaakte compost van het statuut afval te ontheffen, kan er feitelijk geen gunstig advies en dus ook geen vergunning worden verleend. Dit geldt ook voor particulieren.¹⁷³

8.1.1.7 Algemeen Reglement van de Certificering (ARC)

Het toezicht op het ARC wordt uitgevoerd door de OVAM, die ook het ARC opstelt. Het ARC beschrijft de certificeringsvoorwaarden waaraan een vergunde installatie moet voldoen om te kunnen beschikken over een keuringsattest voor de productie van gft- of groencompost en het eindmateriaal van de biologische behandeling van organisch-biologische afvalstoffen voor het gebruik als meststof of bodemverbeterend middel, zoals omschreven in artikel 2.3.1.3. van het VLAREMA.

Er zijn verschillende vormen van biologische verwerking waarop het systeem van certificering betrekking heeft: compostering, anaerobe vergisting, biothermisch drogen,... Deze verwerking valt onder het toepassingsgebied van VLAREMA van zodra er organisch-biologische afvalstoffen worden verwerkt.

In bijlage 1 van het reglement wordt verwezen naar procesvoorwaarden om een voldoende hygiënisatie te kunnen garanderen voor de diverse soorten compost.

- Groencompost: minimum 10 weken verblijftijd aan minstens 45°C, waarvan minstens 4 opeenvolgende dagen min. 60°C of 12 dagen bij min. 55°C, minstens 4 keerbeurten en een vochtgehalte van 45-55% in het begin en 30-40% tijdens de eerste 10 weken.

¹⁷² Zie bepaling VLAREM-rubriek 2.2.3.

¹⁷³ Schriftelijke mededeling van Matty Beckers (Departement Omgeving) van 25/3/2025.

- Gft-compost: minimum 6 weken verblijftijd aan minstens 45°C, waarvan minstens 4 opeenvolgende dagen min. 60°C of 12 dagen bij min. 55°C, minstens 4 keerbeurten en een vochtgehalte van 45-55% in het begin en 30-40% tijdens de eerste 6 weken.

In bijlage 2 wordt verwezen naar de wettelijke samenstellingsvoorwaarden voor meststoffen en bodemverbeterende middelen zoals beschreven in VLAREMA Bijlage 2.3.1.A en Bijlage 2.3.1.B, alsook naar de gebruiksvoorwaarden voor maximaal toelaatbare bodemdoseringsnormen zoals beschreven in VLAREMA, Bijlage 2.3.1.C. Bovendien specificeert bijlage 2 de normen en kwaliteitsdoelstellingen per producttype¹⁷⁴.

8.1.1.8 **Het Mestdecreet**

Het Mestdecreet (22 december 2006) wil eutrofiëring van grond- en oppervlaktewater tegengaan door een beperking van de hoeveelheid nutriënten die per jaar en per hectare landbouwgrond met meststoffen mogen opgebracht worden. Het decreet definieert bemestingsnormen en -verboden overeenkomstig bodemtype, gebiedstype en teelt of teeltcombinatie. Het bepaalt ook de methodes voor aanbrengen, staalname, de berekeningswijzen etc.

In hoofdstuk III, m.b.t. de beperking van het op of in de bodem brengen van meststoffen, wordt in afdeling 3, artikel 12, §3 het verbod ingesteld om slib van rioolwaterzuiveringsinstallaties op landbouwgrond te gebruiken¹⁷⁵.

De MestActiePlannen (MAP) werken de bemestingsnormen verder uit met het oog op de verbetering van de oppervlakte- en grondwaterkwaliteit. Het volledige grondgebied van het Vlaamse Gewest wordt afgebakend als kwetsbaar gebied waardoor overal de maximale norm van 170 kg N uit dierlijke mest per hectare en per jaar van toepassing is. MAP 6 zet in op een gebiedsgerichte benadering: in de gebieden waar de waterkwaliteit slecht tot zeer slecht is, geldt een jaarlijkse daling van de bemestingsnormen werkzame stikstof. MAP 7 voorziet dat de maximale bemestingsnorm voor werkzame stikstof wordt verminderd in functie van het gebiedstype en de teelt op het perceel. Landbouwers kunnen die reducties (gedeeltelijk) terugverdienen door het uitvoeren van goede bodem-, teelt- en bemestingspraktijken.

Voor gecertificeerde gft- en groencompost bestaan een aantal uitzonderingsmaatregelen: ze moeten niet emissiearm aangewend worden, naast het gebruik op landbouwgrond of in groeimedium is ook het gebruik bij aanplantingen en onderhoud van tuinen, parken en plantsoenen toegelaten, de regels voor transport zijn minder streng en ook de berekening van de maximale hoeveelheid op te brengen hoeveelheid stikstof en fosfor is soepeler dan voor andere meststoffen.

Sinds 2016 geldt alleen nog het systeem van werkzame stikstof. Werkzame stikstof is de hoeveelheid stikstof uit meststoffen, die het gewas het eerste jaar nuttig kan gebruiken. Voor gecertificeerde gft- en groencompost en voor boerderijcompost bedraagt de werkingscoëfficiënt voor stikstof 15% en hoeft er slechts 50% van de hoeveelheid fosfor (P₂O₅) van die compost in rekening gebracht te worden¹⁷⁶.

¹⁷⁴ Deze werden opgenomen in bijlage 12.4.2 van dit rapport.

¹⁷⁵ EMIS/VITO: <https://navigator.emis.vito.be/detail?wold=6688>

¹⁷⁶ Bronnen: EMIS Navigator, Bemestingsnormen en richtwaarden 2024 (Vlaamse Land Maatschappij)

Het Mestdecreet stelt dat enkel een 'erkende mestvoerder' compost mag transporteren. De wetgeving voorziet uitzonderingen voor transporten van minder dan 500kg en transporten van minder dan 3.500kg die bestemd zijn voor particuliere tuinen, parken of plantsoenen in het Vlaams Gewest¹⁷⁷.

8.1.1.9 Boerderijcompostering

Boerderijcompostering op het niveau van één landbouwbedrijf, met enkel eigen stromen (mest, oogstresten, grasmaaisel, e.a.) en de afzet van compost enkel op eigen percelen is uitgezonderd van een afvalstoffenvergunning. Als er dierlijke mest verwerkt wordt, moet een erkenning in het kader van de wetgeving op dierlijke bijproducten aangevraagd worden¹⁷⁸.

8.1.1.10 Normen voor PFAS

In Vlaanderen is er een toetsingswaarde van 15µg/kg droge stof voor *PFAS in afvalstoffen gebruikt in of als bodemverbeteraar/meststof*. De norm wordt gehanteerd voor de 20 PFAS verbindingen die meegenomen worden voor de aftoetsing van de Europese drinkwaternorm. Hierdoor worden PFOS, PFOA en de meest frequent gedetecteerde korte keten PFAS verbindingen in de beoordeling meegenomen (Van den Abeele L, 2022).

Recent werd er aan het *Vlaams compendium voor monsterneming en analyse (CMA)* in uitvoering van het Materialendecreet en het Bodemdecreet een deel toegevoegd voor per- en polyfluoralkylverbindingen (PFAS) in bodemverbeterende middelen.¹⁷⁹

De Europese drinkwaterrichtlijn is het wettelijke kader voor de regulering van de kwaliteitseisen voor drinkwater en het opvangen van risico's voor de gezondheid. In de Europese drinkwaterrichtlijn van 2020 worden voor PFAS 2 parameterwaarden opgenomen:

- Som PFAS-20: 0,1 µg/l
- Som van alle PFAS: 0,5 µg/l

Vlaanderen hanteert beide parameterwaarden als wettelijke norm voor drinkwater¹⁸⁰.

Daarnaast geldt een streefwaarde van 4 ng/l voor de som van PFOA, PFOS, PFNA en PFHxS (EFSA-4)(open definitie). Die streefwaarde moet uiterlijk 5 jaar na goedkeuring van het drinkwaterbesluit (20/01/2023) behaald worden, dus 20/01/2028.¹⁸¹

8.1.1.11 Statuut inhoud chemische toiletten

In antwoord op de vraag 'Valt de inhoud van chemische toiletten juridisch onder de definitie afvalwater of afvalstof?' en de vraag 'Mag de inhoud van individuele chemische toiletten in de openbare riolering worden geloosd?', verwijzen we naar het antwoord op een parlementaire vraag¹⁸²:

¹⁷⁷ Bron: VLACO

¹⁷⁸ Bron: OVAM, Wetgeving rond boerderijcompostering en houtsnippers, presentatie voor een studiedag 9-14/2/2024.

¹⁷⁹ *PFAS in bodemverbeterende middelen*, Compendium voor monsterneming en analyse in uitvoering van het Materialendecreet en het Bodemdecreet, CMA/3/O, BS van 26 februari 2024.

¹⁸⁰ Deze norm wordt tevens als saneringscriterium voor grondwater in het kader van het bodemdecreet gehanteerd.

¹⁸¹ Bron: <https://www.vlaanderen.be/pfas-vervuiling/pfas-normenkader>

¹⁸² Vlaams Parlement – Vragen en Antwoorden – Nr. 1 – 6 oktober 2000: Vraag nr. 214 van 23 mei 2000 van de heer Jacques Timmermans. Bevestigd door OVAM in 2023.

- de inhoud van chemische toiletten valt onder de bepalingen van het afvalstoffendecreet (nu: materialendecreet en VLAREMA)
- behandeling: opslaan in een container en laten ophalen/verwerken door een vergunde verwerker van (gevaarlijke) afvalstoffen (in het geval niet-biologisch afbreekbare producten gebruikt werden)
- de vergunde verwerker kan ook een RWZI zijn: de inhoud van chemische toiletten enkel kan als septisch materiaal kan worden beschouwd wanneer de gebruikte chemicaliën biologisch afbreekbaar zijn. Anders mag deze inhoud niet worden aangeleverd (bv op een RWZI) als 'septisch materiaal'.
- lozen op de riool is in geen enkele omstandigheid toegelaten

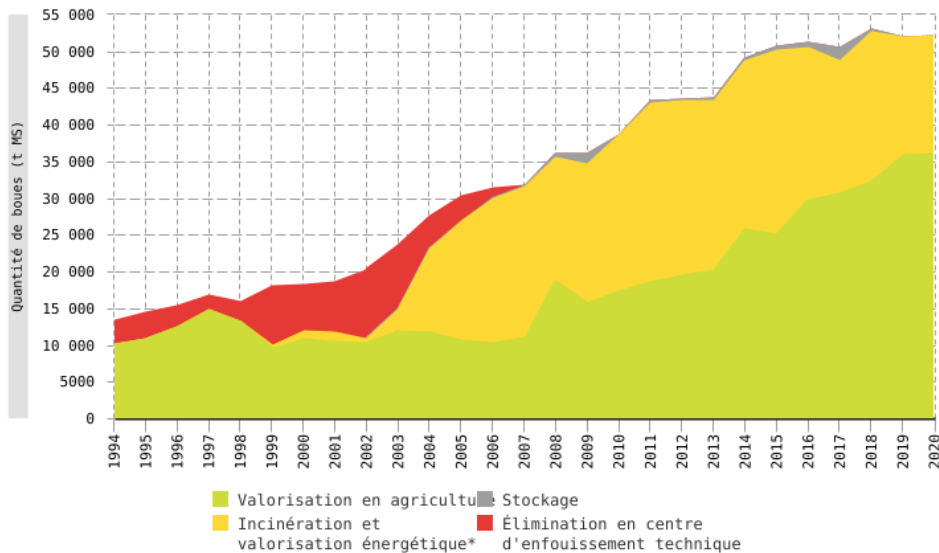
8.1.2 Wallonië

8.1.2.1 Bemesting met slib uit waterzuiveringsstations

Het besluit van de Waalse regering van 12 januari 1995 regelt het gebruik op of in de bodem van zuiverings-slib of slib afkomstig van slibverwerkingscentra voor septische tanks. Er werden twee mogelijkheden tot valorisatie voorzien: als bemesting in de landbouw en door co-verbranding in verbrandingsovens voor huisvuil of in cementovens. Vanuit het oogpunt van de hiërarchie van afvalbeheermethoden heeft terugwinning in de landbouw voorrang op energierecuperatie, zoals bepaald door het Waals decreet van 10 mei 2012 - decreet dat de Europese directive 2008/98/CE omzet in Waalse regelgeving. In Wallonië werd in 2020 69% van het in Wallonië geproduceerde RWZI-slib (52.000 tonDS/jaar) nuttig toegepast in de landbouw, 30% werd verbrand met energierecuperatie en 1% werd verbrand zonder nuttige toepassing. De Waalse watermaatschappij (Société Publique de Gestion de l'Eau - SPGE) schat dat met de geplande zuiveringsinfrastructuur een productie van 56.000 tonDS zuiverings-slib per jaar zal worden bereikt.¹⁸³

¹⁸³ Bron: <https://etat.environnement.wallonie.be/contents/indicatorsheets/DECHETS%208.html>

Figuur 14 Het beheer van rioolzuiveringsslib in Wallonië



* Pour la période 2017 - 2020, 97 à 99 % d'incinération avec valorisation énergétique et 1 à 3 % d'incinération sans valorisation. Pour les années antérieures, les données désagrégées ne sont pas disponibles.

REEW – Sources : SPGE ; SPW Environnement - DSD [déclarations des organismes d'assainissement agréés à la SPGE] © SPW - 2023

Bron: Société Publique de Gestion de l'Eau - SPGE

De valorisatie van RWZI-slib is in Wallonië legaal, op voorwaarde dat een strikt wettelijk kader wordt gerespecteerd. Het is onderworpen aan een gebruikscertificering, waarbij de herkomst van het slib en de processen die tot de productie ervan leiden, moeten worden geïdentificeerd¹⁸⁴. Een analyse van de fysisch-chemische en biologische parameters is verplicht. Hiermee is het mogelijk om de agrarische kwaliteit van het slib en het gehalte zware metalen en essentiële sporenelementen te identificeren.

Het besluit van 12 januari 1995 bepaalt in Art. 2:

§1. Slib mag alleen op of in de bodem worden gebruikt als aan de volgende voorwaarden wordt voldaan:

- 1° het slib niet gevaarlijk en niet giftig is en concentraties heeft die lager zijn dan de grenswaarden voor zware metalen, vermeld in bijlage 1.A, en een pH (water) heeft die groter is dan 6;*
 - 2° de bodems concentraties hebben die lager zijn dan de grenswaarden voor zware metalen, vermeld in bijlage 1.B, en een pH (water) hebben die hoger is dan 6;*
 - 3° de verspreide hoeveelheden overschrijden de maximumdrempels bepaald overeenkomstig bijlage 1.C. niet;*
- §2. Elk product dat uit slib wordt vervaardigd en bestemd is voor gebruik op of in de bodem, moet voldoen aan dezelfde eisen als die welke gelden voor het gebruik van slib op of in de bodem.*

De wetgeving voorziet niet in een analyse van andere verontreinigende stoffen, maar in de praktijk wordt de controle op de niveaus van PAK, BTEX, koolwaterstoffen en dergelijke vrijwel systematisch uitgevoerd en

¹⁸⁴ Deze moet worden aangevraagd bij de 'Direction de la Protection des Sols' (DPS), <https://sol.environnement.wallonie.be/home/sols/administration-spw-competente/direction-de-la-protection-des-sols.html>. Er is ook een toelating nodig van FOD Gezondheid.

afgedwongen door middel van vergunningen en ontheffingen. De verspreiding van rioolzuiveringsslib mag niet leiden tot overschrijding van de normen (Govaerts, 2022).

In België en Frankrijk wordt het ontwateren van slib met kalkmelk nog steeds toegepast als ontwateringstechniek. Het ontwaterde slib gaat daar nog steeds als kalkhoudende meststof naar de landbouw (o.a. in Wallonië)¹⁸⁵.

Omwille van de PFAS problematiek, legde de Waalse regering recent een beperking op de hoeveelheid slib uit waterzuiveringsstations dat gebruikt wordt als meststof in de landbouw.

PFAS was de aanleiding om de toegelaten gebruikte hoeveelheid slib te beperken van 12 naar 6 ton per hectare. Het slib is eveneens onderhevig aan nieuwe normen. Voor elk van de zes meest voorkomende PFAS-chemicaliën¹⁸⁶ mag er maar maximaal 40µg/kg DS aanwezig zijn. Voor de som van alle 22 gekende PFAS-stoffen, mag er maximaal 400 µg/kg DS aanwezig zijn.

Sinds 1 januari 2025 worden waterzuiveringsstations, waar de normen meer dan twee opeenvolgende keren worden overschreden, maandelijks opgevolgd tot zes opeenvolgende stalen wel aan de drempelwaarden voldoen.¹⁸⁷

8.1.2.2 Andere relevante wetgeving

De Waalse overheidsdienst voor Landbouw, Natuurlijke Hulpbronnen en Leefmilieu (SPW ARNE), meer bepaald de Afdeling Bodem en Afval (DSD), ontwikkelt bepalingen voor afvalbeheer en -transport, evenals bepalingen met betrekking tot de bescherming en sanering van bodems.

Hieronder volgt een kort overzicht van het relevante wetgevende kader:

- Het Waals Besluit van 9 maart 2023 betreffende afvalstoffen, circulariteit van materialen en openbare netheid actualiseert de Waalse afvalstoffenwetgeving volgens o.a. de herziene kaderrichtlijn afvalstoffen EU 2008/98.
- In Wallonië zijn alle maatregelen met betrekking tot de opslag en verspreiding van landbouwmeststoffen geïntegreerd in het Programma Duurzaam Stikstofbeheer (PGDA – Waalse tegenhanger van het MAP). Sinds 2008 werd de invoer van organisch afval opnieuw mogelijk, maar de verwerking ervan mag enkel gebeuren in erkende installaties, zoals composterings- of biomethanisatie-eenheden in Wallonië¹⁸⁸.
- De invoer van zuiveringsslib van industriële bedrijven voor toepassing in de landbouw of voor verbranding in de Waalse cementovens kan wel indien alle voorwaarden vervuld zijn.
- Volgens de Waalse Codex Duurzame Huisvesting moet een woning, om gezond te zijn, uitgerust zijn met een spoeltoilet¹⁸⁹. Zonder het gebruik van droogtoiletten te verbieden, voorkomt deze bepaling de bouw van een woning die niet over een conventioneel watertoilet beschikt. In het besluit van 3/12/2020 betreffende tiny houses is niet bepaald dat deze moeten uitgerust zijn met spoeltoilet. De

¹⁸⁵ Bron: STOWA-rapport nr.35, 2019. Slibverwerking met ongebluste kalk.

¹⁸⁶ PFOS, PFOA, PFNA, PFHxS, PFDA, PFHxA

¹⁸⁷ Bron: <https://www.wallonie.be/fr/actualites/pfas-limitation-des-boues-issues-de-stations-depuration-utilisees-comme-fertilisants>

¹⁸⁸ Travail parlementaire (Parlement Wallon), année : 2022, N° : 565 (2021-2022): Les importations d'engrais de ferme en provenance de Flandre.

¹⁸⁹ Voor Vlaanderen: zie <https://www.vlaanderen.be/bouwen-wonen-en-energie/veilig-gezond-en-kwaliteitsvol-wonen/woningkwaliteitsnormen/overzicht-van-minimale-woningkwaliteitsnormen>

huisvestingsfiche die de bepalingen van het besluit van 3/12/2020 samenvat, bepaalt dat het “een droogtoilet kan zijn”, zonder dit echter nader te definiëren (Govaerts, 2022).

8.1.3 Brussel

8.1.3.1 Zuiveringsslib afkomstig van rioolwaterzuivering

De productie van zuiveringsslib door de twee Brusselse RWZI's bedraagt zo'n 40.000 ton per jaar. In beide installaties wordt ook het organisch materiaal door vergisters omgezet tot biogas. Het RWZI Noord heeft daarenboven een installatie voor natte oxidatie van het resterende slib na de biomethanisatie, waardoor het resterende organisch materiaal in het slib afgebroken wordt en enkel mineraal restmateriaal ('technozand') overblijft. Sporadisch wordt een deel, na voorbehandeling in een compostinstallatie, hergebruikt als compost voor landbouw in het buitenland (Frankrijk), zoals bv. in 2019 en 2024. In het Brussels Gewest wordt geen slib als meststof hergebruikt in de landbouw¹⁹⁰, ondanks het bestaan van een wettelijke kader ervoor.¹⁹¹ Een groot deel van het slib en de sedimenten uit Brussel wordt verbrand (bv. in de cementindustrie) of gestort.

Er wordt in het Brusselse gewest zo'n 5.000 ton materiaal uit septische putten verwerkt (IBGE, 2012). Het wordt meestal verwerkt in RWZI's in het Waalse Gewest (waar dit slib, dat nog steeds sterk gehydrateerd is, dezelfde behandeling ondergaat als afvalwater) of verbrand; storten is vrijwel geen optie meer.

8.1.3.2 Brudalex 2.0 en het composteren van bio-afval

De Brudalex¹⁹² (Bruxelles/Brussel-Déchets-Afvalstoffen-LEX) biedt het Brussels Hoofdstedelijk Gewest een wettelijk kader aan om over te schakelen op een circulaire economie, door de administratieve rompslomp te verminderen en de selectieve ophaling en het hergebruik van afvalstoffen te stimuleren.

De Brudalex 2.0 heeft de wetgeving rond afvalstoffen hervormd:

- Sinds 1 mei 2023 is er een sorteerplicht voor bioafval voor professionals (privaat en publiek). Met de toekomstige biomethaniseringsinstallatie en de aansporing en begeleiding om composteerinstallaties voor wijken en bedrijven te creëren en te beheren, wordt er alles aan gedaan opdat er geen voedselafval meer bij het gemengd afval zou belanden.
- Aanmoediging en begeleiding om keukenafval, etensresten van categorie 3 en tuin- en parkafval te composteren voor particulieren én bedrijven:
 - wijkcompostering en bedrijfscompostering zijn niet onderworpen aan een milieuvergunning indien het volume van de composteersite, inclusief de opslagplaats, maximaal 25 m³ bedraagt¹⁹³;
 - de compost mag enkel voor eigen gebruik van deelnemende huishoudens of werknemers aangewend worden en onder eigen verantwoordelijkheid en mag niet weggegeven of verkocht worden. De overtollige hoeveelheden compost worden vervoerd naar een vergunde inzamel- of verwerkingsinrichting; ze kunnen niet worden overgebracht tussen verschillende wijkcomposteersites en/of bedrijfscomposteersites.

¹⁹⁰ Bron: <https://leefmilieu.brussels/burgers/tools-en-data/het-milieu-stand-van-zaken/slib-en-sedimenten>

¹⁹¹ Arrêté du Gouvernement de la Région de Bruxelles-Capitale du 15/07/1993 relatif à l'utilisation des boues d'épuration en agriculture MB du 18/08/1993.

¹⁹² Brudalex 2.0 werd op 23 juni 2022 goedgekeurd en wijzigt het vorige besluit van 1 december 2016 betreffende het beheer van afvalstoffen.

¹⁹³ In Vlaanderen is wijkcompostering tot 25m³ melding plichtig (klasse 3); VLAREM-rubriek 2.2.3.b) 1°.

- de beheerders van de composteersites moeten een opleiding gevolgd hebben. Leefmilieu Brussel stelt een gids van goede praktijken inzake composteren op. Begeleiding en vorming worden aangeboden door specialisten¹⁹⁴.

Brudalex onderscheidt, naast wijk- of bedrijfscompostering (zonder milieuvergunning), kleinschalig en grootschalig composteren. Er is een milieuvergunning nodig wanneer de compost verhandeld wordt en bioafval van derden aanvaard wordt. Kleinschalige composteerinrichtingen, inclusief inzameling en opslag, verwerken tot 1000 ton bioafval per jaar. Behalve voor de parameter zink¹⁹⁵ respecteert de compost de saneringsnormen voor de bodem zoals opgenomen in het besluit van de Brusselse Hoofdstedelijke Regering van 29 maart 2018 tot vaststelling van de interventie en saneringsnormen¹⁹⁶. Er worden minstens analyses uitgevoerd met betrekking tot zware metalen en metalloïden, polycyclische aromatische koolwaterstoffen en minerale oliën. Wanneer de compost voldoet aan alle opgelegde voorwaarden, krijgt die het einde-afvalstatuut.

8.1.3.3 Relevant wetgevend kader m.b.t. compost

Hieronder volgt een kort overzicht van het relevante wetgevende kader m.b.t. compost:

- Registratie als inzamelaar van dierlijk afval categorie 3 (niet-gevaarlijk) : besluit van de Brusselse Hoofdstedelijke Regering van 28 november 2002 betreffende de verwijdering van dierlijk afval en de afvalverwerkingsinstallaties.
- Opslag van afval: besluit van de Brusselse Hoofdstedelijke Regering tot vaststelling van de lijst van de installaties van klasse IB, II en III in uitvoering van artikel 4 van de ordonnantie van 5 juni 1997 betreffende de milieuvergunningen.
- Verwerking: hiervoor gelden de Brusselse ordonnantie betreffende de milieuvergunningen, Brudalex en de Europese verordeningen¹⁹⁷ (zie verder).
- Einde-afvalstatuut : artikel 9 van de ordonnantie van 14 juni 2012 betreffende afvalstoffen en Brudalex
- Gebruik als meststof, transport en verkoop: hiervoor geldt de federale wetgeving (zie verder)

8.1.4 Federaal niveau

8.1.4.1 Richtlijnen voor compost van droogtoiletten

In het comité Meststoffen werd in februari 2025 het finale document over compost van droogtoiletten besproken. Dit document is bestemd voor toekomstige studies. Het definitieve besluit over de vereisten voor compost van droogtoiletten wordt genomen nadat er meer wetenschappelijke informatie verkregen is. De norm DIN SPEC 91421:2020-12 wordt aanbevolen als basis voor informatie.

In de richtlijnen worden de landbouwkundige vereisten, vereisten voor zware metalen, vereisten voor chemische, biologische en fysische contaminanten en vereisten voor rijpheid/stabiliteit besproken. Deze voorlopige richtlijnen werden opgenomen in bijlage 12.4.4.

¹⁹⁴ Bijvoorbeeld: Environnement Eco Circulaire asbl (Jean-Marie Savino) <https://ecocirculaire.be/>

¹⁹⁵ Voor de parameter Zn is de maximale drempel 400 mg Zn/kg droge stof.

¹⁹⁶ Dit besluit werd gewijzigd door het besluit van 30 mei 2024 naar aanleiding van de opname van de normen met betrekking tot PFAS. https://www.ejustice.just.fgov.be/mopdf/2024/07/09_1.pdf#Page113

¹⁹⁷ Bijlage V bij Verordening (EU) nr. 142/2011 van de Europese Commissie tot uitvoering van Verordening (EG) nr. 1069/2009

8.1.4.2 KB Handel in meststoffen, potgrond en bodemverbeteraars

Vanaf het moment waarop je de compost of digestaat gaat verhandelen (ook gratis weggeven wordt beschouwd als verhandelen) moet je voldoen aan het Koninklijk besluit van 28 januari 2013 betreffende het in de handel brengen en het gebruiken van meststoffen, potgrond en bodemverbeteraars.

In de lijst van Bijlage 1, hoofdstuk III, Organische bodemverbeterende middelen, vinden we producten zoals: 'Gedroogde dierenmest', 'wormcompost van dierenmest' en 'gemengd organisch bodemverbeterend middel' waarvoor bepaalde vereisten gelden zoals bv. het maximum gehalte aan zware metalen. In hoofdstuk VIII vinden we de vereisten voor zuiveringsslib afkomstig van zuiveringsinstallaties voor huishoudelijk en/of stedelijk en/of industrieel afvalwater.

Tabel 18 Normen voor bodemverbeterende middelen en voor zuiveringsslib (uitgedrukt in mg/kg droge stof)

Zware metalen en PCB's	Gecomposteerd org BVM (prod.spec. ontheffing)	Digestaat (prod.spec. ontheffing)	Gemengd organisch BVM (KB 28/1/2013)	Zuiveringsslib (KB 28/1/2013)
Arseen	20	150	2,5	10
Cadmium	2	6		
chrom	100	500	100	500
kobalt			10	-
koper	150	800	250	600
kwik	1	5	2.5	10
lood	150	500	500	500
nikkel	50	100	50	100
zink	400	2000	750	2000
PCB's (som 7 congenen)				0,8

Bron: KB van 28 januari 2013 (bijlage 1) en normen die zijn opgenomen in de product specifieke ontheffingen (FOD Gezondheid, Veiligheid van de Voedselketen en Leefmilieu)

Compost en digestaat staan niet op de lijst van de toegelaten producten dus moet hiervoor in het kader van deze wetgeving een ontheffing aangevraagd worden bij het FOD Volksgezondheid, Veiligheid van de Voedselketen en Leefmilieu. De FOD VVVL beslist ook over de gebruiksmogelijkheden van compost en digestaat.

Om met de afvalstoffenwetgeving in orde te zijn, is in Vlaanderen volgens het VLAREMA ook een keuringsattest van een erkende certificeringsinstelling (i.c. Vlaco vzw) vereist, tenzij zuivere mest werd verwerkt. In Wallonië is een gebruikscertificaat vereist.¹⁹⁸

¹⁹⁸ Bronnen: VLACO, FAQ's van FAVV.

Voor toepassing in de landbouw van zuiveringsslib afkomstig van zuiveringsinstallaties voor huishoudelijk en/of stedelijk en/of industrieel afvalwater dient een toelating aangevraagd te worden bij de FOD VVVL¹⁹⁹. In de aanvraag moeten ondermeer recente analyseverslagen zijn opgenomen van:

- landbouwkundige parameters: droge stof (%), organische stof (%), N totaal (%), P₂O₅ oplosbaar in mineraal zuur (%), pH (water) en indien deze pH > 8 ook de neutraliserende waarde
- ongewenste stoffen: aanwezigheid van Salmonella spp., analyse van zware metalen en PCB's.

In Vlaanderen is het gebruik van slib afkomstig van zuiveringsinstallaties voor stedelijk afvalwater niet mogelijk door het Mestdecreet, in Wallonië is het wel mogelijk, maar met een aantal beperkingen.²⁰⁰

“De producten waarvoor ontheffing wordt aangevraagd moeten dermate vrij zijn van giftige of schadelijke bestanddelen, van schadelijke insecten, nematoden, leefbare sporen van stuif- en stinkbrand of andere fytopathogene kiemen, dat zij geen nadelige invloed kunnen uitoefenen op de teelten, noch op de gezondheid van mensen of dieren, wanneer die producten volgens de goede landbouwkundige praktijken gebruikt worden. Ze mogen geen hogere gehalten aan ongewenste stoffen bevatten dan deze die in voorkomend geval overeenkomstig dit besluit zijn vastgesteld.”

Eenieder die meststoffen, bodemverbeterende middelen of teeltsubstraten invoert, fabriceert, bereidt, voorverpakt of doet fabriceren door een derde om ze te verhandelen, moet vooraf daartoe door het Federaal Agentschap voor de Veiligheid van de Voedselketen (FAVV) erkend zijn²⁰¹. De erkenning kan worden aangevraagd aan de hand van een aanvraagformulier. Jaarlijks gebeurt een controlebezoek door een FAVV-inspecteur. Daarbij wordt de checklist gecontroleerd (meldingsplicht, traceerbaarheid, infrastructuur, uitrusting, hygiëne, verpakking en etikettering en autocontrole).

Voor de compostering van menselijke uitwerpselen moet het FAVV sowieso ook toestemming geven. FOD zou ook ontheffing moeten geven, want zeker als het materiaal van festivals komt kan het niet meer als huishoudelijk afval beschouwd worden²⁰².

8.1.4.3 Inputstromen voor verwerking in een vergistingsinstallatie

FOD VVVL hanteert een lijst van toegelaten en niet-toegelaten grondstoffen voor de valorisatie van digestaat in de landbouw. In de positieve lijst (=toegelaten grondstoffen) vinden we geen vermelding van menselijke mest; in de negatieve lijst vinden we organische afvalstoffen die luiers bevatten en slib van de behandeling van stedelijk afvalwater.

8.1.4.4 Toelating als gewasbeschermingsmiddel

Een meststof, een teeltsubstraat (zoals potgrond) of een bodemverbeterend middel kan werkzame stoffen van gewasbeschermingsmiddelen bevatten, bijvoorbeeld doordat het behandeld werd met een gewasbeschermingsmiddel. Als een dergelijk product op de markt wordt gebracht, moet het toegelaten zijn als gewasbeschermingsmiddel (EU pesticiden databank) en overeenkomstig geëtiketteerd zijn.

¹⁹⁹ <https://fytoweb.be/nl/meststoffen/zuiveringsslib>

²⁰⁰ Zie KB van 28 januari 2013, Bijlage 1, Hoofdstuk VIII en bespreking van de Europese richtlijn terzake in paragraaf 8.4.2.

²⁰¹ Het Koninklijk Besluit van 16/01/2006 tot het vaststellen van de nadere regels van de erkenningen, toelatingen en voorafgaande registraties afgeleverd door het Federaal Agentschap voor de Veiligheid van de Voedselketen.

²⁰² Bron: VLACO, schriftelijke mededeling.

Het kan gaan om stoffen zoals glyfosaat of neonicotinoïden.

Het programma 2023-2027 van het federale reductieplan voor gewasbeschermingsmiddelen (FRPG) maakt, samen met drie gewestelijke programma's, deel uit van het nationaal actieplan voor de reductie van pesticiden (NAPAN).

8.1.4.5 Kwaliteit van voor menselijke consumptie bestemd water

Het KB van 4 februari 2024 betreffende de kwaliteit van voor menselijke consumptie bestemd water dat in voedingsmiddeleninrichtingen verpakt wordt of dat voor de fabricage en/of het in de handel brengen van voedingsmiddelen wordt gebruikt, specificeert minimumvereisten voor microbiologische parameters en chemische parameters (waaronder pesticiden en PFAS).

Tabel 19 Normen voor pesticiden en PFAS in drinkwater (uitgedrukt in µg/l)

Parameter	parameterwaarde	Opmerkingen
Pesticiden	0,10	Voor elk pesticide afzonderlijk
Metabolieten van pesticiden	4,50	Aanwezigheid van niet-relevante metabolieten van pesticiden in water
Pesticiden totaal	0,50	Som van alle afzonderlijke pesticiden
PFAS totaal	0,50	Som van alle per- en polyfluoralkylstoffen
Som van PFAS 20	0,1	20 PFAS-stoffen bepaald in Europese richtlijn 2020/2184

Bron: KB van 4 februari 2024

Het FAVV voert sinds 2008 een algemeen toezicht uit op PFAS in de voedselketen, dankzij zijn controleprogramma. In de periode 2008-2020 zijn meer dan 450 monsters genomen en geanalyseerd op de aanwezigheid van PFAS.²⁰³

8.2 DUITSLAND

8.2.1 Algemeen wetgevend kader

In Duitsland is de Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG – Duitse Wet op de gesloten kringloop en het afvalbeheer)²⁰⁴ de basis van de afvalwetgeving. Deze wordt aangevuld en onderbouwd door verschillende voorschriften, maar deze zijn alleen relevant voor de grondstoffen bioafval, rioolslib of dierlijke mest. De verwerking van menselijke feces en urine, indien deze niet met water worden gemengd maar apart worden ingezameld, is niet gereguleerd in de Duitse wetgeving.

²⁰³ PFAS in voeding: grenswaarden, zie <https://favv-afscab.be/nl/pfas-veel-gestelde-vragen#Q9>

²⁰⁴ De Duitse KrWG is vergelijkbaar met het Vlaams Decreet van 23 december 2011 betreffende het duurzaam beheer van materiaalkringlopen en afvalstoffen, het zogenaamde 'Materialendecreet'.

Naast de afvalwetgeving worden gerecycleerde meststoffen ook gereguleerd door de meststoffenwetgeving. De productgerelateerde meststoffenwetgeving bevat de nationale vereisten voor het op de markt brengen van "niet-EG-meststoffen"²⁰⁵. De wettelijke basis voor de productie en marketing van meststoffen, bodemadditieven, plantenadditieven en teeltsubstraten is de Düngegesetz (DüngG) (Duitse meststoffenwet) en de Düngemittelverordnung (DüMV) (Duitse meststoffenverordening). Deze laatste bevat een uitputtende lijst van toegestane grondstoffen en moedermaterialen voor meststoffen, die geen menselijke feces en urine omvatten.

Om inzicht te krijgen in de toegevoegde waarde van meststoffen uit menselijke mest, werden door Krause et al. (2021) eerst de geldende wettelijke voorschriften langs de respectieve waardeketens van de drie bronmaterialen bioafval, rioolslib en vloeibare dierlijke mest getraceerd. De relevante verordeningen voor de recyclinggerichte terugwinning van fecaliënachtige materialen zijn de Bioabfallverordnung (BioAbfV) (Duitse verordening i.v.m. organisch-biologische afvalstoffen), de Klärschlammverordnung (AbfKlärV) (Duitse rioolslibverordening) en de DüMV (Duitse meststoffenverordening). Vloeibare dierlijke mest valt onder de bepalingen van de wetgeving inzake dierhygiëne en meststoffen en wordt onder meer in aanmerking genomen in de Tierische Nebenprodukte- beseitigungsverordnung (TierNebV) (Duitse verordening inzake dierlijke bijproducten). Het schema in bijlage 12.5.1 geeft een duidelijk overzicht van de relevante wetgeving, gaande van afvalstof/grondstof, behandeling, over product en vermarkting tot uiteindelijke toepassing.

Volgens de Duitse meststoffenverordening (Düngemittelverordnung, DüMV) (Germany, 2012) moet de kwaliteitsborging van gerecycleerde producten het juiste gebruik ervan garanderen. Alleen meststoffen die "de vruchtbaarheid van de bodem, de gezondheid van mensen, dieren en gewassen niet schaden en het evenwicht van de natuur niet in gevaar brengen" mogen worden goedgekeurd en op de markt worden gebracht .

Inputstromen ('Ausgangsstoffe') die worden gebruikt voor de productie van meststoffen, moeten ook voldoen aan deze specificatie en moeten "een plantgroei-, productie- of toepassingsgerelateerd voordeel hebben of dienen om de bodem te beschermen en de bodemvruchtbaarheid te behouden en te bevorderen". Bovendien mogen alleen meststoffen die "geen ziekteverwekkers, toxines of plagen bevatten" worden goedgekeurd en op de markt worden gebracht.

Voor generiek bioafval schrijft de Duitse bioafvalverordening (BioAbfV) als behandelingsopties voor:

- pasteurisatie van <70 °C gedurende ten minste 1 uur,
- thermofiele compostering van 55 °C gedurende 2 weken, 60 °C gedurende 6 dagen of 65 °C gedurende 3 dagen, of
- thermofiele fermentatie bij <50 °C met een geschikte retentietijd voor de specifieke vergister.

In de praktijk is de hygiënisering van inhoud van droogtoiletten meestal gebaseerd op EU-aanbevelingen voor de behandeling van rioolslib, waarin staat dat hygiënisering moet worden bereikt door pasteurisatie bij een temperatuur van 70 tot 80 °C gedurende een korte periode (ongeveer 30 tot 60 min) of door thermofiele compostering met een thermofiele composteringsfase en temperaturen boven 60 °C gedurende meerdere dagen.

²⁰⁵ Deze term omvat alle meststoffen die niet op basis van de EU-verordening betreffende meststoffen [(EG) nr. 2003/2003] in de handel zijn gebracht.

Ook voor urinebehandeling wordt pasteurisatie gebruikt voor sanitatie, bijvoorbeeld tijdens de laatste distillatiestap. De stikstofverbindingen in urine moeten echter worden gestabiliseerd vóór verhitting; anders gaat N verloren door ureumafbraak en ammoniak (NH₃)-vervluchtiging.

Een lijst met dodelijke temperaturen voor verschillende ziekteverwekkers, plagen en onkruidzaden (fytosanitaire risico's) is gepubliceerd door de Federale Compostkwaliteitsvereniging (Bundesgütegemeinschaft Kompost, BGK). In overeenstemming met de vereisten van de BioAbfV voor commerciële compostering moet een effectieve warmtebehandeling bij een temperatuur van ≥ 55 °C worden gehandhaafd gedurende een periode van meerdere dagen tot weken om ziekteverwekkers te doden en de kiemkracht en het kiemvermogen van zaden en onkruid te inactiveren. Tot slot moet de compost worden getest op de effectiviteit van de ontsmetting. De BioAbfV bepaalt maximaal twee plantendelen die kunnen kiemen of kiembare zaden per liter testsubstraat.

8.2.2 Productspecificaties DIN SPEC 91421

De Duitse DIN SPEC 91421 definieert kwaliteitseisen voor recyclingmeststoffen uit menselijke mest²⁰⁶. Het dient als maatstaf om de kwaliteit van verschillende recyclingmeststoffen te controleren en te vergelijken. Deze productspecificatie heeft als bedoeling om (i) de bestaande onzekerheden in de vermarkting van gerecycleerde meststoffen uit menselijke mest te verminderen, (ii) de dialoog met beleidsmakers te bevorderen en (iii) duurzame, circulaire sanitaire systemen en alternatieven voor meststoffen te creëren (Krause A, 2020).

Hiertoe werden in 2020 een meta-analyse en "proof of concept"-studie uitgevoerd door een groep van wetenschappers en initiatiefnemers.

Het doel van de *meta-analyse* was om inzicht te krijgen in de bestaande wetten, voorschriften en normen en om grenswaarden en minimumgehalten af te leiden die in aanmerking moeten worden genomen voor kwaliteitsborging van recyclingproducten van substraten van menselijke oorsprong.

Om de toepasbaarheid van deze DIN SPEC en de praktische haalbaarheid van de daarin vereiste analyses voor kwaliteitsborging te testen, werden vervolgens *composteertesten* uitgevoerd. Daarvan werden monsters genomen volgens de aanbevelingen in Bijlage B van de DIN SPEC. Deze monsters werden geanalyseerd in overeenstemming met de kwaliteitseisen en de voorgeschreven methoden en procedures die in de DIN SPEC zijn vastgelegd. Een *evaluatie* werd gemaakt met betrekking tot het bereiken van de gewenste kwaliteitsborging - d.w.z. naleving van de minimale inhouds- en grenswaarden die in de specificatie zijn vereist.

