



**Vlaamse
overheid**

**Ecotoxicologische evaluatie
op basis van blad-, schors- en wortelstalen van
12 boomsoorten groeiend op de Chroom VI
verontreinigde site Keizersberg in Marke**

Opvolgingsperiode 2017-2020

Bruno De Vos, Camille Meeussen, Gerrit Genouw, Catherine M.H.M. Lemmens,
Benoit Allegaert, Andy Slabbinck en Jan Allegaert

INBO.BE - natuurenbos.be - OVAM.be

Auteurs:

Bruno De Vos (INBO), Camille Meeussen (INBO), Gerrit Genouw (INBO), Catherine M.H.M. Lemmens (OVAM), Benoit Allegaert (Envirosoil), Andy Slabbinck (Envirosoil) en Jan Allegaert (ANB)
Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek

Reviewers:

Suzanna Lettens (INBO)

Het INBO is het onafhankelijk onderzoeksinstituut van de Vlaamse overheid dat via toegepast wetenschappelijk onderzoek, data- en kennisontsluiting het biodiversiteitsbeleid en -beheer onderbouwt en evalueert.

Vestiging:

INBO Geraardsbergen
Gaverstraat 4
9500 Geraardsbergen
vlaanderen.be/inbo

e-mail:

bruno.devos@inbo.be

Wijze van citeren:

De Vos, B., Meeussen, C., Genouw, G., Lemmens, C.M.H.M., Allegaert, B., Slabbinck, A., Allegaert, J. (2022). Ecotoxicologische evaluatie op basis van blad-, schors- en wortelstalen van 12 boomsoorten groeiend op de Chroom VI verontreinigde site Keizersberg in Marke. Rapporten van het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek 2022 (16). Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek, Brussel.
doi.org/10.21436/inbor.75323225

D/2022/3241/222

Rapporten van het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek 2022 (16)

ISSN: 1782-9054

Verantwoordelijke uitgever:

Maurice Hoffmann

Foto cover:

Kenmerkende gele kleur van Chroom VI verontreiniging in een waterplas op de verontreinigde site

Dit onderzoek werd uitgevoerd in samenwerking met :

OVAM en ANB

AGENTSCHAP
NATUUR & BOS

SAMEN MAKEN WE
MORGEN MOOIER
OVAM

INSTITUUT
NATUUR- EN BOSONDERZOEK

ENVIROSOIL
ENVIRONMENTAL CONSULTANCY



Dit werk valt onder een [Creative Commons Naamsvermelding-GelijkDelen 4.0 Internationaal-licentie](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).

ECOTOXICOLOGISCHE EVALUATIE OP BASIS VAN BLAD-, SCHORS- EN WORTELSTALEN VAN 12 BOOMSOORTEN GROEIEND OP DE CHROOM VI VERONTREINIGDE SITE KEIZERSBERG IN MARKE

Opvolgingsperiode 2017-2020

**Bruno De Vos (INBO), Camille Meeussen (INBO), Gerrit Genouw (INBO),
Catherine M.H.M. Lemmens (OVAM), Benoit Allegaert (Envirosoil), Andy
Slabbinck (Envirosoil) en Jan Allegaert (ANB)**

doi.org/10.21436/inbor.75323225

Dankwoord/Voorwoord

Deze studie werd uitgevoerd in het kader van een pilootproef die de mogelijkheden en beperkingen van fyto-remediatie op een chroom III en VI verontreinigde site moet nagaan. De site is gelegen in Marke op een natuurterrein (De Preshoek) beheerd door Agentschap Natuur en Bos. De pilootproef werd uitgewerkt en opgestart na het uitvoeren van een BSP door Envirosoil NV in opdracht van OVAM. Het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek (INBO) werd van bij het begin betrokken bij de problematiek rond deze specifieke bodemverontreiniging met tri- en hexavalent chroom voor het verlenen van advies en wetenschappelijke begeleiding.

Derhalve willen we volgende personen hartelijk bedanken voor hun constructieve medewerking aan dit multi-stakeholders project en de mogelijkheden die ze INBO hebben geboden om deze deelstudie uit te voeren:

Catherine M.H.M. Lemmens van OVAM voor de opdracht, de vraagstelling en het financieel ondersteunen van deze studie:

Benoit Allegaert en Andy Slabbinck van Envirosol NV, voor het praktisch uitwerken en uitvoeren van de pilootproef, de technische ondersteuning en het ter beschikking stellen van alle relevante data en bijkomende metingen;

Jan Allegaert, boswachter van ANB, voor het aanbrengen van de plantsoenen (berken en akkerwinde), het planten en de natuurbeheersmatige opvolging van dit project.

Verder dank aan Camille Meeuwsen, die als net afgestuurde bioingenieur en werkzaam als jobstudent bij INBO assisteerde bij de blad-, schors- en wortelstaalnames in de maanden augustus-september 2017.

Ook dank aan Gerrit Genouw, hoofd van de INBO laboratoria, Els Mencke, verantwoordelijke analytisch labo en aan alle laboranten die de stalen hebben geanalyseerd en gerapporteerd.

Moge dit rapport een aanzet zijn tot het beter begrijpen van het gedrag van tri- en hexavalent chroom in het natuurlijk milieu en de potentiële risico's die eraan verbonden zijn voor het bosecosysteem, mens, dier en omgeving.

Samenvatting

De site Keizersberg is wetenschappelijk interessant door een lokaal zeer hoge contaminatie van zowel trivalent als hexavalent chroom (Cr) in de bodem. In een afgebakende zone werd herhaaldelijk sterfte vastgesteld van zwarte els, wat wijst op een mogelijks acuut toxisch effect. De bodemanalyses van Envirosol NV en INBO wezen uit dat de bodemverontreiniging hoofdzakelijk te maken heeft met historische verontreiniging met Cr en in mindere mate met Ni, en dat de andere onderzochte zware metalen Zn, Cd, Pb, As, Cu, Co, Se en Hg op dit terrein niet in verhoogde concentraties voorkwamen. De verontreiniging met Cr is dus zeer specifiek wat element-gericht onderzoek mogelijk maakt.

Door een verkennende staalname bij 12 boom- en struiksoorten in het gebied stelden we variaties vast tussen de soorten voor wat betreft hun blad-, schors- en wortelgehalten. De hoogste bladgehalten aan Cr werden vastgesteld bij zwarte els, de soort die bovengronds de meest duidelijke symptomen van vitaliteitsverlies vertoonde. De hoogste wortelconcentraties troffen we aan bij schietwilg en berk. Gewone es vertoonde eerder lagere blad-, schors- en wortelconcentraties.

Dit onderzoek bevestigt het gegeven uit de wetenschappelijke literatuur dat chroomgehalten in de wortels een factor 10 tot 100 hoger zijn dan in blad of schors. Zelfs bij de uitzonderlijk hoge bodemconcentraties in de pilootproef (tot 14000 $\mu\text{g Cr g}^{-1}$ DS en 2200 $\mu\text{g g}^{-1}$ Cr(VI)) werd bovengronds niet meer dan 13.9 $\mu\text{g Cr g}^{-1}$ DS in de berkenbladeren teruggevonden. Deze bladconcentraties waren tijdens de monitoringsperiode van 2017-2020 steeds het hoogst in het droogtejaar 2018, zowel voor berk als zwarte els. Dat doet vermoeden dat het neerslagregime een rol speelt bij het opnameproces.

De afdeklaag van 30 cm heeft een duidelijk effect op de groei van kruiden, maar zorgt tegelijk voor een verhoogde (wortel)concurrentie voor vocht met de proefbomen. De vitaliteit en groei van het berkenplantsoen over de 4 groeijaren was statistisch niet beter dan in de onafgedekte zones, en er werd evenveel uitval door sterfte vastgesteld. In de proefbomen op de afdeklaag werden wel hogere bladconcentraties aan N, P, K en Ca vastgesteld, maar lagere Mg gehalten. We noteerden ook significant hogere bladconcentraties aan Cd en Zn in de proefbomen op de afdeklaag, maar geen significant hogere concentraties aan Pb, Cu, Cr of Ni. De aangebrachte afdeklaag op deze verontreinigde site heeft blijkbaar geen of beperkte meerwaarde om (bovengrondse) opname van Cr in het proefplantsoen van berk te beperken. Bovendien lijken de bodemconcentraties aan Cr in de afdeklaag toe te nemen na 2018. Daarvoor konden we nog geen duidelijke verklaring vinden. Wel stelden we in te begin vast dat de concentraties in het blad van akkerwinde op de afdeklaag beduidend lager waren.