Volgens DIN SPEC 91421 moeten analyses van de volgende parameters worden uitgevoerd voordat van menselijke mest afgeleide meststoffen op de markt worden gebracht:

²⁰⁶ Omdat de DIN SPEC 91421 een productspecificatie is voor het recyclen van meststoffen, maken de inzameling van de grondstoffen en de productie van meststoffen er geen van deel uit. Technische vereisten voor de werking van droogtoiletten en de behandeling van de inhoud van droogtoiletten, die fundamenteel noodzakelijk zijn voor kwaliteitsborging, worden samengevat in Bijlage E. Daarnaast wordt verwezen naar DIN 30762.

- Standaardparameters (droge stof, organische droge stof, pH-waarde, zoutgehalte, alkalische actieve ingrediënten);
- Voedingsstoffen:
 - ▶ Belangrijkste voedingsstoffen: stikstof (totaal en oplosbaar, naast verschillende vormen, afhankelijk van het type meststof), fosfor (totaal; afhankelijk van het type meststof ook oplosbare vormen), kalium;
 - ▶ Secundaire voedingsstoffen: calcium, magnesium, natrium, selenium, zwavel;
 - ▶ Sporevoedingsstoffen: boor, kobalt, koper, ijzer, mangaan, molybdeen, zink;
- Vreemde stoffen (zoals stenen, gerecycled papier, karton, glas, metaal, plastic);
- Verontreinigende stoffen:
 - ▶ Zware metalen (arsenen, lood, cadmium, chroom, koper, nikkel, kwik, thallium, zink);
 - ▶ Organische verontreinigende stoffen (geperfluoreerde tensiden²⁰⁷, dioxinen en dl-PCB's, PAK's);
 - ▶ Farmaceutische residuen (ciprofloxacine, claritromycine, carbamazepine, diclofenac en ethinylestradiol of estradiol);
- Epidemiologische hygiënische parameters (salmonella, Escherichia coli (E. coli), enterokokken, Clostridium perfringens en sporen, somatische colifagen).

De tabellen met parameters, etiketteringsdrempels, grenswaarden, referentie wetgeving en analyse methode/procedure uit de DIN SPEC werden overgenomen in bijlage 12.5.2. Voor een aantal parameters, met name medicijnresten, waren geen drempel- of grenswaarden beschikbaar in de Duitse wetgeving. De grenswaarde voor perfluoroppervlakactieve stoffen (PFT's) betreft de som van perfluorooctaanzuur (PFOA) en perfluorooctaansulfonaat (PFOS)²⁰⁸.

Verdere specificaties m.b.t. staalnames, de laboratoria, afwijkingen (in bepaalde gevallen), praktische aanbevelingen (meststoffengebruik, behandelingsmethoden menselijke mest en beheer droogtoiletten) en de resultaten van de 'proof of concept' zijn terug te vinden in de bijlagen bij de DIN SPEC.

De keuze van de indicatorstoffen voor de aanwezigheid van medicijnresten wordt verantwoord in bijlage 2 van 'Risicoanalyse: Zur Anwendung von Recyclingdüngern aus menschlichen Fäkalien im Gartenbau' (Krause, Häfner, Augustin, Harlow, et al., 2021).

8.2.3 ZirkulierBAR-project

ZirkulierBAR²⁰⁹ is een recent afgesloten 3-jarig onderzoeksproject in Eberswalde, bij Berlijn, dat focust op de circulaire verwerking van menselijke mest, in samenwerking met onderzoeksinstituten, lokale overheden en bedrijven. De aanpak was holistisch en combineerde expertise en kennis uit verschillende disciplines en praktijken. Het project resulteerde in praktijkervaringen, wetenschappelijk onderzoek, stellingnames, vorming, samenwerking en meer. Die resultaten worden op diverse plaatsen in dit literatuuronderzoek besproken.

²⁰⁷ De perfluor oppervlakactieve stoffen (PFT) maken deel uit van de geperfluoreerde verbindingen (PFAS). Geperfluoreerde oppervlakactieve stoffen zijn zeer goed bestand tegen chemische, thermische en lichtinvloeden (UV-straling) en hebben uitstekende vuil-, kleur-, olie- en waterafstotende eigenschappen. Bekende vertegenwoordigers, zijn perfluorooctaansulfonaat (PFOS) en perfluorooctaanzuur (PFOA). <https://www.allum.de/stoffe-und-ausloeser/perfluorierte-verbindungen/>

²⁰⁸ Zoals aangegeven in de Duitse meststoffenverordening, bijlage 2, nr. 1.4.9.

²⁰⁹ Het Federale Ministerie van Onderwijs en Onderzoek (BMBF) steunde zirkulierBAR in het kader van de financieringsmaatregel REGION.innovativ.

8.3 FRANKRIJK

Het *Frans Besluit van 7 september 2009*²¹⁰ tot vaststelling van de technische eisen die van toepassing zijn op niet-collectieve sanitaire voorzieningen, laat het gebruik van droogtoiletten toe, op voorwaarde dat ze geen overlast voor de buurt of vloeistoflozing buiten het perceel veroorzaken, noch verontreiniging van het oppervlakte- of grondwater.

De droogtoiletten worden geïmplementeerd:

- hetzij om urine en feces gezamenlijk te behandelen. In dit geval worden ze gemengd met organisch materiaal om compost te produceren;
- ofwel om feces te behandelen door middel van drogen. In dat geval moet de urine naar het daarvoor bestemde zuiveringssysteem voor huishoudelijk water worden gestuurd, overeenkomstig de bepalingen van de artikelen 6 en 7 van het besluit.

Droogtoiletten bestaan uit een afgesloten tank waarin feces of urine terecht komt. De tank wordt regelmatig geleegd in een afgesloten ruimte die is ontworpen om lekkage te voorkomen en die is beschermd tegen slechte weersomstandigheden.

De bijproducten van het gebruik van droogtoiletten en moeten na compostering op het perceel worden teruggewonnen en mogen geen overlast voor de buurt of vervuiling veroorzaken.

Indien er gebruik wordt gemaakt van droogtoiletten, moet het gebouw voorzien zijn van een installatie om het huishoudelijk (grijs)water te zuiveren. De dimensionering van deze installatie is afgestemd op het geschatte huishoudelijk waterdebiet.

In Frankrijk is er een aparte overheidsdienst die toeziet op de niet-collectieve sanitaire voorzieningen (Service Public d'Assainissement Non Collectif - SPANC). Het Besluit van 27 april 2012 bepaalt de procedures voor het toezicht op niet-collectieve sanitaire voorzieningen. Hierbij worden voorafgaandelijk de aard van de bodem, de hydrologische en geologische context, risicogebieden, enz. gecontroleerd. De correcte inplanting van de installatie (minimale afstand van 35 meter tot particuliere waterputten, naleving van erfdienstbaarheden met betrekking tot de beschermingsperimeters van wateropvang gebieden, minimale afstand van 3 meter tot eigendomsgrenzen (artikel R 111-18 van de Wet op de ruimtelijke ordening), enz. moet worden gerespecteerd (SPANC, 2014). In bijlage 3 zijn de punten opgenomen die in het specifieke geval van droogtoiletten gecontroleerd moeten worden, met name:

- de aanpassing van de gekozen installatie aan het soort gebruik, aan de gezondheids- en milieueisen, aan de eisen en gevoeligheid van de omgeving, aan de kenmerken van het terrein en aan het gebouw dat wordt bediend;
- controle van de waterdichtheid van de tank waarin feces en/of urine worden opgevangen;
- naleving van de regels voor het verspreiden en recycleren van afval van droogtoiletten;
- de afwezigheid van overlast voor de buurt en zichtbare vervuiling;
- de aanwezigheid van een huishoudelijke waterzuiveringsinstallatie.

²¹⁰ Besluit van 7 september 2009 (artikel 17 in Hoofdstuk V: Bijzondere geval: droogtoiletten (zonder toevoeging van verdunnings- of transportwater), verder gewijzigd door het Besluit van 7 maart 2012.

Het Franse Ecologische Sanitatie-netwerk (Réseau de l'Assainissement Ecologique - RAE) heeft een verzoek ingediend om vrijstelling van het gewijzigde besluit van 7 september 2009. Dit besluit voorziet niet in een specifieke technische oplossing voor de behandeling van huishoudelijk water (in combinatie met droogtoiletten). In het kader van het systeem "France Experimentation", zal een aparte behandeling van grijswater met behulp van houtsnipperfilters op het nationale grondgebied kunnen getest worden²¹¹.

Het was niet duidelijk of droogtoiletten toegelaten zijn in zones met een collectief afvalwaterzuiveringssysteem. Het antwoord van de minister van Ecologie werd op 19 april 2011 gepubliceerd in het Publicatieblad: "dit type installatie is toegestaan, ook in collectieve sanitaire zones".

Na de publicatie van het besluit van 7 september 2009 is het Franse Directoraat-Generaal Volksgezondheid (DGS) zich gaan bezighouden met de kwestie van het installeren van droogtoiletten op openbare plaatsen, vakantieverblijven en tijdelijke evenementen. In 2010 stuurde de DGS een bericht naar de regionale gezondheidsinstanties waarin het verbod (op de installatie van droogtoiletten) werd opgeheven, op voorwaarde dat aan een tiental aanbevelingen werd voldaan:

- In de directe nabijheid van toiletten moeten voldoende drinkwaterpunten voor het wassen van de handen aanwezig zijn. Ze zijn uitgerust met een handreinigingsproduct en een veeg- of droogapparaat.
- Er moet een reinigingsprotocol worden geïmplementeerd voor het sanitair beheer van de toiletten. Er is minimaal een keer per uur een inspectie van de toiletten vereist.
- Beheer van teruggewonnen materialen via een behandlingsproces door middel van compostering (voor hygiënische doeleinden).
- De omstandigheden voor het composteren van menselijke mest moeten worden gecontroleerd:
 - opslag van alle geproduceerde vloeistoffen in afgesloten containers, voor toepassing in een spreidingsgebied van de juiste grootte;
 - opslag van de vaste stoffen in een overdekte ruimte, om uitspoeling door regen te voorkomen
 - minimaal 4 keer per jaar de compost keren om de rijping van de compost te bevorderen
 - toevoeging aan het begin van de compostering van zaagsel of andere houtsnippers, in een verhouding die wordt geschat op 1 op 1 in het geval van feces gemengd met urine
 - compostrijpingstijd van twee jaar vóór verspreiding

Indien compostering niet volgens de hierboven beschreven voorwaarden wordt uitgevoerd, moet elke sanitaire handeling met behulp van droogtoiletten op openbare plaatsen en in vakantieverblijven worden gecombineerd met de mogelijkheid om de materialen naar een zuiveringsinstallatie te brengen.

Het rechtstreeks verspreiden van menselijke mest is verboden²¹².

In het geval van een compostering door de dienstverlener/aanbieder van droogtoiletten voor festivals en evenementen, moet deze zoveel mogelijk voldoen aan de nieuwe ICPE-nomenclatuur en de speciale sectie 2780 over compostering²¹³. Hiervoor is het noodzakelijk een diploma te hebben van compostmeester (ADEME-norm) en de regels te respecteren voor het opzetten van een speciale composteerruimte zoals gespecificeerd in ANC (o.a. waterdichte vloer met percolaat opvang- en recirculatie-inrichting).

²¹¹ Het besluit van 30 maart 2023 betreffende het experimenteren met filters voor houtsnippers werd gepubliceerd in het Franse Staatsblad van 26 april 2023.

²¹² Bron: <https://reseau-assainissement-ecologique.org/reglementation/>

²¹³ In de meeste gevallen zitten de aanbieders onder de limiet van 2.000kg/dag die bepaalt of men aan de vereisten moet voldoen.

Door een gebrek aan wettelijke status i.v.m. vaste en vloeibare materialen uit droogtoiletten wordt de toegang tot de collectieve composteerinstallaties bemoeilijkt (TDM, 2017).

Afgezien van de aanbevelingen van het Directoraat-Generaal Volksgezondheid, bestaat er geen expliciete regelgeving die de mobiele droogtoilettechnieken voor eenmalige evenementen of de kanalen met betrekking tot het beheer van hun materialen regelt. Hun afwezigheid in de regelgeving maakt het moeilijk om ze in een specifiek kader te assimileren. De behandeling van deze materialen zou kunnen worden geregeld door de normen NF U44-095 en NF U44-051.

Tabel 20 Normen voor bodemverbeterende middelen (NF U44-051) en voor zuiveringsslib (NF U44-095) in Frankrijk

Zware metalen en organische pollutanten	Bodemverbeterend middel (mg/kg droge stof)	Zuiveringsslib (mg/kg droge stof)
arseen	18	
cadmium	3	10
chromium	120	1000
kobalt	-	
koper	300	1000
kwik	2	10
lood	180	800
nikkel	60	200
selenium	12	
zink	600	3000
chromium + koper + nikkel + zink		4000
PCB's (som 7 congenere)**	0,8	0,8/0,8
Fluorantheen**	4	5/4
Benzo(b)fluorantheen**	2,5	2,5/2,5
Benzo(a)pyreen**	1,5	2/1,5
Hygiënische parameters	Bodemverbeterend middel (KVE/g totale stof)	
Escherichia coli	10.000 of 1000*	
Clostridium perfringens	1000 of 100*	
Enterokokken	100.000 of 100.000*	
Levensvatbare helmint-eieren	0/1g of 0/25g*	
Listeria monocytogenes	0/1g of 0/25g*	
Salmonella	0/1g of 0/25g*	

*Alle culturen behalve tuinbouw of enkel tuinbouw

** Algemeen/toepassing op weiland

Bron: Franse normen NFU 44 051/ NFU 44-095 (bodemverbeterend middel); Arrêté du 08/01/98, annexes 1a et 1b (zuiveringsslib)

De *Franse norm NFU 44-051* betreft de voorwaarden voor het op de markt brengen van bodemverbeterende middelen (zoals compost). Daarin worden ondermeer grenswaarden vastgesteld voor anorganische onzuiverheden, chemische microverontreinigingen en ziekteverwekkers.

Compost die slib van rioolwaterzuiveringsinstallaties bevat, kan van 'afvalstatus' naar 'productstatus' evolueren als het voldoet aan de specificaties van de *Franse norm NFU 44-095*. In dat geval kunnen ze bijvoorbeeld worden gebruikt voor toepassing in de landbouw zonder dat een strooiplan nodig is. Het slib van rioolwaterzuiveringsinstallaties dat bestemd is voor gebruik voor compostering volgens NF U44-095 moet voldoen aan dezelfde grenswaarden voor metalen en organische pollutanten als het slib dat bestemd is voor verspreiding in de landbouw volgens het gewijzigde besluit van 8 januari 1998 (slib van stedelijke rioolwaterzuiveringsinstallaties) of het gewijzigde besluit van 2 februari 1988 - (afval, afvalwater of slib van industriële rioolwaterzuiveringsinstallaties).

Het Frans Besluit van 21/12/98 betreffende de goedkeuring van bemestingsmaterialen en teeltmedia lijst de parameters op die, voor elk bemestingsproduct (organische of organo-minerale meststof, organische meststof, niet-volledig mineraal groeimedium) dat organische materialen van plantaardige en/of dierlijke oorsprong bevat, moeten onderzocht worden. Het betreft volgende parameters:

- Algemeen: organische stof, organische N, C/N-verhouding
- Microbiologische analyse: aerobe micro-organismen bij 30°C, enterokokken, *Escherichia coli*, *Clostridium perfringens*, *Salmonella*, *Staphylococcus aureus* (of coagulase +), gisten en schimmels met bevestiging van *Aspergillus*, nematode-eieren en -larven.

Voor elk product dat slib uit afvalwaterzuivering bevat, moet het volgende worden onderzocht: PCB (congeneren 28, 52, 101, 118, 138, 153, 180), fluorantheen, benzo(b)fluorantheen, benzo(a)pyreen. In de tabel in bijlage 12.6 worden de uit te voeren analyses en belangrijkste microbiologische criteria weergegeven voor de goedkeuring van bemestingsmaterialen en groeimedia die organische materialen van dierlijke of plantaardige oorsprong bevatten.

8.4 EUROPA

8.4.1 Meststoffenregelgeving

De nieuwe verordening Bemestingsproducten, nr. 2019/1009, verving de bestaande regelgeving 2003/2003 en opende de Europese vrije markt voor herwinbare meststoffen, bio-stimulatoren, compost en digestaat. Tot 16 juli 2022 was de handel alleen mogelijk via landelijke en zelfs regionale regelgeving.

Het is niet verplicht om aan deze vrije markt deel te nemen, maar ook niet zonder verplichtingen. De mogelijkheid is dus optioneel: een bedrijf kan ervoor kiezen om mee te doen of niet. Dit gebeurt via een CE-markering op de producten, zoals we die ook kennen voor bijvoorbeeld speelgoed of elektrische apparaten. Producten die volgens deze verordening de CE-markering hebben verkregen hebben automatisch de 'end of waste'-status.

De erkende producten worden ingedeeld in productfunctiecategorieën (PFC's) van EU-bemestingsproducten, zoals: organische bodemverbeteraar (=PFC 3.A) en microbiële biostimulant voor planten (=PFC 6.A). De erkende producten moeten aan een groot aantal criteria voldoen. Zo worden voor bv. 'vaste organische

meststoffen' of 'organische bodemverbeters' of 'biostimulanten voor planten' een aantal eisen gesteld met betrekking tot:

- contaminanten (zware metalen)
- pathogenen (Salmonella spp., Escherichia coli of Enterococcaceae)
- nutriëntengehalte, gehalte drogestof, gehalte organische koolstof

De erkende producten mogen alleen geproduceerd zijn uit toegelaten grondstoffen, de zogenaamde CMC's (= Component Material Categories). Dierlijke mest valt onder de categorie CMC10 'dierlijke bijproducten'; compost valt onder CMC3; digestaat onder CMC4 of CMC5; struviet onder CMC12; biochar onder CMC14.

Als inputstromen voor compost (CMC3) worden toegelaten:

- bioafval in de zin van Richtlijn 2008/98/EG, afkomstig uit de gescheiden inzameling van bioafval aan de bron;
- levende of dode organismen of delen daarvan, met uitzondering van:
 - materialen die afkomstig zijn van gemengd stedelijk afval,
 - zuiveringsslib, industrieel slib, of baggerslib, en
 - dierlijke bijproducten of afgeleide producten die onder het toepassingsgebied van Verordening (EG) nr. 1069/2009 vallen.
- toevoegingsmiddelen voor de compostering die nodig zijn ter verbetering van de prestaties van het composteringsproces (max. 5%).
- onverminderd vorige punten mag een EU-bemestingsproduct compost die is verkregen uit aerobe compostering van materialen uit categorie 2 of 3 of afgeleide producten daarvan bevatten, overeenkomstig de voorwaarden van artikel 32, leden 1 en 2, en van de in artikel 32, lid 3, van Verordening (EG) nr. 1069/2009 bedoelde maatregelen

Menselijke mest komt niet voor in de CMC-indeling; er zal dus een aanpassing vereist zijn. Een REACH registratie is niet nodig als menselijke mest gebruikt wordt voor de productie van compost, digestaat of biogas op basis van Annex V °12. REACH kan mogelijk wel restricties opleggen wat betreft de aanwezigheid van zeer zorgwekkende stoffen in deze stromen. Op vandaag zijn er echter geen specifieke restricties voor deze stromen opgenomen.

Tenslotte worden nog volgende temperatuur-tijdsprofielen tijdens het composteringsproces gespecificeerd:

- 70 °C of meer gedurende ten minste 3 dagen, of
- 65 °C of meer gedurende ten minste 5 dagen, of
- 60 °C of meer gedurende ten minste 7 dagen, of
- 55 °C of meer gedurende ten minste 14 dagen.

8.4.2 Het gebruik van zuiveringsslib in de landbouw

De richtlijn 86/278/EEG²¹⁴ stelt de voorschriften vast betreffende de bescherming van het milieu en de volksgezondheid, in het bijzonder de bodem, het oppervlaktewater en grondwater, bij het gebruik van zuiveringsslib in de landbouw.

²¹⁴ In 2018 is de richtlijn gewijzigd bij Besluit (EU) 2018/853 wat betreft de procedureregels voor rapportage op milieugebied. In 2019 werd de richtlijn gewijzigd bij Verordening (EU) 2019/1010 die de verslagleggingsverplichtingen in de milieuwetgeving op elkaar afstemt en stroomlijnt.

Daartoe worden grenswaarden vastgesteld voor de toegestane concentratie in de bodem van zeven zware metalen die giftig kunnen zijn voor planten en mensen: cadmium, koper, nikkel, lood, zink, kwik, chroom. De richtlijn bevat een verbod op het gebruik van zuiveringsslib dat leidt tot concentraties van deze zware metalen in de bodem die deze grenswaarden overschrijden. De specifieke grenswaarden worden vermeld in de bijlagen bij deze richtlijn:

- Bijlage IA — zware metalen in de bodem;
- Bijlage IB — zware metalen in slib;
- Bijlage IC — maximale jaarlijkse hoeveelheden zware metalen die aan de bodem mogen worden toegevoegd.

Normaal gesproken moet slib worden behandeld voordat het in de landbouw wordt gebruikt, langs biologische, chemische of thermische weg, door langdurige opslag of volgens enig ander geschikt procedé, om de vergistbaarheid en de gezondheidsrisico's van het gebruik ervan aanzienlijk te verminderen. Een EU-land kan het gebruik van niet-behandeld slib evenwel onder bepaalde voorwaarden toestaan indien het in de grond wordt geïnjecteerd of ondergeploegd. In bepaalde omstandigheden mag er helemaal geen slib worden gebruikt in de landbouw, bv. op weideland (tenzij minimaal drie weken zijn verstreken vooraleer te maaien/begrazen), op groente- en fruitaanplant gedurende de groeiperiode, op bodems welke bestemd zijn voor de teelt van groenten of vruchten die normaliter in rechtstreeks contact met de bodem staan en die normaliter rauw worden geconsumeerd. Dit verbod geldt gedurende een periode van 10 maanden voorafgaand aan de oogst en tijdens de oogst zelf²¹⁵.

De nationale autoriteiten moeten monsters nemen van het slib en de bodem waarop het wordt gebruikt en die analyseren en registers bijhouden. Ze moeten regelmatig rapporteren aan de Europese Commissie die op haar beurt regelmatig een rapport publiceert over het gebruik van slib in de EU-landbouw.

8.4.3 Kaderrichtlijn afvalstoffen

De herziening van de kaderrichtlijn afvalstoffen (2008/98/EG) in 2018 markeerde de ambitie van Europa om het aandeel van het voor hergebruik en recyclage ingezamelde afval te verhogen en zo het aandeel energierecuperatie te verlagen. Concreet beoogt deze herziening dat alle Europese lidstaten uiterlijk tegen 1 januari 2024 een selectieve inzameling van bioafval invoeren. Een gerechtvaardigde doelstelling aangezien gemiddeld tot 40% van het huishoudelijk restafval nog organisch-biologisch afval (OBA) bevat. In België wordt deze richtlijn op gewestelijk niveau in regelgeving omgezet. En dat zorgt voor verschillen tussen de drie gewesten.

Bioafval is volgens de kaderrichtlijn afvalstoffen (Artikel 3): "*biologisch afbreekbaar tuin- en plantsoenafval, levensmiddelen- en keukenafval van huishoudens, kantoren, restaurants, groothandel, kantines, cateringfaciliteiten en winkels en vergelijkbare afvalstoffen van de levensmiddelenindustrie*";

Deze kaderrichtlijn bevat ook bepalingen omtrent het einde-afvalstatuut en bijproducten.

Een bijproduct²¹⁶ is nooit een afvalstof geweest. Een stof dat aan 'einde-afvalfase' voldoet, is wel een afvalstof geweest maar is dat nu niet meer. Een afvalstof die voldoet aan de criteria voor de 'einde-afvalfase' heeft niet

²¹⁵ Dit werd ook zo voorzien in het KB van 28 januari 2013, waarbij in Bijlage 1, Hoofdstuk VIII, de vereisten opgenomen zijn die aan het zuiveringsslib worden gesteld op het vlak van zware metalen en PCB's.

²¹⁶ Bijproducten zijn volgens de richtlijn: 'stoffen of voorwerpen die het resultaat zijn van een productieproces dat niet in de eerste plaats is bedoeld voor de productie van die stof of dat voorwerp'.

langer meer de status afvalstof. Dat is het geval als die afvalstof een behandeling voor nuttige toepassing heeft ondergaan, én voldoet aan specifiek daarvoor opgestelde criteria (einde-afvalcriteria).

Deze criteria staan niet in de Kaderrichtlijn afvalstoffen, maar moeten door de Europese Commissie worden vastgesteld. In de kaderrichtlijn staan wel de voorwaarden die de Europese Commissie moet gebruiken bij het opstellen van die specifieke criteria (artikel 6 van de kaderrichtlijn).

Voor afvalstoffen waarvoor geen Europese einde-afvalcriteria zijn ontwikkeld, mogen Europese lidstaten zelf regelingen met einde-afvalcriteria invoeren.

8.4.4 De Europese afvalstoffenlijst (EURAL)

De Europese afvalstoffenlijst of EURAL kwam tot stand en werd vastgelegd in Beschikking 2000/532/EG. Deze lijst wordt in lokale wetgeving omgezet of opgenomen en maakt het mogelijk om onderlinge vergelijkingen en afspraken te maken. Nationale of regionale uitbreidingen zijn mogelijk.

De EURAL wordt opgenomen in het VLAREMA onder bijlage 2.1 (en voor menselijke mest bestaat er geen EURAL-code).

Een nieuwe EURAL-code voor gescheiden ingezamelde menselijke mest zal moeten gezocht worden in rubriek 20 "Stedelijk afval: huishoudelijk afval en soortgelijk bedrijfsafval en afval van instellingen." Dit begrip mag niet verward worden met het begrip 'huishoudelijk' afval uit VLAREMA. Het begrip 'stedelijk' afval is ruimer en bevat ook bedrijfsafval dat vergelijkbaar is qua aard met het huishoudelijke afval. Deze rubriek is gereserveerd voor afvalstoffen die vrijkomen bij particuliere huishoudens (of hieraan gelijkaardig zijn) en voor specifieke selectief ingezamelde stromen. Het omvat ook bedrijfsafval van vergelijkbare processen.

De inhoud van droogtoiletten (met zaagsel erbij) voldoet niet aan de definitie van septisch materiaal; de inhoud van vacuümtoiletten waarschijnlijk wel. Voor septisch materiaal bestaat een EURAL-code– '20 03 04 slib van septic tanks'. Het alternatief dat door ZirkulierBAR werd voorgesteld, is '20 03 99 niet elders genoemd stedelijk afval'. In Frankrijk denkt men dan weer eerder aan code '20 01 99 niet elders genoemde gescheiden ingezamelde fracties huishoudelijk of daaraan gelijkgesteld bedrijfsafval' of aan de creatie van een nieuwe specifieke code '20 01 42 afval van huishoudelijke, evenementiële en publieke droogtoiletten'.

8.4.5 De Europese verordening dierlijke bijproducten

Het gaat over de Europese Verordening nr. 1069/2009 en de uitvoeringsverordening nr. 142/2011.

Deze wetgeving legt regels vast voor onder meer de opslag, hantering, transport, be- en verwerking van dierlijke bijproducten die niet bestemd zijn voor menselijke consumptie en die ontstaan bij het slachten van dieren, bij de productie van producten van dierlijke oorsprong zoals zuivel, bij de verwijdering van dode dieren en bij ziektebestrijdingsmaatregelen. Deze verordeningen zijn niet van toepassing op menselijke feces en urine.

De dierlijke bijproducten zijn onderverdeeld in drie categorieën, gelinkt aan de mogelijke gevaars-eigenschappen en bijgevolg ook aan de mogelijke eindbestemmingen ervan:

- Categorie 1-materiaal wordt beschouwd als het dierlijke bijproduct met het meeste risico. Deze categorie is uitsluitend geschikt voor verwijdering.
- Categorie 2 is een tussencategorie die onder bepaalde voorwaarden nog nuttig gebruikt mag worden.
- Categorie 3-materiaal is geschikt, maar om diverse redenen niet bestemd voor menselijke consumptie en heeft de meeste mogelijke bestemmingen.

Dierlijke mest wordt onder Cat.2 ondergebracht. Categorie 2 materiaal moet in het algemeen verwijderd worden door verbranding. Maar als het gaat om mest, inhoud van het maagdarmkanaal, zuivel of eieren mag het worden:

- gebruikt voor de vervaardiging van organische meststoffen en bodemverbeteraars
- omgezet in compost of biogas, rechtstreeks of na verwerking.
- uitgereden op het land.

In het geval van keukenafval, of andere dierlijke bijproducten moet de composteerder dus rekening houden met deze verordening²¹⁷.

Compost en digestaat dienen te voldoen aan de eisen van bijlage V, Hoofdstuk III - Afdeling 3 - b) van de verordening 142/2011²¹⁸:

- de producten moeten een warmtebehandeling hebben ondergaan van 70°C gedurende minimaal 1 uur of een daaraan gelijkwaardige behandeling (hygiënisatie).
- Representatieve monsters moeten aan volgende microbiologische normen voldoen:
 - Escherichia coli: 0-1000/1g (gemiddelde van 5 stalen, met max. van 5.000 in 1 staal)
 - Enterococcaceae: 0-1000/1g (gemiddelde van 5 stalen, met max. van 5.000 in 1 staal)
 - Salmonella: geen in 25g (in alle 5 stalen)

8.4.6 Europese initiatieven ter bescherming van water

We vermelden hier een aantal Europese richtlijnen die elders ook ter sprake komen:

- Nitraatrichtlijn (Richtlijn 91/676/EEG): wil grond- en oppervlaktewater beschermen tegen verontreiniging door nitraten uit agrarische bronnen
- Kaderrichtlijn Water 2000/60/EG: stelt een maximum voor de hoeveelheid nitraat in grond- en oppervlaktewater.
- In de Grondwaterrichtlijn (Richtlijn 2006/118) is een norm voor de concentratie van nitraten en werkzame stoffen uit bestrijdingsmiddelen opgenomen.
- Europese richtlijn stedelijk afvalwater (eind 2024 vernieuwd onder Belgisch voorzitterschap) *Het toepassingsgebied van de richtlijn wordt uitgebreid naar kleinere agglomeraties (> 2.000 IE), er komen strengere normen voor IBA's en voor de verwijdering en recuperatie van stikstof en fosfor, de verwijdering van micropolluenten op de grootste RWZI's zal verplicht worden, RWZI's > 10.000 IE moeten energieneutraal worden*²¹⁹.
- Water reuse regulation (EU) 2020/741 en Richtlijn 91/271
- Europese drinkwaterrichtlijn (EU) 2020/2184

8.4.7 Europese initiatieven omtrent pesticiden, chemische stoffen en POP

We vermelden hier een aantal Europese richtlijnen:

- Europese verordening EG 1907/2006 van 18 december 2006 inzake chemische stoffen

²¹⁷ Bron: VLACO

²¹⁸ Bronnen: omzendbrief FAVV, Overzicht van de wetgeving bij afzet eindproducten van mestbewerking en -verwerking (Vlaams Coördinatiecentrum Mestverwerking, 2015)

²¹⁹ Bron: Aquafin, Jaarverslag 2023.

- ‘substances of very high concern’ (SVHC) in de autorisatie of restrictielijst van REACH
- Europese verordening EU 2019/1021 van 20 juni 2019 betreffende persistente organische verontreinigende stoffen (stoffen vermeld in bijlage 1)

8.4.8 Europese initiatieven omtrent PFAS

In 2023 ging The Water Reuse Regulation (EU) 2020/741 van kracht die duurzaam circulair watergebruik in de landbouw wil bevorderen door de kwaliteitseisen waar zo'n water aan moet voldoen te verduidelijken.

In juni 2022 stelde Aquafin geen gezuiverd afvalwater afkomstig van rioolwaterzuiveringsstations meer ter beschikking aan boeren. Uit een beperkte steekproef in '22-'23 in Vlaanderen bleek dat voor veel rioolwaterzuiveringsstations de PFAS-gehalten en fecale bacteriën hoger lagen dan de drempelwaarde uit de Europese verordeningen (zie bijlage 12.7.1). PFAS worden immers niet actief uit het water verwijderd met de huidige zuiveringstechnieken. Naast micropolluenten blijven er ook veel vragen over de effecten van andere, minder spectaculaire bestanddelen van het gezuiverd afvalwater wanneer ze zich opstapelen in de bodem: zouten en organische stof²²⁰.

Op 12 januari 2021 trad Richtlijn (EU) 2020/2184 betreffende de kwaliteit van voor menselijke consumptie bestemd water in werking. Deze richtlijn stelt een maximale concentratie in drinkwater vast van 0,5 µg/l voor het totaal aan PFAS-stoffen en 0,1 µg/l voor de som van 20 PFAS-stoffen die als zorgwekkend worden beschouwd voor water dat bestemd is voor menselijke consumptie. Deze richtlijn werd omgezet in nationale wetgeving of decreten van de regionale overheden.

Daarnaast heeft de Europese Unie in Verordening (EU) 2023/915 maximumgehalten vastgesteld voor PFAS in bepaalde categorieën levensmiddelen. Deze limieten gelden ook voor alle bronnen van PFAS, niet alleen voor gewasbeschermingsmiddelen.

De nieuwe maximumgehalten die in voege zijn vanaf 1 januari 2023 zijn strenger dan de actiegrenzen die voorheen werden gehanteerd. Zij hebben niet langer betrekking op slechts 2 stoffen (PFOS en PFOA), maar op de 4 meest voorkomende PFAS (PFOS, PFOA, PFNA en PFHxS) en vooral op de som van deze 4 stoffen.

8.4.9 Europees Actieplan Circulaire Economie

In 2020 lanceerde de Europese Commissie “Een nieuw actieplan voor een circulaire economie, Voor een schoner en concurrerender Europa”. Dit actieplan verzamelt alle initiatieven voor een circulaire economie, waarbij ondermeer:

- ondersteunen van de duurzame en circulaire biogebaseerde sector door middel van de uitvoering van het actieplan voor de bio-economie
- een geïntegreerd nutriëntenbeheersplan om een meer duurzame toepassing van nutriënten te waarborgen en de markten te stimuleren nutriënten te winnen.
- de herziening van de richtlijnen inzake afvalwaterbehandeling en zuiveringsslib
- beoordelen van de natuurlijke middelen voor de verwijdering van nutriënten, zoals algen.

²²⁰ Bronnen: ILVO artikel, 04/03/2024, <https://ilvo.vlaanderen.be/nl/nieuws/gezuiverd-afvalwater-voor-irrigatie-beter-voorkomen-dan-genezen>
 VILT artikel, 27 oktober 2023, <https://vilt.be/nl/nieuws/kunnen-landbouwers-gezuiverd-rioolwater-gebruiken-voor-irrigatie>
 INAGRO artikel, 21 maart 2024, <https://inagro.be/nieuws/stockeren-van-gezuiverd-stedelijk-afvalwater-kan-microbiele-contaminatie-terugdringen>

8.5 WERELDGEZONDHEIDSORGANISATIE (WHO)

De WHO heeft richtlijnen gepubliceerd met betrekking tot het veilig gebruik van afvalwater, menselijke mest en grijswater:

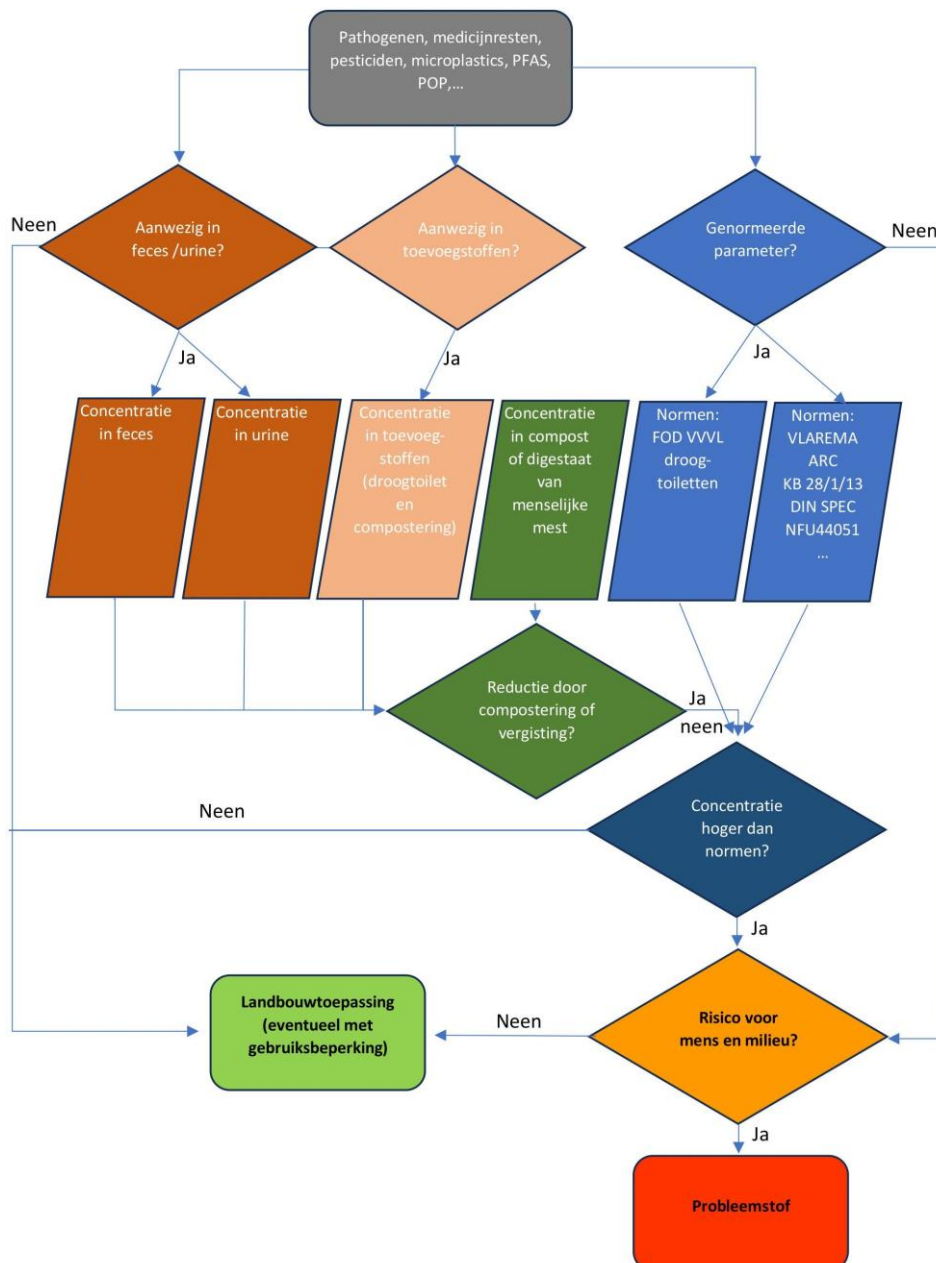
- minimumtermijnen (in functie van temperatuur) in acht te nemen bij het opslaan (zonder verdere bewerking) van droge feces en fecaal slib, met het oog op de eliminatie van pathogenen, alvorens deze te gebruiken²²¹:
 - 1,5 à 2 jaar bij omgevingstemperaturen van 2-20°C elimineert bacteriële pathogenen; hergroei van *E. coli* en *Salmonella* moet mogelijk worden overwogen als het opnieuw wordt bevochtigd; zal virussen en parasitaire protozoa onder het risiconiveau brengen. Sommige in de bodem aanwezige eicellen kunnen in lage aantallen blijven bestaan.
 - > 1 jaar bij omgevingstemperaturen van 20-35°C levert substantiële tot volledige inactivering van virussen, bacteriën en protozoa op; inactivering van schistosoma-eieren (<1 maand); inactivering van nematoden (rondworm) eieren, bijvoorbeeld haakworm (*Ancylostoma/ Necator*) en zweepworm (*Trichuris*); overleving van een bepaald percentage (10-30%) van *Ascaris*-eieren (≥4 maanden), terwijl een min of meer volledige inactivering van *Ascaris*-eieren binnen 1 jaar zal optreden.
 - > 6 maanden wanneer de pH is verhoogd tot meer dan 9 door toevoeging van bijvoorbeeld houtas of kalk.
- minimumtermijn in acht te nemen bij het opslaan van urine alvorens deze te gebruiken: opslag van minimum 6 maanden bij 20°C vernietigt waarschijnlijk alle pathogenen.
- compostering waarbij een minimumtemperatuur wordt bereikt van 50°C gedurende minstens 1 week wordt aanbevolen als hygiënische behandeling .

²²¹ WHO, Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater, Deel IV 'Gebruik van uitwerpselen en grijs water in de landbouw'.
Bron: <https://www.who.int/publications/i/item/9241546824>

9 EVALUATIE RISICO'S, REDUCTIEPOTENTIEEL EN NORMEN

In hoofdstuk 6 hebben we onderzocht in welke mate menselijke uitscheidingen ziekteverwekkers en milieugevaarlijke stoffen bevatten. In hoofdstuk 7 onderzochten we een aantal verwerkingsmethoden voor menselijke mest en het effect ervan op de eerder besproken milieu- en gezondheidsrisico's. In hoofdstuk 8 tenslotte brachten we de relevante wetgeving en normen in kaart. In de volgende paragrafen wordt die informatie voor elke groep van parameters gestructureerd volgens onderstaand stroomschema.

Figuur 15 Stroomschema voor de evaluatie van compost van droogtoiletten



In deze synthese beperken we ons tot compostering als verwerkingsmethode. We evalueren de mogelijke toepassing van compost van droogtoiletten in de landbouw a.h.v. het normenkader en de gegevens verzameld in de literatuurstudie.

9.1 PATHOGENEN

De pathogenen beperken zich in de meeste studies en normen die we in deze studie hebben besproken tot vooral deze bacteriën: Escherichia coli, Enterococcus, Clostridium perfringens, sulfaat reducerende bacteriën (SRB) en Salmonella. Daarnaast kunnen nog andere bacteriën, virussen, protozoa of parasitaire wormen voorkomen in menselijke feces, al naargelang factoren zoals gezondheid, levensstijl, voeding, gewoonten, omstandigheden en klimaat. De WHO-lijst van mogelijke ziekteverwekkers in feces is uitgebreid, maar wellicht niet altijd relevant voor onze westerse leefomstandigheden.

In de Europese normen voor hergebruik van gezuiverd rioolwater in de landbouw vinden we nog andere mogelijke indicator-pathogenen, zoals: Legionella spp., totaal aantal colifagen (als indicator voor virussen), sporen van Clostridium perfringens of sporenvormende SRB, Campylobacter, rotavirus en Cryptosporidium.

Tabel 21 Indicator pathogenen, gemeten in menselijke urine (KVE/ml), feces (KVE/g) en compost van menselijke mest

Pathogenen	Urine	Feces	Compost van menselijke mest			Normen voor compost van droogtoiletten		
	TDM (2017)	TDM (2017)	Mühlenberg (2024)	TDM (2017)	Carpentier (2025)	België FOD VVVL (voorlopig)	Frankrijk NFU 44-051	Duitsland DIN SPEC 91421
E. coli	10.000 - 10.000.000	1.000 - 10.000.000	<10-40 (450)	10-100	10-20	<1.000/g	<1.000/g	<1.000/g
Enterokokken	10.000 - 10.000.000	1.000.000 - 10.000.000	<10-450 (2500/95.000)	600-6.000	<100	<1.000/g	<10.000/g	<1.000/g
Clostridium perfringens	-	1.000 - 10.000	<10-100 (250/1.500)	100	<100	-	-	0/g
SRB*		10.000 - 100.000		200-1.000	-	-	-	-
Salmonella	0	0	0	0	0	0/25g	0/1g of 0/2g	0/50g
Levensvatbare wormeieren	0	0	-	-	-	-	0/1,5g	-

* SRB of anaerobe sulfaat-reducerende bacteriën worden over het algemeen beschouwd als indicatoren voor Clostridium-besmetting.

Bronnen:

TDM (2017): 6 compoststalen (waarvan 2 collectieve composteerinstallaties hier weergegeven - details zie bijlage 12.3.1).

Mühlenberg (2024): 11 compoststalen (cijfers tussen haakjes betreffen 'uitschieters')

Carpentier (2025): 2 compoststalen

De meeste ziekteverwekkers komen in feces voor. Urine is steriel is tot het door de urinewegen gaat, waardoor het van nature uit geen pathogenen bevat. Door kruisbesmetting met feces kan het toch pathogenen bevatten (wat in de studie van Toilettes Du Monde het geval was). In de TDM-studie werden geen salmonella, Hepatitis A-virus of eitjes van parasitaire wormen vastgesteld in menselijke mest afkomstig van festivals en evenementen die gebruik maken van droogtoiletten. E.coli, Enterococcus, Clostridium perfringens en SRB werden wel vastgesteld.

Duitse compost van menselijke mest (Mühlenberg, 2025) beantwoordt grotendeels aan de Duitse normen voor E.coli, Enterokokken en Salmonella. Enkele compoststalen (2/11) bevatten meer Enterokokken dan toegelaten door de Duitse norm. Voor Clostridium perfringens beantwoordden weinig stalen aan de Duitse norm die, achteraf beschouwd, niet realistisch werd bepaald, gezien de bacterie ook in aarde en water voorkomt en zelfs in de voedingssector normen gelden die aanzienlijk hoger liggen.

Franse compost van collectieve composteerinstallaties waar menselijke mest wordt verwerkt met grote hoeveelheden strooisel van kippenstallen of gehakseld snoeihout, beantwoordt aan de Franse normen. Opvallend is dat de Franse norm voor Enterokokken 10x hoger ligt dan de Duitse en Belgische grenswaarden. Sommige compost die is gemaakt door toiletaanbieders (kleinere schaal, minder toevoegstoffen) kan evenwel niet toegepast worden voor de teelt van groenten (wel voor andere teelten).

Zwitserse compost van menselijke mest (Carpentier, 2025) beantwoordt aan de hygiënische veiligheidsnormen voor Salmonella, E.coli en Enterokokken (DIN SPEC) en aan de achtergrondwaarde in gecultiveerde bodems van Clostridium perfringens (Voidarou et al., 2011).

Compostering reduceert E.coli na 3 tot 4 maanden met 99,99% (of 4 log₁₀-eenheden), zoals werd aangetoond door Mühlenberg (2025) en TDM (2017). Moleculaire analyse van totaal DNA voor en na compostering onthulde veranderingen in de samenstelling van de bacteriële gemeenschap en antibiotica resistente genen (Werner, 2022). Groepen met veel menselijke pathogenen namen af tijdens het composteren, zoals Pseudomonadales, Bacilli met Bacillus spp. of Staphylococcaceae en Enterococcaceae. Er bleek een afname van het aantal detecteerbare antibiotica resistente genen van 15 vóór tot 8 na het composteren.

9.2 ZWARE METALEN

Het gehalte aan zware metalen in menselijke feces en urine is laag, vergeleken met conventionele biogene afvalstromen en compost. De gemiddelde concentraties zware metalen in feces - uit de studie van Krause et al. (2021) - zijn overal lager dan de door de FOD VVVL voorlopig voorgestelde normen²²². De Duitse DIN SPEC-norm geeft enerzijds een nog 'nauwere' norm aan dan FOD voor cadmium, maar daarentegen is de norm voor koper en zink zeer 'breed'.

²²² Deze waarden zijn gelijk aan de FOD-normen voor product specifieke ontheffingen voor gecomposteerde bodem verbeterende middelen (zie Tabel 18).

Tabel 22 Concentraties (in mg/kg DS) van zware metalen in feces en andere in vergelijking met FOD-normen

Zware metalen	Feces* (Krause)	Urine** (Bertram, 2023)	Compost van menselijke mest (Mühlenberg, 2024)	Voorstel norm compost van droogtoiletten (FOD voorlopig)	Duitse norm compost droog- toiletten (DIN SPEC 91421)	Zuiveringsslib* (Krause)	FOD-norm (zuiveringsslib)
arseen	?	0,25	9,3	20			10
cadmium	0,7 (±0,6)	0,01	0,7	2	1,5	0,8 (±0,6)	
chromium	1,8 (±1,2)	0,00	66,1	100	300?	28,0 (±12,7)	500
koper	26,9 (±9,7)	0,20	40,5	150	900	366 (±93)	600
kwik	?	0,01	0,1	1			10
lood	0,7 (±0,3)	0,02	25,6	150	150	27 (±14)	500
nikkel	4,2 (±2,0)	0,02	35,2	50	80	20 (±7)	100
zink	241 (±90)	6,3	173.1	400	5000	658 (±80)	2000

*Gemiddelde waarde (± standaard deviatie), Krause et al. (2021), zie ook bijlage 12.2.2 van deze studie.

** droge stof gehalte urine =5%

Bronnen: Krause et al. (2021), Mühlenberg (2024), Bertram (2023), FOD VVVL, DIN.

De gemiddelde concentraties zware metalen in compost van menselijke mest – uit de studie van Mühlenberg (2024) – zijn eveneens lager dan de door de FOD VVVL voorgestelde normen.

Er dient rekening mee gehouden worden dat een belangrijk deel van compost van droogtoiletten uit toevoegstoffen bestaan die mogelijk hogere waarden voor zware metalen bevatten dan feces en urine. Dat zou verklaren waarom de waarden voor chromium, nikkel en lood fors hoger liggen in compost van menselijke mest dan in feces en urine. De VLACO kwaliteitsdoelstellingen voor zware metalen in groencompost geven aan dat de voor groencompost in aanmerking komende inputmaterialen hogere gehalten aan zware metalen bevatten dan menselijke feces. Deze inputmaterialen worden vaak als strooiselmateriaal in droogtoiletten of als structuurmateriaal in de compostering van menselijke mest toegevoegd. Deze gehalten zijn ruim lager dan de wettelijke samenstellingsvoorwaarden van bijlage 2.3.1. van het VLAREMA.

In het omgekeerde geval, bijvoorbeeld voor zink, zijn de waarden in feces hoger dan de waarden in compost van menselijke mest. Hier is mogelijk sprake van een ‘verduunningseffect’. Maar gezien het kleine aantal studies dat menselijke feces onderzocht op aanwezigheid van o.a. zware metalen en gezien deze contaminanten in toevoegstoffen meestal niet bemeten worden, kunnen we hier geen definitieve conclusies aan verbinden.

In het zuiveringsslib van rioolwater zitten flink hogere concentraties zware metalen dan in feces (behalve voor cadmium). De vergelijking van de concentraties aan zware metalen in zuiveringsslib met de FOD-norm voor zuiveringsslib geeft over het algemeen aan dat de normen ‘breder’ zijn.

In vergelijking met conventionele biogene afvalstromen (zoals vloeibare koeienmest, varkensmest) en compost (van gft, groenafval of digestaat) bevat menselijke feces (significant) minder zware metalen. Rioolslib en varkensmest hebben vaker de hoogste waarden, maar ook compost van groenafval of digestaat scoren hoog op sommige metalen (cadmium, chroom of lood) (Krause et al., 2021).

9.3 MEDICIJNRESTEN

Twee derde van de medicijnresten worden met de urine uitgescheiden en ongeveer een derde wordt met de feces uitgescheiden. Gezien de verdeling van de stoffen in urine en feces afhankelijk is van hun chemische eigenschappen (lipofiel/hydrofiel) en het daaraan verbonden risicopotentieel, wordt het risicopotentieel voor urine en ontlasting met betrekking tot menselijke geneesmiddelen op ongeveer hetzelfde geschat (Lienert et al., 2007).

De concentraties medicijnresten in urine kunnen sterk verschillen, zo bleek uit het literatuuronderzoek van Krause et al. (2021). De gemiddelde waarden zijn het hoogst voor tetracycline (1.168µg/l), ibuprofen (957µg/L), estradiol (364µg/L) en naproxen (146µg/L).

Er zijn weinig analyses op feces beschikbaar. Zhang (2023) constateerde 0,6 tot >5.533µg/kg concentraties voor antibiotica, met als hoogste oxytetracycline, norfloxacin en azithromycine.

In een rapport van de VMM (2017) werd een berekening gemaakt van de influent- en effluentvrachten van medicijnen in afvalwater van RWZI's in Vlaanderen (zie bijlage 12.1.2). Iopromide, gabapentine, amidotrizoïnezuur, naproxen, sotalol, hydrochloorthiazide en propranolol hebben de hoogste influentvrachten (> 900 kg). Gabapentine, iopromide, amidotrizoïnezuur, sotalol en hydrochloorthiazide hebben de hoogste effluentvrachten (> 900 kg). De berekeningen toonden aan dat voor zo goed als alle medicijnresten het afvalwater van gezinnen de belangrijkste bron van medicijnresten in waterlopen zijn; het afvalwater van ziekenhuizen komt op de tweede plaats. De concentraties medicijnresten in urine zijn significant lager dan die in zuiveringsslib.

Analyses tonen aan dat medicijnresten wijd verspreid zijn in het Vlaamse oppervlaktewater, waarbij de concentraties voor diclofenac en clarithromycine soms hoger zijn dan de drempelwaarde. In drinkwater werden concentraties van minder dan 100ng/L gevonden van carbamazepin, iopamidol, iopromid en lidocaïne.

Diverse studies wezen uit dat compostering medicijnresten in grote mate kan reduceren. Zelfs na 3 weken compostering werd een 75%-reductie bereikt voor 2/3 van de geanalyseerde medicijnresten en drugs in menselijke mest afkomstig van festivals in Frankrijk (Koanda, 2015). Er bleken wel enkele persistentere medicijnresten te bestaan.

Dalahmeh et al. (2022) bekeek het effect van langere compostering van zuiveringsslib: hormonen en antibiotica werden na 6 maanden tijd voor 93% gereduceerd (100% na 1 jaar); andere medicijnresten werden na 6 maanden voor 85% gereduceerd (95% na 1 jaar).

Er zijn weinig normen voor medicijnresten in compost. Als referentie kunnen de grenswaarden voor geneesmiddelen en hormonen voor recyclage van wegwerpluiers worden genomen. De limietwaarde bedraagt 250 µg/kg DS voor elke medicijnrest en 200 µg/kg DS voor elk hormoon behorende tot een lijst van 16 stoffen

(VLAREMA Bijlage 5.2.15.A). Daarnaast kan als algemene norm 15µg/kg DS genomen worden (verplichte informatiefiche voor bepaalde bodemverbeterende middelen of meststoffen – VLAREMA Art.2.3.3.4).

In Duitse compost (9 stalen) van droogtoiletten (Mühlenberg, 2025) kunnen na 3 maanden voor de meeste medicijnresten (op een 100-tal geteste stoffen) geen waarden gedetecteerd worden (<10µg/kg DS). Enkel doxycycline komt daarboven (75-110µg/kg DS). In Zwitserse compost van droogtoiletten werd in één studie 23µg/kg DS carbamazepine gevonden (Carpentier, 2025), terwijl in een andere studie (Schinkel, 2025) hogere concentraties werden vastgesteld voor metformine (113µg/kg compost), amisulpride (70µg/kg compost), ciprofloxacin (48µg/kg compost) en carbamazepine (32µg/kg compost). De concentraties van medicijnresten in compost afkomstig van droogtoiletten liggen allen onder de limietwaarde van 250µg/kg DS die voor luiers werd aangenomen.²²³ Slechts enkele medicijnresten zitten boven de algemene grenswaarde van 15µg/kg DS.

9.4 PESTICIDEN

Over concentraties van pesticiden in feces hebben we zeer weinig gegevens gevonden. Er zijn aanwijzingen dat de totale hoeveelheid pesticiden in menselijke feces veel kleiner is dan in mest van weidekoeien. Voor één proefpersoon uit Nederland bedroeg het totaal aan pesticiden in feces 72µg/kg DS terwijl de concentratie in mest van weidekoeien 813µg/kg DS bedroeg. Studies lijken ook aan te geven dat de hoeveelheid pesticiden in menselijke uitscheidingen sterk beïnvloed worden door voeding (verschil tussen gangbaar en biologisch voedsel) en in het algemeen door blootstelling.

Overheidsmaatregelen om stoffen of producten te verbieden hebben hun effect, zo blijkt uit humaan biomonitoring onderzoek. Uit Europees onderzoek blijkt dat acetamiprid, chloorprofam en glyfosaat vaak in urine van deelnemers worden teruggevonden. In het Waalse biomonitoring onderzoek werden voor glyfosaat en zijn metabolieten concentraties in de urine vastgesteld bij 18,5% van de deelnemers boven de detectielimiet van <0,08µg/l; de concentratie voor het 95%-percentiel bedroeg 0,13µg/l. Deze waarden liggen lager dan vergelijkbare Vlaamse waarden uit 2014 (P95= 0,39µg/l), mogelijk omdat in de tussentijd al enige restrictieve maatregelen m.b.t. het gebruik werden genomen. Het totaal van de onderzochte pesticiden in urine bedroeg 20,3µg/l in Wallonië, terwijl alleen al voor de organofosfaat pesticiden in Vlaanderen 58,9µg/l gemeten werd.

In het effluent van 16 RWZI's verspreid over Vlaanderen werden in de periode 2020-2022 in totaal 50 verschillende pesticiden aangetroffen. Aminomethylfosfonzuur en glyfosaat werden in alle metingen teruggevonden. Cybulski et al. (2021) vonden tot 15ng/l organochloorpesticidenresten in effluentwater van Poolse RWZI's.

De druk op het waterleven door pesticiden wordt samengevat in de SEQ-indicator, waarin de landbouw een overweldigend (99% in 2019) aandeel blijkt te hebben (VMM). Het water uit het waterspaarbekken De Blankaart kan vaak tijdelijk niet worden gebruikt voor drinkwaterproductie omwille van teveel vervuiling door pesticiden zoals: bentazon, metaldehyde, metazachloor, metobromuron, terbutylazine en 1,2,4-triazool. Naar aanleiding van overschrijding van de Europese voorzorgsnorm van 0,1µg/l werd de norm in Vlaanderen tijdelijk verhoogd naar 1µg/l.

²²³ Enkel metformine en carbamazepine behoren tot de lijst van 16 stoffen die in VLAREMA Bijlage 5.2.15.A werden opgenomen.

Er gebeurt wereldwijd heel veel onderzoek naar de (bio)degradeerbaarheid van pesticiden. Daarbij wordt ook gekeken naar wat er met de pesticiden residu's in plantaardig afval gebeurt tijdens het composteren. Vergelijkingen van pesticideconcentraties vóór en na compostering toonden aan (Büyüksönmez et al., 2000) dat organochloorverbindingen het meest resistent zijn tegen biologische afbraak tijdens compostering. Er werden afbraak percentages van 80-87% gemeten voor aldrin, α -endosulfan, β -endosulfan en lindaan na 100 dagen composteren.

Op enkele uitzonderingen na, ontbinden pesticiden in andere categorieën matig tot zeer goed. Zoals sommige studies echter opmerkten, versnelt compostering niet altijd de afbraak van alle pesticiden. De aard van het pesticide, de specifieke composteringomstandigheden en -procedures, de aanwezige microbiële gemeenschappen en de duur van de compostering beïnvloeden de mate en de mechanismen van afbraak. Uit onderzoek van VLACO blijkt dat de meeste bestrijdingsmiddelen snel worden afgebroken tijdens het composteringproces, maar dat bijvoorbeeld Clopyralid een meer persistent herbicide is.

Er zijn geen normen voor pesticidenresidu's in compost; wel voor drinkwater en voeding.

9.5 MICROPLASTICS

Microplastics in feces bedragen $14\mu\text{g/g}$ of 56mg/kg DS (Luqman et al., 2021). In feces zitten 28.000-42.000 deeltjes per kg DS, waarvan 45% microplastics kleiner dan $50\mu\text{m}$ en 55% grotere deeltjes met als maximale grootte $300\text{-}500\mu\text{m}$ (Yan et al., 2022).

De bijdrage van microplastics in menselijke feces in de totale hoeveelheid microplastics in huishoudelijk afvalwater is nog niet zo goed gekwantificeerd. Als belangrijkste bronnen van microplastics worden aangegeven: het wassen van synthetische kledij, reinigingsmiddelen en het gebruik van cosmetica en schoonheidsproducten. Daarnaast zijn er nog andere bronnen, zoals bandenslijtage en zwerfvuil, die in het rioolwater terechtkomen via andere wegen. Lofty et al. (2022) hebben in zuiveringsslib tot 1 gewichts% microplastics van 1-5mm gemeten, of met andere woorden 10.000 mg/kg DS . Casella et al. (2023) vonden in zuiveringsslib gemiddeld 1.500-170.000 microplastic deeltjes per kg DS, met een deeltjesgrootte van 1-5.000 μm . Aangetoond werd dat de meeste microplastics in rioolwater door het zuiveringsproces in de RWZI's in het zuiveringsslib terecht komen. Uit de studie van UGent (Vercauteren M., 2021a) blijkt dat microplastics met een partikel grootte van 25-1.000 μm voor 97% uit het influent van RWZI's worden gezuiverd. Toch bevatten de Vlaamse waterbodems gemiddeld 2.500 microplastic deeltjes per kg sediment. In het sediment werden kleinere microplastics (25 – 50 μm) aangetroffen dan in het oppervlaktewater.

Microplastics komen op verschillende plaatsen in het milieu voor, met name in de hydrosfeer, maar ook in compost van 50% gft-afval en 50% groenafval ($20\text{-}25\text{MPs/kg DS}$). Gecomposteerd gft-digestaat bevat $70\text{-}120\text{MPs/kg DS}$ en een commercieel verkrijgbare meststof van een gft-vergister die alleen voedselresten uit de handel verwerkt, bevat 895MPs/kg DS . Digestaat van de vergisting van energiegewassen, mais- of graskuilvoerders, tarwe, zonnebloemen, fruitafval bevat slechts $0\text{-}11\text{MPs/kg DS}$. (Weithmann et al., 2018). De vergelijking van het aantal deeltjes in compost en in (al dan niet) gecomposteerd digestaat van

hoofdzakelijk gft-afval, in vergelijking met digestaat van energiegewassen, toont aan dat gft-afval meer microplastics bevat dan groenafval of energiegewassen.

In deze compost en digestaat werd enkel het 1-5mm segment deeltjesgrootte gemeten. Deze veel grotere deeltjes maken dat commerciële, gecertificeerde gft-compost in gewicht meer microplastics bevat dan feces (terwijl de kleine deeltjes nog niet werden gemeten).

De effecten van compostering op microplastics werden o.a. bestudeerd door Růžičková et al. (2022) waarbij microplastics in stedelijk groenafval (gft?) na drie maanden compostering verminderde van 144 mg/kg naar 24 mg/kg. De droge stofconcentratie van microplastics in de rijpe compost (zes maanden) was 122 mg/kg DS. De concentraties van polymere verbindingen namen na drie maanden af met 33 tot 84%, terwijl de afname voor additieven 68% bedroeg.

Andere studies hebben aangetoond dat de hoge temperaturen, verhoogde luchtvochtigheid en zuurstofrijke omstandigheden die kenmerkend zijn voor compostering de veroudering en afbraak van microplastics kunnen versnellen. Xing et al. (2023) en Dazhuang et al. (2025) onderzochten de ecologische risico's en afbraakmechanismen van microplastics in compost. Door ijzermineralen toe te voegen, werd de microbiële redoxreactie versterkt, wat leidde tot een hoge productie van vrije radicalen en bijgevolg een versnelde afbraak van microplastics. Zij rapporteerden een reductie van 35,93% in de hoeveelheid microplastics (wat 5,53 keer beter was dan de reductie-efficiëntie van gewone compostering) en een significante afname van de deeltjesgrootte na compostering.

Er zijn geen normen voor microplastics in compost, maar dit wordt wel al onderzocht²²⁴. In gft-compost werden microplastics geanalyseerd; in compost van menselijke mest nog niet. Rekening houdende met de deeltjesgrootte en concentratie van microplastics in feces en met de analyses van commerciële compost en digestaat, schatten we in dat compost van menselijke mest minder microplastics (in gewicht) zal bevatten en meer kleinere microplastics zal bevatten dan gangbare gft-compost of gft-digestaat.

9.6 PFAS

PFAS zit in ons bloed, urine en feces, zo blijkt uit diverse onderzoeken. De uitscheiding via urine of feces blijkt afhankelijk te zijn van het soort PFAS. Voor PFOS is fecale eliminatie veel belangrijker, terwijl voor L-PFOS de urinale eliminatie veel groter is.

De Vlaamse toetsingswaarde van 15µg/kg DS in compost blijkt alvast 25x hoger te liggen dan de waarde van PFOA die werd vastgesteld in feces (0,6 µg/kg DS) van Zweden die jaren werden blootgesteld aan met PFAS vervuild drinkwater. De PFAS-belasting in de urine van deze Zweden bedroeg 0,02µg/l.

De concentraties van PFAS in zuiveringsslib bedragen volgens metingen van Aquafin 32 tot 57µg/kg DS. In Frankrijk bedraagt de concentratie van de PFAA's in zuiveringsslib van RWZI's 370µg/kg. In Nederland leverden metingen concentraties op van 10-100µg PFAS/kg DS.

WC-papier bevat 6:2 diPAP, een andere soort PFAS, welke in Europese landen 2-8% van de totale PFAS-belasting in rioolwaterzuiveringsslib vertegenwoordigt.

²²⁴ Zie VLACO: <https://vlaco.be/nieuws/closecycle-onderzoekt-microplastics-in-compost>

In oppervlaktewater in Vlaanderen bedroeg de som van PFAS₂₀ maximaal 6,4ng/l (VMM).

De concentratie van TFA (een erg korte PFAS-molecule, is vooral afkomstig uit pesticiden) kwam recent in het nieuws omdat ze in veel hogere concentraties in drinkwater wordt teruggevonden dan de meer gekende PFAS en dan vooral in gebieden met intensieve landbouw. Diverse drinkwatermaatschappijen rapporteerden concentraties TFA van 1,9 tot 8,3µg/l in drinkwater, welke onder de nieuwe Vlaamse gezondheidkundige advieswaarde van 15,6 µg/l liggen.

In freatisch grondwater werd de Europese norm voor drinkwater (0,1µg/l voor PFAS₂₀ en 0,5µg/l voor alle PFAS) in 6% van de metingen overschreden.

PFAS zijn 'forever chemicals' en worden naar verwachting niet gereduceerd door compostering. Het is dus belangrijk om te voorkomen dat PFAS in het milieu en in de voedselketen terecht komen. Bij wijze van voorbeeld blijkt uit onderzoek in Amerika dat composteerbare voedselverpakking (papieren borden en bekertjes die vet- en waterafstotend zijn gemaakt) een belangrijke bron is van PFAS-verontreiniging in gft-compost. Langere rijpingstijden van de compost gaven een hogere PFAS-verontreiniging te zien: 12,6µg/kg DS bij compost van 3 maand en 84,3 µg/kg DS bij compost van 12 maand. Dit werd verklaard doordat PFAS-precursoren meer tijd kregen om te ontbinden naar de uiteindelijke PFAS-groepen. Het meten van PFAS gebeurt dus best in rijpe compost indien men wil weten welke PFAS-concentraties uiteindelijk toegepast worden op landbouwgrond.

Ook bij metingen van influent- en effluent-water van RWZI's werd vastgesteld dat PFAS-concentraties in effluent soms hoger zijn dan in influent omwille van PFAS-precursoren.

De concentraties PFAS in 11 Duitse compoststalen van menselijke mest bleven onder 0,01mg of 10µg/kg DS en liggen daarmee ook onder de toetsingwaarde voor compost van 15µg/kg DS voor PFAS₂₀. Deze toetsingswaarde werd ook voorgesteld in het voorlopig normenkader voor compost van droogtoiletten van de FOD VVVL.

In Frankrijk bedroeg de concentratie PFAA in compost van gemeentelijk bioafval (gft) 10µg/kg DS. In de proefcompostering van rioolslib met bermgras- en slootmaaisel in de Nederlandse proefboerderij de Marke was er geen normoverschrijding voor PFAS.

9.7 PAK'S EN BTEX

De blootstelling aan PAK's wordt in de urine gemeten aan de hand van metabolieten van pyreen, naftaleen, fluoreen en fenantreen. Alle PAK-metabolieten opgeteld, gemeten in de urine van volwassenen van 40 tot 59 jaar in het Waalse biomonitoring onderzoek, geven een maximale waarde (P95) van 55µg/l. PAK's in feces werden totnogtoe niet gemeten.

De concentraties van PAK's in 11 Duitse compoststalen van menselijke mest varieerden van 0,55-3,7 mg/kg DS en bleven onder de Duitse grenswaarde (DIN SPEC) van 6 mg/kg DS. Deze waarden liggen dus ook onder de door de FOD VVVL voorlopig voorgestelde norm voor compost van droogtoiletten van 20 mg/kg DS.

In een review-studie (Lin et al., 2022) m.b.t. compostering en de toepassing ervan bij bioremediatie van organische verontreinigingen worden reductiepercentages voor PAK's vanuit verschillende studies gepresenteerd. Composteren reduceert PAK's in rioolwaterzuiveringsslib met 60-75% al naargelang de verschillende studies (met composteertijden variërend van 39 tot 110 dagen).

Voor BTEX werd door de FOD VVVL een voorlopige norm voor compost van droogtoiletten voorgesteld van 20 mg/kg DS.

9.8 DIOXINES EN PCB'S

Voor dioxines bleven de compoststalen van menselijk mest ruim onder de Duitse norm van 30ngTEQ/kg DS en onder de 20ngTEQ/kg DS uit het voorgestelde Vlaamse normenkader voor compost van droogtoiletten (FOD VVVL).

Voor PCB's bleven de compoststalen van menselijk mest ver onder de Duitse norm van 0,1mg/kg DS.

9.9 SAMENVATTING

Onderstaande tabel geeft een overzicht en samenvatting van de voorgaande paragrafen.

Tabel 23 Evaluatie van de toepassing in de landbouw van compost van droogtoiletten (compost DT)
a.h.v. het normenkader en de gegevens uit de literatuurstudie

Parameters	Normenkader			Literatuurstudie	Ref.
	FOD VVVL (compost DT)	Andere normen	Geen normen	Conclusies voor compostering van menselijke mest	
Hygiëne (biologisch)	+			reductie E.coli met 99,99% - idem Enterkokken (m.u.v. uitschieters) clostridium perfr. < achtergrondwaarde in gecultiveerde bodems geen salmonella – reductie ARG's	9.1
Zware metalen (ZM)	+++			Hg, Cu, Zn, Pb ruim onder de norm; As, Cd, Cr, Ni minder ruim gehalte: compost DT < groencompost < varkensmest < RWZI-slib Cr, Ni, Pb in feces/urine < in compost DT → via toevoegstoffen?	9.2
Medicijnresten (MR)		+/?		meeste (95%) in compost DT < 10µg/kg DS reductie 6m-1j antibiotica/hormonen 93-100%; andere MR 85-95% metformine/amisulpride/ciprofloxacine/carbamazepine/doxycycline: < 250µg/kg DS (per stof) = norm luiers → VLAREMA Bijlage 5.2.15.A	9.3
Pesticiden (PS)		+/?		organochloor (meest resistent) in compost: -80% na 100 dagen meeste andere: goede afbraak (uitz. clopyralid) in urine: glyfosaat 0,13µg/l en totaal < 20µg/l in feces = geen of zeer beperkte gegevens in compost DT = niet geanalyseerd	9.4
Microplastics (MP)			?	in feces: 56mg /kg DS → 45% <50µm en 55% 50-500µm in commerciële gft-compost: meer gewicht, grotere (1-5mm) → compost DT: minder (gewicht), meer kleine deeltjes (aantal)? reductie polymeren 33-84% en additieven 68% (compost na 3 m.)	9.5
PFAS	+			in feces Zweden (contaminatie drinkwater): 0,6µg/kg DS in dierlijke mest: 0,7µg/kg DS < RWZI-slib: 10-370µg/kg DS effluent RWZI 10-1.000ng/l > opp.vl.water (6ng/l) < TFA drinkwater in compost DT <10µg/kg DS → <15µg/kg DS (Vlaamse toetsingswaarde) in toiletpapier: 2-8% van PFAS-belasting in rioolslib	9.6

PAK's (BTEX)	+++ (?)			in urine: 55µg/l in compost DT: 0,6-3,7mg PAK/kg DS < norm = 20mg/kg DS reductie 60-75% PAK's in gecomposteerd RWZI-slib na 40-110 dagen (BTEX: niet geanalyseerd in compost DT; norm = 20mg/kg DS)	9.7
Dioxines PCB's	+++	+++		in compost DT < norm FOD = 20ngTEQ/kg DS in compost DT < Duitse norm = 0,1mg/kg DS	9.8
Benzeen minerale olie	?			geen metingen in compost DT, geen studies geen metingen in compost DT, geen studies	

+ : beantwoordt aan de norm **+++** beantwoordt in ruime mate aan de norm **?** evaluatie onvolledig

De resultaten van de literatuurstudie worden vooreerst afgetoetst aan het voorlopige normenkader voor compost van droogtoiletten zoals voorgesteld door FOD VVVL (1^e kolom). Wanneer er in dit normenkader voor bepaalde parameters nog geen norm werd voorgesteld, toetsen we af aan andere normen (2^e kolom).

De gegevens verzameld in deze literatuurstudie tonen aan dat compost van droogtoiletten kan beantwoorden aan de richtlijnen die werden voorgesteld door FOD VVVL voor wat betreft: hygiëne parameters, zware metalen, PFAS, PAK's en dioxines. Bijgevolg kan compost van droogtoiletten in aanmerking komen voor valorisatie in de landbouw.

Voor medicijnresten stelt de FOD VVVL nog geen norm voorop, maar verwijst ze naar bibliografische studie terzake. Hier kunnen de normen voor de recyclage van luiers (VLAREMA Bijlage 5.2.15.A - zie bespreking paragraaf 8.1.1.11) richtinggevend zijn.

Pesticiden en microplastics werden niet expliciet vermeld in de voorlopige richtlijnen van FOD VVVL. Bij gebrek aan meetresultaten in compost van droogtoiletten kunnen we voor deze parameters geen volledige evaluatie maken.

10 PRODUCTEN AFGELEID VAN MENSELIJKE MEST

10.1 TOEPASSINGEN IN LANDBOUW

10.1.1 Zuiveringslib (vergist/gedroogd/gecomposteerd)

Het gebruik van slib van rioolwaterzuivering in de landbouw in Europa is sterk verschillend van land tot land, afhankelijk van de normen die elk land hanteert. Spanje, Ierland, Verenigd Koninkrijk, Frankrijk, Portugal en Denemarken gebruiken 50% tot 80% van het zuiveringslib voor bodembemesting. Tot 30% van dit slib wordt nagecomposteerd alvorens het wordt toegepast. Nederland gebruikt helemaal geen zuiveringslib in de landbouw. In België is het alleen in Wallonië toegelaten. Dit blijkt uit gegevens van Eurostat (Laan, 2019).

Tabel 24 Productie van zuiveringslib in een aantal geselecteerde EU-landen en toepassing voor landbouwdoeleinden en compostering (gemiddelde waarden in tonnen DS * 1000 over 2006-2015 en procentueel aandeel)

	Productie	Landbouwkundig gebruik	Compostering en andere toepassingen		
Duitsland	1.930	540	28%	330	17%
Polen	541	108	20%	33	6%
Zweden	207	48	23%	62	30%
Hongarije	176	29	17%	55	31%
Ierland	80	62	78%	16	20%
Belgie	146	15	10%	0	0%
Denemarken	130	67	51%	NB	NB
Spanje	1.144	871	76%	NB	NB
Frankrijk	978	543	56%	291	30%
Italie	1.103	316	29%	NB	NB
Nederland	351	0	0%	0,5	0,1%
Oostenrijk	255	41	16%	73	29%
Portugal	291	164	56%	NB	NB
Verenigd Koninkrijk	1.627	981	60%	NB	NB
Zwitserland	206	7	3%	0	0%

Bron: Eurostat 2018 (studie STOWA)

Ongeveer 45-53% van het vergist zuiveringslib dat in de Europese Unie en de VS wordt geproduceerd, wordt gebruikt in de landbouw (Dubey et al., 2021; Kelessidis en Stasinakis, 2012). In Zweden wordt bijvoorbeeld 211.000 ton zuiveringslib (drooggewicht) per jaar geproduceerd, waarvan ongeveer 39% wordt uitgereden op landbouwgrond (SMED, 2018). Anaeroob vergist en ontwaterd zuiveringslib is een meststof en

bodemverbeteraar vanwege het waardevolle gehalte aan organische stoffen, voedingsstoffen voor planten en sporenelementen. Maar het is eveneens bekend dat zuiveringsslib farmaceutisch actieve stoffen, andere microverontreinigingen en zware metalen bevat (Dalahmeh et al., 2022).

10.1.2 Compost-, digestaat of fermentatieproducten

Een teeltexperiment (Boness J., 2024) met mais in potten werd geanalyseerd na een proefperiode van 8 weken om het korte termijn effect van een gehygiëniseerde fecale compost (HFC) en een genitrificeerde urinemeststof (NUF) te bepalen. Oplosbare concentraties van stikstof, fosfor en kalium in de bodem en de inhoud in de plant (*Zea mays* L.) en biomassa, planthoogte en chlorofylgehalte van de bladeren werden beoordeeld.

De varianten met alleen compost vertoonden geen tot iets hogere DS-opbrengsten dan de controle, terwijl de variant met gecombineerde composturinemeststof ongeveer 80% van de DS-opbrengst van de referentiebehandeling met minerale meststof bereikte. De totale stikstofopslag van de bodem wordt aanzienlijk verhoogd door de toevoeging van HFC. De concentratie oplosbare fosfor in de bodem neemt aanzienlijk toe bij verhoogde composttoepassingen.

In de variant met gecombineerde composturinemeststof resulteert echter een voldoende stikstoftoevoer in een laag niveau van oplosbare fosfor vanwege de hoge productie van plantenbiomassa. Deze trend wordt weerspiegeld in het fosforgehalte van het plantenmateriaal. HFC wordt beschouwd als een goede fosformeststof, wat ook in dit experiment wordt bevestigd.

Een soortgelijk beeld ontstaat voor de toevoer van kalium uit HFC. Hoewel de vloeibare urinemeststof (gecombineerd met HFC) in de vroege fase van de plantengroei niet de DS-opbrengst van de minerale referentievariant bereikt, heeft het duidelijke voordelen bij het voorzien van het gewas van stikstof.

Uit dit onderzoek blijkt dat het recyclen van voedingsstoffen uit menselijke ontlasting een mogelijke strategie is om eindige hulpbronnen te behouden en energiezuinige landbouwpraktijken te bevorderen in lijn met de circulaire economie.

Een ander onderzoek (Boness et al., 2024) ging het effect na van compost gemaakt van menselijke mest op de bodem. Zowel compost²²⁵ als de bodem (voor bemesting en na bemesting en teelt op diverse tijdstippen) werden onderzocht op de aanwezigheid van pathogenen (*Salmonella*, *E.coli*, Enterokokken en *Clostridium perfringens*).

Hoewel de compoststalen voldeden aan de eisen van DIN SPEC 91421 met betrekking tot de parameters *E. coli*, *Salmonella* spp. en Enterokokken, bevatten deze toch lage bacterietellingen van *E. coli* (tot 90/g) en Enterokokken (tot 250/g) vastgesteld (maar geen *Salmonella*). In de bodem konden deze bacteriën in geen geval worden aangetroffen. Bij een test in gesloten bakken werd het compoststaal met de hoogste enterokokken waarde gebruikt. Na acht weken was er in de bodem geen verontreiniging met enterokokken meer detecteerbaar.

In vier van de zeven gebruikte compoststalen werd *C. perfringens* aangetroffen boven de grenswaarde van 0/g uit DIN SPEC 91421. In het experiment in gesloten bakken werd na 8 weken in één geval een verhoogde aanwezigheid van *C. perfringens* vastgesteld t.o.v. de controlebak zonder bemesting. In de open veld

²²⁵ Hierbij wordt verwezen naar het onderzoek van Mühlenberg et al., 2024.

experimenten lag het aantal *C. perfringens* in percelen met bemesting telkens lager dan in het controleperceel zonder bemesting.

In geen van de experimenten kon een verband worden gevonden tussen bemesting en een significante verandering in concentraties van indicatororganismen voor fecale verontreiniging. Aangezien ook andere organische meststoffen een aanzienlijke toevoer van indicatororganismen in de bodem veroorzaken, en deze ook in de bodem kunnen worden gedetecteerd (Brochier et al., 2012; Tontti et al., 2011), moeten de concentraties die in deze experimenten zijn gedetecteerd als opmerkelijk gematigd worden beschouwd. Toch moet er extra voorzichtigheid worden betracht bij het gebruik van menselijke mest bij bemesting, om de overdracht van mens op mens te doorbreken. Volgens de bevindingen van dit onderzoek biedt de DIN SPEC hiervoor een goede basis.

Voor de toepassing van urine als meststof is de manier van toediening aan de bodem van belang. Gasvormige NH₃-emissies dragen ook bij aan eutrofiëring. In de lucht reageert NH₃-gas met zwavelzuur en salpeterzuur om zouten te vormen die gemakkelijk kunnen worden overgebracht naar de pedosfeer of hydrosfeer met neerslag. Deze zouten zijn gemakkelijk oplosbaar in water, wat leidt tot ophoping van voedingsstoffen in het water en bijgevolg tot overmatige groei van planten en algen ("eutrofiëring"). De volgende omstandigheden bij toediening aan de bodem helpen om broeikasgas- of NH₃-emissies te vermijden Krause et al. (2021) en (Brusselman E., 2016):

- koele tot matige temperaturen;
- droge (niet met water verzadigde) grond;
- opname van de meststof in de grond binnen 4 uur na toepassing, met uitzondering van compost en meststoffen met een DS-gehalte van <2% FM;
- emissiearme toepassingstechnieken zoals sleepslangen, sleepshoenen of injectie;
- voorafgaande verzuring van de meststof (urine)

In diverse studies is onderzoek gedaan naar de *opname van microverontreinigende stoffen via plantenwortels, scheuten, bladeren of vruchten*, na bemesting met compost gemaakt op basis van menselijke mest. Hieronder bespreken we kort enkele van deze studies:

- Diclofenac, atenolol en verapamil worden niet overgedragen van meststoffen op basis van urine naar gewassen. (Arnold en Schmidt, 2012)
- Carbamazepine werd aangetroffen in tarwe- en maïskorrels en -stengels, maar in relatief lage concentraties. Gezien de gemiddelde hoeveelheid graan die per jaar door een persoon in Duitsland wordt geconsumeerd (~100 kg), zou men >100 jaar tarwe moeten eten om de dagelijkse dosis carbamazepine die aan een persoon met epilepsie wordt gegeven (>400 mg) binnen te krijgen. Een beoordeling van het potentieel voor translocatie van de medicijnen carbamazepine, sulfamethoxazol en triclosan in het eetbare deel van de plant werd onderzocht voor verschillende soorten groenten. De resultaten gaven aan dat het potentieel voor opname afneemt in de volgende volgorde: bladgroenten > wortelgroenten > granen en vruchtgroenten. De dagelijkse menselijke consumptie van besmette groenten die nodig is om toxische limieten te bereiken wordt niet als realistisch beschouwd (Christou et al. 2019 en Wu et al., 2015).

- Uit een recente studie (Häfner et al., 2023) bleken witte kolen, die werden bemest met een compost op basis van menselijke mest, van alle geteste verbindingen alleen sporen van CBZ (=carbamazepine, een anti-epileptic, antidepressivum) en ibuprofen te bevatten. Hoewel meetbare concentraties werden gedetecteerd in de biomassa waren deze concentraties extreem laag, overeenkomend met 0,384 µg in een gemiddelde koolkrop van 1,08 kg. Dit impliceert dat meer dan 521.000 koolkroppen nodig zouden zijn om een dosis te accumuleren die gelijk is aan één CBZ-pil (200 mg). Koolplanten vertonen een laag risico, aangezien ze een lange groeiperiode kennen waardoor CBZ en ibuprofen vooral in de stengel en buitenste bladeren wordt opgenomen en veel minder in de zich later ontwikkelende krop. De nog aanwezige medicijnresten (en hun metabolieten) in de compost worden gedurende de groeiperiode in de bodem verder afgebroken door micro-organismen (zoals al was gebeurd in de compost). Uit deze studie bleek ook dat de plantopname van medicijnresten beïnvloed wordt door het type bodem (meer opname bij zanderige bodems) en de dosis medicijnresten in de bemesting.