Akkerwinde kon zich niet bewijzen als potentiële Cr-hyperaccumulator. De vitaliteit en groei van de aangeplante exemplaren tijdens de droge zomers van 2017 en 2018 was ondermaats en de Cr-accumulatie ruim onder de verwachting.

De hoogste concentraties van Cr in bovengrondse biomassa stelden we vast in spontaan ontwikkelde paddenstoelen in de nabijheid van de centrale berk in de proefzone. Tot $209 \mu\text{g Cr g}^{-1}$ DS werd aangetroffen in een Vaalhoed soort die mycorrhizen vormt met berk. Dit is opmerkelijk omdat de wetenschappelijke literatuur aangeeft dat de meeste zwammen geen of zeer weinig Cr accumuleren. Echter één literatuurbron vermeldt dat bodems verontreinigd met Cr(VI) wel verhoogde Cr-opname in paddenstoelen kan veroorzaken wat wellicht hier het geval is. Hierdoor kan Cr in het bovengrondse voedselweb terechtkomen en leiden tot biomagnificatie.

In dit project werden Cr(III) en Cr(VI) in de bodem apart bepaald. Cr(VI) is wateroplosbaar en het meest toxisch: het gedrag ervan baart dan ook de meeste zorgen. Door de hoge neutrale tot basische bodem-pH binnen het onderzoeksgebied wordt Cr(III) vooral geïmmobiliseerd in de bodem en in de planten ter hoogte van de wortelmembranen.

De hoge concentraties van trivalent en vooral hexavalent Cr in het oppervlaktewater van grachten en poelen in het studiegebied zijn onmiskenbaar het grootste toxicologische risico, zowel voor aquatische en terrestrische fauna, als voor de dieren die ingezet worden voor begrazing (schapen, paarden). Via deze weg zijn kunnen ook risico's voor de mens ontstaan.

////////////////////////////////////

Aanbevelingen voor beheer en/of beleid

- Boomsoortenkeuze is van belang. Wat betreft bovengrondse Cr-concentraties treffen we de hoogste meetwaarden aan in het blad van zwarte els, niet toevallig de soort waar de meeste sterfte werd vastgesteld. We stellen voor geen zwarte els meer aan te planten op de met Cr verontreinigde sites in Keizersberg en Rekkem.
- In de onderzochte vruchten (bessen, noten, appels) vonden we geen beduidende Cr-gehalten. Dit bevestigt de wetenschap dat Cr niet wordt opgenomen in vruchten. Derhalve is er bijna geen risico voor Cr-doorvergiftiging via eetbare vruchten naar de avi(fauna) en de mens.
- Wel werden hoge Cr gehalten vastgesteld in paddenstoelen die sporadisch verschijnen in de buurt van berk. Indien deze paddenstoelen aangevreten worden, vormt dit een risico op biomagnificatie. Mogelijks kunnen die paddenstoelen als bio-indicator gebruikt worden.
- De vastgestelde vraat aan schors en blad van de bomen op Keizersberg door de schapen en pony's die voor begrazing worden ingezet zal wellicht niet leiden tot toxische effecten bij de dieren vermits de concentraties beduidend lager zijn dan de maximaal toelaatbare dosissen vermeld in de literatuur.
- Uit de resultaten van de pilootproef tijdens de monitoringsperiode 2017-2020 blijkt het nut van een afdeklaag van 30 cm voor het beperken van Cr-opname in bomen niet bewezen.
- De recent vastgestelde Cr-concentraties in het water van de gracht en verzamelput zijn tot 20x hoger dan de veilige drinkwaternormen voor vee ($100 \mu\text{g Cr l}^{-1}$). Er moet nagegaan of het lokale drinkwater (in poelen, plassen, grachten) voor het vee voldoet. Zeker wanneer het water een geelkleuring heeft is het dat zeker niet. Wanneer verdacht moeten maatregelen genomen worden om het vee enkel te laten drinken van leidingwater.
- Chroom accumuleert vooral in de wortels van bomen- en struiken. Bovengronds materiaal van Keizersberg kan zonder probleem afgevoerd worden voor compostering en/of verwerking (brandhout, geriefhout), maar wortels beter niet. Tenzij wortels worden geoogst om Cr selectief uit het gecontamineerde ecosysteem te halen (vorm van sanering), worden ze in alle andere gevallen best ter plaatse gelaten.