Uit de door VLACO gepubliceerde cijfers over de Vlaamse afzet van compost en digestaat²²⁶ blijkt dat jaarlijks 440.000 ton groen- en gft-compost en 1.300.000 ton digestaat afgezet worden. Hiervan is 98.000 ton compost en 750.000 ton digestaat op Vlaamse grond afgezet.

De trends voor compost zijn:

- een stijgend gebruik in de landbouw (om het organisch stofgehalte in de bodem te verhogen)
- een grote vraag vanuit de potgrondfabrikanten die alternatieven zoeken voor veen. VLACO krijgt ook de vraag om compost van buiten Vlaanderen te certificeren om deze in Vlaamse potgrond te kunnen verwerken. In Vlaanderen blijkt er namelijk onvoldoende compost beschikbaar om aan de vraag van de markt te voldoen. Compost die in substraten gemengd wordt, heeft bij voorkeur een laag zoutgehalte en lage pH²²⁷.
- Uit de afzetenquête blijkt dat de toenemende vraag naar en interesse in compost zich vertaalt in een stijgende gemiddelde verkoopprijs (berekend uit de omzet/afgezette hoeveelheden). Deze bedroeg in 2023 ongeveer 5,8 euro per ton. De voorbije jaren zat dit rond de 3 à 3,5 euro per ton. Anderzijds bedraagt de vervangingswaarde van compostproducten op basis van de werkzame nutriënt- en de koolstofinhoud, mede gebaseerd op de prijzen van kunstmest, 37 à 65€/ton²²⁸. Vooral de organische stofinhoud van compost wordt ondergewaardeerd.

De trends voor digestaat zijn:

- Mogelijk is een dalende lijn in de afzet van digestaat ingezet. In 2023 en 2024 kreeg VLACO tal van berichten in verband met het stopzetten van de vergistingsactiviteiten, op een lagere capaciteit draaien in afwachting van investeringen, etc.
- Mogelijk heeft de omschakeling naar biomethaan al een impact op de afzet. De laatste jaren wordt er minder gedroogd digestaat afgezet. Indien biogas minder ingezet wordt om elektriciteit te produceren en meer omgezet wordt naar methaan, is er minder warmte ter beschikking om de eindproducten in te drogen.

²²⁶ Bron: VLACO, <https://vlaco.be/nieuws/lichte-daling-afzet-compost-en-digestaat-in-2023>

²²⁷ VLACO onderzoekt de specifieke mogelijkheden van compost (op maat) in diverse substraattoepassingen, zoals de eigen universele VLACO-potgrond en professionele potgronden voor sier- en groenteteelt via Cmartlife en het in 2024 opgestarte Hort2thefuture.

²²⁸ Berekening door VLACO, zie: <https://vlaco.be/vervangingswaarden-van-compost-en-digestaat>

- Minder digestaat heeft het statuut ‘dierlijke mest’ (53% van al het digestaat). Verschillende co-vergisters zetten in op een lijn met en zonder mest. In de lijn met mest worden weinig andere stromen bijgemengd. Zo houdt de sector het ‘multiplicator effect’ van de mest zo klein mogelijk: minder dierlijke mest en meer andere meststof, waarvoor er een grotere vraag en zo een gemakkelijkere afzet bestaat.

Gezien de (voorlopig) beperkte bijkomende te verwerken volumes van composttoiletten zal dit geen problemen vormen in de markt.

10.1.3 Insectenkweek op menselijke mest

Sinds enkele jaren groeit in Europa en België de interesse om insecten te benutten voor heel wat toepassingen zoals in voeding voor de mens, als voeder voor landbouw- of huisdieren of om organische reststromen zoals mest te verwerken. Insecten zijn immers een hoogwaardige bron van eiwitten, energie, vetten en mineralen. De Europese verordening 1069/2009 bepaalt dat insecten, indien door de mens gehouden voor de productie van voedsel, wol, bont, veren, huiden of een ander dierlijk product of voor andere veeteeltdoeleinden, behoren tot de landbouwhuisdieren. De bevoegde Gewestelijk overheden hebben een gezamenlijke nota opgesteld om het statuut van het restsubstraat, dat naast de uitwerpselen van de insecten ook ongebruikt voeder voor de insecten en resten van de insecten zelf bevat, te verduidelijken.

Verwerkingsmogelijkheden²²⁹:

- Afzonderlijke verwerking door droging op 70°C gedurende 1 uur door een 1069-erkend verwerker, er moet voldaan zijn aan de samenstellingsvoorwaarden van de definitie. Het verwerkt materiaal is “verwerkte frass”.
- Vergisting door een 1069-erkend vergistingsbedrijf, er moet niet voldaan zijn aan de samenstellingsvoorwaarden van de definitie. De gebruikte warmtebehandelingen zijn 1u op 70°C of een alternatieve gevalideerde warmtebehandeling. Het verwerkt materiaal is “digestaat”.
- Compostering door een 1069-erkend composteringsbedrijf, er moet niet voldaan zijn aan de samenstellingsvoorwaarden van de definitie. De gebruikte warmtebehandelingen zijn 1u op 70°C of een alternatieve gevalideerde warmtebehandeling. Het verwerkt materiaal is “compost”.

Het Actieplan voedselresten en bio-organische afvalstromen bevat een *Actie 1.9.3. ‘Blijven innoveren en onderzoek voeren naar nichetoeepassingen: Bioconversie van onderbenutte heterogene voedselreststromen met insecten’*. Dit onderzoeksproject focust op de inzet van insecten om heterogene biomassafracties om te zetten tot uniforme marktrelevante producten met hoge toegevoegde waarde, zoals eiwit, vet, chitine en organische meststof.

Er bestaat ook een Vlaams Strategisch platform Insecten (SPI) dat veel onderzoek coördineert.

*Gezien insecten vallen onder het statuut ‘landbouwhuisdieren’ kan mest niet als substraat voor insectenkweek worden toegepast*²³⁰. Een groot deel van de bruikbare reststromen, zoals mest en slachtafval, zijn door de huidige wet- en regelgeving niet toegestaan voor de insectenkweek. Groente- en fruitafval vormen nu de basis van de reststromen. In de toekomst zal ook keuken- en voormalige levensmiddelenafval toegevoegd worden

²²⁹ Vlaams Agentschap Landbouw en Zeevisserij, <https://lv.vlaanderen.be/dier/insecten/insecten-kweken-en-verwerken#wetgeving>

²³⁰ Bron: VCM, <https://www.vcm-mestverwerking.be/nl/kenniscentrum/4238/wetgeving-innovatieve-toepassingen>

aan de bruikbare reststroom. De organische reststroom wordt verwerkt tot gecertificeerd substraat en dient als larvenvoer²³¹.

Nochtans zijn er veel studies die mest als voedsel voor insectenkweek onderzoeken. Zo is het kweken van insecten op mest een manier om enerzijds het teveel aan mest te verwerken en anderzijds het tekort aan hoogwaardige eiwit- en vetbronnen te compenseren. De larven van de zwarte soldatenvlieg (*Hermetia illucens* – Black Soldier Fly - BSF) zijn hiervoor ideaal omdat ze zeer snel groeien op rottend materiaal zoals mest. Een masterthesis aan de Universiteit Gent (Deweert, 2021) schetst de mogelijkheden van BSF als afvalverwerker:

- De hoeveelheid droge stof aan pluimveemest daalt met 32-62% nadat BSF-larven op de mest groeien (Zhou et al., 2013). Deze daling komt door de microbiële activiteit in het substraat, het metabolisme van de larven en alsook de gewichtsaanzet van de larven zelf (Oonincx et al., 2015).
- Naast de hoeveelheid mest daalt de totale hoeveelheid en concentratie aan nutriënten. Zo kunnen BSF-larven, bij het opgroeien op varkensmest, de concentratie aan fosfor (P) en stikstof (N) in het substraat met respectievelijk 44,1% en 55,3% reduceren. Doordat de hoeveelheid overgebleven mest ook daalt, daalt de totale hoeveelheid N en P in de mest met ongeveer 70% (Newton et al., 2004).
- Niet alleen de concentraties aan N en P worden door de larven gereduceerd, maar ook andere concentraties van mineralen en metalen worden door de larven gereduceerd: Zn -45,1%; Cu -45,8%; S -44,7%; Ca -56,2%; Mg -41,2%.
- Bijkomende effecten van het kweken van BSF-larven op mest zijn een vermindering van geur en een volledige reductie van wilde vliegenpopulaties in de mest.
- Bovendien kan het overgebleven restsubstraat, als bodemverbeteraar gebruikt worden omdat N, P en vervuulende zware metalen verminderd zijn (Newton et al., 2005; Parra Paz et al., 2015). Het toevoegen van dit restsubstraat aan kleigrond en zandgrond bevordert de groei van planten (Newton et al., 2005).

Er bestaan ook projecten die insecten kweken op menselijke mest, zoals dat van Sanergy in Nairobi (zie paragraaf 11.1.9).

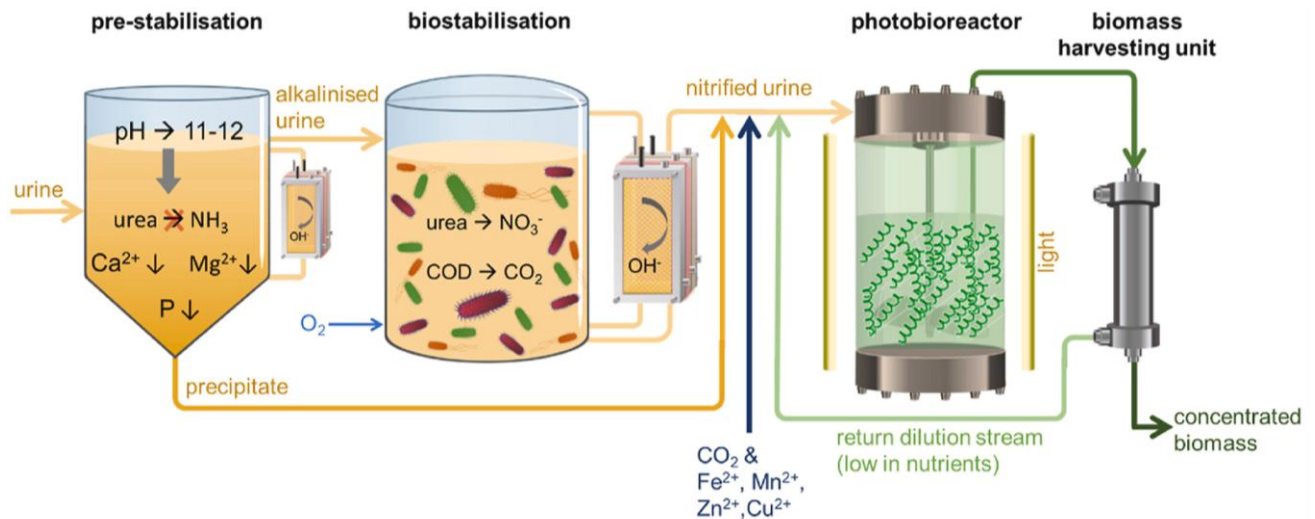
10.1.4 Algenkweek: spirulina

Microalgen kunnen een belangrijke rol spelen in de bio-economie, met name in combinatie met de valorisatie van afvalstromen als kweekmedia. Urine is een voorbeeld van een algemeen beschikbare, voedingsrijke afvalstroom, en alkalische stabilisatie en daaropvolgende volledige nitrificatie in een bioreactor levert een stabiele, nitraatrijke oplossing op.

Verwerkte urine kan dienen als voedsel voor micro-organismen, die op hun beurt voedsel zijn voor ruimtereizigers. Spirulina is zo'n veelbelovend ruimtevoedsel. Het is een micro-alg die urine kan verwerken, maar tegelijk zelf een waardevolle bron van eiwitten, vitaminen en mineralen is. Spirulina is bovendien bestand tegen schadelijke ruimtestraling en produceert ook flink wat zuurstof (De Paepe et al., 2023).

²³¹ VILT, 30 juni 2023: <https://vilt.be/nl/nieuws/duurzame-insectenkweek-dankzij-100-circulair-substraat>

Figuur 16 Productie van spirulina op basis van urine



Bron: De Paepe et al., 2023

In de studie van De Paepe diende dergelijke genitrificeerde urine als kweekmedium voor de eetbare microalg *Limnospira indica*. Om de stikstofopname-efficiëntie en biomassaproductie te verbeteren, werd genitrificeerde urine aangevuld met potentieel beperkende elementen. Beperkte hoeveelheden fosfor, magnesium, calcium, ijzer en EDTA maakten de genitrificeerde urinematriceven effectief als gemodificeerd medium dat gebruikt wordt in de substraatteelt, zowel in termen van biomassaproductie en nutriëntenopname als eiwitopbrengst in batchcultuur. Urineprecipitaten gevormd door alkalinisatie konden in principe voldoende fosfor, calcium en magnesium leveren, waarbij alleen externe toevoeging van ijzer, EDTA en anorganische koolstof nodig was. Vervolgens werd de geschiktheid van aangevulde genitrificeerde urine als kweekmedium bevestigd in continue *Limnospira*-kweek in een CSTR-fotobioreactor. Hierdoor wordt genitrificeerde urine aangemerkt als een waardevol en duurzaam groeimedium voor microalgen. Hierdoor ontstaan nieuwe voedingskringen op aarde en in de ruimte, bijvoorbeeld in regeneratieve levens ondersteunende systemen voor menselijke ruimtemissies.

10.2 ANDERE TOEPASSINGEN

10.2.1 Energieproductie

Zoals in diverse toepassingen wordt aangetoond (zie hoofdstuk 11) is menselijke mest een bron voor energieopwekking via:

- de productie van biogas of methaan door co-vergisting met keukenafval
- de productie van brandstofbriketten

10.2.2 Bouwmateriaal

Compost en menselijke mest kunnen omgevormd worden tot bouwmaterialen. Hier zijn enkele mogelijkheden en overwegingen²³²:

- Compost kan gebruikt worden als *vulmateriaal in biocomposieten*, waarbij het gemengd wordt met een bindmiddel (zoals bioplastics, natuurlijke harsen of mycelium). Dit kan leiden tot lichtgewicht, biologisch afbreekbare bouwmaterialen met toepassingen in tijdelijke structuren of isolatiematerialen.
- Gedroogde feces als *bouwmateriaal voor bakstenen*, panelen of isolatiematerialen. Gescheiden feces (uit droogtoiletten) kan gedroogd en verwerkt worden tot een vezelrijke grondstof. Het kan eventueel gebonden worden met leem, kalk of andere natuurlijke bindmiddelen, vergelijkbaar met modderbakstenen of biochar-gebaseerde bouwmaterialen.
- *Mycelium (schimmeldraden)* kan organische materialen zoals compost of fecale vezels koloniseren en omzetten in stevige structuren. Dit leidt tot sterke, lichte en biologisch afbreekbare bouwmaterialen, die na gebruik terug de natuur in kunnen.

²³² Deze vraag werd voorgelegd aan het programma ChatGTP

11 PRAKTIJKERVERINGEN

11.1 VERWERKINGSMETHODEN VOOR FECES

11.1.1 Finizio - proefinstallatie voor compostering



Bron: <https://finizio.de/recycling/>

Finizio (droogtoilettenbedrijf) in samenwerking met Kreiswerke Barnim (intercommunaal bedrijf)

Inzameling/omschrijving:

De proefcomposteringsinstallatie in de buurt van Berlijn (Eberswalde) verwerkt menselijke mest afkomstig van festivals en droogtoilettenbedrijven. De inhoud van de droogtoiletten wordt gescheiden opgevangen (vaste stof en vloeistof apart). De verwerking gebeurt op industriële schaal.

Verwerkingsmethode:

Zuurstof gecontroleerde compostering, met controle van:

- hygiënisatie op hoge temperatuur (70°C gedurende 7 dagen in gesloten compostcontainer met beluchting).
- toevoeging van klei, vers groen materiaal, biochar en water
- aerobe compostering in rillen (1m hoog, 2m breed, 30m lang)
- keren en controleren gedurende 8 à 10 weken + narijping (samen meer dan 3 maanden)
- zuurstofgehalte: minimaal 5%
- vochtgehalte: 55-60% vocht
- temperatuur: wordt binnen het bereik van 55°C-65°C gehouden
- materiaaldensiteit (input): maximaal 650kg/m³
- zeven om onzuiverheden (afval) eruit te halen

Installatie(s):

- Compostering
- betonvloer 400m² met omwalling

- machines: hygiëniseringscontainer 30m³, lader, keermachine, zeefmachine, meettoestellen
- membraan (compostdoek) ter bescherming tegen uitdroging of regen
- Urine verwerking: VUNA-proces (zie verder).

Eindproduct(en) en toepassing:

- Humusmeststof, ook 'supercompost' of 'humapost' genoemd.
- Geconcentreerde vloeibare meststof.
- Toepassing: op landbouwpercelen met een speciale toestemming als proefvelden.

Kwaliteit:

- **DIN SPEC 91421:** deze productspecificaties worden zoveel mogelijk nagestreefd (zie bespreking in paragraaf 7.1.3)
- **Medicijnresten:** Er gebeurt een controle op medicijnresten via 6 indicatorstoffen: twee antibioticavarianten (ciprofloxacine en claritromycine), een anti-epilepticum of psychotroop geneesmiddel (carbamazepine), een pijnstillert (diclofenac) en een anticonceptiehormoon (ethinylestradiol).
- **Pathogenen:** Er gebeurt tevens een kwaliteitscontrole op de eventuele aanwezigheid E. Coli, salmonella, enterokokken, Clostridium perfringens en sporen, somatische colifagen.

11.1.2 L'Equilibre - Zwitserse wooncoöperatie

Bron: <https://www.cooperative-equilibre.ch/eco-toilettes/>
<https://assainissement-ecologique.ch/projets/>

De Zwitserse wooncoöperatie L'Equilibre koos ervoor om in haar appartementswoonblokken verschillende ecologische sanitatiesystemen toe te passen. Uit die projecten is de organisatie Aneco ontstaan die professionele dienstverlening aanbiedt rond het ontwerp van ecologische sanitatiesystemen.

Inzameling/omschrijving:

Drie verschillende sanitatiesystemen in drie verschillende woonblokken van L'Equilibre:

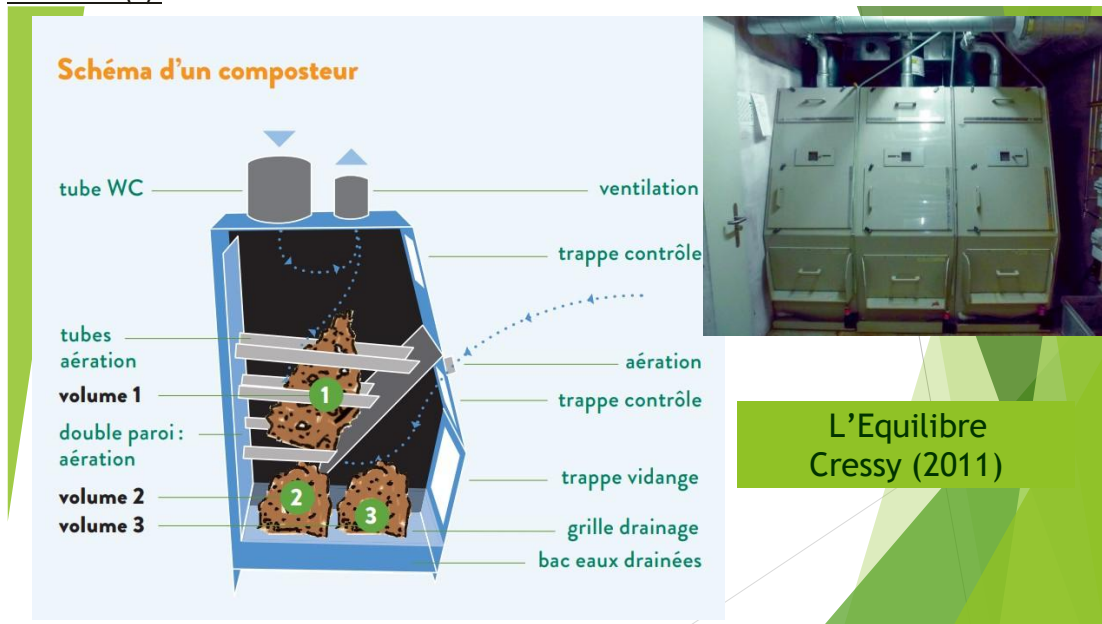
- Droogtoilet met strooisel + individuele composteers (Cressy)
- Water gespoeld scheidingstoilet + collectieve compostering (Soubeyran)
- Droogtoilet met strooisel en urinescheiding + cacarrousel (Meyrin)

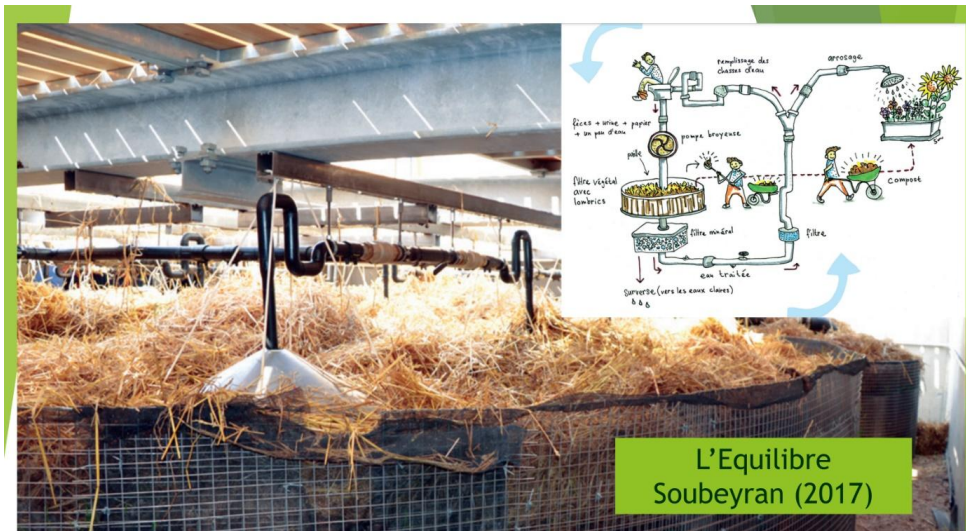
De inzameling, verwerking en toepassing gebeuren ter plaatse.

Verwerkingsmethode:

- Bij alle systemen gebeurt de verwerking op locatie (kelderverdiep, appartement, tuin)
- Alle systemen werken met een (voor)compostering met behulp van compostwormen
- Nacompostering van de wormencompost (gemengd met groenafval uit tuin en keuken) gedurende 6 maand tot 1 jaar in compostvakken in open lucht (behalve in Meyrin)
- Het vloeibare deel wordt apart ingezameld + verwerkt/afgevoerd

Installatie(s):





L'Equilibre Soubeyran (2017)



L'Equilibre Meyrin (2018)

Eindproduct(en) en toepassing:

- Kwaliteitscompost, toegepast in de omliggende tuinen
- Vloeibare meststof (pitribon) o.b.v. urine, toegepast in de omliggende tuinen
- Gezuiverd water

Kwaliteit:

In Soubeyran worden om de 2 maand analyses gedaan van het gezuiverde water. Dit water beantwoordt aan de normen voor lozing in oppervlaktewaters. De metingen hebben verlaagde concentraties van organische micropolluenten (caféïne, cyclamaat, gabapentine) aangetoond tov de concentraties in rioolwater, mogelijk te verklaren door de werking van het sanitatiesysteem. Er werden geen pathogenen (E. Coli et Enterokokken) vastgesteld in het gerecirculeerde water.

11.1.3 De Nieuwe Dokken (Gent)

Bron: <https://www.interregnorthsea.eu/anchor/pilots>
<https://www.saniwijzer.nl/projecten/nieuwe-dokken-gent-zawent/detail=19>
<https://ducoop.be/>

ANCHOR is een lopend Europees project (Interreg North Sea) met partners en demo-sites met waterbesparende (toilet)systemen in België, Nederland, Duitsland en Zweden. De Belgische demosites uit het ANCHOR-project is De Nieuwe Dokken in Gent, een nieuwe woonbuurt in de oude haven.

DuCoop is de coöperatie die duurzaamheidsdiensten (energie, afvalverwerking,...) levert aan de bewoners.

Inzameling/omschrijving:

Collectieve opvang van toiletwater (via een waterbesparend vacuümtoiletsysteem) van zo'n 400 appartementen. Het toiletwater (zonder urinescheiding) wordt samen met gft vergist en het biogas wordt gebruikt om groene energie op te wekken.

Verwerkingsmethode:

- vacuümtoiletten en -riolering: klein regenwaterverbruik (0,8L/spoelbeurt)
- vergisting van toiletwater en gft afkomstig van de bewoners
- productie biogas voor omzetting in warmte (voor warmtenet) en elektriciteit
- effluent van biogasinstallatie wordt omgezet in struvietkorrels + afvalwaterzuivering via membraanbioreactor + hergebruik
- recuperatie van restwarmte uit grijswater

Installatie(s):



Vergistingsinstallatie

vacuümsysteem

warmterecuperatie

Eindproduct(en) en toepassing:

- Biogas: voor omzetting in warmte voor het warmtenet of in elektriciteit voor de installaties
- Slib van de vergisting: wordt opgehaald en verwerkt door een erkende slibverwerking (meestal verbranding)
- Struvietkorrels: voor bemesting van de groenzones in de wijk
- Gezuiverd afvalwater voor toiletspoeling en proceswater van nabijgelegen bedrijf

Kwaliteit:

Wekelijkse analyse van de kwaliteit van de milieuparameters ter bewaking van de waterkwaliteit voor te lozen oppervlaktewater. Daarnaast ook regelmatige controle van zware metalen, pathogenen e.a.

11.1.4 Leudegem - afvalwaterzuivering

Bron: <https://www.leudegem.be/>

Leudegem is een project van HelloWater.

Inzameling/omschrijving:

Met het project 'Ledegem wordt Leudegem', werd in de Sint-Pieterstraat een innovatieve installatie geplaatst om afvalwater lokaal te zuiveren. Huishoudelijk afvalwater verdween in de natuur in een open baangracht, wat heel wat geuroverlast meebracht voor de buurt.

Het huishoudelijk afvalwater wordt ontvangen in een voorbezinktank aan het begin van de gracht. Het vloeibare gedeelte loopt over in een pompput. Van daar wordt het afvalwater met een pomp en verdeelsysteem gelijkmatig in de plantenbak (helofytenfilter) verspreid.

Verwerkingsmethode:

Het afvalwater sijpelt langzaam tussen de plantenwortels en de mix van lava en substraten waar het water wordt gezuiverd door een samenspel van bacteriën, lava en plantenwortels.

Na de plantenfilter is er een nazuivering aanwezig die het fosfaat 90% kan verwijderen (d.m.v. FOSCUBE® - op basis van korrels afkomstig uit het ontijzeringsproces van waterzuivering).

Installatie(s):



Eindproduct(en) en toepassing:

2800 m³afvalwater (per jaar) wordt gezuiverd en lokaal terug geïnfiltrerd.

Kwaliteit:

Totaal P is OK; totaal N is niet OK i.f.v. gemiddelde in Vlaams oppervlaktewater (0,25mgP/l en 3,8mgN/l).

Prestatie waterzuivering

	WETGEVING VAN TOEPASSING 5-500IE	RESULTATEN LEUDEGEM 70IE
Biologisch zuurstofverbruik (mg/L)	max 25	<3
Chemische zuurstofverbruik (mg/L)	max 125	28
Zwevende stoffen (mg/L)	max 60	1
Totaal Fosfaat (mgP/L)	Niet bepaald	0,38
Totaal Stikstof (mgN/L)	Niet bepaald	17,5

11.1.5 Batchcompostering voor particulieren

Bronnen: <https://humanurehandbook.com/>
<https://www.eautarcie.org/nl/>
<https://www.ecoprojecten.be/projecten/ecotoilet>

Joseph Jenkins is een Amerikaan en al meer dan 40 jaar bezig met droogtoiletten en compostering. Hij is wereldbekend door zijn 'Humanure Handbook' en andere publicaties waarin hij de techniek van een strooiseltoilet en batchcompostering uitlegt en verwijst naar onderzoek terzake.

Joseph Orszàgh was een Hongaar afkomstig uit Boedapest en voormalig universitair onderzoeker aan de universiteit van Mons in België. Hij is in heel Europa bekend via zijn website 'Eautarcie'.

Inzameling/omschrijving:

Samen inzamelen en verwerken van feces en urine (geen urinescheiding).

Hiervoor worden '1 emmer'-strooiseltoiletten gebruikt waarbij plantaardig strooiselmateriaal zorgt voor vocht- en geur-absorptie. De inhoud van het strooiseltoilet heeft op die manier de juiste koolstof/stikstofverhouding en de juiste vochtigheid voor compostering.

Verwerkingsmethode:

- grote afsluitbare emmers (30L) voor tussentijdse opslag
- overdekte composteerplek bestaande uit minstens 3 compostvakken: 1 in opbouw, 1 in rust, 1 opslagvak (grootte van het compostvak=ongeveer 500L per persoon/jaar)
- 1 of 2-wekelijkse toevoegingen (batches) van mest, groen, gft, kleipoeder, lavameel
- hiervoor worden mestvork, handschoenen en kruitwagen gebruikt
- toevoeging van vers groenmateriaal is belangrijk: 2 à 3x het volume aan toegevoegde mest; dit zorgt voor de gewenste hoge temperatuur van +50°C
- de inputs afwisselend in laagjes toevoegen (lasagneteknik) in warmste deel (midden)
- isoleren van het compostvak tegen koude, droogte en vliegen (met stro, hooi,...) en afschermen van zon en regen
- zuurstoftoevoer verzekeren: onderin, aan zijkanten, hoogtebeperking, extra kanalen
- temperatuur wordt opgevolgd met een compostthermometer,
- composteertijd= 2 jaar; keren is niet noodzakelijk (hooguit 1x na één jaar)

Installatie(s):



Bron: ECOprojecten

Eindproduct en toepassing:

- Humusmeststof die overal kan gebruikt worden, ook in de moestuin. Indien niet aan alle voorwaarden is voldaan, wordt aangeraden om de compost te gebruiken voor bomen en struiken en als bodembedekker in de siertuin.

Kwaliteit:

- temperatuur vereiste voor hygiëniseren: >50°C gedurende minimaal 24u (in deze omstandigheden worden pathogene organismen gedood)
- lange composteertijd: 1 à 2 jaar (de micro-organismen van het bodemecosysteem zorgen ervoor dat residuen van geneesmiddelen en hormonen worden afgebroken, cf. het onderzoek waarnaar verwezen wordt in het boek van Joseph Jenkins)

11.1.6 Johnson-Su bioreactor

Bron: <https://regenerationinternational.org/bioreactor/>
<https://www.youtube.com/watch?v=JGxSDhmvUUc>

Inzameling/omschrijving:

Snoeihout en landbouwresten wordt verhakseld. De compostering van houtig materiaal verloopt sneller met de toevoeging van mest en dat zorgt ervoor dat het eindproduct vol zit met zowel micro-organismen, schimmels als nutriënten.

Verwerkingsmethode:

- meestal hoge composthoop in cilindervorm, maar kan ook worden toegepast in veel grotere bioreactoren (zie video over landbouwer in de San Luis Valley in Colorado, USA);
- max. hoogte = 1,6m; doormeter = 1,4m
- extra luchttoevoerkanalen via onderkant (pallet) + verticale buizen (belang van een max. luchtpenetratie afstand van 30cm in compost); bovenkant afdekken tegen uitdroging
- input: hakselhout, gedroogd gft, grasmaaisel, tuinafval, bladeren en mest
- alles goed gemengd of vermalen en nat gemaakt in een bad
- toezicht: op temperatuur en vochtigheidsgraad 70-90% ; extra water toedienen in warme fase (>38°C); compostwormen toevoegen in afkoelingsfase (<27°C)
- compost klaar na 1 jaar

Installatie(s):



Bron: Johnson-Su toepassingen internet

Eindproduct(en) en toepassing:

De eindcompost wordt in zeer kleine hoeveelheden toegediend omdat niet de nutriënt-inhoud, maar vooral de microbiologie (schimmels) die aan de bodem wordt toegevoegd gunstige effecten heeft op de plantengroei.

Kwaliteit:

Hiervoor verwijzen we naar de interessante video van Dr. David Johnson:

<https://www.youtube.com/watch?v=cO2nGHq40Xc>

11.1.7 Brussel - publieke droogtoiletten

Bron: [https://leefmilieu.brussels/burgers/onze-acties/jaarverslagen/droogtoiletten-met-wormencompost-
een-originele-en-duurzame-technologie-jaarverslag-2023?highlight=droogtoiletten](https://leefmilieu.brussels/burgers/onze-acties/jaarverslagen/droogtoiletten-met-wormencompost-
een-originele-en-duurzame-technologie-jaarverslag-2023?highlight=droogtoiletten)

Inzameling/omschrijving:

Eind 2023 werden 2 modulaire droogtoiletten met wormencompost geplaatst in het Goede Herderpark in Evere en in het Koning Boudewijnpark in Jette. Er is een proefperiode van 2 jaar gepland. Zo kan Leefmilieu Brussel de onderhoudsbehoeften beoordelen in reële omstandigheden, inclusief vandalisme en de impact van intensief gebruik.

Verwerkingsmethode:

- De toiletten hebben geen water, elektriciteit, chemicaliën of zaagsel nodig om te kunnen werken.
- Ze raken niet verstopt en zijn vorstbestendig.
- Bovendien nemen ze een klein vloeroppervlak (8 m²) in beslag.

Installatie(s):



Bron: ©Imane Elzo Speelplein in S-P-Woluwe (2017)



Bron: ©Bruxelles Environnement, 2024

Eindproduct(en) en toepassing:

Leefmilieu Brussel wacht het einde van de proefperiode af en neemt dan een beslissing om al dan niet nieuwe droogtoiletten met wormencompost te installeren. Tot nu toe is er nog geen sprake geweest van vandalisme en de feedback van het publiek is positief. De toiletten zijn proper, worden 3 keer per week schoongemaakt en werken goed.

11.1.8 Kakume vluchtelingenkamp (Kenia)

Bron: Sanivation, Waste-to-Value Sanitation in Kakuma Refugee Camp, 2020.

<https://data.unhcr.org/es/documents/download/64297>

Sanivation is een sociale onderneming gevestigd in Kenia. De missie is om de toegang tot veilige en kosteneffectieve sanitaire voorzieningen in verstedelijkte gemeenschappen en vluchtelingenkampen te vergroten. In 2017 werden in totaal 500 droogtoiletten geïnstalleerd in een vluchtelingenkamp met 150.000 bewoners in het Noordwesten van Kenia. Slechts 25% van de bewoners had toegang tot een putlatrine. Het project werd geïmplementeerd in samenwerking met UNHCR en Norwegian Refugee Council, die verantwoordelijk zijn voor water, sanitaire voorzieningen en hygiëne in het vluchtelingenkamp Kakuma.

Inzameling/omschrijving:

De inzameling gebeurt via droogtoiletten met urinescheiding (de urine wordt afgeleid naar bezinkput). Houtskool of andere droog plantaardig materiaal wordt deels toegevoegd in de toiletten. De inhoud van de toiletemmer wordt na verdere behandeling en verwerking omgezet in brandstofbriketten.

Verwerkingsmethode:

- Verhitting fecaal slib tot temperaturen boven de 65°C gedurende minimaal drie uur (Capaciteit: 2 ton fecaliën per dag; warmte opgewekt door de zon of via elektriciteit).
- Fecaliën fungeren als bindmiddel voor andere biomassa-afvalstromen zoals houtskoolstof, landbouwresten en gecarboniseerde prosopis (een houtachtig invasief onkruid in Oost-Afrika).
- Vermenging 10-30% natte fecale slib op biomassa-afval tot vereiste consistentie.
- Vorming van kleine briketten met een rolpers.
- Droging op rekken in de zon (3 dagen).

Installatie(s):



Bron: Sanivation/UNHCR-rapport

Eindproduct(en) en toepassing:

De brandstofbriketten zijn compatibel met de kacheltjes die de vluchtelingen gebruiken om op te koken.

Kwaliteit:

Voordat de briketten worden verpakt en klaar zijn voor de verkoop, moeten ze een kwaliteitscontroleproces doorlopen waarbij de brandtijd, de kooktijd van het water, stevigheid gecheckt worden. De brandstofbriketten branden 1,5 keer langer dan traditionele houtskool, water kookt in 10 procent minder tijd en de briketten produceren minder rookuitstoot.

Zie (Ward et al., 2014) voor een wetenschappelijke evaluatie van vaste brandstofbriketten uit menselijk afval.

11.1.9 Black soldier fly in Nairobi (Kenia)

Bron: Reuters artikel, From poo to food: Kenyan toilet waste key for new animal feed, by Hereward Holland, June 17, 2019

Sanergy werd opgericht om zich bezig te houden met sanitaire voorzieningen. De firma voorziet in het afvalbeheer van dagelijks 100.000 mensen met meer dan 2.500 toiletten. In ontwikkelingslanden als Kenia, waar volgens de Wereldbank bijna tweederde van de stadsbewoners in sloppenwijken woont, zou het voeren van vliegenlarven met afval zowel de sanitaire als voedingsproblemen kunnen oplossen.

Inzameling/omschrijving:

De inhoud van de toiletten uit Nairobi wordt verzameld in afgesloten vaten die naar een fabriek voor organische recycling in Machakos County worden gebracht.

Verwerkingsmethode:

- de larven van de zwarte soldatenvlieg worden gevoed door een mengsel van uitwerpselen en voedselresten van hotels en landbouwbedrijven;
- in 10 dagen tijd verwerken de larven 70% van het afval;
- de larven worden gekookt in heet water om ze te doden.

Installatie(s):



Bron: Sanergy

Eindproduct(en) en toepassing:

Organische mest: vol met stikstof en calcium.

Veevoer: veevoederfabrikanten vermalen de larven tot poeder, gemengd met andere ingrediënten om een uitgebalanceerd dieet te creëren voor pluimvee, varkens en vissen. De larven kunnen het vismeel uit het Victoriameer of dure sojabonen uit Zambia vervangen.

Kwaliteit:

Geen data.

11.2 VERWERKINGSMETHODEN VOOR URINE

11.2.1 AURIN - urineverwerking in kantoorgebouwen

Bron: <https://vuna.ch/urin-recycling-technologie/>
<https://www.eawag.ch/de/abteilung/eng/projekte/vuna-naehrstoffrueckgewinnung-aus-urin/>

Inzameling/omschrijving:

In het hoofdgebouw van EAWAG, het Zwitsers wateronderzoeksinstituut in Zürich, bevinden zich enkel urinoirs zonder waterspoeling en toiletten met urinescheiding. Daardoor kan alle urine zuiver en onverdund via aparte leidingen naar de kelder verdieping gevoerd worden voor verwerking tot vloeibare meststof. Hetzelfde systeem wordt in de nieuw gerenoveerde gebouwen van de ESA in Parijs geplaatst.

Verwerkingsmethode:

EAWAG ontwikkelde het VUNA-proces (zie bespreking onder paragraaf 7.2.3.) dat urine omvormt tot een geconcentreerde vloeibare meststof. AURIN is de eerste van menselijke urine gemaakte meststof die met volledige goedkeuring vrij kan verkocht worden in Zwitserland, Liechtenstein en Oostenrijk.

Installatie(s):



Foto's: ECOprojecten

Aangepaste toiletten – urinoduct – opslagtanks – beluchte reactor – actief koolfilter – distillatie

Eindproduct(en) en toepassing:

- Vloeibare meststof (verkocht onder het merk 'AURIN').
- Gedistilleerd water uit urine: wordt in het EAWAG-gebouw hergebruikt om de toiletten te spoelen.

Kwaliteit: Vrijwel alle farmaceutica worden verwijderd in de actief koolfilter. Distillatie elimineert alle pathogenen vanwege de hoge temperaturen.

11.2.2 Aneco - Pitribon

Bron: <https://www.cooperative-equilibre.ch/eco-toilettes/>
<https://assainissement-ecologique.ch/projets/>

De Zwitserse organisatie ANECO begeleidde de installatie en ontwikkelde het low tech Pitribon-systeem voor het sanitatiesysteem van wooncoöperatie L'Equilibre in Meyrin.

Inzameling/omschrijving:

De appartementen zijn uitgerust met een 'cacaroussel', een droogtoilet met urinescheiding. De urine wordt apart behandeld met actief kool.

Verwerkingsmethode:

Pitribon is een proces voor het stabiliseren van urine door nitrificatie op een filter van beluchte houtskool. De technologie is nog in ontwikkeling voor verdere optimalisatie (Guilherme, 2023).

Installatie(s):

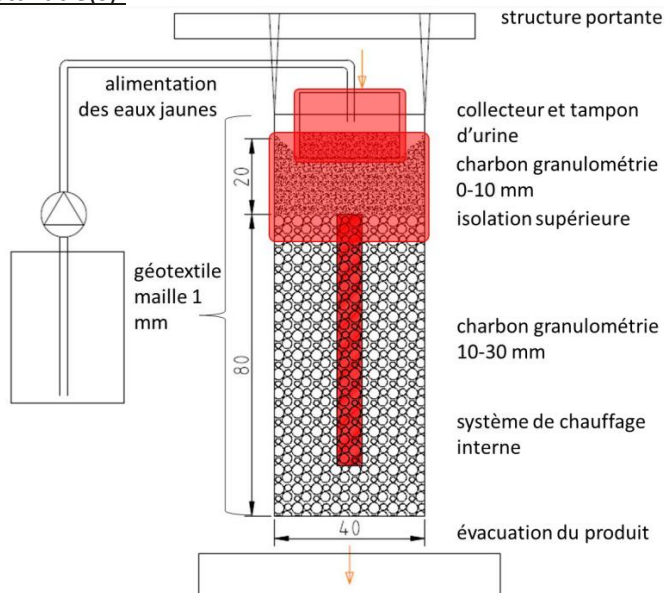


Figure 2: Vue en coupe d'une unité de filtre aéré avec une description des différents composants

Bron: ANECO

Het systeem verwerkt maximaal 3L urine per dag per filter. De omgevingstemperatuur van de ruimte waar de behandel eenheid zich bevindt, moet het hele jaar door boven de 20°C gehouden worden (eventueel met een intern verwarmingssysteem). Isolatie voorkomt ammoniakverdamping en warmteverlies waar dit het meest waarschijnlijk is (in de toevoerzone). Het evenwicht tussen optimale isolatie, de zuurstofbehoefte van het proces en het vermijden van ammoniakemissies is nog voorwerp van verder onderzoek.

Eindproduct(en) en toepassing:

De vloeibare meststof die het resultaat is van het proces kan zonder verdere behandeling opgeslagen en gebruikt worden

Kwaliteit: Er loopt momenteel een financieringsaanvraag voor een driejarig onderzoek, om het product en het proces grondig te bestuderen met als doel de urinemeststof te laten goedkeuren. Resultaten over microverontreinigingen worden binnen 1,5 jaar verwacht.

11.2.3 Lactopi Start – biostimulant

Bron: <https://toopi-organics.com/>

De Franse start-up Toopi Organics verwerkt urine tot een biostimulerend product voor de landbouw. Hierdoor kan bespaard worden op het gebruik van drinkwater in de toiletten, wordt er minder water verontreinigd en kunnen boeren kiezen voor een ecologisch en lokaal alternatief voor chemische meststoffen.

Inzameling/omschrijving:

De urine wordt ingezameld in vaste of tijdelijke installaties. Een vaste installatie is bv. een universiteitscampus of openbare plaszuilen. Sinds 2021 wordt urine van inwoners van Toulouse ingezameld via 'uritrottoirs' dankzij een partnerschap met Les Alchimistes, een jong bedrijf uit de sociale en solidaire economie dat zich toelegt op de terugwinning van bioafval. De urine wordt met speciaal uitgeruste bakfietsen opgehaald. Grote festivals, zoals bv. La Fête de l'Humanité (Parijs, 430.000 bezoekers) zijn eveneens een grote inzamelbron. Daarvoor wordt samengewerkt met toiletaanbieders, zoals WC Loc, Happee Services, Un Petit Coin de Paradis, Madame Pee. De urinoirs zijn van het type waterloze urinoirs.



Bron: Toopi Organics

Verwerkingsmethode:

De urine wordt via een hygiënisatie-, filterings- en fermentatieproces verrijkt met bacteriën (*Lactobacillus paracasei*) en metaboliëten.

Installatie(s):

- Op dit ogenblik wordt een productie-eenheid op industriële schaal gebouwd in Frankrijk, met o.a. subsidies van de European Innovation Council Accelerator. Momenteel is er enkel een kleinere eenheid in de buurt van Bordeaux.
- Daarna is een tweede productie-eenheid gepland in België, mogelijk in Luik.
- Het bedrijf streeft ernaar om in 2029 meer dan 5 miljoen liter biostimulantia op basis van urine in heel Europa te verdelen. (Einddoel: 200 miljard liter/jaar urine in Europa apart opvangen en verwerken.)

Eindproduct(en) en toepassing:

Het product is toegelaten in Frankrijk (ANSES - AMM n°1220824) voor grote, industriële culturen zoals bv. mais, bieten. Het kan ook gebruikt worden in de tuinbouw, maar niet voor culturen waarbij de geogoste delen in aanraking komen met de grond. Verder mag het ook gebruikt worden in de wijnbouw en boom- en bloemkwekerijen.

Het product is volgens Toopi Organics ook in België toegelaten onder de Waalse derogatie M735.X. In 2023 werden er proefvelden opgezet met bieten in samenwerking de Société Coopérative Agricole de la Meuse (SCAM). Ook met mais werden er proefvelden opgezet in samenwerking met Waalse landbouwers. Een 40-tal testen tonen een beter ontwikkeld wortelstelsel, een hoger percentage mycorhisatie en hogere teeltopbrengsten. Ze tonen ook aan dat het gebruik van (kunst)meststoffen voor de vroege groei sterk kan gereduceerd worden (30%-50%) door toepassing in combinatie met het product.

Met een dosering van 25L/ha kan het middel 35kg van de aanwezige fosfor in de bodem vrijmaken. Het stimuleert de ontwikkeling van het wortelstelsel voor een betere toegang tot water en voedingsstoffen. Het stimuleert mycorhisatie, dwz de transformatie van de wortels van planten door interne associatie met een schimmel. Toopi Organics: *“Wij geloven dat urine de ontbrekende schakel is om de voedingsstoffencyclus tussen consumenten en boeren te sluiten. Met onze technologie voor de hygiënisering en fermentatie van menselijke urine bieden we eindelijk een levensvatbaar economisch model voor de agrarische valorisatie van urine.”*

Het product is toegelaten voor de biologische landbouw in 6 EU-landen.

Het eerstvolgende initiatief van Toopi Organics zal bestaan uit het opzetten van 120 landbouwproeven in 6 lidstaten: België, Nederland, Duitsland, Spanje, Portugal en Italië.

Kwaliteitsgarantie:

Het filtratie- en fermentatieproces van Toopi Organics elimineert 100% van de ziekteverwekkers en tot 90% van de xenobiotica (niet-lichaamseigen stoffen zoals medicijnresten), waardoor een hygiënisch, stabiel product zonder risico voor het milieu wordt gegarandeerd.

11.2.4 UCLL Diepenbeek - biomeiler

Bron: <https://biomeiler.nl/innovatie-trajecten/urine-verwerking-met-de-biomeiler/>

Deze vorm van (hout)compostering werd ontwikkeld door Jean PAIN, in België bekend via het comité Jean PAIN. Stichting Biomeiler is een kennisbank, ketenregisseur en productontwikkelaar. Zij zetten onderzoekstrajecten op samen met ervaringsdeskundigen en wetenschappers in binnen- en buitenland. In België heeft Stichting Biomeiler ondermeer samengewerkt met Hogeschool UCLL in Diepenbeek.

Inzameling/omschrijving:

Aan de hogeschool UCLL Diepenbeek werden in 2022 vier biomeilers geïnstalleerd die warmte kunnen opwekken met organisch afval, zoals houtsnippers, groenteafval en mest. Het snoeihout is afkomstig van nabij gelegen fruitboomgaarden. De compostering van houtig materiaal verloopt sneller met de toevoeging van urine en/of mest. Voor een biomeiler is urine een uitstekende stikstofbron en komt ten goede aan de warmteopbrengst. De nutriënten gaan zich hechten aan het koolstof en dat maakt de compost een uitstekende bodemverbeteraar. Onderzoek wijst uit dat microverontreinigingen van medicijnresidu's relatief goed afbreken in een composteringsproces. Er is echter nog meer onderzoek nodig om alle risico's uit te sluiten. Wageningen Universiteit Research neemt het concept in onderzoeksprogramma's op.

Verwerkingsmethode:

- composthoop in cilindervorm: bv. constructie met betonnetten en gronddoek;
- max. hoogte = 3m; doormeter = 3-10m;
- onderkant moet waterdicht afgesloten zijn, met afloop naar opvangbak (voor recirculatie);
- luchttoevoer: bovenkant + eventueel zijkanten (de houtsnippers zorgen voor een luchtige structuur);
- input: verse houtsnippers (minimaal 70%) aangevuld met ander organisch materiaal zoals mest, gras/stro, bladeren, etc.... en water: 30-70% van het volume aan houtsnippers;
- blijft 1 tot 1,5 jaar warm ($50^{\circ}\text{C} < T < 80^{\circ}\text{C}$); compost klaar na langzame rijping (18-36 maanden)

Installatie(s):



Bron: Radio 2 verslag, 22 nov 2022

Eindproduct(en) en toepassing:

Warmte: UCLL wil met haar installaties de labo's verwarmen waar ze appelleren maken.

Compost: opnieuw toepassen in de fruitboomgaarden

Kwaliteit:

Resultaten van het project op te vragen bij UCLL.

11.3 ANDERE PRAKTIJKERVERVARINGEN

11.3.1 ZirkulierBAR (Duitsland)

Bron:

<https://zirkulierbar.de/wissen/projektergebnisse/>

Type: inter- en transdisciplinair onderzoeksproject

Omschrijving:

Het Bondsministerie van Onderwijs en Onderzoek (BMBF) heeft het voor drie jaar gefinancierd in het kader van de subsidiemaatregel REGION.innovativ. Deze maatregel ondersteunt regio's bij het inzetten van nieuwe onderzoeks- en innovatiethema's en het opzetten van samenwerking tussen gemeenten de recycling van stoffen, materialen of producten te verbeteren.

Projectresultaten:

Naast het wetenschappelijk onderzoek (dat in deze literatuurstudie aan bod kwam), werden vanuit het ZirkulierBAR-project²³³ aanbevelingen gedaan om de wetgeving circulaire economie en de meststoffenwetgeving aan te passen:

- de definitie van bioafval uitbreiden met menselijke urine en ontlasting.
- de opname van menselijke uitwerpselen in de meststoffenverordening (positieve lijst direct uitbreiden met afzonderlijk geregistreerde urine en ontlasting, en een eenvoudige en transparante procedure voorzien voor het uitbreiden van de positieve lijst)
- het gebruik van de procedure van wederzijdse erkenning om toegang tot nationale markten te verkrijgen. Naast het op de markt brengen van meststoffen via de nationale meststoffenwetgeving bestaat er op EU-niveau ook de Verordening Bemestingsproducten (EU) 2019/1009. Fabrikanten die in één lidstaat een vergunning hebben gekregen voor gerecycleerde meststoffen, kunnen de 'Verklaring van wederzijdse erkenning' overeenkomstig Verordening (EU) 2019/515 gebruiken voor producterkenning om markttoegang te verkrijgen in andere lidstaten. Voorwaarde hiervoor is het 'rechtmatig in de handel brengen' van een meststof.

Er werden ook technische verwezenlijkingen gerealiseerd. Naast de grondcomposteringsinstallatie van Finizio werd eind 2023 in Eberswalde (Duitsland) een nieuwe onderzoeksfaciliteit van ZirkulierBAR in gebruik genomen. Hier wordt een systeem van 'rekkencompostering' onderzocht waarbij de compostrijen vlak naast en boven mekaar – niet op de vloer – maar op een rek liggen. Grondcompostering is erg ruimte- en arbeidsintensief en dat is een probleem voor de schaalbaarheid. Het 'humusrek' wordt gebruikt voor onderzoek naar het opschalen, optimaliseren en automatiseren van gecontroleerde zuurstof gebaseerde compostering.

De rekken (tot 3 boven elkaar) verhogen de oppervlakte-efficiëntie en vermijden de afdichting van de bodem door een betonvloer. De stalen frames van de rekken staan op betonnen puntfunderingen en zweven boven de grond. Grootchalig betonneren is niet meer nodig.

De keermachine speelt één van de belangrijkste rollen bij gecontroleerde, zuurstofrijke compostering. De automatisering daarvan verhoogt de arbeidsefficiëntie. Bovendien wordt er van onderaf nog meer zuurstof

²³³ <https://zirkulierbar.de/wissen/projektergebnisse/#positionspapier>

aan de compostrijen toegevoerd door automatische actieve ventilatie in de vloer. In een volgende ontwikkelingsstap kan de keermachine via sensoren volautomatisch de compostrijen herkennen en het juiste programma draaien. Op deze manier kan het in de toekomst zelfs rendabel blijken om de rillen de eerste drie tot vier dagen twee keer per dag te keren, wat een enorme impact heeft op de kwaliteit van het composteringsproces.

Grijpers en keermachines op rails hebben veel minder machinegewicht en kracht nodig voor beweging; ze zijn aanzienlijk energiezuiniger dan zelfrijdende machines op beton. De machines worden bij voorkeur van groene stroom voorzien, ter plaatse opgewekt met zonnepanelen.

Met rolluiken aan de buitenkant wordt het rek een weerbestendige ruimte waarin de compostrijen niet uitdrogen of door regen worden weggespoeld.

11.3.2 Boerderij van de toekomst en KNAP (Nederland)

Bron:

<https://farmofthefuture.nl/nieuws/zonde-om-weg-te-spoelen-wat-menselijke-ontlasting-kan-bijdragen-aan-duurzame-landbouw/>

<https://www.wur.nl/nl/project/pps-kringloopsluiting-van-nutriënten-uit-afvalwater-en-proceswater-knap.htm>

Type: veldonderzoek

Omschrijving:

Wageningen Research en Universiteit (WUR) en de Boerderij van de Toekomst experimenteren met het gebruik van humane meststoffen in de landbouw. Nog in 2024 start een experiment in Lelystad waarin verschillende vormen van stikstof en urine uit de humane kringloop gehaald worden en gaan gebruikt worden. Dit is een samenwerking tussen Boerderij van de Toekomst en de PPS KNAP (Kringloopsluiting van Nutriënten uit Afvalwater en Proceswater).

Een achterliggende doelstelling is het verwijderen en beheersbaar maken van contaminanten in circulaire afvalwatersystemen om veilig hergebruik van producten mogelijk te maken.

Verwachte resultaten:

- Uitgewerkt kwaliteitssysteem voor gerecyclede producten en meststoffen uit communaal en industrieel afvalwater, met specifiek aandacht voor uitdagingen in wet- en regelgeving;
- Actueel inzicht in de grootste lekkages van macronutriënten uit het Nederlandse nutriëntensysteem;
- Verscheidenheid aan cases waarin op centrale en decentrale wijze nutriënten uit communaal en industrieel afvalwater worden teruggewonnen en hergebruikt, in interactie met de ontwikkeling van het kwaliteitssysteem;
- Detailinformatie over de landbouwkundige waarde, kwaliteit en veiligheid van de afzonderlijke gerecyclede meststoffen;
- Draagvlak van relevante partijen voor het kwaliteitssysteem en de realisatie van cases gedurende en na afloop van het project met betrekking tot overheden, bedrijven en kennisinstellingen;
- Opsomming van bestaande barrières in wet- en regelgeving die een belemmering vormen voor het optimaal verwaarden van nutriëntrijke reststromen.

Details:

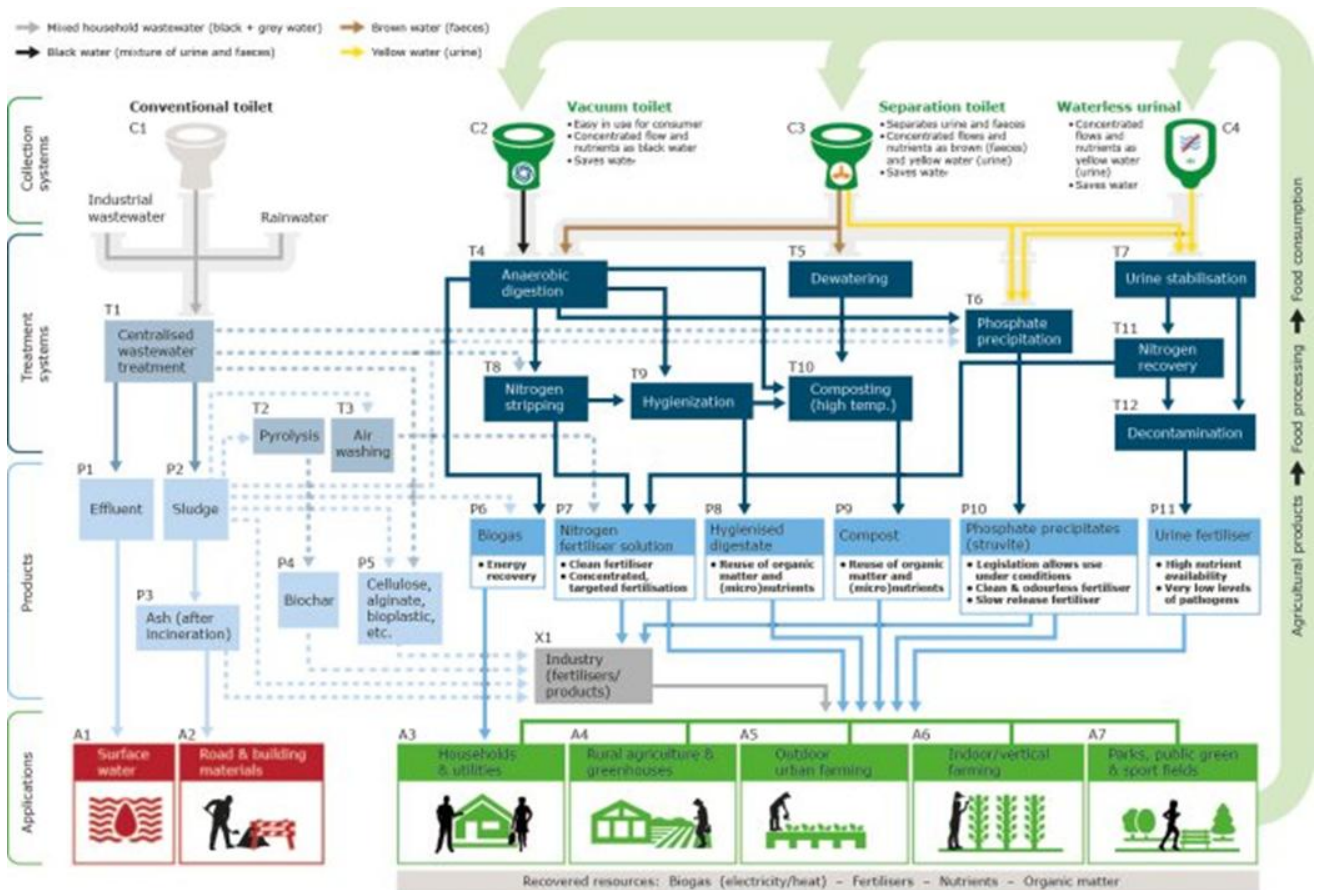
De communale afvalwater cases zijn:

- Verwaarding van geconcentreerde stikstofhoudende vloeibare meststoffen;
- Verwaarding van vaste mineraal/fosfaat houdende meststoffen uit communaal afvalwater;
- Verwaarding van ontwaterd slib en digestaat afkomstig van behandeld zwart water;
- Opwaardering bron gescheiden decentrale sanitatie (urine, mogelijk zwart water en gft);
- Circulaire akkerbouw met gerecyclede meststoffen uit afvalwater in Flevoland.

De industriële afwater cases zijn:

- Duurzame toepassing van waardevolle nutriënten uit agro-food industrie;
- Verwaarding van digestaat afkomstig van verwerkte voedselresten;
- Circulaire glastuinbouw met meststoffen uit afvalwater;
- Toepassing van waardevolle nutriënten uit afvalwater van de brouw- en zuivelindustrie.

Figuur 17 Conventionele en nieuwe sanitatiesystemen met recyclage van nutriënten



Bron: WUR

Overzicht van conventioneel communaal afvalwaterzuiveringssysteem (links, lichtere kleuren) en nieuwe sanitatie systemen (rechts, donkere kleuren) met belangrijkste routes voor recycling van nutriënten en andere hulpbronnen.

Er is een indrukwekkende lijst van partnerorganisaties uit:

- (Afval)watersector
- Landbouw en glastuinbouw en agro-food industrie
- Meststoffen industrie
- Agronomisch advies en technologie-leveranciers
- Laboratoria, kennisinstellingen en -organisaties
- Netwerkorganisaties
- Provincies en gemeenten
- Burgercollectieven rond decentrale sanitatie: woonwijk Noorderhoek (Sneek), woonproject Arneco (Arnhem)
- Natuurorganisaties

11.3.3 OCAPAPI (Frankrijk)

Bron:

<https://www.leesu.fr/ocapi/les-projets/projets-en-cours/>

Type: langlopend actiegericht multidisciplinair onderzoeksprogramma

Omschrijving:

OCAPAPI (Organisation des cycles azote et phosphore dans les territoires) werd in 2014 gelanceerd. Het richt zich op de biogeochemische cycli in de gebieden en in het bijzonder op het beheer van menselijke uitscheidingen en het gebruik ervan in de landbouw. OCAPAPI helpt het debat over methoden voor het beheer van urine en fecaliën en de scheiding aan de bron, weer te openen. Het programma wordt geleid door het 'Laboratoire Eau Environnement et Systèmes Urbains' (LEESU) van de 'Ecole nationale des ponts et chaussées' en ondersteund door 'l'Agence de l'Eau Seine Normandie' en ADEME.

Projectresultaten:

Het onderzoeksprogramma is gericht op acties gericht in diverse domeinen, zoals pilootprojecten, het samenbrengen en begeleiden van stakeholders, het bestuderen van verwerkingstechnieken, sociale dynamieken, gezondheidsaspecten, lange termijn effecten,... in samenwerking met landbouwers, wetenschappers, sociologen, enz.

Een 12-tal acties werden afgerond en een 15-tal zijn nog in uitvoering, waaronder het project 'ENVILLE', hier kort beschreven bij wijze van voorbeeld.

Project ENVILLE (2022-2025):

Dit project heeft als doel om een bredere uitwisseling te stimuleren tussen stedelingen en landbouwers in het kader van een wekelijkse korte-keten levering van groenten. OCAPAPI begeleidt, onderzoekt en ondersteunt.

Praktisch:

- de leden van het systeem hebben een contractuele overeenkomst met de groenteboer voor de wekelijkse levering van groenten gedurende 1 jaar.
- elke week halen de leden hun groenten af in het verdeelpunt en brengen ze hun urine in kleine bidons mee.
- deze bidons worden door een pompsysteem geleidigd in een groot vat (1x/maand geleidigd door de boer).
- de verdere behandeling van de urine bestaat uit opslag gedurende 1 tot 6 maanden in een gesloten tank (volgens WHO is dit in principe voldoende). Een verdere behandeling kan bestaan uit nitrificatie (om verlies van stikstof tegen te gaan) en filtratie door actiefkool (om medicijnresten uit te zuiveren).
- na deze behandeling wordt de urine als vloeibare meststof gebruikt op experimentele percelen.

Resultaten:

- bemestingsexperimenten op percelen met bloemen en granen, op weiden en fruitboomgaarden. Bij experimenten met groenten wordt de behandelde urine in de grond toegediend, nooit op de groenten zelf.
- 50 huishoudens leveren 750L urine/week of 39.000L/jaar, wat 235kg stikstof oplevert om 20.000m² landbouwgrond te bemesten; 390.000L water/jaar bespaard; 95kg stikstof belandt niet in de Seine.
- Ontwikkeling van een urine-injecteerder voor kleine percelen



DEEL 3: CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

Conclusies

Het voorliggend literatuuronderzoek heeft als belangrijkste doel een antwoord te geven op een aantal prangende beleidsvragen rond de mogelijkheden en het wettelijk kader van gescheiden inzameling en verwerking van menselijke mest en de milieuhygiënische risico's bij het verwerken van menselijke mest tot compost. De belangrijkste conclusies zijn:

- Menselijke feces en urine hebben meestal lagere concentraties verontreinigende stoffen in vergelijking met gft-compost of dierlijke mest.
- Compostering van gescheiden ingezamelde menselijke mest reduceert in belangrijke mate pathogenen, medicijn- en pesticidenresten, microplastics en PAK's. Vergisting is veel minder effectief in het elimineren van pathogenen en medicijnresten.
- Compost van menselijke mest beantwoordt aan de richtlijnen die werden voorgesteld door de FOD VVVL voor wat betreft: hygiëneparameters, zware metalen, PFAS, PAK's en dioxines. Voor diverse medicijnen, drugs, pesticiden (actieve stoffen en metabolieten) en microplastics blijft het moeilijk om relevante referentie- of grenswaarden te vinden voor bijvoorbeeld compost. De normen voor de deelstroom uit luierreyclage kunnen wel als referentienorm voor medicijnresten dienen.
- Er zijn voldoende aanwijzingen dat menselijke mest op een milieuverantwoorde en veilige manier kan verwerkt worden tot bodemverbeteraar, weliswaar onder bepaalde voorwaarden en mits de nodige maatregelen.
- Menselijke urine lijkt het meeste potentieel te hebben om op relatief korte termijn in de landbouw toegepast te worden. Het bevat meer nutriënten dan feces, het is apart inzamel- en verwerkbaar, er zijn relatief eenvoudige technieken voor de eliminatie van pathogenen en medicijnresten en het is een snelle stikstofbemester. Zowel compost als biochar van menselijke feces kunnen in de landbouw toegepast worden, maar de toepassing ervan wordt beperkt door de mate van fosforverzadiging van de bodem en de fosforbemestingslimiet.

Aanvullend diende het literatuuronderzoek de milieu-impact van bestaande en circulaire sanitaire systemen te vergelijken. De belangrijkste conclusies zijn:

- Het jaarlijks waterverbruik van spoeltoiletten in Vlaanderen bedraagt 17% van het huishoudelijk waterverbruik. Dat is gelijk aan het watervolume van het Albertkanaal tussen Antwerpen en Maastricht.
- De verontreinigingen die aanwezig zijn in menselijke mest zijn in versterkte mate terug te vinden in het zuiveringsslib van RWZI's. Immers, 9% van het afvalwater dat RWZI's zuiveren bestaat uit toiletwater, 91% is ander afvalwater. Toiletwater is vermoedelijk verantwoordelijk voor de meeste pathogenen en medicijnresten in rioolwater, evenals voor 8% koper en 16% zink. Toiletwater is verantwoordelijk voor een kwart van de netto-emissies van stikstof en fosfor naar oppervlaktewater.

- De milieu- en gezondheidsrisico's van medicijn- en pesticidenresten, microplastics en PFAS blijven een grote zorg met name vanwege hun persistentie en mogelijke bio-accumulatie. Het composteren van gescheiden ingezamelde menselijke mest verlegt een deel van deze risico's van het milieucompartiment water naar het milieucompartiment bodem. Volgens de Wereldgezondheidsorganisatie (WHO) is het bodemsysteem over het algemeen beter geschikt voor de afbraak van farmaceutische resten dan waterlichamen.
- Eén derde van de huidige stikstofaanvoer door kunstmest op Vlaamse landbouwgronden zou kunnen vervangen worden door menselijke urine. Gecomposteerde feces kan 125.000 ton per jaar bijdragen aan het verhogen van het organisch stofgehalte in landbouwgronden.
- Circulaire sanitaire systemen blijken een veel kleinere milieu-impact te hebben dan conventionele sanitaire systemen: het is dus zinvol om circulaire systemen verder te onderzoeken en te zien onder welke voorwaarden en met welke maatregelen menselijke mest beter kan gevaloriseerd worden.

Aan de bovenstaande conclusies voegen we graag nog enkele bedenkingen toe die naar voor komen door iets meer uit te zoomen op het thema:

- Ons sanitair systeem is kwetsbaar voor klimaatverandering. Vlaanderen hoort bij de regio's in Europa met de laagste watervoorraad per inwoner. In perioden van langdurige droogte zijn de beperkte (regen)watervoorraden sneller opgebruikt door toiletspoeling. Anderzijds kan intense en/of langdurige neerslag leiden tot overbelasting van de riolering en afvalwaterzuivering met als gevolg dat die tijdelijk buiten werking kunnen vallen. Extreem weer kan tot sanitaire noodsituaties leiden.
- Er zit een vicieuze cirkel in het huidig sanitair systeem, waarbij alomtegenwoordige pesticiden, PFAS, microplastics en andere milieugevaarlijke stoffen via het afvalwater en de daarvoor onaangepaste afvalwaterzuivering terecht komen in oppervlaktewater dat instaat voor 50% van de drinkwatervoorziening.
- De toenemende vraag naar water is een trend op lange termijn. Zuiver water is in feite een schaars goed, dat even essentieel is voor mens en natuur als voor de productie van onze Vlaamse economie. Belangrijke industriële waterverbruikers zoals de chemie- en voedingssector zijn ook de sectoren die verantwoordelijk zijn voor de productie en het gebruik van pesticiden, waarvan sommige onder de vorm van persistente organische pollutanten blijven circuleren in de water- of bodemcyclus en via drinkwater en voeding het menselijk lichaam binnen komen. Het voorzorgsprincipe en het principe van de 'vervuiler betaalt' moeten leiden tot enerzijds een verbod op de productie en het gebruik van persistente organische pollutanten en anderzijds tot het bijdragen in de extra kosten van een performantere waterzuivering.

Aanbevelingen

Op basis van de bovenstaande conclusies en bedenkingen formuleren we aanbevelingen i.v.m. de verdere ontwikkeling van, de toepassingsgebieden voor en het onderzoek naar duurzame sanitatie. We eindigen met suggesties voor de aanpassing van het wettelijk kader.

Praktische aanpak voor verdere ontwikkeling

- Door in te zetten op circulaire economie en innovatie is het mogelijk om een competitief nadeel (schaarste aan zuiver water) om te zetten in een competitief voordeel (water besparende en zuiverende technologie). Daarom is het aan te bevelen om doelstellingen en acties rond duurzame sanitatie op te nemen in de meerjarenplannen van de OVAM, de VMM, Vlaanderen Circulair, Blue Deal en andere programma's.
- Een Green Deal 'Duurzame sanitatie', waarbij alle stakeholders samenwerken rond technieken, wetenschappelijk onderzoek en de voorbereiding van nieuwe regelgeving, kan als een 'proeftuin' fungeren zoals dat ook gebeurt in Duitsland, Nederland en Frankrijk.
- Een gerichte aanpak is nodig om mensen te laten wennen aan het idee dat menselijke mest gerecycleerd wordt. Psychologische drempels kunnen weggenomen worden door informatie, vorming, de voorbeeldrol van de overheid en positieve gebruikservaringen bij festivals en publieke droogtoiletten.

Toepassingsgebieden voor circulaire sanitaire systemen

Circulaire sanitaire systemen kunnen complementair zijn met het bestaande systeem. We denken in eerste instantie aan volgende toepassingsgebieden:

- het zogenaamde 'buitengebied' waar geen riolering is: combinaties van droogtoiletten en grijswaterzuivering met hergebruik van gezuiverd water, of zuivering door helofytenfilters.
- nieuwe woonuitbreidingsgebieden, appartementen en kantoren: lokale inzamel- en verwerkingssystemen (zoals bijvoorbeeld de 'Nieuwe Dokken' in Gent).
- (natuur)parken zonder water-, elektriciteits- of rioolaansluiting: publieke droogtoiletten die volledig autonoom functioneren.
- festivals en evenementen: tijdelijke droogtoiletten en grijswaterzuivering.
- extreme weersomstandigheden: droogtoiletten als nood sanitair.

Verder onderzoek

Dit literatuuronderzoek hanteerde een aanpak '*in de breedte*', waarbij we een globaal beeld probeerden te schetsen over het 'waarom' en 'hoe' van duurzame sanitatie. Denk aan milieu-impact van het huidige sanitaire systeem, risicoanalyse van menselijke mest, verwerkingstechnieken, wetgeving, toepassingen en praktijkvoorbeelden.

Voor meer gericht onderzoek '*in de diepte*' doen we een aantal suggesties in volgorde van belangrijkheid:

- Compostproeven met menselijke mest met het oog op reductie van pathogenen en medicijnresten met verschillende kleinschalige en grootschaliger composteringstechnieken.
- Het effect van 'tijd & microbiologie' bij compostering op de afbraak van 'hardnekkige' pathogenen (zoals bv. clostridium perfringens), medicijnresten/drugs, hormonen en pesticiden.
- Onderzoek naar de bronnen en concentraties in feces en urine van zware metalen, microplastics, medicijnresten, PFAS en residu's van bestrijdingsmiddelen.
- Vergistingsproeven met menselijke mest. Zoals testen met droge/natte stromen, variëren met de aanwezigheid van cellulose, onderzoeken van het biogaspotentieel,...

- Onderzoek omtrent het pyrolyseren van feces.
- Vergelijkend onderzoek naar de afbraak van microplastics, medicijnresten en residu's van bestrijdingsmiddelen door waterzuiveringsprocessen versus door compostering.
- Bijkomend literatuuronderzoek gericht op pathogenen en medicijnresten in menselijke feces en urine met o.a. de verschillen tussen particulieren, festivals, ziekenhuizen en zorginstellingen.
- Een LCA-studie om diverse technieken zoals composteren, vergisten en pyrolyse te vergelijken op uiteenlopende parameters zoals milieu-impact, risicoreductie, water- en energieverbruik,...).

Aanpassing wettelijk kader

Er wordt aanbevolen een regelgevend kader uit te werken waar plaats is voor:

- gecertificeerde compost van gescheiden ingezamelde menselijke mest
- niet-gecertificeerde compost voor eigen gebruik (voor particuliere gebruikers met een droogtoilet).

In navolging van de aanbevelingen uit het Duitse ZirkulierBAR-project kunnen we gelijkaardige voorstellen doen om in Vlaanderen/België het wettelijk kader aan te passen om toe te laten dat menselijke mest wordt gecomposteerd, vergist of gepyrolyseerd en dat de eindproducten van die verwerking kunnen verhandeld en toegepast worden:

- Creatie van een EURAL-code voor menselijke mest
- Bij finaal gebruik als bodemverbeterend middel of meststof:
 - Opname in lijst toegelaten afvalstof voor gebruik als meststof of bodemverbeterend middel (VLAREMA Bijlage 2.2)
 - Aanpassingen aan VLAREMA en Algemeen Reglement Certificering (ARC)
 - Kwaliteitscontrole en keuringsattest nodig als basis voor ontheffing FOD VVVL
 - Uitbreiding positieve lijst toegestane inputs voor vergisting (FOD VVVL)
 - Akkoord VLM om behandelde menselijke mest te beschouwen als 'Andere Mest'
- Aanpassing VLAREM i.v.m. sectorale voorwaarden die van toepassing zijn op de vergunde verwerker

Gebruiksbeperkingen:

- Voor professionele compostering van menselijke mest moeten in principe geen gebruiksbeperkingen worden opgelegd wanneer de compost gecertificeerd is volgens de normen. Dat betekent dat compost van menselijke mest zowel kan toegepast worden bij teelten die rechtstreeks voor voedsel bestemd zijn, als bij boom- en bloemenkwekerijen.
- Het vrijstellen van een omgevingsvergunning voor compostering op kleine schaal en thuiscompostering van menselijke mest, kan eventueel gepaard gaan met het opleggen van beperkingen, zoals bijvoorbeeld: het verplicht volgen van een opleiding en van een 'code van goede praktijk', enkel gebruik op eigen perceel, niet gebruik bij minder dan 2 jaar compostering,...

12 BIJLAGEN

12.1 AFBAKENING VAN HET ONDERZOEKSVELD

12.1.1 Zuiveringsslib RWZI's

Tabel 3. Gemiddelde kwaliteit van RWZI-slib aan de hand van de rekenkundige of gewogen(*) gemiddelden van de concentraties bepaald op de droge stof, Vlaanderen, periode 1998-2009 (bron: NV Aquafin)

	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Organische stof (%)	51,4	56,3	59,0	58,2	57,1	56,1	58
Organische en ammoniakale stikstof (% N)	4,4	5,3	5,2	4,6	4,5	4,5	4,7
Fosfor (% P ₂ O ₅)	4,5	5,1	5,7	4,8	5,6	5,2	5,6
IJzer (% Fe)	4,6	4,3	4,1	3,8	4,5	5,5	4,6
Zink (mg Zn/kg ds) (*)	1.150	1.227	1.258	1.255	1.383	1.428	1.302
Koper (mg Cu/kg ds) (*)	308	345	354	329	317	312	306
Lood (mg Pb/kg ds) (*)	171	164	173	166	160	167	149
Chroom (mg Cr/kg ds) (*)	74	118	84	74	72	72	72
Nikkel (mg Ni/kg ds) (*)	39	70	48	40	33	32	30
Cadmium (mg Cd/kg ds) (*)	4,2	4,6	3,7	4,0	4,1	4,1	4,3
Kwik (mg Hg/kg ds) (*)	1,4	1,3	1,2	1,2	1,0	0,9	0,9

Bron: Voortgangsrapportage Uitvoeringsplan Slib 2008-2009

**GEMIDDELDE VRACHTEN (KG/JAAR) AAN DROGE STOF, ORGANISCHE STOF, N, P EN ZWARE METALEN IN AFGEVOERD
ZUIVERINGSSLIB EN CONCENTRATIES OP DS-BASIS. DATA AFKOMSTIG CBS STATLINE, WAARDEN VAN 2022 (CBS 2024)**

Parameter	Vracht (kg/jaar)	Concentratie	Eenheid
Nat slib*	1.299.154.000		-
Droge stof	300.041.000		-
Organische stof	210.103.000	70%	% ds
N	17.755.000	59,2	g/kg ds
P	11.004.000	36,7	g/kg ds
Cd	280	0,933	mg/kg ds
Cr	11.795	39,3	mg/kg ds
Cu	109.077	364	mg/kg ds
Hg	134	0,447	mg/kg ds
Ni	7.670	25,6	mg/kg ds
Pb	23.100	77,0	mg/kg ds
Zn	298.603	995	mg/kg ds
As	3.006	10,0	mg/kg ds

* Benaming zoals gebruikt door het CBS. Steekvast slib is een meer gebruikelijke term binnen de waterschappen

Bron: STOWA, 2025, Verkenning circulaire slibketen 2050

12.1.2 Medicijnresten in afvalwater

Tabel 8: Berekende influent- en effluentvrachten (in kg) totaal Vlaanderen op basis van metingen op 16 RWZI's in 2014

Medicijn	Influent vracht (kg)	Effluent vracht (kg)
Gabapentine	2.060	1.450
Iopromide	4.660	1.190
Amidotrizoïnezuur	1.530	1.070
Sotalol	1.090	955
Hydrochloorthiazide	1.030	927
Irbesartan	599	412
Carbamazepine	387	395
Diclofenac	423	392
Atenolol	608	235
Propranolol	946	190
Clindamycine	70,1	107
Sulfamethoxazol	255	102
Naproxen	1.120	97,2
Lidocaïne	87,6	86,7
Metoprolol	71,3	44,6
Bezafibraat	113	37,9
Ketoprofen	92,5	30,2
Iopamidol	8,37	4,11
Clozapine	11,5	3,68
Pentoxifylline	9,37	3,54
Fluoxetine	1,24	1,58
Trimethoprim	41,3	1,17
Dimetridazol	0,0498	0,0218
Fenazon	0,0	0,000977

Bron: VMM, 2017

12.2 RISICO-INHOUD VAN MENSELIJKE MEST

12.2.1 Pathogenen (Krause et al., 2021)

1112

Circular Economy and Sustainability (2021) 3:1107–1146

Table 1 Pathogens excreted with human feces and their epidemiological relevance according to the WHO [19]

Category	Epidemiological risk			
	High	Medium	Low	Indeterminate
Bacteria	Enterohaemorrhagic <i>E. coli</i> Enteropathogenic <i>E. coli</i> <i>Salmonella enterica</i> ser. Typhi <i>Shigella dysenteriae</i> <i>Shigella flexneri</i> <i>Shigella sonnei</i> <i>Vibrio cholerae</i> AMR ^a opportunistic pathogens	Enteroinvasive <i>E. coli</i> Enterotoxigenic <i>E. coli</i> <i>Yersinia enterocolitica</i>	<i>Campylobacter</i> spp. <i>Clostridium difficile</i> Other strains of <i>Salmonella</i>	Enteroagglomerative <i>E. coli</i> <i>Helicobacter pylori</i>
Viruses		Hepatitis A Hepatitis E Polioviruses	Adenoviruses Astroviruses Noroviruses Rotaviruses Sapoviruses <i>Cyclospora cayetanensis</i>	Enteroviruses
Protozoa	<i>Cryptosporidium</i> spp. <i>Entamoeba histolytica</i>	<i>Giardia intestinalis</i>		
Helminths	<i>Ascaris lumbricoides</i> (roundworm) <i>Ancylostoma duodenale</i> (hookworm) <i>Necator americanus</i> (hookworm) <i>Hymenolepis</i> spp. (dwarf tapeworm) <i>Schistosoma haematobium</i> (blood fluke) Other <i>Schistosoma</i> spp. <i>Strongyloides stercoralis</i> (roundworm) <i>Taenia solium</i> (pork tapeworm) <i>Taenia saginata</i> (beef tapeworm) <i>Trichuris trichiura</i> (whipworm)	<i>Diphyllobothrium latum</i>		Trematodes (flatworms), parasites or flukes

^a AMR, antimicrobial resistance

Table 2 Human urine-related pathogens and their epidemiological relevance [16, 19]

Category	Epidemiological relevance			
	High	Medium	Low	Indeterminate
Bacteria			Mycobacteria <i>Salmonella typhi</i> and <i>paratyphi</i> <i>Leptospira interrogans</i> Bacteria causing urinary tract infection ^a	
Viruses				Cytomegalovirus John Cunningham virus Humanes Polyomavirus Adenoviruses Hepatitis (probably low)
Fungi			Microsporidia	
Helminths	<i>Schistosoma haematobium</i>			

^a Bacteria causing urinary tract infection such as. *E. coli*, *Enterococcus fecalis*, and others []

Table 3 Heavy metal content in human urine, feces, and other waste streams or recycling fertilizers. The values are given as mean \pm standard deviation of a total of n values determined from the data in the sources. For urine, values are given in $\mu\text{g L}^{-1}$ of FM, for all other material flows in mg kg^{-1} of DM. Where source FM values related were converted to DM, Gaussian error propagation was applied

Material flow	Cr	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn
	$\mu\text{g L}^{-1}$ FM for urine; mg kg^{-1} DM for all other material flows					
Urine [11, 58–60]	<5 or 7.1 (n=2 or 1)	<0.2 or 0.7 (n=2 or 1)	<10 or 71.4 (n=2 or 1)	<10 (n=3)	<0.8 or 14 (n=3 or 1)	194 \pm 88 (n=3)
Feces [44, 59]	1.8 \pm 1.2 (n=3)	0.7 \pm 0.6 (n=2)	26.9 \pm 9.7 (n=2)	4.2 \pm 2.0 (n=3)	0.7 \pm 0.3 (n=3)	241 \pm 90 (n=3)
Sewage sludge [61, 62]	28.0 \pm 12.7 (n=2)	0.8 \pm 0.2 (n=2)	366 \pm 93 (n=2)	20 \pm 7 (n=2)	27 \pm 14 (n=2)	658 \pm 80 (n=2)
Cattle slurry [63, 64]	2.4 \pm 2.1 (n=3)	0.25 \pm 0.05 (n=2)	35.3 \pm 12.4 (n=4)	5.4 (n=1)	2.8 \pm 1.4 (n=4)	138 \pm 58 (n=4)
Pig manure [63, 64]	3.1 \pm 2.7 (n=4)	0.20 \pm 0.13 (n=3)	612 \pm 362 (n=4)	9.8 (n=1)	3.0 \pm 1.0 (n=4)	702 \pm 158 (n=4)
Organic waste compost [64–66]	24.9 \pm 3.3 (n=4)	0.5 \pm 0.2 (n=4)	52.4 \pm 12.6 (n=4)	15.8 \pm 3.5 (n=4)	40.1 \pm 12.5 (n=4)	204 \pm 54 (n=4)
Gardening waste compost [66–70]	29.5 \pm 28.1 (n=5)	0.32 \pm 0.06 (n=5)	36.4 \pm 27.2 (n=5)	16.5 \pm 10.2 (n=5)	24.1 \pm 5.6 (n=4)	161 \pm 116 (n=5)
Digestate compost [71–73]	28.7 \pm 27.1 (n=8)	0.8 \pm 0.6 (n=8)	50.3 \pm 14.1 (n=8)	17.3 \pm 13.0 (n=8)	53.5 \pm 45.4 (n=8)	251 \pm 66 (n=8)

Cd, cadmium; *Cr*, chromium; *Cu*, copper; *DM*, dry matter; *FM*, fresh matter; *Ni*, nickel; *Pb*, lead; *Zn*, zinc

12.2.3 Medicijnresten

Table 4 Ranges of concentrations of pharmaceutical residues in different substrates, where (n) depicts the number of data [11, 82, 99–104]

Pharmaceutical	Urine ^a			Liquid manure ^b			Sewage sludge ^b			P-ROC ^{a,c}			MAP			Soil		
	$\mu\text{g L}^{-1}$			$\mu\text{g kg}^{-1}$			$\mu\text{g kg}^{-1}$			$\mu\text{g kg}^{-1}$			$\mu\text{g kg}^{-1}$			$\mu\text{g kg}^{-1}$		
	Min	Max	Mean (n)	Min	Max	Mean (n)	Min	Max	Mean (n)	Min	Max	Mean (n)	Min	Max	Mean (n)	Min	Max	Mean (n)
17- α -Ethinylestradiol	<50																	
17- β -Estradiol																		
Bezafibrate	163	573	364 (3)	392 (1)														
Carbamazepine	0.25	124	22.8 (5)															
Chlortetracycline																		
Ciprofloxacin ^d																		
Clarithromycin	<1	300	17 (1)	28 (10)														
Diclofenac	0.25	56	18 (7)															
Enrofloxacin ^d																		
Fenofibrate																		
Ibuprofen	13	4 160	957 (7)															
Ketoprofen	<1	13.6	13.6 (3)															
Metoprolol																		
Naproxen	7.9	386	146 (4)															
Estrone	1.1	7.5	3.4 (4)															
Paracetamol	36	140	88 (2)															
Phenazone	2	4	3 (2)															
Progesterone	1.6	52	26.8 (2)															
Sulfadiazine																		
Sulfadimidine																		
Sulfamethoxazole	<2	6 800	14.2 (1)	20 (1)														
Tetracycline	36.2	2 300	1 168 (2)	66 000 (24)														
Trimethoprim	0.06	1 300	64 (3)	17 000 (4)														

^a Data retrieved from literature search. ^b Data retrieved from the UBA database "Pharmaceuticals in the environment" [105] with search terms provided in Appendix A2. The individual values taken from the database have different units: $\mu\text{g L}^{-1}$, $\mu\text{g kg}^{-1}$, $\mu\text{g kg}^{-1}$ DM, $\mu\text{g kg}^{-1}$ FM, or $\mu\text{g kg}^{-1}$ without specifying DM or FM (see also Appendix A2). To allow comparisons and to take into account the majority of values for which DM or FM is not specified, the values were listed in $\mu\text{g kg}^{-1}$ or $\mu\text{g L}^{-1}$. To compare $\mu\text{g L}^{-1}$ with $\mu\text{g kg}^{-1}$, we assumed 1 L urine corresponds to 1 kg material. We further assumed that the maximum values in sewage sludge, manure, and soil are related to kg DM. ^c Crystallization product of sewage sludge that may contain $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ and MAP [106]. DM dry matter; FM fresh matter; MAP magnesium ammonium phosphate; P-ROC P-recycling products from sewage sludge. ^d The human antibiotic ciprofloxacin is a degradation product of the veterinary drug enrofloxacin, which accumulates in the soil on application of liquid manure [87]

Bron: Krause et al. (2021)

TABEL Antibiotica residuen in mest per dier subcategorie op basis van de resultaten in Perceel 1. De gemiddelde waarden worden weergegeven, alsook de minimale (\geq LOD) en maximale concentraties, en het aantal stalen waarin een bepaald antibioticum werd gedetecteerd (\geq LOD). Gearceerd in oranje zijn waarden > 1 mg kg⁻¹. Gearceerd in geel zijn waarden $> 0,1$ mg kg⁻¹. De rode waarde voor sulfadiazine bij mestkalveren werd niet in rekening gebracht voor het bepalen van het gemiddelde. Nd staat voor niet gedetecteerd (alle stalen $<$ LOD).