English abstract

The 'Keizersberg' site, nearby Kortrijk city (NW-Flanders), is scientifically highly interesting due to very elevated soil contamination levels by both trivalent and hexavalent chromium. In the past, dieback of Alder (*Alnus glutinosa*) was repeatedly reported by the Forest Service (ANB) at a specific location on that site and linked to a possible acute toxic effect of trace metals in Alder trees.

Soil analyses by Envirosoil NV and by INBO evidenced the presence of historical soil contamination, predominantly with Cr and to a lesser extent with Ni. It was also shown that many other heavy metals like Zn, Cd, Pb, As, Cu, Co, Se and Hg were clearly well below critical soil sanitation levels. Hence, the trace metal pollution seemed to be very specific at this site, enabling targeted research and ecological risk assessment of the Chromium element only.

In this study we sampled 12 trees and shrub species, and found among these species substantial variation in their heavy metal concentrations in leaves, bark and roots. The highest foliar concentrations of Cr were indeed detected in Black Alder, the tree species showing the most prominent symptoms of all investigated species. Conversely, the highest Cr concentrations in the root compartment were found in Willows and Birches. Common Ash proved to have lower foliar, bark and root concentration levels.

Chromium concentrations in roots were found to be a factor 10-100 more elevated than in foliage or bark. On the extremely contaminated locations with Cr concentration levels up to 14000 $\mu\text{g Cr g}^{-1}$ and 2200 $\mu\text{g Cr(VI)}$ we found no more than 13.9 $\mu\text{g Cr g}^{-1}$ DS in the leaves of Birch trees. These concentrations were found highest in the drought year 2018, both for Birch and Alder, indicating that rainfall and soil moisture regime might play a role in the plant uptake of Chromium.

The capping layer of 30 cm in the Pilot experiment had a beneficial effect on ground vegetation development, but at the same time enhanced (root)competition for soil moisture with the trees. The vitality and growth of the planted Birches during the 4-year monitoring period was statistically not better than in the non-capped zone and the mortality rate was similar in the capped zone. In the foliage of the tested trees growing in the capped zone more elevated concentrations were found of the macronutrients N, P, K and Ca, but lower Mg contents. Also significant higher Cd and Zn concentrations were found in the Birch trees in the capped zone whereas non-significant differences with the uncapped zone were found for Pb, Cu, Cr and Ni. The capping layer of 30 cm was inadequate to reduce the Cr uptake in Birch trees compared to the non-capped (contaminated) soil. Furthermore we observed an increase in Cr concentrations in the capped layer since 2018, which could not be explained yet. In the foliage of the field bindweed (*Convolvulus arvensis*) that was introduced as a test plant, lower Cr concentrations were detected when it grew on the capped layer compared to the contaminated soil. So the capped layer makes a difference for herbs.

Field bindweed, known as a potential hyperaccumulator could not prove itself in this trial due to the fact that only 2 plantings survived the dry summers of 2017 and 2018. Their vitality and growth was rather disappointing and Cr accumulation lower than expected.

The highest concentrations of Cr in aboveground biomass were found in mushrooms that popped up close to the central Birch tree in the experimental zone. Up to 209 $\mu\text{g Cr g}^{-1}$ was found in a *Hebeloma* species, which was surprising since most mushrooms are known as Cr-excluders which do not contain nor accumulate much Cr. However, one peer reviewed study

////////////////////////////////////

clearly stated that mushrooms preferentially take up Cr(VI) compared to Cr(III) and can act as bioindicators for Cr(VI) pollution. This is confirmed by our observations. This may indicate a risk that excess Cr is entering the aboveground food-web, which may lead to bio-magnification.

Chromium contents quantified in the fruits and seeds of trees and shrubs confirm current literature that most heavy metals are not accumulated in them. Hence, further metal transfer and biomagnification is avoided through insects, birds and mammals (including humans).

Both Cr(III) and Cr(VI) were determined in soils. As Cr(VI) is water soluble it is commonly considered as the most toxic form which needs special ecotoxicological attention. Since the study site has neutral to alkaline conditions (high pH), Cr(III) is expected to be immobilised in the soil and by the root membranes of plants.

Phytoextraction of Cr by forest trees using aboveground biomass seems not feasible and realistic. Theoretically, excavating the root biomass containing high Cr contents would be much more efficient to 'harvest' or extract total Cr from the soil, but this seems quite destructive for the ecosystem and soil environment.