Antibioticum	MESTKALVEREN			MESTVARKENS			ZEUGEN & BIGGEN		
	Gemiddelde $\mu\text{g kg}^{-1}$	Min - max $\mu\text{g kg}^{-1}$	Aantal %	Gemiddelde $\mu\text{g kg}^{-1}$	Min - max $\mu\text{g kg}^{-1}$	Aantal %	Gemiddelde $\mu\text{g kg}^{-1}$	Min - max $\mu\text{g kg}^{-1}$	Aantal %
Doxycycline	2776	441 - 10881	100	1145	5 - 7078	88	1642	5 - 13632	75
Oxytetracycline	4078	98 - 19522	100	48	3 - 2246	19	276	14 - 3865	19
Tetracycline	29	3 - 168	67	0	26	1	1	13	6
Chloortetracycline	nd	nd	0	1	59	1	0	4	6
Sulfadiazine	383	1 - 84084	89	42	1 - 1359	76	49	1 - 731	63
Sulfadoxine	3	1 - 10	56	0	1 - 11	4	0	5	6
Sulfamethazine	0	1	11	0	1 - 1	7	nd	nd	0
Trimethoprim	nd	nd	0	nd	nd	0	0	2	6
Lincomycine	35	3 - 141	100	75	3 - 1608	71	354	3 - 3154	88
Tilmicosine	143	2 - 1149	89	6	2 - 221	21	2	2 - 9	38
Tylosine	57	5 - 504	22	115	5 - 5599	15	nd	nd	0
Tulathromycine	nd	nd	0	1	10 - 42	4	7	38 - 80	13
Gamithromycine	0	2	11	0	10	1	nd	nd	0
Tylvalosine	5	44	11	nd	nd	0	1	8	6
Flumequine	536	1 - 4494	100	8	1 - 392	16	52	1 - 787	31
Marbofloxacin	12	2 - 39	78	0	2 - 13	10	15	2 - 112	56
Ciprofloxacin	48	2 - 234	100	0	2 - 8	7	0	2 - 2	13
Enrofloxacin	31	2 - 161	100	2	2 - 36	10	1	2 - 9	13
Danofloxacin	1	2 - 8	22	0	6	1	nd	nd	0
Neomycine	621	960 - 3186	33	nd	nd	0	nd	nd	0
Paromomycine	nd	nd	0	nd	nd	0	2	29	6
Gentamycine	nd	nd	0	0	21	1	nd	nd	0
Thiamuline	nd	nd	0	5	25 - 121	12	7	117	6

Bron: VMM, Emissies naar oppervlakte water van medicijnen uit veterinair gebruik, 2017

12.2.4 Pesticiden in koeienmest (Martine Bruinenberg, 2023)

		Aantal mestmonsters	Gemiddeld µg per kg DS	Stdev	Max µg per kg DS
<i>Cypermethrin</i>	<i>I</i>	20	7,0	5,2	20,2
<i>Deltamethrin</i>	<i>I</i>	12	9,1	7,1	25,0
<i>Piperonylbutoxide</i>	<i>S</i>	20	10,3	12,2	46,4
<i>Fthalamide (afbr. folpet)</i>	<i>F</i>	36	4,3	2,0	10,5
<i>Imazalil</i>	<i>F</i>	16	22,4	17,9	53,4
<i>Tebuconazool</i>	<i>F</i>	5	7,2	7,5	17,8
<i>Dicamba</i>	<i>H</i>	2	21,7	5,0	25,2
<i>Flufenacet</i>	<i>H</i>	6	1,6	0,3	2,1
<i>Fluroxypyr</i>	<i>H</i>	8	4,6	5,5	16,3
<i>Fluthiacet-methyl*</i>	<i>H</i>	3	4,8	1,9	6,7
<i>MCPA</i>	<i>H</i>	12	7,3	10,6	33,4
<i>Glyfosaat</i>	<i>H</i>	22	512	450	2133
<i>AMPA</i>	<i>H</i>	19	201	136	583

**middelen die niet (meer) toegelaten zijn in Nederland.*

12.2.5 Pesticiden in menselijke urine (BMH_Wal, 2025)

	N _{tot}	LOQ	N<LOQ	VR95
GLYPHOSATE ET METABOLITE (µg/L)				
Glyphosate				
Total	302	0.08	81.5%	0.13
AMPA				
Total	302	0.15	91.1%	-
PESTICIDES ORGANOPHOSPHORES (µg/L)				
DEP				
Total	295	0.50	17.3%	8.1
DETP				
Total	301	0.50	93.4%	-
DEDTP				
Total	301	0.50	100%	-
DMTP				
Total	301	0.50	59.1%	2.9
DMDTP				
Total	301	0.50	91.4%	0.55
TCPY				
Total	300	0.08	9.7%	1.0
PESTICIDES PYRETHRINOIDES (µg/L)				
c-DCCA				
Total	300	0.20	76.3%	0.72
t-DCCA				
Total	300	0.15	41.3%	1.7
DBCA				
Total	300	0.30	58.0%	1.7
3-PBA				
Total	300	0.09	11.3%	2.5
4-F-3-PBA				
Total	300	0.11	98.0%	-

VR95: Het percentiel dat wordt gebruikt om de referentiewaarde vast te stellen (aangeduid met VR95) is het 95e percentiel en het bijbehorende 95%-betrouwbaarheidsinterval. Er kan geen referentiewaarde worden vastgesteld als de ondergrens van het P95-betrouwbaarheidsinterval kleiner is dan de kwantificeringslimiet.

12.2.6 Nutriënten-inhoud (Krause et al., 2021)

1120

Circular Economy and Sustainability (2021) 3:1107–1146

Table 5 Nutrient contents in human urine, feces, and other waste streams or recycling fertilizers. The values correspond to the mean \pm standard deviation determined from the data in the sources. For urine, values are given in g L^{-1} of FM; for all other material flows in g kg^{-1} of DM. Where source FM values were converted to DM, Gaussian error propagation was applied

Material flow	N	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	P	K	Mg	Ca
	g L^{-1} FM for urine, or g kg^{-1} DM for all other material flows					
Urine [4, 8, 11, 44, 58, 60, 125, 126]	7.1 \pm 3.5 (n=22)	0.58 \pm 0.49 (n=6)	0.8 \pm 0.6 (n=15)	1.5 \pm 0.7 (n=14)	0.06 \pm 0.05 (n=6)	0.10 \pm 0.09 (n=6)
Feces [8, 44, 126, 127]	28.2 \pm 8.0 (n=8)	n.d.	7.8 \pm 2.9 (n=14)	10.3 \pm 4.0 (n=15)	3.4 \pm 2.3 (n=5)	17.7 \pm 9.4 (n=7)
Sewage sludge [62, 64, 69]	48.7 \pm 8.5 (n=3)	11 (n=1)	26.4 \pm 5.7 (n=3)	3.0 \pm 0.6 (n=2)	4.3 (n=1)	38.6 (n=1)
Cattle slurry [11, 64, 128]	43.8 \pm 5.3 (n=2)	25.6 (n=1)	7.9 \pm 1.2 (n=2)	48.7 \pm 4.3 (n=2)	4.8 (n=1)	12.8 (n=1)
Pig manure [11, 64, 128]	82.8 \pm 15.2 (n=2)	62.5 (n=1)	23.2 \pm 1.6 (n=2)	43.7 \pm 10.1 (n=2)	8.4 (n=1)	12.0 (n=1)
Bio-waste compost [64, 66, 127–129]	10.0 \pm 7.9 (n=5)	1.1 \pm 0.3 (n=2)	3.0 \pm 2.5 (n=6)	7.9 \pm 5.5 (n=6)	5.8 \pm 8.3 (n=4)	90 (n=1)
Garden waste compost [26, 66, 68, 70, 128, 130, 131]	10.7 \pm 2.5 (n=7)	0.22 \pm 0.15 (n=2)	2.3 \pm 0.8 (n=7)	8.0 \pm 1.9 (n=7)	5.3 \pm 2.3 (n=6)	25.3 \pm 12.3 (n=4)
Digestate compost [72, 73, 132–134]	38.0 \pm 15.0 (n=9)	2.8 \pm 2.8 (n=9)	10.0 \pm 5.5 (n=9)	19.2 \pm 9.4 (n=9)	4.1 \pm 1.4 (n=7)	43.7 \pm 18.6 (n=7)

DM dry matter, FM fresh matter, n.d. no data

Table 7 Nutrient contents in human urine and feces and in additives used for composting. The values are given as mean \pm standard deviation determined from the data in the sources. Where source FM values were converted to DM, Gaussian error propagation was applied

Material flow	C	N	NH ₄ ⁺ -N	P	K	Mg	Ca
	g L ⁻¹ FM for urine, or g kg ⁻¹ DM for all other materials						
Urine [4, 8, 11, 44, 58, 60, 125, 126]	7.3 \pm 0.7 (n=2)	7.1 \pm 3.5 (n=22)	0.6 \pm 0.5 (n=6)	0.8 \pm 0.6 (n=15)	1.5 \pm 0.7 (n=14)	0.06 \pm 0.05 (n=6)	0.10 \pm 0.09 (n=6)
Feces [8, 44, 126, 127]	370 \pm 110 (n=1)	28.2 \pm 8.0 (n=8)	n.d.	7.8 \pm 2.9 (n=14)	10.3 \pm 4.0 (n=15)	3.4 \pm 2.3 (n=5)	17.7 \pm 9.4 (n=7)
Food waste (generic) [63, 125, 161–164]	440 \pm 63 (n=1)	22.3 \pm 7.4 (n=12)	n.d.	3.7 \pm 1.1 (n=12)	8.7 \pm 4.8 (n=14)	1.8 \pm 0.9 (n=13)	15.7 \pm 9.0 (n=13)
Sawdust (generic) [126]	488 \pm 4 (n=26)	2.6 \pm 0.5 (n=21)	n.d.	0.44 \pm 0.09 (n=7)	n.d.	n.d.	n.d.
Biochar (generic) [126]	735 \pm 11 (n=75)	3.7 \pm 0.5 (n=69)	n.d.	2.0 \pm 1.5 (n=16)	n.d.	n.d.	n.d.

DM dry matter, FM fresh matter, n.d. no data

12.2.7 PFAS in bloed

TABLEAU 13 : STATISTIQUES DESCRIPTIVES DES PFAS DANS LE SANG (µg/L)

	N _{tot}	LOQ	N<LOQ	MG (95% IC)	P5	P25	P50	P75	P95 (95% IC)	p z-test	VR95
PFAS (µg/L)											
PFHxA											
Total	302	0.10	100%				<LOQ				
PFHpA											
Total	302	0.10	99.7%				<LOQ				
PFOA											
Total	302	0.50	11.6%	1.00 (0.92-1.07)	<LOQ	0.74	1.06	1.51	2.54 (2.29-3.55)		
Genre (p=0.0036)											
Femme	157	0.50	11.5%	0.92 (0.83-1.02)	<LOQ	0.69	0.96	1.30	2.42 (2.10-3.55)	ns	2.5
Homme	145	0.50	11.7%	1.08 (0.97-1.21)	<LOQ	0.81	1.19	1.68	2.85 (2.29-3.66)		
PFNA											
Total	302	0.10	2.6%	0.37 (0.35-0.40)	0.14	0.26	0.39	0.53	0.98 (0.87-1.15)		0.98
PFDA											
Total	302	0.10	21.9%	0.16 (0.15-0.17)	<LOQ	0.11	0.17	0.25	0.49 (0.42-0.60)		0.49
PFHxS											
Total	302	0.15	3.6%	0.71 (0.66-0.78)	0.21	0.47	0.79	1.18	2.01 (1.74-2.31)		
Genre (p<0.0001)											
Femme	157	0.15	5.1%	0.57 (0.51-0.65)	0.17	0.38	0.62	0.94	1.75 (1.32-2.15)	0.0031	2.0
Homme	145	0.15	2.1%	0.90 (0.81-1.01)	0.30	0.66	1.02	1.34	2.24 (1.80-3.35)		
PFOS											
Total	302	0.50	3.3%	2.37 (2.17-2.59)	0.70	1.53	2.51	3.96	8.61 (6.84-10.2)		8.6
Genre (p=0.0005)											
Femme	157	0.50	5.1%	2.04 (1.79-2.31)	0.51	1.38	2.11	3.48	6.57 (5.36-8.67)	0.0009	6.5
Homme	145	0.50	1.4%	2.80 (2.49-3.15)	0.83	1.75	2.84	4.26	9.53 (7.49-11.4)		9.5

La différence entre les catégories (M-W) est considérée comme significative pour p<0.05 tandis que la différence entre les VR95 (z-test) est considérée significative pour p<0.001. Pour les z-tests, la p-value est indiquée quand p<0.05 ; ns "non significatif" est mentionné lorsque p>0.05.

Bron: BHM_Wal 3

12.2.8 PAK's, dioxines,... in compost

Table 2
Results of all measured chemical and biological data for 17 selected compost samples.

Sample no.	∑12 US-EPA PAHs (µg kg ⁻¹)	∑19 PAHs (µg kg ⁻¹)	TEQ _{DHHC} (µg kg ⁻¹)	∑PCDDs/Fs (µg kg ⁻¹)	TEQ _{H4HE} PCDDs/Fs-UB (µg kg ⁻¹)	∑DL-PCBs (µg kg ⁻¹)	TEQ _{H4HE} DL-PCBs-UB (µg kg ⁻¹)	TEQ _{bio} (µg kg ⁻¹)	∑6PCB ind. (µg kg ⁻¹)	∑DDT (µg kg ⁻¹)	∑HCH (µg kg ⁻¹)	HCb (µg kg ⁻¹)	PeCB (µg kg ⁻¹)
1A	1.6E+03	1.7E+03	2.1E-01	4.1E-01	8.0E-03	3.3E+00	1.2E-03	2.7E+00	2.2E+01	5.6E+01	5.9E-01	3.2E-01	9.1E-02
2A	1.0E+03	1.2E+03	2.0E-01	9.7E-02	4.5E-03	1.9E+00	8.1E-04	5.2E-01	1.8E+01	2.2E+00	7.8E-01	6.4E-01	6.2E-02
3A	1.6E+03	1.7E+03	1.6E-01	2.3E-01	6.1E-03	4.2E+00	1.5E-03	3.3E+00	2.7E+01	1.7E+01	5.6E-01	1.1E+00	3.3E-01
4A	2.6E+03	3.0E+03	3.6E-01	2.2E-01	7.0E-03	5.0E+00	9.3E-04	2.0E+00	4.4E+01	5.2E+00	5.5E-01	1.6E-01	3.9E-02
1B	1.5E+03	1.8E+03	2.5E-01	1.3E-01	5.0E-03	2.7E+00	9.8E-04	3.8E+00	1.8E+01	1.2E+01	9.2E-01	4.0E-01	1.8E-01
2B	4.2E+02	5.0E+02	8.5E-02	1.7E-01	7.7E-03	1.7E+00	1.0E-03	6.5E-01	1.5E+01	2.1E+00	5.7E-01	3.6E-01	8.1E-02
1C	9.1E+03	1.1E+04	2.0E+00	4.0E-02	1.6E-02	2.0E+00	6.9E-02	4.4E+00	1.0E+01	1.4E+01	1.1E+01	3.9E-01	8.8E-02
2C	1.4E+03	1.5E+03	1.8E-01	1.2E-01	9.4E-03	4.0E+00	2.4E-03	1.1E+00	3.4E+01	6.3E+00	6.0E-01	4.6E-01	8.1E-02
3C	8.5E+02	9.4E+02	1.5E-01	3.4E-01	1.1E-02	6.1E+00	1.6E-03	1.8E+00	2.9E+01	9.7E+00	6.4E-01	2.5E-01	9.2E-02
1D	6.2E+02	7.0E+02	1.1E-01	2.3E-01	5.5E-03	5.0E+00	6.8E-04	1.3E+00	2.1E+01	8.9E+00	5.8E+00	1.5E-01	5.9E-02
2D	2.0E+03	2.2E+03	3.0E-01	4.7E-01	8.3E-03	2.2E+00	3.9E-04	9.6E-01	1.4E+01	6.8E+00	4.1E+00	4.7E-01	6.7E-02
1F	8.3E+02	9.3E+02	1.2E-01	9.0E-03	1.5E-02	1.1E-01	6.0E-05	3.4E-01	9.8E-01	1.3E+00	3.4E+00	6.9E-02	4.9E-02
2F	1.1E+03	1.2E+03	1.3E-01	1.4E-02	1.5E-02	1.7E+00	4.7E-04	4.6E-01	1.1E+01	1.6E+00	4.2E-01	3.6E-01	2.8E-01
1G	6.8E+02	7.4E+02	1.2E-01	7.0E-03	1.9E-02	5.3E-01	2.1E-04	9.0E-02	8.5E+00	4.9E-01	5.9E-01	1.5E-01	1.0E-01
1H	1.3E+03	1.6E+03	3.0E-01	7.7E-02	3.8E-03	1.4E+00	2.8E-04	1.3E+00	1.0E+01	1.9E+00	4.4E-01	1.5E+00	1.9E-01
2H	1.2E+03	1.4E+03	1.8E-01	2.7E-01	7.7E-03	8.3E+00	1.0E-03	1.2E+00	3.0E+01	9.4E+00	6.1E-01	1.9E-01	7.6E-02
1I	2.3E+04	2.6E+04	2.8E+00	5.4E-01	2.0E-02	4.1E+00	1.3E-03	8.2E+00	3.0E+01	6.8E+00	2.3E+00	5.9E+00	3.4E-01

A - biobin + green waste compost, B - green waste compost, C - sewage sludge compost, D - MBT compost, F - manure + biowaste digestate, G - manure + energy crops digestate, H - MBT digestate, I - other; PAHs - polycyclic aromatic hydrocarbons; TEQ - toxic equivalent of 2,3,7,8 tetrachlorodibenzo-*p*-dioxin; PCDDs/Fs - polychlorinated dibenzodioxins/furans; DL-PCB - dioxin-like polychlorinated biphenyls; DDT - dichlorodiphenyltrichloroethane; HCB - hexachlorobenzene; PeCB - pentachlorobenzene; HCH - hexachlorocyclohexane; TEQ_{PAH} - toxic equivalent of 2,3,7,8 TCDD for PAHs calculated from analytical results and induction equivalency factors for PAHs, TEQ_{bio} - toxic equivalent of 2,3,7,8 TCDD calculated from bioassay results; TEQ_{H4HE} - toxic equivalent of 2,3,7,8 TCDD calculated from analytical results and relative potencies (REPs) of PCDDs/Fs or DL-PCBs.

Bron: Benisek et al., 2014

12.3 RISICO-INHOUD VAN COMPOST VAN MENSELIJKE MEST

12.3.1 Pathogenen in compost van menselijke mest (TDM, 2017)

Tabel 25 Kenmerken en resultaten van verschillende composteringen van menselijke mest afkomstig van festivals in Frankrijk

Kenmerken	Eenheid	Compostering door toiletaanbieder	Collectief-private compostering
Festivals:			
- aantal	#	4	3
- bezoekers	#/avond	600 – 6.000 (3 tot 4 dagen)	3.000 – 10.000 (1 tot 3 dagen)
- droogtoiletten	type	Strooiseltoilet (zelf strooien)	Strooiseltoilet (zelf strooien)
- urinoirs	type	Opvang met strooisel	Opvang zonder strooisel
Composteerinrichting:			
- composteersites	#	2	2
- waterdichte vloer/ overkapping	J/N	Neen Neen	Ja Neen
- verwerkt volume (totaal onderzochte festivals)	M ³	10,3	19,7
- verwerking (totaal van de sites)	T/jaar	95	300
Procesbeheer:			
- toevoegstoffen	aard	Stro of moestuinafval	Strooisel kippenstal of gehakseld snoeihout
- toevoegstoffen/ menselijke mest	ratio	2 - 4,7	12,9 – 14,4
- omzettingen compost	aantal	0 – 1	12 - 18
- totale compostduur	maanden	24	5 – 8 (+ opslag 0 – 3)
- vochtmeting / regulatie	J/N	N/ N	J/ J
zeefmachine/ handmatig	J/N	N/ J	J/ N
Resultaten:			
- temperatuur >60°C	weken	12/ 5/ 0/ ?	5/ 12
maximum temperatuur	°C	74/ 70/ 49/ ?	80/ 73
- volume menselijke mest	M ³	3,2/ 5,6/ 1,5/ ?	10,4/ 9,3

- vochtigheidsgraad	% (4m)	65 – 80	30 – 40
	% (12m)	70 – 80	45 – 50
- C/N (na 12 maanden)	ratio	20 – 25	12 – 15
- E.coli	KVE/g (4m)	100 – 1.000	10 – 100
	KVE/g (12m)	100 – 8.000	?
- Enterokokken	KVE/g (4m)	100 – 600	600 – 6.000
	KVE/g (12m)	100 – 100	?
- C.perfringens	KVE/g (4m)	100 – 1.000	100
	KVE/g (12m)	100 – 10.000	?
- ASR	KVE/g (4m)	600 – 8.000	200 – 1.000
	KVE/g (12m)	4.000 – 300.000	?

Bron: verwerking van TDM (2017)

12.3.2 Medicijnresten in gecomposteerd rioolslib (Dalahmeh et al., 2022)

Table 4

First-order exponential decay model parameters for hormones, antibiotics and other pharmaceuticals (PhACs) during 363 days of degradation in open air storage with composting in windrow (COM).

Substance	C ₀ (ng/g ash)	K ^a (Day ⁻¹)	Half-life (t _{1/2} ; days)	R ²
Hormones				
Estrogen ^c	878.2	0.0069	100.4	0.5649
Estradiol ^c	41.86	0.0334	20.79	0.7683
17 α -ethinyl estradiol ^b	27.81	0.0342	20.28	0.2956
Antibiotics				
Benzylopenicillin ^b	–	–	–	–
Rifampicin	–	–	–	–
Sulfamethoxazole	8.285	0.0137	50.56	0.7405
Ciprofloxacin	516.3	0.1049	6.607	0.7698
Clarithromycin	12.8	0.0207	33.56	0.9385
Clindamycin	77.58	0.0190	36.49	0.7587
Erythromycin ^b	1.451	0.0268	25.83	0.2468
Linezolid	0.1578	–0.0085	–81.49	0.9142
Metronidazole ^b	–	–	–	–
Moxifloxacin	63.38	0.0104	66.57	0.7023
Trimethoprim	–	–	–	–
Ofloxacin	143.4	0.0733	9.455	0.9089
PhACs				
Amlodipine	442.2	0.0729	9.512	0.8971
Atenolol	–	–	–	–
Bisoprolol	65.78	0.0282	24.59	0.8091
Caffeine ^b	579.2	0.0037	187.9	0.3117
Carbamazepine	466.5	0.0248	28	0.8417
Citalopram	3055	0.0205	33.76	0.8142
Diazinon	–	–	–	–
Diclofenac	468.6	0.0224	30.91	0.7911
Fluoxetine	515	0.0261	26.56	0.8027
Furosemide	5.281	0.0081	86.02	0.8471
Hydrochlorothiazide	27.66	0.0716	9.685	0.9165
Ibuprofen	722.5	0.0045	155.7	0.7419
Ketoprofen	33.55	0.0085	82.02	0.7915
Metformin ^b	17.37	0.0028	–247.7	0.2813
Metoprolol	1379	0.0322	21.53	0.7956
Naproxen ^b	–	–	–	–
Norephedrine	60.32	0.0102	67.86	0.778
Omeprazole	2.946	0.0081	85.41	0.7439
Oxazepam	73.01	0.0805	8.616	0.9207
Paracetamol ^b	304	0.007	99.59	0.1911
Propranolol	348.7	0.0287	24.14	0.8399
Ramipril	–	–	–	–
Ranitidine	8.674	0.0076	90.66	0.7986
Risperidone	–	–	–	–
Sertraline	4403	0.0277	24.99	0.89
Terbutaline	–	–	–	–
Tramadol	495	0.0312	22.21	0.8928
Venlafaxine	299.3	0.0149	46.53	0.8605
Warfarin	–	–	–	–
Zolpidem	17.97	0.012	57.97	0.8689

^a A minus sign of rate constant K implies degradation.

^b The regression models did not show good fit with the measured data.

^c Degradation of estrogen and estradiol was modeled using data for days 26–363 for estrogen and estradiol, during which these hormones showed decay after an initial increase in concentration.

12.3.3 Medicijnresten in compost van menselijke mest (Häfner et al., 2023)

TABLE 7 Pharmaceutical and other chemical compounds detected in fecal compost, by means of an initial screening of 310 compounds, followed by a targeted analysis of specific compounds.

Compound	Class	Initial screening	Targeted analysis
<i>Pharmaceutical, $\mu\text{g kg}^{-1}$ DM</i>			
Diphenhydramine	Antihistaminic	108.1	0.833
Salicylic acid	Wound-healing, antiseptic	48.7	10.9
Gemfibrozil	Lipid regulator	45.9	<LOD
Allopurinol	Anti-gout	20.6	10.7
acetaminophen	Analgesic, antipyretic	5.4	1.23
Naproxen	Analgesic, anti-inflammatory	2.8	
Clotrimazole	Antimycotic	2.3	2.8
CBZ	Antiepileptic, antidepressant	1.4	7.767
CBZ_Epox	CBZ derivate	NM	2.200
CBZ_Dihyd	CBZ derivate	NM	0.133
Ibuprofen	Analgesic, anti-inflammatory	ND	0.8
Nitrendipine	Calcium channel antagonist	1.1	NM
Piperine	Analgesic, anti-inflammatory	1	NM
Fluconazole	Antimycotic	0.9	NM
Clarithromycin	Antibiotic	ND	<LOD
Sulfamethoxazole		ND	<LOD
Ciprofloxacin		ND	<LOD
Enrofloxacin		ND	<LOD
Amoxicillin		ND	<LOD
Penicillin		ND	<LOD
Trimethoprim	Antibiotic, often combined with sulfamethoxazole	NM	<LOD
Diclofenac	Analgesic	ND	<LOD
Dienogest	Synthetic gestagen, common component of contraceptive pill	NM	<LOD
Methyltestosterone	Synthetic steroid hormone	NM	<LOD
<i>Other, $\mu\text{g kg}^{-1}$ DM</i>			
DEET	Insect repellent	16.1	NM
2-Benzothiazolesulfonic acid	Rubber additive TP	15.1	NM
Octyl-methoxycinnamate	UV filter	11.8	NM
Triethyl phosphate	Plasticizer, flame retardant	11.6	NM
Caffeine	Methylxanthine (central nervous system stimulant)	11.4	26.1
5-Methyl-1H-benzotriazole	Corrosion inhibitor	10.7	NM
N-Cyclohexyl-2-benzothiazole-sulfenamide	Rubber additive	10.3	NM
Tris (2-chloroethyl)phosphate	Plasticizer, flame retardant	7.5	NM
Tricresyl phosphate	Plasticizer, flame retardant	7.2	NM

CBZ, carbamazepine; LOD, limit of detection; ND, not detected; NM, not measured.

12.3.4 Medicijnresten in compost van menselijke mest (Carpentier, 2025)

| VaLoo Impact Projekt Kompostiering - Anhang E

Resultate Arzneimittelrückstände Gebündelt Uster1 und Uster2

Labor				Nybom			Jenabios	
# Substanzen im Screenset				22			100	
# Wiederholungen (n)				4			1	
Charge				Uster1			Uster2	
Analyse DIN SPEC und Funde in Screensets	Substanz	Einheit	Grenz- oder Richtwert	Grünkompost start ohne TTI	TTI	Reifer Kompost	TTI	Reifer Kompost
Anteil TTI (Trockentabletteninhalte)		vol% TTI		0	100	16	100	0.13
TS (ODER Umrechnung von Originalsubstanz zu TS)		%		TS	TS	TS	37.05%	41.05%
				mg/kg +/- sd mg/kg TS			mg/kg TS	
DinSpec91421	Ciprofloxacin (Antibiotikum)	mg/kg TS	NA = not available	nd	0.0707 +/- 0.007.1	nd = not detected	nd	nd
	Clarithromycin (Antibiotikum)	mg/kg TS	NA	nd	0.0004 +/- 0.000.1	<0.0001 (<Bestimmungsgrenze)	nd	nd
	Carbamazepin (Antiepileptisch Mittel)	mg/kg TS	NA	nd	0.1437 +/- 0.0259	0.0233 +/- 0.6 (average, n=4)	nd	nd
	Diclofenac (Antirheumatika)	mg/kg TS	NA	nd	0.0938 +/- 0.0176	nd	nd	nd
	Ethinylestradiol (Hormon)	mg/kg TS	NA	nicht bestimmt	nicht bestimmt	nicht bestimmt	<14	<5
Nybom screening positive	Trimethoprim	mg/kg TS	NA	nd	0.0187 +/- 0.0037	nd		
	Sulfamethazine	mg/kg TS	NA	0.0072 +/- 0.0006	nd	0.0019 +/- 0.0012		
	Sulfamethoxazole	mg/kg TS	NA	nd	0.0032 +/- 0.0004	nd		
	Sulphapyridine	mg/kg TS	NA	nd	0.0079 +/- 0.0017	nd		
	Hydrochlorothiazide	mg/kg TS	NA	nd	0.0865 +/- 0.0142	nd		
Ritonavir	mg/kg TS	NA	nd	0.0095 +/- 0.0022	0.0040 +/- 0.0002			
Jenabios screening positive	Cotinin	mg/kg TS	NA				0.65	0.17
	Doxycyclin	mg/kg TS	NA				0.03	nd
	Ibuprofen	mg/kg TS	NA				0.14	0.04
	Metoprolol	mg/kg TS	NA				0.02	nd
	Nicotin	mg/kg TS	NA				1.19	0.49
	Paracetamol	mg/kg TS	NA				0.32	nd

12.4 WETGEVING IN BELGIË

12.4.1 VLAREMA, Bijlage 2.3.1.A en Bijlage 2.3.1.B

7.2.2 Samenstellingsvoorwaarden maximum gehalten aan verontreinigende stoffen (VLAREMA Bijlage 2.3.1.A en Bijlage 2.3.1.B)

	Stromen ≥ 2% droge stof		Stromen < 2% droge stof	
	Totaal- concentratie	Eenheid	Totaal- concentratie	Eenheid
METALEN^{2,3}				
Arseen	20	mg/kg DS ⁴	0,4	mg/liter
Cadmium	6	mg/kg DS	0,12	mg/liter
Chroom	150	mg/kg DS	3	mg/liter
Koper	800	mg/kg DS	16	mg/liter
Kwik	1	mg/kg DS	0,02	mg/liter
Lood	300	mg/kg DS	6	mg/liter
Nikkel	100	mg/kg DS	2	mg/liter
Zink	1500	mg/kg DS	30	mg/liter
POLYCYCLISCHE AROMATISCHE KOOLWATERSTOFFEN				
Acenafteen	10	mg/kg DS	200	µg/liter
Acenaftyleen	10	mg/kg DS	200	µg/liter
Antraceen	5	mg/kg DS	100	µg/liter
Benzo(a)anthraceen	3	mg/kg DS	60	µg/liter
Benzo(a)pyreen	3	mg/kg DS	60	µg/liter
Benzo(g,h,i)peryleen	5	mg/kg DS	100	µg/liter
Benzo(b)fluorantheen	10	mg/kg DS	200	µg/liter
Benzo(k)fluorantheen	5	mg/kg DS	100	µg/liter
Chryseen	3	mg/kg DS	60	µg/liter
Dibenzo(a,h)antraceen	5	mg/kg DS	100	µg/liter
Fenantreen	10	mg/kg DS	200	µg/liter
Fluoranteen	10	mg/kg DS	200	µg/liter
Fluoreen	10	mg/kg DS	200	µg/liter
Indeno(1,2,3c,d)pyreen	5	mg/kg DS	100	µg/liter
Naftaleen	3	mg/kg DS	60	µg/liter
Pyreen	3	mg/kg DS	60	µg/liter
OVERIGE ORGANISCHE STOFFEN³				
Som van 1,2,3,5- Tetrachloorbenzeen en 1,2,4,5- Tetrachloorbenzeen	4	mg/kg DS	80	µg/liter
1,2,3,4-Tetrachloorbenzeen	2	mg/kg DS	40	µg/liter
Pentachloorbenzeen	1,5	mg/kg DS	30	µg/liter
Hexachloorbenzeen	0,5	mg/kg DS	10	µg/liter
Minerale olie C10-C20	560	mg/kg DS	11,2	mg/liter
Minerale olie C20-C40	5600	mg/kg DS	112	mg/liter
Polychloorbifenylen (PCB als som 7 congeneren)	0,6	mg/kg DS	12	µg/liter

Bron: Algemeen Reglement van de Certificering voor de biologische verwerking van organisch-biologisch afval tot grondstof (meststof of bodemverbeterend middel) – januari 2019

12.4.2 Vlaams regelement voor de certificering (MB 14 februari 2019)

7.2.3 Normen en kwaliteitsdoelstelling per producttype

7.2.3.1 Gft-compost en gft-compost van vergisting met nacompostering

	KDS ⁵	Percentiel- getal	Referentie- norm	FOD- Norm	Eenheid
Algemene parameters					
Droge stof ⁶	>50	20	>45	>50	gew%
Organische stof	>16	20	>14	>16	gew%
pH (water)	-	-	6,5 - 9,5	6,5 - 9,5	-
Gehaltes aan zware metalen					
Arseen	<15	75	<20	<20	mg/kg DS
Cadmium	<1,5	75	<2	<2	mg/kg DS
Chroom	<70	75	<70	<100	mg/kg DS
Koper	<90	75	<150	<150	mg/kg DS
Kwik	<1	75	<1	<1	mg/kg DS
Lood	<120	75	<150	<150	mg/kg DS
Nikkel	<20	75	<30	<50	mg/kg DS
Zink	<300	75	<400	<400	mg/kg DS
onzuiverheden, steentjes en kiemkrachtige zaden					
Onzuiverheden > 2 mm	<0,5	75	<0,5	<0,5	gew% DS
Steentjes >5 mm	<2,0	75	<4	<2,0	gew%
Kiemkrachtige zaden ⁷	<1	90	Max. 1	<1	#/0,5l
Stabiliteit⁸					
Rijpheidsgraad (temperatuur)	<40	80	<45	<40	°C
Zuurstofconsumptie (Oxitop®)	10	80	15		mmol O ₂ /kg O ₂ /h
Salmonella			afwezig		/25g

Productnormen – ter plaatse te beoordelen: Uitzicht: product moet los en rul zijn (geen te natte of gecompacteerd massa) en te noteren op monsternemingsformulier.

7.2.3.2 Groencompost

	KDS ⁹	Percentiel- getal	Referentie- norm	FOD- Norm	Eenheid
Algemene parameters					
Droge stof ¹⁰	>50	20	>45	>50	gew%
Organische stof	>16	20	>14	>16	gew%
pH (water)	-	-	6,5 - 9,5	6,5 - 9,5	-
Gehaltes aan zware metalen					
Arseen	<15	75	<20	<20	mg/kg DS
Cadmium	<1,5	75	<2	<2	mg/kg DS
Chroom	<70	75	<70	<100	mg/kg DS

⁵KDS = Kwaliteitsdoelstelling

⁶Voor compost met een gemiddeld gehalte aan organische stof op droge stof van meer dan 38 % en voor zover het uitzicht van het product ok blijft (los, rul, geen compacte massa) wordt de KDS > 50% en de norm > 40%.

⁷Opm.: als P-90 voor kiemkrachtige zaden = 1, dan voldoet het resultaat NIET aan de KDS

⁸In de eerste plaats moet voldaan worden aan de eisen voor rijpheidsgraad, indien dit niet het geval is gebeurt de beoordeling op basis van Oxitop®

⁹KDS = Kwaliteitsdoelstelling

¹⁰Voor compost met een gemiddeld gehalte aan organische stof op droge stof van meer dan 38 % en voor zover het uitzicht van het product ok blijft (los, rul, geen compacte massa) wordt de KDS > 50% en de norm > 40%.

Koper	<90	75	<150	<150	mg/kg DS
Kwik	<1	75	<1	<1	mg/kg DS
Lood	<120	75	<150	<150	mg/kg DS
Nikkel	<20	75	<30	<50	mg/kg DS
Zink	<300	75	<400	<400	mg/kg DS
onzuiverheden, steentjes en kiemkrachtige zaden					
Onzuiverheden > 2 mm	<0,5	75	<0,5	<0,5	gew% DS
Steentjes >5 mm	<2,0	75	<4	<2,0	gew%
Kiemkrachtige zaden ¹¹	<1	90	Max. 1	<1	#/0,5l
Stabiliteit ¹²					
Rijpheidsgraad (temperatuur)	<30	80	<40	<30	°C
Zuurstofconsumptie (Oxítóp®)	10	80	15		mmol O ₂ /kg OS/h
Salmonella			afwezig		/25g

Productnormen – ter plaatse te beoordelen: Uitzicht: product moet los en rul zijn (geen te natte of gecompacteerd massa) en te noteren op monsternemingsformulier.

7.2.3.3 Digestaat(producten)

	Referentie-norm ¹³	FOD-Norm (ruw digestaat)	Eenheid
Algemene parameters			
pH (water)	≥6	≥6	-
Gehaltes aan zware metalen			
Arseen	<20	<150	mg/kg DS
Cadmium	<2	<6	mg/kg DS
Chroom	<100	<500	mg/kg DS
Koper	<800	<600	mg/kg DS
Kwik	<1	<5	mg/kg DS
Lood	<150	<500	mg/kg DS
Nikkel	<50	<100	mg/kg DS
Zink	<1500	<2000	mg/kg DS
onzuiverheden, steentjes en kiemkrachtige zaden			
Onzuiverheden > 2 mm ¹⁴	<0,5	<0,5	gew% DS
Steentjes >5 mm ¹⁵	<2,0	<2,0	gew%
Kiemkrachtige zaden	Max. 1		#/0,5l
Stabiliteit			
Zuurstofconsumptie (Oxítóp®)	50		mmol O ₂ /kg OS/h
Salmonella	afwezig		/25g

Productnormen – ter plaatse te beoordelen: Uitzicht, homogeniteit, geur (te noteren op monsternemingsformulier)

¹¹ Opm.: als P-90 voor kiemkrachtige zaden = 1, dan voldoet het resultaat NIET aan de KDS

¹² In de eerste plaats moet voldaan worden aan de eisen voor rijpheidsgraad, indien dit niet het geval is gebeurt de beoordeling op basis van Oxítóp®

¹³ Als het droge stofgehalte kleiner is dan 2%, wordt de referentienorm omgerekend naar een waarde uitgedrukt in mg/l

¹⁴ Als onzuiverheden bepaald zijn in ruw digestaat, kan deze parameter worden weggelaten bij de analyse van de dunne fractie, concentraat en effluent na biologie. Bij de analyse van vloeibare digestaatproducten (ruw digestaat, dunne fractie, effluent, concentraat) wordt de norm voor het gehalte onzuiverheden (<0,5%) uitgedrukt op de verse stof.

¹⁵ Als steentjes bepaald zijn in ruw digestaat, kan deze parameter worden weggelaten bij de analyse van de dunne fractie, concentraat en effluent na biologie

7.2.3.4 OBA-mest

	Referentie-norm	FOD-Norm ¹⁶	Eenheid
Algemene parameters			
Droge stof	>40	>45	gew%
Organische stof	>10	>10	gew%
pH (water)	6,5 - 9,5	6,5 - 9,5	-
Gehaltes aan zware metalen			
Arseen	<20		mg/kg DS
Cadmium	<2	<2	mg/kg DS
Chroom	<100	<100	mg/kg DS
Koper	<800	<250	mg/kg DS
Kwik	<1	<1	mg/kg DS
Lood	<150	<150	mg/kg DS
Nikkel	<50	<50	mg/kg DS
Zink	<1500	<750	mg/kg DS
onzuiverheden, steentjes en kiemkrachtige zaden			
Onzuiverheden > 2 mm	<0,5	<0,5	gew% DS
Steentjes >5 mm	<2,0	<2,0	gew%
Kiemkrachtige zaden	Max. 1		#/0,5l
Stabiliteit			
Zuurstofconsumptie (Oxitop®)	50		mmol O ₂ /kg OS/h
Salmonella	afwezig		/25g

Productnormen – ter plaatse te beoordelen: Uitzicht, homogeniteit, geur (te noteren op monsternemingsformulier)

7.2.3.5 Biologisch behandeld organisch bodemverbeterend middel

	Referentie-norm	FOD-Norm ¹⁷	Eenheid
Algemene parameters			
Droge stof	>40	>45	gew%
Organische stof	>10	>10	gew%
pH (water)	6,5 - 9,5	6,5 - 9,5	-
Gehaltes aan zware metalen			
Arseen	<20		mg/kg DS
Cadmium	<2	<2	mg/kg DS
Chroom	<70	<100	mg/kg DS
Koper	<150	<150	mg/kg DS
Kwik	<1	<1	mg/kg DS
Lood	<150	<150	mg/kg DS
Nikkel	<30	<50	mg/kg DS
Zink	<400	<400	mg/kg DS
onzuiverheden, steentjes en kiemkrachtige zaden			
Onzuiverheden > 2 mm	<0,5	<0,5	gew% DS
Steentjes >5 mm	<2,0	<2,0	gew%
Kiemkrachtige zaden	Max. 1		#/0,5l
Stabiliteit			
Zuurstofconsumptie (Oxitop®)	50		mmol O ₂ /kg OS/h
Salmonella	afwezig		/25g

Productnormen – ter plaatse te beoordelen: Uitzicht, homogeniteit, geur (te noteren op monsternemingsformulier)

¹⁶ Bij een overschrijding van de FOD-normen waarbij het staal nog steeds voldoet aan de referentienorm, wordt elk dossier door de FOD geval per geval bekeken, en worden naventant voorwaarden vastgelegd.

¹⁷ Bij een overschrijding van de FOD-normen waarbij het staal nog steeds voldoet aan de referentienorm, wordt elk dossier door de FOD geval per geval bekeken, en worden naventant voorwaarden vastgelegd.

12.4.3 Brusselse saneringsnormen bodem

Bijlage 2: saneringsnormen voor bodem en grondwater
Annexe 2: normes d'assainissement pour le sol et l'eau souterraine

Partie fixe du sol (mg/kg matière sèche)		Eau souterraine (µg/l)	
Vaste deel van de aarde (mg/kg droge stof)		Grondwater (µg/l)	
METAUX LOURDS ET METALLOÏDES / ZWARE METALEN EN METALLOÏDEN			
Arsenic	Arseen	35	12
Cadmium	Cadmium	1,2	3
Chrome (III)	Chroom (III)	91	30
Cuivre	Koper	72	60
Mercure	Kwik	1,7	0,6
Plomb	Lood	120	12
Nickel	Nikkel	56	24
Zinc	Zink	200	300
HYDROCARBURES MONOCYCLIQUES AROMATIQUES / MONOCYCLISCHE AROMATISCHE KOOLWATERSTOFFEN			
Benzène	Benzeen	0,3	2
Toluène	Toluene	1,6	20
Ethylbenzène	Ethylbenzeen	0,8	20
Xylène	Xyleen	1,2	20
Styrène	Styreen	0,32	10
HYDROCARBURES CHLORES / GECHLOREERDE KOOLWATERSTOFFEN			
Dichlorométhane	Dichloormethaan	0,05	5
Tétrachlorométhane	Tetrachloormethaan	0,04	1,2
Tétrachloroéthène	Tetrachlooretheen	0,28	5
Trichloroéthène	Trichlooretheen	0,26	5
Monochlorobenzène	Monochloorbenzeen	1	5
1,2-dichlorobenzène (1)	1,2-dichloorbenzeen (1)	14	5
1,3-dichlorobenzène (1)	1,3-dichloorbenzeen (1)	16	5
1,4-dichlorobenzène (1)	1,4-dichloorbenzeen (1)	1,6	5
Trichlorobenzène (2)	Trichloorbenzeen (2)	0,2	5
Tétrachlorobenzène (2)	Tetrachloorbenzeen (2)	0,04	5
Pentachlorobenzène	Pentachloorbenzeen	0,2	1,4
1,1,1-trichloroéthane	1,1,1-trichloorethaan	4	5
1,1,2-trichloroéthane	1,1,2-trichloorethaan	0,08	5
1,1-dichloroéthane	1,1-dichloorethaan	0,08	5
Cis+trans-1,2-dichloroéthène	Cis+trans-1,2-dichlooretheen	0,16	5
HYDROCARBURES CHLORES CARCINOGENES / CARCINOGENE GECHLOREERDE KOOLWATERSTOFFEN			
1,2-dichloroéthane	1,2-dichloorethaan	0,06	5
Chlorure de vinyle	Vinylchloride	0,06	2
Trichlorométhane	Trichloormethaan	0,06	5
Hexachlorobenzène	Hexachloorbenzeen	0,06	0,6
HYDROCARBURES AROMATIQUES POLYCYCLIQUES / POLYCYCLISCHE AROMATISCHE KOOLWATERSTOFFEN			
Naphtalène	Naftaleen	0,8	20
Benzo(a)pyrène	Benzo(a)pyreen	0,3	0,4
Phénanthrène	Fenantreen	30	20
Fluoranthène	Fluoranteen	10,1	2
Benzo(a)anthracène	Benzo(a)antraceen	2,5	2
Chrysène	Chryseen	5,1	0,9

Benzo(b)fluoranthène	Benzo(b)fluoranteen	1,1	0,7
Benzo(k)fluoranthène	Benzo(k)fluoranteen	0,6	0,4
Benzo(ghi)peryène	Benzo(ghi)perylene	35	0,1
Indeno(1,2,3-cd)pyrène	Indeno(1,2,3-cd)pyreen	0,55	0,06
Anthracène	Antraceen	1,5	20
Fluorène	Fluoreen	19	20
Dibenz(a,h)anthracène	Dibenz(a,h)antraceen	0,3	0,3
Acénaphthène	Acenaftteen	4,6	20
Acénaphthylène	Acenaftyleen	0,6	20
Pyrène	Pyreen	62	20
CYANURES / CYANIDES			
Cyanures totaux (3)	Cyanides (3)		40
Cyanures libres	Vrij cyanide	3	
Cyanures non oxydables au chlore	Niet-chlooroxideerbare cyanides	3	
PESTICIDES / PESTICIDEN			
Aldrine + dieldrine	Aldrin + dieldrin		0,02
Chlordane (cis + trans)	Chloordaan (cis + trans)		0,1
DDT + DDE + DDD	DDT + DDE + DDD		0,1
Hexachlorocyclohexane (isomère g)	Hexachloorcyclohexaan (g - isomeer)		0,1
Hexachlorocyclohexane (isomère a)	Hexachloorcyclohexaan (a - isomeer)		0,03
Hexachlorocyclohexane (isomère β)	Hexachloorcyclohexaan (β - isomeer)		0,1
Endosulfane (a, β et sulfate)	Endosulfan (a, β en sulfaat)		0,1
Somme des pesticides (4)	Som van de pesticiden (4)		0,25
AUTRES COMPOSES ORGANIQUES / OVERIGE ORGANISCHE VERBINDINGEN			
Hexane	Hexaan	0,6	20
Heptane	Heptaan	10	50
Octane	Octaan	30	50
Huile minérale (>C5-C8)	Minerale olie (>C5-C8)	4	60
Huile minérale (>C8-C10)	Minerale olie (>C8-C10)	7	200
Huile Minérale (C10-C40)	Minerale olie (C10-C40)	300	300
Méthyle tertiaire butyléther	Methyltertiairbutylether	1	20
Polychlorobiphényles (5)	Polychloorbifenyleen (5)	0.033	
AUTRES SUBSTANCES / OVERIGE STOFFEN			
Amiante (6)	Asbest (6)	80	
Nitrates	Nitraten		5000
PFAS			
Partie fixe du sol (µg/kg matière sèche)			Eau souterraine (µg/l)
Vaste deel van de aarde (µg/kg droge stof)			Grondwater (µg/l)
PFOA	PFOA	2	0,02
PFOS	PFOS	3	0,02
Autres PFAS (7)	Overige PFAS (7)	1 (8)	0,02 (8)

Bron: Besluit van 30/05/2024 tot wijziging van het besluit van 29/03/2018 tot vaststelling van de interventienormen en saneringsnormen (B.S. 09/07/2024)

12.4.4 Richtlijnen voor compost van droogtoiletten (FOD VVVL)

FOD VVVL – Comité Meststoffen (19/2/25)

De norm DIN SPEC 91421:2020-12 wordt aanbevolen als basis voor informatie.

1) PRODUCTIEPROCES

Droog toiletafval wordt gemaakt van natuurlijk, niet-verontreinigd afval en biologisch afbreekbare producten.

Product verkregen door gecontroleerde compostering van droogtoiletten. Tijdens de verwerking moet het product gedurende 1 uur verwarmd zijn tot een temperatuur van 70°C. Of een combinatie van tijd en temperatuur waarvan moet worden aangetoond dat het voldoende is om het biologische risico te beperken.

2) LANDBOUWKUNDIGE VEREISTEN

- Droge stof
- Organische stof
- pH (water)
- stikstof (totaal, organisch, ammonium, nitraat)
- fosfor (oplosbaar in mineraal zuren, zuren, water)
- kalium (oplosbaar in water)
- secundaire elementen (oplosbaar in minerale zuren en water)
- sporenelementen (oplosbaar in minerale zuren)
- Zeefwijdte van 40mm: minimaal 99%

3) VEREISTEN VOOR ZWARE METALEN

Compostnormen ²³⁴	Mg/kg DS
As	20
Cd	2
Cr	100
Cu	150
Hg	1
Ni	50
Pb	150
Zn	400

²³⁴ Compostnormen : compost van droogtoiletten bevat a priori minder zware metalen

4) VEREISTEN VOOR CHEMISCHE CONTAMINANTEN

		mg/kg DS	
- HAP ¹⁶		20 ²³⁵	
- BTEX ²³⁶		20	
o Benzeen			
o Toluëen			
o Ethylbenzeen			
o Xyleen			
- Benzeen ²³⁷			
• Som van 1,2,3,5-Tetrachloorbenzeen en 1,2,4,5- Tetrachloorbenzeen			
• 1,2,3,4-Tetrachloorbenzeen			
• Pentachloorbenzeen			
• Hexachloorbenzeen			
- Minerale olie ²³⁸			Biogeen
o Som C10-C40	280		2800
o C10-C12	75		750
o C12-C16	280		2800
o C16-C20	280		2800
o C20-C40	280		2800
-			
- Dioxine – PCDD/F		20 ng éq tox (WHO - TEQ 2005)	
- PFAS		15 µg/kg ²³⁹	
17 PFAS van Vlaanderen			
- Andere contaminanten : (PFAS,...), medicamenten en hormonen:			Bibliografische studie

²³⁵ Normen Wallonië : compost van droogtoiletten bevat a priori minder PAK's

²³⁶ Normen Wallonië

²³⁷ Normen Vlaanderen

²³⁸ Normen Wallonië : compost van droogtoiletten bevat a priori minder minerale olie

²³⁹ Normen Vlaanderen: compost van droogtoiletten bevat a priori minder PFAS

5) VEREISTEN VOOR BIOLOGISCHE CONTAMINANTEN

E. Coli ²⁴⁰	< 1000 /g
Enterobacteriaceae	< 1000 /g
Salmonella	0 /25g
Clostridium perfringens en sporen	Bibliografische studie + analyses
Coliphage somatique ²⁴¹	Bibliografische studie + analyses
Andere indicator micro- organismen :	Bibliografische studie + analyses
Andere micro-organismen :	Bibliografische studie
Plantpathogenen ²⁴²	Bibliografische studie

6) VEREISTEN VOOR FYSISCHE CONTAMINANTEN

- | | |
|--|-----------|
| - Onzuiverheden (glas, plastic, metaal) > 2 mm | Max 2 % |
| - Stenen > 5 mm | Max 0,5 % |
| - Kiemkrachtige zaden | 0 |

7) VEREISTEN VOOR RIJPHEID/STABILITEIT

- | | |
|---|-----------|
| - Ofwel de mate van zelfverhitting
(Rottegrad) | < 30°C |
| - Ofwel de mate van zelfverhitting + | 30- 40°C |
| - Oxitop | < 10 mmol |

²⁴⁰ Règlement 142/2012

²⁴¹ Norme DIN

²⁴² Norme DIN

12.5 DUITSE WETGEVING

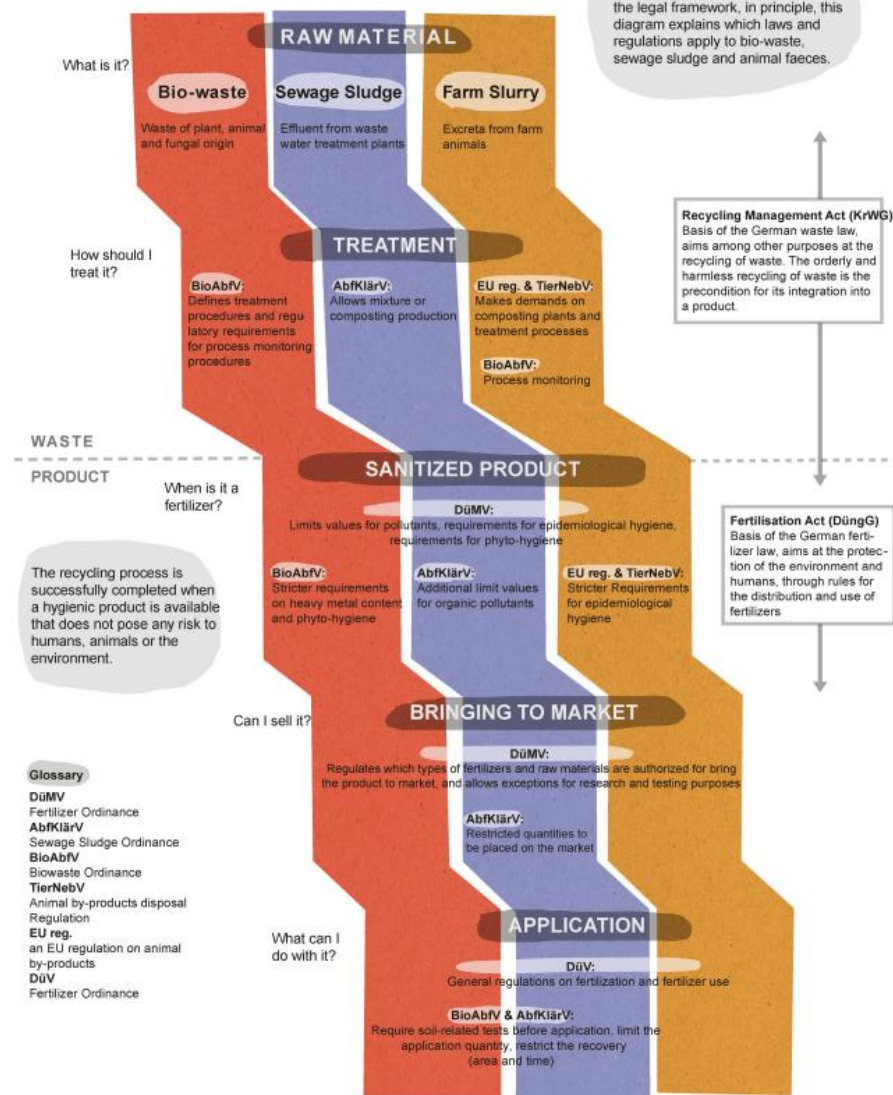
12.5.1 Algemeen wetgevend kader

FROM FAECES TO FERTILIZER

What is important to the legislator?

Guidelines for the recycling of the three waste products to be processed for fertilizers

The German legal framework for human faeces that are not disposed in wastewater treatment is unclear. Nevertheless, we want to utilise them for fertilizer. In order to understand the legal framework, in principle, this diagram explains which laws and regulations apply to bio-waste, sewage sludge and animal faeces.



Bron: (Krause A, 2020)

12.5.2 Productspecificaties DIN SPEC 91421

DIN SPEC 91421

December 2020

Table A.1 — Standard parameters and nutrients with labelling thresholds and scope of application according to the DüMV, as well as source, method and analytical procedure

Analytical parameter	Labelling threshold	According to the DüMV, to be used for fertilizer types ^a	Source (in law)	Method ^b	Analytical procedure
Standard parameter					
Dry matter (DM)	n.a. ^c	n.a. where < 15 % DM,	n.a.	DIN EN 12880-S 2a: 2001-02	Drying
Organic dry matter (ODM)/loss on ignition	5 % DM	all	DüMV:2012, Annex 2, no. 1.3.3	VDLUFA II.1, 10.1: 2014	Incineration
pH	each value	n.a. ^c	DüMV:2012, Annex 2, no. 1.3.7	BGK Chapter III, C1.1 2013-05	Measurement in H ₂ O eluate
Salt content/conductivity (in g KCl/l)	0,5 g/l	n.a. ^f	DüMV:2012, Annex 2, no. 1.3.4	BGK Chapter III, C2.1 2013-05	Measurement in H ₂ O eluate
Alkaline active ingredients (CaO)	5 % DM	all	DüMV:2012, Annex 2, no. 1.3.2	VDLUFA II.1, 6.3: 1995	Titration
Main nutrients					
Nitrogen (N)	1,5 % DM	all	DüMV:2012, Annex 2, no. 1.1.1	VDLUFA II.1, 3.5.2.7: 1995	Combustion and thermal conductivity measurement
Phosphate (P ₂ O ₅)	0,5 % DM	all	DüMV:2012, Annex 2, no. 1.1.2	VDLUFA II.1, 8.10: 2007	Extraction in aqua regia and atomic emission spectrometry (ICP-OES) ^g
Potassium (K ₂ O)	0,75 % DM	all	DüMV:2012, Annex 2, no. 1.1.3	VDLUFA II.1, 8.10: 2007	Extraction in aqua regia and atomic emission spectrometry (ICP-OES)
Other nutrients/nutrient forms					
Nitrogen (N) soluble ^h	where total N > 1,5 % DM and N	for organic and organic-mineral fertilizers	DüMV:2012, § 6 (1) 4 ⁱ	Nitrate: VDLUFA II.1, 3.4.2 Ammonium: acc. to STRACH (DBFZ)	Photometric determination of 24-dimethylphenol Photometric determination
Further N forms	none	mineral compound fertilizers ^k	DüMV:2012, Annex 1, Clause 2 DüMV:2012, Annex 2, Table 3	see Table A.3 and Table A.4	
Phosphate solubility	none	mineral compound fertilizers ^l	DüMV:2012, Annex 1, Clause 2 DüMV:2012, Annex 2, Table 4	see Table A.3 and Table A.4	
Calcium (Ca) water soluble ^m	5,7 % DM	liquid fertilizers	DüMV:2012, Annex 2, no. 1.1.7	VDLUFA II.1, 6.3: 1995	Titration
Magnesium (MgO)	0,3 (1,7 ⁿ) % DM	all	DüMV:2012, Annex 2, no. 1.1.5	VDLUFA II.1, 8.10: 2007	Extraction in aqua regia and atomic emission spectrometry (ICP-OES)
Sodium (Na)	0,2 (1,5 ⁿ) % DM	all	DüMV:2012, Annex 2, no. 1.1.6	VDLUFA II.1, 8.10: 2007	Extraction in aqua regia and atomic emission spectrometry (ICP-OES)
Selenium (Se)	0,0005 % DM	all	DüMV:2012, Annex 2, no. 1.3.5	VDLUFA II.1, 8.10: 2007	Extraction in aqua regia and spectrometry (ICP-OES)
Sulfur (S)	0,3 (1,5 ⁿ) % DM	all	DüMV:2012, Annex 2, no. 1.1.4	VDLUFA II.1, 8.10: 2007	Extraction in aqua regia and atomic emission spectrometry (ICP-OES)
Cl (chloride)	all contents	n.a. ^f	DüMV:2012, Annex 2, no. 1.3.6	VDLUFA II.1, 9.8.2: 2008	Titration

Table A.1 — Standard parameters and nutrients with labelling thresholds and scope of application according to the DüMV, as well as source, method and analytical procedure

Analytical parameter	Labelling threshold	According to the DüMV, to be used for fertilizer types ^a	Source (in law)	Method ^b	Analytical procedure
Trace nutrients^c					
Boron (B)	0,02 % DM	all	DüMV:2012, Annex 1, no. 4.1.1, column 2	VDLUFÄ II.1, 8.10: 2007	Extraction in aqua regia and atomic emission spectrometry (ICP-OES)
Cobalt (Co)	0,004 % DM	all	DüMV:2012, Annex 1, no. 4.1.1, column 2	DIN EN 16170: 2017-01	Extraction in nitric acid and atomic emission spectrometry (ICP-OES)
Copper (Cu)	0,02 % DM	all	DüMV:2012, Annex 1, no. 4.1.1, column 2	VDLUFÄ II.1, 8.10: 2007	Extraction in aqua regia and atomic emission spectrometry (ICP-OES)
Iron (Fe)	0,04 (1') % DM	all	DüMV:2012, Annex 1, no. 4.1.1, column 2	VDLUFÄ II.1, 8.10: 2007	Extraction in aqua regia and atomic emission spectrometry (ICP-OES)
Manganese (Mn)	0,02 (0,2 ^a) % DM	all	DüMV:2012, Annex 1, no. 4.1.1, column 2	VDLUFÄ II.1, 8.10: 2007	Extraction in aqua regia and atomic emission spectrometry (ICP-OES)
Molybdenum (Mo)	0,002 % DM	all	DüMV:2012, Annex 1, no. 4.1.1, column 2	DIN EN 16170: 2017-01	Extraction in nitric acid and atomic emission spectrometry (ICP-OES)
Zinc (Zn)	0,02 % DM	all	DüMV:2012, Annex 1, no. 4.1.1, column 2	VDLUFÄ II.1, 8.10: 2007	Extraction in aqua regia and atomic emission spectrometry (ICP-OES)

The generally applicable labelling thresholds and limit values for pollutants, foreign matter and epidemiologically hygienic parameters in accordance with the DüMV are presented in Table A.2. There are also parameters that are derived from other ordinances or have been incorporated on the basis of risk considerations.

Table A.2 — Pollutants, foreign matter and epidemiologically hygienic parameters with labelling thresholds and limit values as in the DüMV and other ordinances, scope as in the DüMV, and sources, methods and analytical procedures

Analytical parameter	Labelling threshold	Limit value	According to the DüMV, to be used for fertilizer types... ^a	Source (in law)	Method ^b	Analytical procedure
Foreign matter						
Stones > 10 mm	none	5 % DM	all	DüMV:2012, § 3 (1) 4	BGK Chapter II, C2 2013-05	Sieve analysis
Recycled paper, cardboard, glass, metal, plastically non-	none	0,4 % DM	all	DüMV:2012, § 3 (1) 4	BGK Chapter II, C1 2006-09	Sieve analysis
	none	0,1 % DM	all	DüMV:2012, § 3 (1) 4		
Heavy metals						
Arsenic (As)	20 mg/kg DM	40 mg/kg DM	all	DüMV:2012, Annex 2, no. 1.4.1	VDLUF A II.1, 8.10: 2007	Extraction in aqua regia and atomic emission spectrometry (ICP-OES)
Lead (Pb)	100 mg/kg DM	150 mg /kg DM	all	DüMV:2012, Annex 2, no. 1.4.2	VDLUF A II.1, 8.10: 2007	Extraction in aqua regia and atomic emission spectrometry (ICP-OES)
Cadmium (Cd)	1,0 mg/kg DM 20 mg/kg P ₂ O ₅ ^c	1,5 mg/kg DM 50 mg/kg P ₂ O ₅ ^d	all	DüMV:2012, Annex 2, no. 1.4.3	DIN EN 16170: 2017-01	Extraction in nitric acid and atomic emission spectrometry (ICP-OES)
Chromium (Cr) (total)	300 mg/kg DM	n.a.	all	DüMV:2012, Annex 2, no. 1.4.4	VDLUF A II.1, 8.10: 2007	Extraction in aqua regia and atomic emission spectrometry (ICP-OES)
Chromium (Cr) (VI)	1,2 mg/kg DM	2 mg/kg DM	all	DüMV:2012, Annex 2, no. 1.4.5	DIN 38405-24: 1987-05	Extraction in demineralized water and photometric determination of chromium (VI) using 1,5 diphenylcarbazide
Copper (Cu)	200 mg/kg DM	900 mg/kg DM ^e	all	DüMV:2012, Annex 1, no. 4.1.1, column 6	VDLUF A II.1, 8.10: 2007	Extraction in aqua regia and atomic emission spectrometry (ICP-OES)
Nickel (Ni)	40 mg/kg DM	80 mg/kg DM	all	DüMV:2012, Annex 2, no. 1.4.6	VDLUF A II.1, 8.10: 2007	Extraction in aqua regia and atomic emission spectrometry (ICP-OES)
Mercury (Hg)	0,5 mg/kg DM	1,0 mg/kg DM	all	DüMV:2012, Annex 2, no. 1.4.7	Sample preparation: VDLUF A I, 2.4.3.1: 1991 Analysis: DIN EN ISO 12846: 2012-08	Extraction in aqua regia and atomic absorption spectrometry
Thallium (Tl)	0,5 mg/kg DM	1,0 mg/kg DM	all	DüMV:2012, Annex 2, no. 1.4.8	DIN EN 16170: 2017-01	Extraction in nitric acid and atomic emission spectrometry (ICP-OES)
Zinc (Zn)	200 mg/kg DM	5000 mg/kg DM ^f	all	DüMV:2012, Annex 1, no. 4.1.1, column 6	VDLUF A II.1, 8.10: 2007	Extraction in aqua regia and atomic emission spectrometry (ICP-OES)
Organic pollutants						
PFT (Perfluorinated tensides)	0,05 mg/kg DM	0,1 mg/kg DM	all	DüMV:2012, Annex 2, no. 1.4.9	DIN 38414-14: 2011-08	Extraction in methanol and chromatography and mass spectrometry (HPLC-MS/MS ^g)
Dioxin and dl-PCB ^h (WHO-TEQ 2005)	none	30 ng/kg DM	all	DüMV:2012, Annex 2, no. 1.4.10	DIN EN 16190: 2019-10	Extraction in toluene and gas chromatography and high resolution mass spectrometry (HR GC-MS)
PAH ^k 16	none	6 mg/kg DM	n.a.	REGULATION (EU) 2019/1009, Part II, CMC 3: compost, 1 e) ii	composts: DIN ISO 18287: 2006-05	Gas chromatography and mass spectrometry (GC-MS) Method B: Extraction with a mixture of acetone, petroleum ether and water in the presence of sodium chloride
					carbonisates: DIN EN 15527: 2008-09	Extraction with toluene and GC-MS
					DIN EN 16181: 2019-08	Extraction with toluene and HPLC

The generally applicable labelling thresholds and limit values for pollutants, foreign matter and epidemiologically hygienic parameters in accordance with the DüMV are presented in Table A.2. There are also parameters that are derived from other ordinances or have been incorporated on the basis of risk considerations.

Table A.2 — Pollutants, foreign matter and epidemiologically hygienic parameters with labelling thresholds and limit values as in the DüMV and other ordinances, scope as in the DüMV, and sources, methods and analytical procedures

Analytical parameter	Labelling threshold	Limit value	According to the DüMV, to be used for fertilizer types... ^a	Source (in law)	Method ^b	Analytical procedure
Pharmaceutical residues¹						
Ciprofloxacin	none	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	Extraction in aqueous buffer/ethanol and chromatography, and chromatography and mass spectrometry (HPLC-MS/MS)
Clarithromycin	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	Extraction in aqueous buffer/ethanol and chromatography and mass spectrometry (HPLC-MS/MS)
Carbamazepine	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	Extraction in aqueous buffer/ethanol and chromatography, and chromatography and mass spectrometry (HPLC-MS/MS)
Diclofenac	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	Extraction in aqueous buffer/ethanol and chromatography, and chromatography and mass spectrometry (HPLC-MS/MS)
Ethinyl estradiol or estradiol	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	Chromatography and mass spectrometry (HPLC-MS/MS) (partially validated method)
Epidemiologically hygienic parameters						
Salmonella	n.a.	0/50 g	all	DüMV:2012, § 5 (2) 1	BGK Chap. IV C1; 2013-05 or BioAbfV 4.2.1.2	Comparison with standard or surface method/MPN method ^m
<i>E. coli</i>	n.a.	1 000 CFU/1g ^e	n.a. ^o	EC 142/2011 Annex V Chap. III para. 3 no. 1a	BGK Chap. IV C3; 2006-09	Fluorescence measurement
Enterococci	n.a.	1 000 CFU/1g ^e	n.a. ^q	EC 142/2011 Annex V Chap. III para. 3 no. 1a	BGK Chap. IV C4; 2006-09	MPN method ^d
<i>Clostridium perfringens</i> and spores	n.a.	0/1 g	n.a. ^s	EC 142/2011 Annex IV Chap. III G no. 1 c i	BVL L 00.00-57; 2006-12	Colony count
Somatic coliphages ¹	n.a.		n.a.	n.a.	DIN EN ISO 10705-2: 2002-01	PFU ⁿ count
Phytohygienic parameters						
Germinable seeds and parts of plants capable of sprouting	n.a.	2 plants/1 l	n.a. ^v	BioAbfV, Annex 2, 4.3.2	Cultivation method with 3 kg bulk sample sieved < 10 mm (solid	Test mixture is adjusted to a salt content of < 2 g KCl per litre,

The types of fertilizer and their required properties are listed in Table A.3. The table makes it possible to assign the fertilizer to a fertilizer type on the basis of one's own analyses. According to the DüMV, such a classification is required if a fertilizer is to be placed on the market.

Table A.3 — Fertilizer types and classification of recycling fertilizers according to the DüMV with minimum contents, source and notes

Fertilizer type	Minimum content	Source (in law)	Notes on analysis or requirements ^a
Phosphate fertilizers			
Fertilizers from phosphate precipitation (1), incineration of sewage sludge (2) ^b	10 % P ₂ O ₅ as total phosphate	DüMV:2012, Annex 1, no. 1.2.9	Sieve analysis: 98% of the phosphate fertilizer shall pass through the sieve at 0,63 mm or 90% at 0,16 mm.
		DüMV:2012, Annex 2, Tables 4, 5.7 and 6.2	Minimum phosphate solubility: water soluble: 2,5 %; neutral ammonium citrate soluble and water soluble: 5 %; soluble in mineral acids only: 2 %
(1) From phosphate precipitation		DüMV:2012, Annex 2, no. 6.2.4	Precipitants: Calcium chloride, milk of lime, magnesium chloride, magnesium oxide or hydroxide, calcium silicate hydrate ^c If the end product is dicalcium phosphate (with magnesium or with tricalcium phosphate), the requirements of the DüMV, Annex 1, Table 1.2 (1.2.1 or 1.2.2) apply.
(2) From incineration of sewage sludge ^d		DüMV:2012, Annex 2, no. 6.2.3	In granulated or dust-bound form, sieve analysis: — for 0,1 mm max. 0,2 %; — for 0,05 mm max. 0,05 %; — for 0,01 mm max. 0,005 %.
Mineral compound fertilizers^e			
NP fertilizers	solid: 3 % N, 5 % P ₂ O ₅	DüMV:2012, Annex 1, Clause 2.1	Fertilizer was produced chemically, by mixing (solid) or dissolving (solution).
	as solution: 1 % N, 1 % P ₂ O ₅ , total 3 %		Nitrogen in the nitrogen forms: solid: 3.1 to 3.10 as solution: 3.1 to 3.4 and 3.7 phosphate in the phosphate solubilities: solid: 4.2.1 to 4.2.3 as solution: 4.2.1
NK fertilizers	solid: 3 % N, 5 % K ₂ O	DüMV:2012, Annex 1, Clause 2.2	Fertilizer was produced chemically, by mixing (solid) or dissolving (solution).
	as solution: 1 % N, 1 % K ₂ O, total 3 %		Nitrogen in the nitrogen forms: solid: 3.1 to 3.10; solution: 3.1 to 3.4 and 3.7; water-soluble potassium oxide
PK fertilizers	solid: 5 % P ₂ O ₅ , 5 % K ₂ O	DüMV:2012, Annex 1, Clause 2.3	Fertilizer was produced chemically, by mixing (solid) or dissolving (solution) or suspending (suspension). Exclusive use of ashes according to Annex 2, Table 7.3 (line 7.3.16) is also possible.
	as suspension: 5 % P ₂ O ₅ , 5 % K ₂ O		Phosphate in the phosphate solubilities 4.2.1 to 4.2.11 is water-soluble potassium oxide
	as solution: 1 % P ₂ O ₅ , 1 % K ₂ O, total 3 %		
NPK fertilizers	solid: 3 % N, 5 % P ₂ O ₅ , 5 % K ₂ O	DüMV:2012, Annex 1, Clause 2.4	Fertilizer was produced chemically, by mixing (solid) or dissolving (solution) or suspending (suspension).
	on carrier material: 1 % N, 1 % P ₂ O ₅ , 1 % K ₂ O		For solid fertilizers, the exclusive use of ashes according to Annex 2, Table 7.3 (line 7.3.16) is also possible.
	as solution: 1 % N, 1 % P ₂ O ₅ , 1 % K ₂ O, total 4 %		Nitrogen in the nitrogen forms: solid: 3.1 to 3.10; as solution: 3.1 to 3.4, 3.7; as suspension: 3.1 to 3.4
	as suspension: 3 % N, 4 % P ₂ O ₅ , 4 % K ₂ O		Phosphate in the phosphate solubilities: solid: 4.2.1 to 4.2.7, 4.2.11; as solution: 4.2.1; as suspension: 4.2.1, 4.2.5, 4.2.8
Organic and organic-mineral fertilizers^f			
Organic N-, P-, K-, NP-, NK-, PK- or NPK-fertilizers	single nutrient fertilizer: 3 % of the nutrient; two-nutrient and three-nutrient fertilizers: 1 % N, 0,3 % P ₂ O ₅ or 0,5 % K ₂ O	DüMV:2012, Annex 1, Clause 3.1	Origin of the raw materials acc. to the DüMV:2012, Annex 2, Table 7.1, 7.2 and 7.4
Organic-mineral N-, P-, K-, NP-, NK-, PK- or NPK-fertilizers	single nutrient fertilizer: 3 % of the nutrient; two-nutrient and three-nutrient fertilizers: 1,5 % N, 0,5 % P ₂ O ₅ or 1,0 % K ₂ O; 10 % ODM	DüMV:2012, Annex 1, Clause 3.2	Origin of the raw materials acc. to the DüMV:2012, Annex 2, Table 7 If mineral fertilizers are used, the minimum content increases to 3 % N, 3 % P ₂ O ₅ or 3 % K ₂ O.

Table A.4 and Table A.5 contain only parameters to be specifically analysed for mineral fertilizers, that is, nitrogen forms and phosphate solubilities. Which analyses have to be made depends on the type of fertilizer. This is determined with the help of Table A.3.

Table A.4 — Nitrogen forms (declaration) according to the DüMV with source, method and analytical procedure

Analytical parameter	Source	Method	Analytical procedure
3.1 Total nitrogen	DüMV Annex 2, no. 3.1	VDLUFA II.1, 3.5.2.7:1995 (total nitrogen N)	Combustion and thermal conductivity measurement
3.2 Nitrate nitrogen	DüMV:2012, Annex 2, no. 3.2	VDLUFA II.1, 3.4.2:1995	Extraction and photometry
3.3 Ammonium nitrogen	DüMV:2012, Annex 2, no. 3.3	Determination according to STRACH (DBFZ) ^a	Photometry
3.4 Carbamide nitrogen	DüMV:2012, Annex 2, no. 3.4	VDLUFA II.1, 3.9.2:1995	Chromatography (HPLC)
3.5 Cyanamide nitrogen	DüMV:2012, Annex 2, no. 3.5	VDLUFA II.1, 3.6:2004	Precipitation
3.6 Crotonylidene diurea nitrogen	DüMV:2012, Annex 2, no. 3.6	Urea nitrogen, VDLUFA II.1, 3.8 - 3.10:1995	Various methods
3.7 Formaldehyde urea nitrogen	DüMV:2012, Annex 2, no. 3.7		
3.8 Isobutylidene diurea nitrogen	DüMV:2012, Annex 2, no. 3.8		
3.9 Dicyandiamide nitrogen	DüMV:2012, Annex 2, no. 3.9		
3.10 Acetylene diurea nitrogen	DüMV:2012, Annex 2, no. 3.10	VDLUFA II.1, 3.10.2:1995	Chromatography (HPLC)

^a DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH (German Institute for Biomass Research), publication series of the BMU funding programme "Energetic use of biogas": Messmethodensammlung Biogas — Methoden zur Bestimmung von analytischen und prozessbeschreibenden Parametern im Biogasbereich, 3.4 Bestimmung des Ammonium-stickstoffgehaltes, Leipzig 2015

Table A.5 — Phosphate solubilities (declaration) according to the DüMV with source, method and analytical procedure

Analytical parameter	Source	Method	Analytical procedure
4.2.1 Water-soluble phosphate	DüMV:2012, Annex 2, no. 4.2.1	DIN EN ISO 11885 (E 22); 2009-09 (mod.)	Spectrometry (ICP-OES)
4.2.2 Neutral-ammonium citrate-soluble phosphate	DüMV:2012, Annex 2, no. 4.2.2	VDLUFA II.1, 4.1.4:1995	Extraction
4.2.3 Neutral-ammonium citrate-soluble and water-soluble phosphate	DüMV:2012, Annex 2, no. 4.2.3	DIN EN ISO 11885 (E 22); 2009-09 (mod.)	Spectrometry (ICP-OES)
4.2.4 Phosphate exclusively soluble in mineral acids	DüMV:2012, Annex 2, no. 4.2.4	DIN EN ISO 11885 (E 22); 2009-09 (mod.)	Spectrometry (ICP-OES)
4.2.5 Alkaline ammonium citrate-soluble phosphate (Petermann)	DüMV:2012, Annex 2, no. 4.2.5	VDLUFA II.1, 4.1.5:1995	Extraction
4.2.6 Phosphate soluble in 2% citric acid	DüMV:2012, Annex 2, no. 4.2.6	VDLUFA II.1, 4.1.3:1995	Extraction
4.2.7 Total phosphate, of which at least 75 % of the declared content of P ₂ O ₅ is soluble in alkaline ammonium citrate (Joulie)	DüMV:2012, Annex 2, no. 4.2.7	VDLUFA II.1, 4.1.5:1995	Extraction
4.2.8 Total phosphate, of which at least 55 % of the declared content of P ₂ O ₅ is soluble in 2% formic acid	DüMV:2012, Annex 2, no. 4.2.8	VDLUFA II.1, 4.1.2:2004	Extraction
4.2.9 Total phosphate of which at least 45 % of the declared P ₂ O ₅ content is soluble in 2 % formic acid; at least 20 % of the declared P ₂ O ₅ content is water-soluble phosphate	DüMV:2012, Annex 2, no. 4.2.9	VDLUFA II.1, 4.1.2:2004	Extraction
		VDLUFA II.1, 4.1.7:1995	Extraction
4.2.10 Phosphate soluble in 2 % citric acid and in alkaline ammonium citrate (Petermann)	DüMV:2012, Annex 2, no. 4.2.10	VDLUFA II.1, 4.1.3:1995	Extraction
		VDLUFA II.1, 4.1.5:1995	Extraktion
4.2.11 Total phosphate (method: mineral acid soluble phosphate) ^a	DüMV:2012, Annex 2, no. 4.2.11	VDLUFA II.1, 4.1.1.1 to 4.1.1.4:1995	Wet or dry digestion with acids

^a The content of P₂O₅ soluble in mineral acids only shall not exceed 2 %.