Since acceptable concentrations of Cr were found in the aboveground tree components, including fruits and seeds, phytostabilisation is a more promising option even for soils heavily polluted by Cr in the study area. Most likely the uptake of more toxic Cr(VI) is greater than Cr(III) in the aerial tree compartments and is biochemically treated by the trees and reduced to less toxic Cr(III) as a way of soft sanitation. This process needs to be confirmed by experiment in order to avoid collateral damage to the ecosystem.

The elevated concentrations of trivalent and especially hexavalent chromium in the surface waters within the study area most probably causes the greatest ecotoxicological risk, both for aquatic and terrestrial fauna and wildlife, as for the domestic animals (sheep and horses).

More insight in the behaviour of Cr in the forest ecosystem by monitoring and experiments will allow to develop best practices for proper soil management and sustainable nature conservation in these contaminated areas. Some suggestions for further research are given at the end of this report.

Inhoudstafel

Dankwoord/Voorwoord	2
Samenvatting	3
Aanbevelingen voor beheer en/of beleid	5
English abstract.....	6
Lijst van figuren.....	10
Lijst van tabellen	12
1 Inleiding	14
2 Studiegebied	16
2.1 Site Keizersberg.....	16
2.1.1 Algemeen.....	16
2.1.2 Chroomverontreiniging in de bodem	19
2.1.3 Pilootproef.....	22
2.2 Site Rekkem E17 LAR – Brug Triloystraat.	23
3 Materiaal en methoden	25
3.1 Survey boomsoorten	25
3.1.1 Selectie boomsoorten	25
3.1.2 Staalname van bladeren, schors, wortels en vruchten	26
3.1.3 Chemische analyse van blad, schors, wortels en vruchten	28
3.2 Pilootproef.....	29
3.2.1 Aanleg van de pilootproef	29
3.2.2 Staalname en analyse testplant akkerwinde	33
3.2.3 Staalname en analyse van paddestoelen	33
3.3 Site Rekkem.....	35
3.3.1 Staalname en analyse blad	35
3.4 Statistische verwerking	35
3.4.1 Statistische technieken	35
3.4.2 Waarden onder bepaalbaarheidsgrens	35
4 Resultaten.....	37
4.1 Boomsoort specifieke opnamepatronen.....	37
4.1.1 Bladconcentraties	37
4.1.1.1 Macronutriënten	37
4.1.1.2 Zware metalen	39
4.1.2 Schorsconcentraties	44
4.1.2.1 Macronutriënten	44
4.1.2.2 Zware metalen	44
4.1.3 Wortelconcentraties.....	46
4.1.3.1 Macronutriënten	46
4.1.3.2 Zware metalen	47
4.1.4 Gehalten in vruchten.....	48
4.1.5 Verhoudingen tussen compartimenten inzake Cr gehalten.....	50
4.2 Pilootproef.....	52
4.2.1 Vitaliteit en groei	52
4.2.2 Bodemvocht	54
4.2.3 Bodemconcentraties	54
4.2.3.1 Initiële bodemconcentraties (To) pilootproef	54
4.2.3.2 Evolutie bodemconcentraties pilootproef 2017-2020.....	57
4.2.4 Bladanalyses	60

////////////////////////////////////

Lijst van figuren

Figuur 1.	Google maps orthofoto van het gebied Keizersberg met aanduiding van de sterk verontreinigde zone (rode dot), tevens locatie van de pilootproef [LAT=50.79337, LONG=3.23605]	16
Figuur 2.	Foto van infopaneel met aanduiding van de toponiemen Keizersberg en Klarenhoek	16
Figuur 3.	Detailkaart van het gebied Preschoekbos, deel Klarenhoek met aanduiding van beboste zones (B), braakliggend terrein (brk), weiland (we), akker (ak) en poelen (poel). Rode lijn is afsluiting ANB. Groene zone is MTB zone. Bron: Agentschap Wegen	18
Figuur 4.	Orthofoto met aanduiding van de bodempolygonen van de Belgische bodemkaart (rood omlijnd), de proefzone (geel omlijnd) en de bemonsterde bomen (witte stippen). Binnen elke bodempolygoon wordt de bodemserie (rode code).	19
Figuur 5.	Envirosoil nv syntheseskaart van de chroom bodemverontreiniging. Grijs lijnen zijn wandelpad en MTB pad, rode lijn is afsluiting van ANB doorheen terrein. De blauwe polygoon is de 'kale' zone waar tevens sterfte werd vastgesteld. Rood gemarkeerde boorlocaties zijn verontreinigd aan Cr(VI).	20
Figuur 6.	Detail van Envirosoil nv chroom-verontreinigingskaart rondom de kale zone (blauwe polygoon) met aangifte van de Cr totaal, Cr(III) en Cr(VI) verontreinigingsgraad in tabelvorm voor de staalnamelocaties. Rode meetwaarden indien BSNI werd overschreden; rode puntlocaties indien de bodemsaneringsnorm voor Cr(VI) werd overschreden.	21
Figuur 7.	Deel van de onbegroeide 'kale plek' ter hoogte van de blauw omlijnde zone in Figuur 6.	22
Figuur 8.	Door ANB aangeplante zwarte elzen sterven bovengronds af en vertonen nadien nog wortelopslag	22
Figuur 9.	Staalname op een kort transect tussen begroeid en onbegroeid gedeelte: (1) onbegroeid, (2) zone met enkel mossen, (3) zone met kruidachtige vegetatie	22
Figuur 10.	Scherpe overgang tussen zone met levende en dode mossen	22
Figuur 11.	Situering van afgedekte chroomverontreiniging in een nabijgelegen gebied	23
Figuur 12.	Gebruik van een polyesterweefsel gewapend membraan om Cr(VI)- verontreinigde taluds civieltechnisch te isoleren.	23
Figuur 13.	Staalnamelocaties in de verontreinigde Site te Rekkem	24
Figuur 14.	Prunus struiken (inlandse kers) voor bladstaalname op het talud niet voorzien van folie.	24
Figuur 15.	Salix bomen/struiken in drainagekanalen van met membraan afgedekt gedeelte	24
Figuur 16.	Locatie van de boomsoorten op de site Keizersberg	26
Figuur 17.	Staalname van bladeren met geopositionering	27
Figuur 18.	Staalname van berkenschors	27
Figuur 19.	Linksboven: uitgegraven zone met doorgang naar poort volgens schema rechtsboven. Onder: aanbrengen van de afdeklaag op het talud bovenop de gecontamineerde bodem	29
Figuur 20.	Schematische voorstelling van de finale indeling van de pilootproef in 6 zones.	30
Figuur 21.	Aanplanting van de berken door ANB/INBO.	31
Figuur 22.	Overzicht van de proefzone voor en na aanplanting van de proefbomen	31
Figuur 23.	Bodemvochtsensor HH2 (rechts) voor meting aan voet van testbomen en PlantCare sensor (links) voor continue bodemtemperatuur en bodemvochtmeting	32
Figuur 24.	Overlevende en afgestorven akkerwinde ingebracht in de pilootproef (links) en afgestorven exemplaar na 1 seizoen (rechts)	33
Figuur 25.	Paddenstoelen aangetroffen in november 2017 ter hoogte van de berk in het onafgedekte gedeelte van de pilootproef.	34
Figuur 26.	Pearson correlatietabel voor alle zware metaal-bladconcentraties over alle soorten heen. Histogram van elke variabele op diagonaal, scatterplot met lowess regressie onder diagonaal en Pearson correlatiecoëfficiënt boven de diagonaal. Hoe roder (positief gecorreleerd) en groter het getal hoe hoger de correlatie. Waarden onder LoQ zijn niet gebruikt.	42
Figuur 27.	Bubble plot van Cr bladgehalten ongeacht de boomsoort. Hoogste Cr gehalten komen overwegend voor nabij de proefzone.	43

////////////////////////////////////

1 INLEIDING

Om de mogelijkheden en beperkingen van fyto-remediatie op een chroom III en VI verontreinigde site na te gaan werd begin april 2017 door Envirosoil in opdracht van OVAM een pilootproef aangelegd op een talud in Marke, op de zogenaamde Keizersberg. Dit kaderde in het Beperkt 1^{ste} gefaseerd bodem-saneringsproject (BSP) deel pilootproef zone 1 van dd. 06/12/2016, ref. Envirosoil EB1501/031.

Voor de studie aangaande fytoremediatie werd door de OVAM op dd. 13/12/2016 een conformverklaring met ref. C16473 opgemaakt.