12.6 WETGEVING IN FRANKRIJK

Arrêté du 21/12/98 relatif à l'homologation des matières fertilisantes et des supports de culture

ANALYSES à EFFECTUER et PRINCIPAUX CRITÈRES MICROBIOLOGIQUES pour l'homologation des Matières fertilisantes et des Supports de culture contenant des matières organiques d'origine animale ou végétale

micro-organismes concernés	cultures						méthodes d'analyses *
	grandes cultures	arboriculture viticulture petits fruits	gazons prairies	syviculture pépinière ornementale	cultures florales	légumes fraises	
1-Micro-organismes aérobies à 30°C							NF V08-051 (1992)
2-Micro-organismes pathogènes pour l'homme ou les animaux :							
Entérocoques	< 10 000 par gramme				<100 par g	NF T90-432 (1997) LV 02-9703 (1997)	
Escherichia coli	< 1 000 par gramme				<100 par g	NF V08-053 (1993)	
Clostridium perfringens (spores et formes végétatives)	absence dans 1 gramme					NF V08-056 (1994) LV 02-9502 (1995)	
Salmonella	absence dans 1 gramme				absence dans 25 g	NF ISO 6579 (1990) NF V08-052 (1993)	
Staphylococcus aureus ou à coagulase +	< 10 par gramme					NF V08-057-1/2 (1994) LV 02-9801 (1996)	
Listeria monocytogenes		obs. ds 25 g (prairie)			absence dans 25 grammes	NF V08-055 (1997) LV 02-9802 (1998)	
Levures et moisissures avec confirmation d'Aspergillus						XPV08-059 LV 02-9701 (1997)	
Nématodes (oeufs)	absence dans 1 gramme				absence dans 25 g	MgSO4	
3-Nématodes (larves)	absence dans 1 gramme				absence dans 25 g	LV 02-9201 (1992)	
4-Organismes pouvant présenter un risque pour les cultures :							
4.1- Nématodes à déterminer si tous les critères du tableau 2 sont vérifiés et présence de larves de nématode (tableau 3) :							
Anguina sp.	nddé		nddé				**
Aphelenchoides subterminalis, besseyi/taqariae, ritzenbosii					nddé		**
Bursaphelenchus sp.				nddé			**
Ditylenchus dipsaci, destructor, mycelophagum	nddé		non détecté dans l'échantillon				**
Globodera pallida, rostochiensis	nddé					nddé	**
Heterodera sp.	non détecté dans l'échantillon					nddé	**
Longidorus sp.	nddé		non détecté dans l'échantillon				**
Meloidogyne sp.	non détecté dans l'échantillon						**
Macroposthonia sp.		nddé					**
Paratrichodorus, Trichodorus sp.	nddé				nddé		**
Pratylenchus sp.		non détecté dans l'échantillon				nddé	**
Tylenchulus semi-penetrans		nddé					**
Xiphinema sp. (sauf X. pachtaicum)	nddé		non détecté dans l'échantillon				**
4.2- Organismes à rechercher si tous les critères du tableau 2, et du tableau 3 ou si nécessaire du 4.1, sont vérifiés :							
- Champignons :							
Potentiel Nérot. Rac. (betteraves)	note < 1						**
Aphanomyces (pois)	nddé						**
Phytophthora sp. cinnamomi				nddé			**
Potentiel Nérot. Rac. (fraises)						note < 1	**
Pythium (fonte des semis)	non détecté dans l'échantillon						**
Synchytrium endotrochium (pot.)***	nddé						**
Thielaviopsis basicola						nddé	**
- Virus (test immunologique) :							
Rhizomanie (betteraves, pdt.)	négatif					négatif	**
- Bactéries :							
Ralstonia solanaceae (solanacée)***	nddé						**
nddé : non détecté dans l'échantillon Analyse à effectuer pour les cultures concernées note < 1, négatif : résultat de la recherche ou du test							
* : les méthodes d'analyses indiquées doivent être assorties de méthodes d'échantillonnage à préciser							
** : les méthodes correspondantes sont en cours d'étude ou en cours de rédaction en vue de leur normalisation							
*** : recherche à effectuer uniquement pour les produits issus en tout ou partie de la transformation de la pomme de terre (pdt)							
Ce tableau est susceptible d'être modifié en fonction de l'évolution des connaissances scientifiques							
Commission d'Étude de la Toxicité - Matières Fertilisantes - Supports de Culture							

12.7 EUROPESE WETGEVING

12.7.1 Hergebruik gezuiverd afvalwater

Tabel 2 — Kwaliteitseisen van teruggewonnen water voor landbouwirrigatie

Kwaliteitsklasse teruggewonnen water	Indicatieve technologie-doelstelling	Kwaliteitseisen				
		<i>E. coli</i> (aantal/100 ml)	BZV ₅ (mg/l)	TSS (mg/l)	Troebelingsgraad (NTU)	Overig
A	Secundaire behandeling, filtratie en desinfectie	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 5	<i>Legionella</i> spp.: < 1000 kve/l waar er een verstuiwingsrisico bestaat Rondwormen (wormeieren): ≤ 1 eijl voor irrigatie van weidegewassen of diervoedergewassen
B	Secundaire behandeling en desinfectie	≤ 100	In overeenstemming met Richtlijn 91/271/EEG (bijlage I, tabel 1)	In overeenstemming met Richtlijn 91/271/EEG (bijlage I, tabel 1)	—	
C	Secundaire behandeling en desinfectie	≤ 1 000			—	
D	Secundaire behandeling en desinfectie	≤ 10 000	—			

Tabel 4 — Validatiemonitoring van teruggewonnen water voor landbouwirrigatie

Kwaliteitsklasse teruggewonnen water	Indicatormicro-organismen (*)	Prestatiestreefwaarden voor de zuiveringsketen (log ₁₀ -reductie)
A	<i>E. coli</i>	≥ 5,0
	Totaal aantal colifagen/F-specifieke colifagen/somatische colifagen/colifagen (**)	≥ 6,0
	<i>Clostridium perfringens</i> -sporen/sporenvormende sulfaatreducerende bacteriën (***)	≥ 4,0 (bij sporen van <i>Clostridium perfringens</i>) ≥ 5,0 (bij sporenvormende sulfaatreducerende bacteriën)

(*) De referentiepathogenen *Campylobacter*, rotavirus en *Cryptosporidium* kunnen ook in plaats van de voorgestelde indicatormicro-organismen voor validatiemonitoringdoeleinden worden gebruikt. Daarbij zijn dan de volgende log₁₀-reductiestreefwaarden van toepassing: *Campylobacter* (≥ 5,0), rotavirus (≥ 6,0) en *Cryptosporidium* (≥ 5,0).

(**) Totaal aantal colifagen wordt geselecteerd als de meest geschikte indicator voor virussen. Indien het echter niet mogelijk is om het totaal aantal colifagen te analyseren, wordt ten minste één ervan (F-specifieke of somatische colifagen) geanalyseerd.

(***) Sporen van *Clostridium perfringens* worden geselecteerd als de geschiktste indicator voor protozoa. Sporenvormende sulfaatreducerende bacteriën vormen echter een alternatief indien de concentratie *Clostridium perfringens*-sporen het niet mogelijk maakt om de gewenste log₁₀-verwijdering te valideren.

13 BIBLIOGRAFIE

- Adjama, I., Derkyi, N. S. A., Uba, F., Akolgo, G. A., & Opuko, R. (2022). Anaerobic Co-Digestion of Human Feces with Rice Straw for Biogas Production: A Case Study in Sunyani. *Modelling and Simulation in Engineering*, 2022(1), 2608045. <https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2022/2608045>
- Adler N., B. F., Blondzik, Brauer, Chorus, Ebert, T. Fiedler, T. Grummt, J. Heidemeier, A. Hein, M. Helmecke, F. Hilliges, I. Kirst, J. Klasen, S. Konradi, B. Krause, A. Küster, C. Otto, U. Pirntke, A. Roskosch, J. Schönfeld, H.-C. Selinka, R. Szewzyk, K. Westphal-Settele, W. Straff H.-C. Selinka, R. Szewzyk, K. Westphal-Settele, W. Straff. (2018). *Antibiotics and Antibiotic Resistances in the Environment Background, Challenges and Options for Action*. U. G. E. Agency/UBA). www.umweltbundesamt.de/publikationen
- Aerts A, G. D., Van Geert K et al. (2024). *PFAS-verdachte activiteiten voor grond-, grondwater- en waterbodemerontreiniging*. Mechelen: OVAM Retrieved from file:///C:/Users/hp%20oem/Downloads/Rapport%20PFAS%20verdachte%20activiteiten%20update%20Orubrieken%202024-11-22.pdf
- Aliahmad, A., Harder, R., Simha, P., Vinnerås, B., & McConville, J. (2022). Knowledge evolution within human urine recycling technological innovation system (TIS): Focus on technologies for recovering plant-essential nutrients. *Journal of Cleaner Production*, 379, 134786. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134786>
- Arora, S., & Saraswat, S. (2021). Vermifiltration as a natural, sustainable and green technology for environmental remediation: A new paradigm for wastewater treatment process. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 4, 100061. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2021.100061>
- Bajsa, O., Jaya, N., Mathew, K., & Ho, G. (2003). Vermiculture as a tool for domestic wastewater management. *Water science and technology : a journal of the International Association on Water Pollution Research*, 48, 125-132. <https://doi.org/10.2166/wst.2004.0821>
- Baltussen, J. (2025). *Handleiding 'Rekentool v2024 en e-MJV' voor Zuiveringbeheerders*
- Baltussen J., G. v. k. (2014). *Luchtgerelateerde emissies vanuit RWZI's in het kader van de I-PRTR*.
- BBT. (2024a). *Composteren EMIS/VITO*. <https://emis.vito.be/nl/node/105853>
- BBT. (2024b). *Vergisten*. EMIS/VITO. <https://emis.vito.be/nl/bbt/bbt-tools/selectiesystemen/afss/afvaltechnieken/vergistig>
- Beníšek, M., Kukučka, P., Mariani, G., Suurkuusk, G., Gawlik, B. M., Locoro, G., Giesy, J. P., & Bláha, L. (2015). Dioxins and dioxin-like compounds in composts and digestates from European countries as determined by the in vitro bioassay and chemical analysis. *Chemosphere*, 122, 168-175. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.11.039>
- Berendes, D. M., Yang, P. J., Lai, A., Hu, D., & Brown, J. (2018). Estimation of global recoverable human and animal fecal biomass. *Nat Sustain*, 1(11), 679-685. <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0167-0>
- Bertram, J., Esser, A., Thoröe-Boveleth, S., Fohn, N., Schettgen, T., & Kraus, T. (2023). Quantification of 26 metals in human urine samples using ICP-MSMS in a random sample collective of an occupational and environmental health care center in Aachen, Germany. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 78, 127161. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2023.127161>
- Bisschops, B., van Eekert. (2025). *Verkenning circulaire slibketen 2050*.
- Bleuler, M., Gold, M., Strande, L., & Schönborn, A. (2021). Pyrolysis of Dry Toilet Substrate as a Means of Nutrient Recycling in Agricultural Systems: Potential Risks and Benefits. *Waste and Biomass Valorization*, 12(7), 4171-4183. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01220-0>

- Boness, J.-O. (2020). Boness 2020 - Composting human faeces An Insight into commercial faecal composting at Germany's first composting plant for contents from Dry Toilets.
- Boness, J.-O., Kautz, T., & Hoffmann-Bahnsen, R. (2024). *Konzentrationen seuchenhygienisch relevanter Indikatororganismen im Boden nach Düngung mit Kompost aus menschlichen Fäkalien*.
- Boness J., K. T., Hoffmann-Bahnsen R. (2024). Fertilizer addition effect of novel recycling fertilizers from human excreta in a pot experiment with maize (*Zea mays* L.). *Soil Use and Management*, Volume40, Issue4. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/sum.13151>
- Bruinenberg M., v. E. N. (2023). *Verkenning residuen van gewasbeschermingsmiddelen in (weide)mest*. L. B. Instituut.
- Brusselman E., B. B., De Campeneere S., Demeyer P., Goossens K., Kerselaers E., Maertens L., Millet S., Reubens B., Riebbels G., Vandaele L., Vangeyte J., Zwertvaegher I. (2016). *Screening van maatregelen die kunnen leiden tot de reductie van ammoniakemissie afkomstig van landbouw*.
- Butkovskiy, A., Ni, G., Hernandez Leal, L., Rijnaarts, H. H. M., & Zeeman, G. (2016). Mitigation of micropollutants for black water application in agriculture via composting of anaerobic sludge. *Journal of hazardous materials*, 303, 41-47. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.10.016>
- Büyüksönmez, F., Robert, R., F., H. T., & and Bechinski, E. (2000). Literature Review: Occurrence, Degradation and Fate of Pesticides During Composting: Part II: Occurrence and Fate of Pesticides in Compost and Composting Systems. *Compost Science & Utilization*, 8(1), 61-81. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2000.10701751>
- Carpentier, L. (2025). Kompost mit menschlichen Ausscheidungen. Abschlussveranstaltung Composting Impact Project (Uster, 2022-2025), Uster (Switzerland).
- Casella C., S. D., Laca A., Díaz M. (2023). Microplastics in Sewage Sludge: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(23), 63382-63415. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27151-6>
- Castro-Herrera, D., Prost, K., Schäfer, Y., Kim, D. G., Yimer, F., Tadesse, M., Gebrehiwot, M., & Brüggemann, N. (2022). Nutrient dynamics during composting of human excreta, cattle manure, and organic waste affected by biochar. *Journal of Environmental Quality*, 51(1), 19-32. <https://doi.org/10.1002/jeq2.20312>
- Chaudhari, Y. S., Kumar, P., Soni, S., Gacem, A., Kumar, V., Singh, S., Yadav, V. K., Dawane, V., Piplode, S., Jeon, B.-H., Ibrahim, H. A., Hakami, R. A., Alotaibi, M. T., Abdellattif, M. H., Cabral-Pinto, M. M. S., Yadav, P., & Yadav, K. K. (2023). An inclusive outlook on the fate and persistence of pesticides in the environment and integrated eco-technologies for their degradation. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 466, 116449. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.taap.2023.116449>
- Colles, A. (2022). *Per- en polyfluoralkylstoffen in en rond de woning*.
- Cullmann A., S. G., Wägner N., von Hirschhausen C., Kemfert C. (2022). Wertvolle Ressource Wasser auch in Deutschland zunehmend belastet und regional übermäßig genutzt. *DIW Berichten*, 89. Jahrgang 7. Dezember 2022. https://doi.org/https://doi.org/10.18723/diw_wb:2022-49-1
- Cybulski, J., Witczak, A., & Pokorska-Niewiada, K. (2021). The Effect of Water and Sewage Treatment on Reducing Residues of Selected Organochlorine Pesticides in Szczecin (Poland). *Water, Air, & Soil Pollution*, 232(8), 310. <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05261-6>
- Dalahmeh, S. S., Thorsén, G., & Jönsson, H. (2022). Open-air storage with and without composting as post-treatment methods to degrade pharmaceutical residues in anaerobically digested and dewatered sewage sludge. *Science of The Total Environment*, 806, 151271. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151271>
- Damodaran, T., Bagyaraj, D., & Revanna, A. (2016). *Effect of chemical fertilizers on the beneficial soil microorganisms*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20802.79044>

- Dazhuang D., W. G., Lele L., Yuxin L., Yaodan D. (2025). Comprehensive understanding of microplastics in compost: Ecological risks and degradation mechanisms. *Science of The Total Environment*, 958, 178104. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.178104>
- De_Heyn, C. (2022). *Het effect van fermentatie op het overleven van wormeieren in paardenmest* Universiteit Gent]. Gent.
- Decker, K. D. (2010). Recycling animal and human dung is the key to sustainable farming.
- Dekker P., v. Z. M., Paauw J. (2010). *Levenscyclusanalyse groencompost - Grootschalig en zelf composteren* (bioKennis WUR, Issue. P. P. Omgeving & G. R. e. V. Businessunit Akkerbouw.
- Denali. (2014). Composting Human Waste from Mount McKinley with Worms.
- Derksen A., B. J. (2021). *PFAS in influent, effluent en zuiveringsslib - resultaten van een meetcampagne op acht RWZI's*.
- Deweer, C.-V. (2021). *Optimalisatie van de opweek van de zwarte soldatenvlieg op kippenmest* Universiteit Gent]. Gent.
- Diver, S. (2004). *Controlled Microbial Composting and Humus Management: Luebke Compost* ATTRA — National Sustainable Agriculture Information Service <https://www.biolit-natur.com/media/lubke-kompost-und-biolit-vulkangesteinsmehl.pdf>
- Donley, N., Cox, C., Bennett, K., Temkin, A. M., Andrews, D. Q., & Naidenko, O. V. (2024). Forever Pesticides: A Growing Source of PFAS Contamination in the Environment. *Environ Health Perspect*, 132(7), 75003. <https://doi.org/10.1289/ehp13954>
- Dussen. (2003). Composteren als levenswerk. *Dynamisch Perspectief*. <https://edepot.wur.nl/116109>
- El Fanssi S., O. N., Mandi L. (2019). Efficacité de l'épuration des eaux usées domestiques par filtres plantés et essais de réutilisation des eaux usées épurées en milieu rural marocain. *Geo-Eco-Trop.*, 2019, 43, 3, n.s.: 385-393. https://www.geoecotrop.be/uploads/publications/pub_433_08.pdf
- Eriksson, U., Haglund, P., & Karrman, A. (2017). Contribution of precursor compounds to the release of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) from waste water treatment plants (WWTPs). *Journal of Environmental Sciences*, 61. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2017.05.004>
- Fan, S., Li, A., ter Heijne, A., Buisman, C. J. N., & Chen, W.-S. (2020). Urine Addition as a Nutrient Source for Biological Wood Oxidation at 40 °C. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8(46), 17079-17087. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c04896>
- Fletcher, T., Andersson, A., Li, Y., Xu, Y., Lindh Christian, H., Kärrman, A., & Jakobsson, K. (2022). The relative importance of faecal and urinary excretion of PFAS and implications for epidemiological studies. *ISEE Conference Abstracts*, 2022(1). <https://doi.org/10.1289/isee.2022.O-OP-024>
- Franchitti, E., Pedullà, M., Madsen, A. M., & Traversi, D. (2024). Effect of anaerobic digestion on pathogens and antimicrobial resistance in the sewage sludge. *Environ Int*, 191, 108998. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108998>
- Geraats B., L. J. (2008). *Het effect van afkoppelen van hemelwater op de RWZI*. <https://www.stowa.nl/sites/default/files/assets/PUBLICATIES/Publicaties%202000-2010/Publicaties%202005-2009/STOWA%202008-14.pdf>
- Düngemittelverordnung - DüMV, (2012). https://www.gesetze-im-internet.de/d_mv_2012/D%C3%BCMV.pdf
- Gómez-Muñoz, B., Magid, J., & Jensen, L. S. (2017). Nitrogen turnover, crop use efficiency and soil fertility in a long-term field experiment amended with different qualities of urban and agricultural waste. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 240, 300-313. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.01.030>
- Govaerts, Y. (2022). *Perspectives de transition du secteur de l'assainissement individuel en Wallonie* Liège Université]. Gembloux.
- Greff, B., Szigeti, J., Nagy, Á., Lakatos, E., & Varga, L. (2022). Influence of microbial inoculants on co-composting of lignocellulosic crop residues with farm animal manure: A review. *Journal of*

- Environmental Management*, 302, 114088.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114088>
- Guilherme, I. (2023). Note explicative pour l'auto-construction d'un système Pitribon.
- Gundy, P., & Pepper, I. (2008). Survival of Coronaviruses in Water and Wastewater. *Food and Environmental Virology*, 1, 10-14. <https://doi.org/10.1007/s12560-008-9001-6>
- Häfner, F., Monzon, O., Tietjen, S., Schröder, C., & Krause, A. (2023). Recycling fertilizers from human excreta exhibit high nitrogen fertilizer value and result in low uptake of pharmaceutical compounds. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 1038175. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1038175>
- Hendriks, A. T. W. M., & Zeeman, G. (2009). Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, 100(1), 10-18.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.05.027>
- Howard A, W. Y. (1931). *The waste products of agriculture*. Oxford City Press.
- Huybrechts D., D. R. (2001). *Beste Beschikbare Technieken voor de verwerking van RWZI- en gelijkaardig industrieel afvalwaterzuiveringslib*.
https://emis.vito.be/sites/emis/files/pages/migrated/Zuiveringslib_volledig_rapport_0.pdf
- Huybrechts D., V. K. (2005). *Beste Beschikbare Technieken voor composteer- en vergistingsinstallaties*. A. Press.
https://emis.vito.be/sites/emis/files/pages/migrated/BBT_rapport_composteerinstallaties_volledig_document.pdf
- IBGE. (2012). *Production et gestion des boues et sédiments en région de Bruxelles-capitale*.
<https://multimedia.metabolismofcities.org/library/577349/download/577354/>
- ILVO_VMM. (2017). *Emissies naar oppervlakte water van medicijnen uit veterinaire gebruik*.
- Jacques A., R. I., Jacquemin P. (2025). *Détermination des valeurs de référence pour la population Wallonne - Phase 3 : adultes de 40 à 59 ans* (BIOMONITORING HUMAIN WALLON BMH-WAL, Issue.
- Janssens G., C. K., Huybrechts D. (2020). *Beste Beschikbare Technieken (BBT) voor huishoudelijke houtverwarming* (BBT-studies, Issue. VITO. https://emis.vito.be/sites/emis/files/study/BBT-studie_huishoudelijke_houtverwarming_Eindrapport_mei-2020.pdf
- Jenkins. (2019). *The humanure Handbook* (Fourth edition ed.). Joseph Jenkins, Inc.
- Karami, K., Karimi, K., Mirmohamadsadeghi, S., & Kumar, R. (2022). Mesophilic aerobic digestion: An efficient and inexpensive biological pretreatment to improve biogas production from highly-recalcitrant pinewood. *Energy*, 239, 122361. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122361>
- King. (2011). *Farmers of forty centuries* (S. Leeflang, Trans.).
- Koanda, A., Bayard, R., Naquin, P., Jean, G., Bévalot, F., Charline, B., & Gourdon, R. (2015). Co-compostage de résidus solides de toilettes sèches mobiles en présence de déchets verts. *Déchets, sciences et techniques*, 68. <https://doi.org/10.4267/dechets-sciences-techniques.183>
- Koulouri M. E., Q. M., Templeton M. R. and Fowler G. D. . (2024). Carbon flows and biochar stability during coprolysis of human faeces with wood biomass. *Environmental Science Water Research & Technology*, 2024, 10, 2709.
- Krause, A., Häfner, F., Augustin, F., Harlow, E., Boness, J.-O., & Udert, K. (2021). *Risikoanalyse zur Anwendung von Recyclingdüngern aus menschlichen Fäkalien im Gartenbau* (DIN-Connect, Issue.
- Krause, A., Häfner, F., Augustin, F., & Udert, K. (2021). Qualitative Risk Analysis for Contents of Dry Toilets Used to Produce Novel Recycling Fertilizers. *Circular Economy and Sustainability*, 1.
<https://doi.org/10.1007/s43615-021-00068-3>
- Krause A, H. F., Harlow E, Augustin F et al. (2020). *Qualitätssicherung von Recyclingprodukten aus Trockentoiletten zur Anwendung im Gartenbau*. Berlin, Germany: Beuth Verlag GmbH Retrieved from <https://www.dinmedia.de/de/technische-regel/din-spec-91421/330937272>

- Krause, A., Kaupenjohann, M., George, E., & Koepfel, J. (2015). Nutrient recycling from sanitation and energy systems to the agroecosystem-Ecological research on case studies in Karagwe, Tanzania. *African journal of agricultural research*, 10, 4039-4052. <https://doi.org/10.5897/AJAR2015.10102>
- Laan, P. (2019). *Verkenning verwaardiging van zuiveringsslib mbv biologische methoden*.
- Lienert, J., Bürki, T., & Escher, B. I. (2007). Reducing micropollutants with source control: substance flow analysis of 212 pharmaceuticals in faeces and urine. *Water Sci Technol*, 56(5), 87-96. <https://doi.org/10.2166/wst.2007.560>
- Lienert, J., Güdel, K., & Escher, B. I. (2007). Screening Method for Ecotoxicological Hazard Assessment of 42 Pharmaceuticals Considering Human Metabolism and Excretory Routes. *Environmental Science & Technology*, 41(12), 4471-4478. <https://doi.org/10.1021/es0627693>
- Lin, C., Kiprotich, C. N., Xuan-Thanh, B., & and Ngo, H. H. (2022). Composting and its application in bioremediation of organic contaminants. *Bioengineered*, 13(1), 1073-1089. <https://doi.org/10.1080/21655979.2021.2017624>
- Lofty, J., Muhawenimana, V., Wilson, C. A. M. E., & Ouro, P. (2022). Microplastics removal from a primary settler tank in a wastewater treatment plant and estimations of contamination onto European agricultural land via sewage sludge recycling. *Environmental Pollution*, 304, 119198. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119198>
- Louis Bolk, I. (2018). *Goedbodembeheer Mest en compost*. <https://irp-cdn.multiscreensite.com/1bce804b/files/uploaded/GBB%20Mest%20en%20Compost%20aug%202018.pdf> (Handboek Mest en Compost, 2001)
- Lübke. (1995). Microbial Inoculants for Controlled Composting of Organic Materials. <https://www.infric.or.jp/knf/PDF%20KNF%20Conf%20Data/C4-5-126.pdf> (Controlled Microbial Composting Group, Peuerbach, Austria)
- Luqman, A., Nugrahapraja, H., Wahyuono, R. A., Islami, I., Haekal, M. H., Fardiansyah, Y., Putri, B. Q., Amalludin, F. I., Rofiqah, E. A., Götz, F., & Wibowo, A. T. (2021). Microplastic Contamination in Human Stools, Foods, and Drinking Water Associated with Indonesian Coastal Population. *Environments*, 8(12).
- Maurya, N. (2012). Is human excreta a waste? *Int. J. of Environmental Technology and Management*, 15, 325-332. <https://doi.org/10.1504/IJETM.2012.049231>
- MIRA. (2007). *Milieurapport Vlaanderen, Achtergronddocument 2007 Vermesting*.
- Mühlenberg J., M. J. E., Kirsten C. (2024). *Characterisation of recycled fertilisers from dry toilet contents - analysis of nutrients, hygiene and harmful substances* <https://doi.org/DOI:10.17632/fjv2bf6mh2.2>
- Munoz, G., Michaud, A. M., Liu, M., Vo Duy, S., Montenach, D., Resseguier, C., Watteau, F., Sappin-Didier, V., Feder, F., Morvan, T., Houot, S., Desrosiers, M., Liu, J., & Sauv e, S. (2022). Target and Nontarget Screening of PFAS in Biosolids, Composts, and Other Organic Waste Products for Land Application in France. *Environmental Science & Technology*, 56(10), 6056-6068. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c03697>
- Nasri B., B. F., Fouch e O. (2018). Evaluation of the quality and quantity of compost and leachate from household waterless toilets in France. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(3), 2062-2078. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0604-z>
- Noe-Hays, A. (2023). *Practical Strategies for Reducing Ammonia Volatilization from Urine-Derived Fertilizers*. R. E. Institute.
- Nordin, A. (2010). *Ammonia Sanitisation of Human Excreta* [Doctoral Thesis, Swedish University of Agricultural Sciences]. Uppsala
- Nutricycle. (2022). *Actieplan Transitie Nutri ntenrecuperatie in Vlaanderen 2020-2025*
- NutriNorm. (2025). *CEC (Cation Exchange Capacity, bindingscapaciteit kleihumuscomplex)*. NutriNorm Nederland. <https://nutrinorm.nl/bodem/wat-levert-de-bodem-op/cec/>

- O'Callaghan, L., Olsen, M., Tajouri, L., Beaver, D., Hudson, C., Alghafri, R., McKirdy, S., & Goldsworthy, A. (2024). Plastic induced urinary tract disease and dysfunction: a scoping review. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*. <https://doi.org/10.1038/s41370-024-00709-3>
- Oosterbaan A., d. J. A., van Dijk A. (2013). Houtas terug naar het bos? *Vakblad Natuur Bos Landschap*. <https://edepot.wur.nl/274385>
- Oosterlinck, J. (2020). *Directe of indirecte zuivering van huishoudelijk afvalwater* (Publication Number 01501508) Universiteit Gent]. Gent. https://libstore.ugent.be/fulltxt/RUG01/002/839/697/RUG01-002839697_2020_0001_AC.pdf
- Pain, I. e. J. (1972). *Un autre jardin - Les méthodes Jean Pain* (I. Pain, Ed.). Ida Pain.
- Poocheera, S., Suntivarakorn, R., & Tredet, W. (2014). Biogas Production from Human Faeces and Community Waste Food. *Advanced Materials Research*, 931-932, 1101-1105. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.931-932.1101>
- Rose, C., Parker, A., Jefferson, B., & Cartmell, E. (2015). The Characterization of Feces and Urine: A Review of the Literature to Inform Advanced Treatment Technology. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 45(17), 1827-1879. <https://doi.org/10.1080/10643389.2014.1000761>
- Rousis, N. I., Gracia-Lor, E., Hernández, F., Poretti, F., Santos, M. M., Zuccato, E., & Castiglioni, S. (2021). Wastewater-based epidemiology as a novel tool to evaluate human exposure to pesticides: Triazines and organophosphates as case studies. *Science of The Total Environment*, 793, 148618. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148618>
- Růžičková J., R. H., Safar M., Koval S., Juchelková D., Kucbel M., Švédová B., Slamová K. (2022). Fate of microplastics during composting and their leachability. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 30, 100867. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2022.100867>
- Sayeed, M. (2023). *Human faeces, human urine and community food waste biogas production for clean energy and waste management in Dhaka city, Bangladesh*.
- Scheck, G. S., Greta / Krause, Ariane / von Hirschhausen, Christian. (2023). *Meta-Analyse von Life-Cycle-Assessments zu Toiletten mit Stoffstromtrennung an der Quelle* [Zusammenfassung - PDF]. ZirkulierBAR. https://zirkulierbar.de/wp-content/uploads/2024/03/zirkulierBAR_Meta-Analyse-LCA_TU-WIP.pdf
- Schinkel, L., Eberhard, Y., Maccagnan, A., Berg, M., & Mc Ardell, C. S. (2025). Antibiotics and other micropollutants in Swiss sewage sludge and fecal compost. *Chemosphere*, 375, 144216. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2025.144216>
- Schmitt, H. (2017). *Bronnen van antibioticaresistentie in het milieu en mogelijke maatregelen*.
- Schollier C., S. E. (2015). *Overzicht van de wetgeving bij afzet eindproducten van mestbe- en verwerking* (Deze publicatie kadert binnen het MIP3-project 'Nutricycle – groene kunstmest uit mest en digestaat' . , Issue.
- Schwabl, P., Köppel, S., Königshofer, P., Bucsis, T., Trauner, M., Reiberger, T., & Liebmann, B. (2019). Detection of Various Microplastics in Human Stool: A Prospective Case Series. *Ann Intern Med*, 171(7), 453-457. <https://doi.org/10.7326/m19-0618>
- Senathirajah, K., Attwood, S., Bhagwat, G., Carbery, M., Wilson, S., & Palanisami, T. (2021). Estimation of the mass of microplastics ingested - A pivotal first step towards human health risk assessment. *Journal of hazardous materials*, 404(Pt B), 124004. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124004>
- Słojewska, A., Łabuda, M., Królikowska, K., Bogucka, A., Sowińska, T., Mentel, O., Sikora, J., Knychalska, K., Kotkowiak, A., & Szema, A. (2025). Glyphosate: Human Exposure and Health Impacts — A Literature Review. *Journal of Education, Health and Sport*, 81, 60109. <https://doi.org/10.12775/JEHS.2025.81.60109>
- Smith, M. E. (1981). *Evaluation of compost toilets*. <https://www.fs.usda.gov/t-d/pubs/pdfimage/81231202.pdf>

- SPANC. (2014). *Guide SPANC: Assainissement non collectif - Guide d'accompagnement des services publics de l'ANC*. Paris: Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie Retrieved from <https://reseau-assainissement-ecologique.org/wp-content/uploads/2020/04/12032-2 ANC Guide-SPANC complet monte 2014 cle7a9567.pdf>
- Spijker, E. v. d. G. e. J. (2017). *Medicijnresten, pathogenen en antibioticaresistentie in struviet uit Nederlands huishoudelijk afvalwater*.
- Steunpunt_O&G. (2019). *Factsheet Pyrethroïde pesticiden*. S. O. e. Gezondheid. https://www.omgeving-en-gezondheid.be/sites/default/files/2022-04/factsheet_pyrethroïde%20pesticiden_2019.pdf
- Steunpunt_O&G. (2021). *Factsheet Perfluorverbindingen (PFAS)*. S. O. e. Gezondheid. https://www.omgeving-en-gezondheid.be/sites/default/files/2024-10/factsheet_PFAS_2021plus.pdf
- Steunpunt_O&G. (2024). *Factsheet Organofosfaatpesticiden* [Factsheet]. S. O. e. Gezondheid. https://www.omgeving-en-gezondheid.be/sites/default/files/2024-10/Factsheet%20Organofosfaat%20pesticiden_2024FINAL.pdf
- Styszko, K., Pamuła, J., Pac, A., & Sochacka-Tatara, E. (2023). Biomarkers for polycyclic aromatic hydrocarbons in human excreta: recent advances in analytical techniques-a review. *Environ Geochem Health*, 45(10), 7099-7113. <https://doi.org/10.1007/s10653-023-01699-1>
- SuSanA. (2008). *Towards more sustainable sanitation solutions - SuSanA Vision Document*. Sustainable Sanitation Alliance <https://p-uwayc3.project.space/en/knowledge-hub/resources-and-publications/library/details/267>
- Sutton R., X. Y., Moran K., Teerlink J. (2019). Occurrence and Sources of Pesticides to Urban Wastewater and the Environment. In A. Publications (Ed.), *Pesticides in Surface Water: Monitoring, Modeling, Risk Assessment, and Management* (Vol. Vol. 1308). <https://doi.org/10.1021/bk-2019-1308.ch005>
- TDM. (2017). *Caractérisation des pratiques et des impacts de la gestion des matières de Toilettes Sèches Mobiles*. ADEME.
- Teunen L., B. C., Dardenne F., Blust R., Covaci A. en Bervoets L. (2020). *Veldstudies naar monitoring van biota in het kader van de rapportage van de chemische toestand voor de Kaderrichtlijn Water 2015-2018 (algemene trends en relaties)*.
- Thompson, J. T., Chen, B., Bowden, J. A., & Townsend, T. G. (2023). Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Toilet Paper and the Impact on Wastewater Systems. *Environmental Science & Technology Letters*, 10(3), 234-239. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.3c00094>
- Timshina, A. S., Robey, N. M., Oldnettle, A., Barron, S., Mehdi, Q., Cerlanek, A., Townsend, T. G., & Bowden, J. A. (2024). Investigating the sources and fate of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in food waste compost. *Waste Management*, 180, 125-134. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.03.026>
- UNICEF_WHO. (2023). *Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000–2022: special focus on gender*. United Nations Children's Fund (UNICEF) and World Health Organization (WHO).
- Van den Abeele L, J. I. e. a. (2022). *Toetsingswaarden voor PFAS in afvalstoffen bestemd voor gebruik in of als bodemverbeteraar of meststof*. Mechelen: OVAM Retrieved from <https://publicaties.vlaanderen.be/view-file/49922>
- van den Broek, S., Nybom, I., Hartmann, M., Doetterl, S., & Garland, G. (2024). Opportunities and challenges of using human excreta-derived fertilizers in agriculture: A review of suitability, environmental impact and societal acceptance. *The Science of The Total Environment*, 957. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177306>
- van Egmond J.L., B. J., de Kreuk M. (2021). *Verkenning van verwijderingsroutes microplastics in de RWZI*. STOWA. <https://www.stowa.nl/sites/default/files/assets/PUBLICATIES/Publicaties%202021/STOWA%202021-51%20microplastics%20rwzi.pdf>

- Vanderreydt, I. (2021). *Einde-afval criteria voor wegwerpluiers*. OVAM.
- VCM. (2015). *Compostering van rundermest*. https://cdn.digisecure.be/vcm/2018212142929742_brochure-composteringsproef-vcm-leden.pdf
- Vercauteren M., S. I., Van Acker E., Pequeur E., Van Esch L., Uljee I., Asselman J., Janssen C. (2021a). *Onderzoek naar verspreiding, effecten en risico's van microplastics in het Vlaamse oppervlaktewater*. <https://vmm.vlaanderen.be/publicaties/onderzoek-naar-verspreiding-effecten-en-risico2019s-van-microplastics-in-het-vlaamse-oppervlaktewater-kernrapport>
- Vercauteren M., S. I., Van Acker E., Pequeur E., Van Esch L., Uljee I., Asselman J., Janssen C. (2021b). *Onderzoek naar verspreiding, effecten en risico's van microplastics in het Vlaamse oppervlaktewater (Deelrapport 3)*. <https://vmm.vlaanderen.be/publicaties/onderzoek-naar-verspreiding-effecten-en-risico2019s-van-microplastics-in-het-vlaamse-oppervlaktewater-deelrapport-3>
- Verhofstede, M. (2023). *Bouwen aan een levende en gezonde bodem - Masterclass "Bodem - Compost - Humus"*. In.
- Vijn M., W. J. (2020). *Menselijke urine als meststof voor eetbare planten: Inzameling, medicijnresten, wet- en regelgeving en maatschappelijke acceptatie* (Rapport / Wageningen University & Research Wetenschapswinkel, Issue. W. Wageningen.
- VLACO. (2021). *Van compost en digestaat, bodemorganische koolstof en koolstofcompensaties* Additionele Vlaco-data t.a.v. Dept L&V & Inagro naar aanleiding van overlegmomenten in mei 2021 https://vlaco.be/sites/default/files/generated/files/page/bodemorganische-koolstof-en-de-rol-van-compost-en-digestaat-vlaco-2021_0.pdf
- VLM. (2024). *Nitraatresidurapport 2023*. https://www.vlm.be/nl/SiteCollectionDocuments/Mestbank/Studies/Nitraatresidurapport_2023.pdf
- VMM. (2017). *Medicijnen in de waterketen. Resultaten verkennend onderzoek in de periode 2014-2016*. <https://vmm.vlaanderen.be/publicaties/medicijnen-in-de-waterketen-resultaten-verkennend-onderzoek-in-de-periode-2014-2016>
- VMM. (2018). *Waterverontreiniging door metalen in 2017*. VMM.
- VMM. (2019). *Waterverontreiniging in Vlaanderen*.
- VMM. (2020). *Jaarrapport Lucht Emissies en concentraties van luchtverontreinigende stoffen*.
- VMM. (2022a). *Oriënterend onderzoek naar diffuse verspreiding van PFAS in het freatisch grondwater in Vlaanderen*. https://assets.vlaanderen.be/image/upload/v1657309929/Onderzoek_naar_diffuse_verspreiding_van_PFAS_in_het_freatisch_grondwater_in_Vlaanderen_2022_gbzsza.pdf
- VMM. (2022b). *Perfluorverbindingen in bronnen voor de productie van drinkwater - 2021* [https://assets.vlaanderen.be/image/upload/v1655130248/PFAS - VMM - PFAS in de bronnen - juni 2022_y3xise.pdf](https://assets.vlaanderen.be/image/upload/v1655130248/PFAS_-_VMM_-_PFAS_in_de_bronnen_-_juni_2022_y3xise.pdf)
- Voidarou, C., Bezirtzoglou, E., Alexopoulos, A., Plessas, S., Stefanis, C., Papadopoulos, I., Vavias, S., Stavropoulou, E., Fotou, K., Tzora, A., & Skoufos, I. (2011). Occurrence of *Clostridium perfringens* from different cultivated soils. *Anaerobe*, 17(6), 320-324. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.anaerobe.2011.05.004>
- Wang M., W. Y., Zhao J., Liu Y., Gao L., Jiang Z., Zhang J., Tian W. (2022). Comparison of composting factors, heavy metal immobilization, and microbial activity after biochar or lime application in straw-manure composting. *Bioresource Technology*, 363, 127872. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127872>
- Ward, B. J., Yacob, T. W., & Montoya, L. D. (2014). Evaluation of Solid Fuel Char Briquettes from Human Waste. *Environmental Science & Technology*, 48(16), 9852-9858. <https://doi.org/10.1021/es500197h>

- Weithmann, N., Möller, J., Löder, M., Piehl, S., Laforsch, C., & Freitag, R. (2018). Organic fertilizer as a vehicle for the entry of microplastic into the environment. *Science Advances*, 4. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aap8060>
- Werner KA, P. A., Schneider D, El-Said K, Wöhrmann M, Linkert I, Hübner T, Brüggemann N, Prost K, Daniel R and Grohmann E. (2022). Thermophilic Composting of Human Feces: Development of Bacterial Community Composition and Antimicrobial Resistance Gene Pool. *Frontiers in Microbiology*, 13 - 2022, Article 13:824834. <https://doi.org/https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.824834>
- WHO. (2006). *WHO guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater*. W. Press.
- Wichuk, K., & McCartney, D. (2010). Compost stability and maturity evaluation - a literature review. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 37, 1505-1523. <https://doi.org/10.1139/L10-101>
- Willekens K, J. L. (2014). Compost levert complete bemesting. *bioKennis Bericht*.
- Yadav, K. D., Tare, V., & Ahammed, M. M. (2010). Vermicomposting of source-separated human faeces for nutrient recycling. *Waste Management*, 30(1), 50-56. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.09.034>
- Yan, Z., Liu, Y., Zhang, T., Zhang, F., Ren, H., & Zhang, Y. (2022). Analysis of Microplastics in Human Feces Reveals a Correlation between Fecal Microplastics and Inflammatory Bowel Disease Status. *Environmental Science & Technology*, 56(1), 414-421. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c03924>
- Zhang, Y., Lv, Z., Li, X., Zhao, K., Huang, S., Chen, Y., Fu, Y., Peng, C., Cao, T., Ke, Y., & Xia, X. (2023). Occurrence and risk assessment of antibiotics in feces of elderly individuals in Shenzhen. *Environ Sci Pollut Res Int*, 30(15), 44943-44951. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25522-7>