Op de plaats van de pilootproef werd immers voorheen door het Agentschap Natuur en Bos (ANB) en het Instituut voor Bos- en Natuuronderzoek (INBO) sterfte vastgesteld van bosplantsoen, hoogstwaarschijnlijk te wijten aan hoge concentraties van hexavalent chroom (Cr(VI)) in bodem en grondwater. In het kader van de pilootproef werden 60 berken aangeplant, waarvan 30 in zone 2 rechtstreeks in de verontreinigde bodem (referentie) en 30 proefbomen in zone 5 voorzien van een 30 cm dikke afdeklaag bovenop de verontreinigde bodem. Tevens werd geëxperimenteerd inzaaien van berken (zones 1 & 4) én met aanplanten van akkerwinde om de prestaties van deze woekerplant te testen als potentiële hyperaccumulator voor chroom, en dus de mogelijkheden voor fytoextractie met kruidachtige planten te evalueren.

De pilootproef werd van 2017 tot 2020 wetenschappelijk opgevolgd door INBO in nauwe samenwerking met Envirosol, OVAM en ANB. Het is immers pas na een aantal groeijaren dat de respons van bodemverontreiniging op bomen betrouwbaar kan vastgesteld worden. Bij de aanvang van de pilootproef werd tevens een verkennende analyse gedaan bij 12 boomsoorten in de directe omgeving van de proef, teneinde na te gaan welke soorten meer of minder Cr en andere zware metalen opnemen.

Door de chemische analyse van diverse organen van de bomen (bladeren, schors, wortels) kan nagegaan worden hoe en in welke mate zware metalen opgenomen worden door de vegetatie en verspreid worden in het milieu. Deze techniek wordt al meer dan 25 jaar toegepast door het INBO bij de ecotoxicologische risico-evaluatie van metaalverontreinigde baggergronden en Sigma overstromings-gebieden in Vlaanderen. De opnamepatronen voor zware metalen zijn soort- (en zelfs kloon-) specifiek en ook de proportionele allocatie van de zware metalen in de delen van de plant: in bladeren, stengel/stam of wortels. Het is belangrijk voor elk zwaar metaal deze allocatie-patronen te kennen, niet alleen voor de biomonitoring maar ook om de potenties voor fyto-extractie (maximale extractie van zware metalen via planten) of fyto-stabilisatie (minimale bovengrondse transfer van zware metalen) na te gaan. Van de ‘courante’ zware metalen Zn, Cd, Pb, Cu is al heel wat hierrond gekend maar minder voor Ni en Cr en al zeker niet voor hexavalent Cr(VI), vandaar het wetenschappelijke belang dat INBO heeft in deze proef. Ook het Kabinet en OVAM heeft bijzondere interesse in zachte sanering van metaal-verontreinigde bodems en wilden dit pilootproject ondersteunen. Onderstaand artikel verscheen in de OVAM nieuwsbrief (2017) om het pilootproject aan te kondigen en de onderzoeksvragen te schetsen.

Proefproject in Kortrijk zet planten in tegen verontreiniging

 10 maart 2017



Eind jaren zestig werd bij de aanleg van de E17 en de verkeerswisselaar met de A17 30 à 40 000 m³ chroomhoudende 'grond' aangevoerd voor de aanleg van een werfweg. Dat resulteerde in de verontreiniging van de bodem tussen de Klarenhoek en de Keizerstraat in Kortrijk. Er worden chroomconcentraties gemeten tot 10.000 mg/kg droge stof (grootteorde 100 keer de bodemsaneringsnorm voor chroom III en 300 keer de bodemsaneringsnorm voor chroom VI).

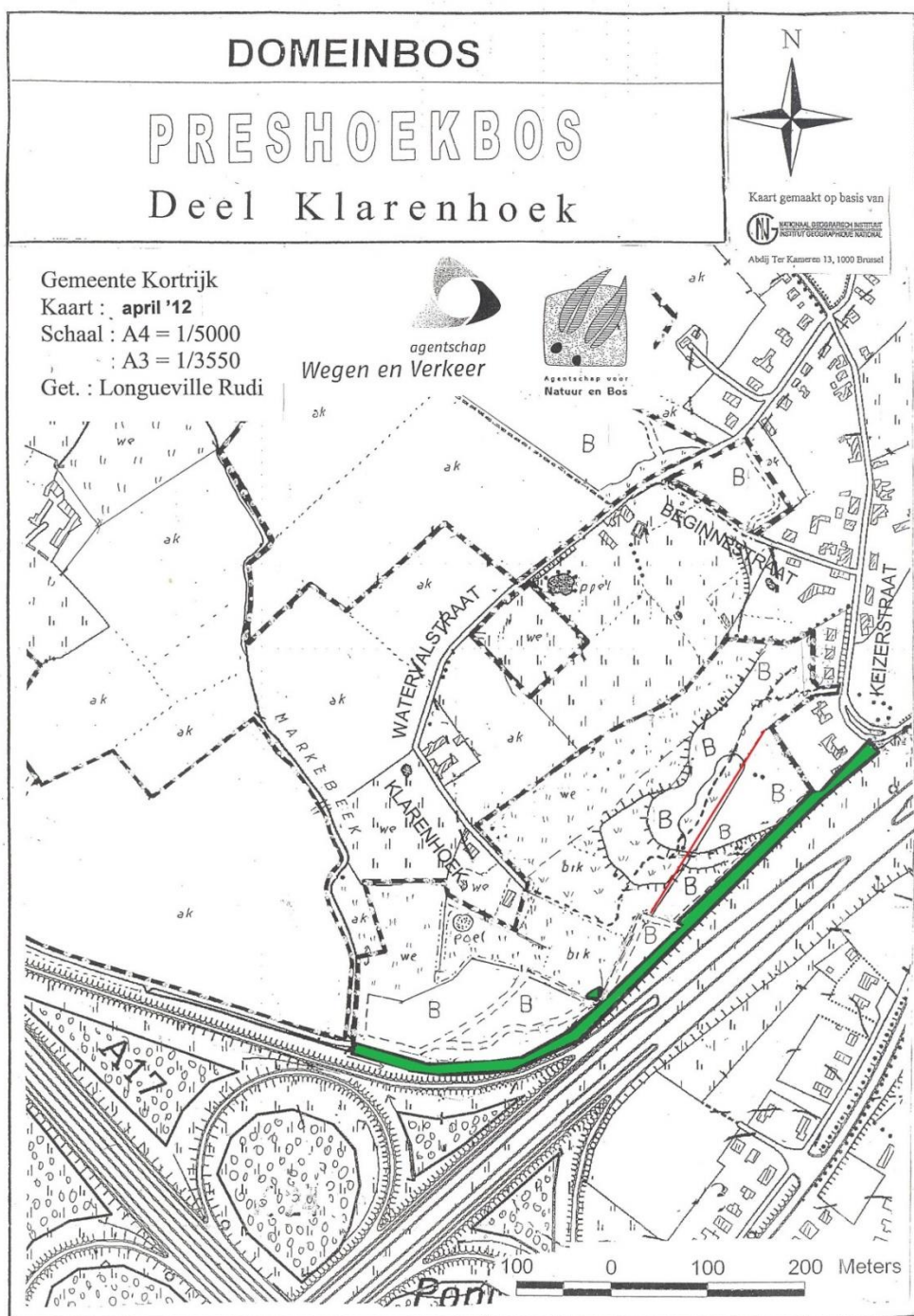
Planten doen het werk

De verontreinigde zone bevindt zich in een voor het publiek afgeschermd deel van een natuurgebied dat beheerd wordt door het Agentschap voor Natuur en Bos (ANB). In onderling overleg tussen de OVAM, het ANB en het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek (INBO) is er gekozen voor een alternatieve saneringstechniek: fytoremediatie. Dat betekent dat we planten zullen inzetten om schadelijke stoffen in de bodem enerzijds vast te leggen en anderzijds te verwijderen.

On-site starten we een proefproject van drie jaar op waarbij berken en akkerwinde worden aangeplant. De berken zullen voor fyto-stabilisatie zorgen (het vastleggen van de schadelijke stoffen), terwijl de akkerwinde als fyto-extractor dienst zal doen (de stoffen verwijderen). Er worden ook referentiezones meegenomen, zodat we zicht hebben op de spontane evolutie van de opeenvolgende successiestadia van andere planten: van pioniersplanten over grassen en ruigte tot struiken en bomen.



Dit rapport bundelt alle data en kennis opgedaan tijdens de opvolgingsperiode van de pilootproef 2017-2020. Op basis hiervan worden duidelijke conclusies getrokken en aanbevelingen gedaan voor het verdere beheer van dit natuurgebied en voor het saneringsbeleid van chroom verontreinigde gronden.



Figuur 3. Detailkaart van het gebied Preshoekbos, deel Klarenhoek met aanduiding van beboste zones (B), braakliggend terrein (brk), weiland (we), akker (ak) en poelen (poel). Rode lijn is afsluiting ANB. Groene zone is MTB zone. Bron: Agentschap Wegen

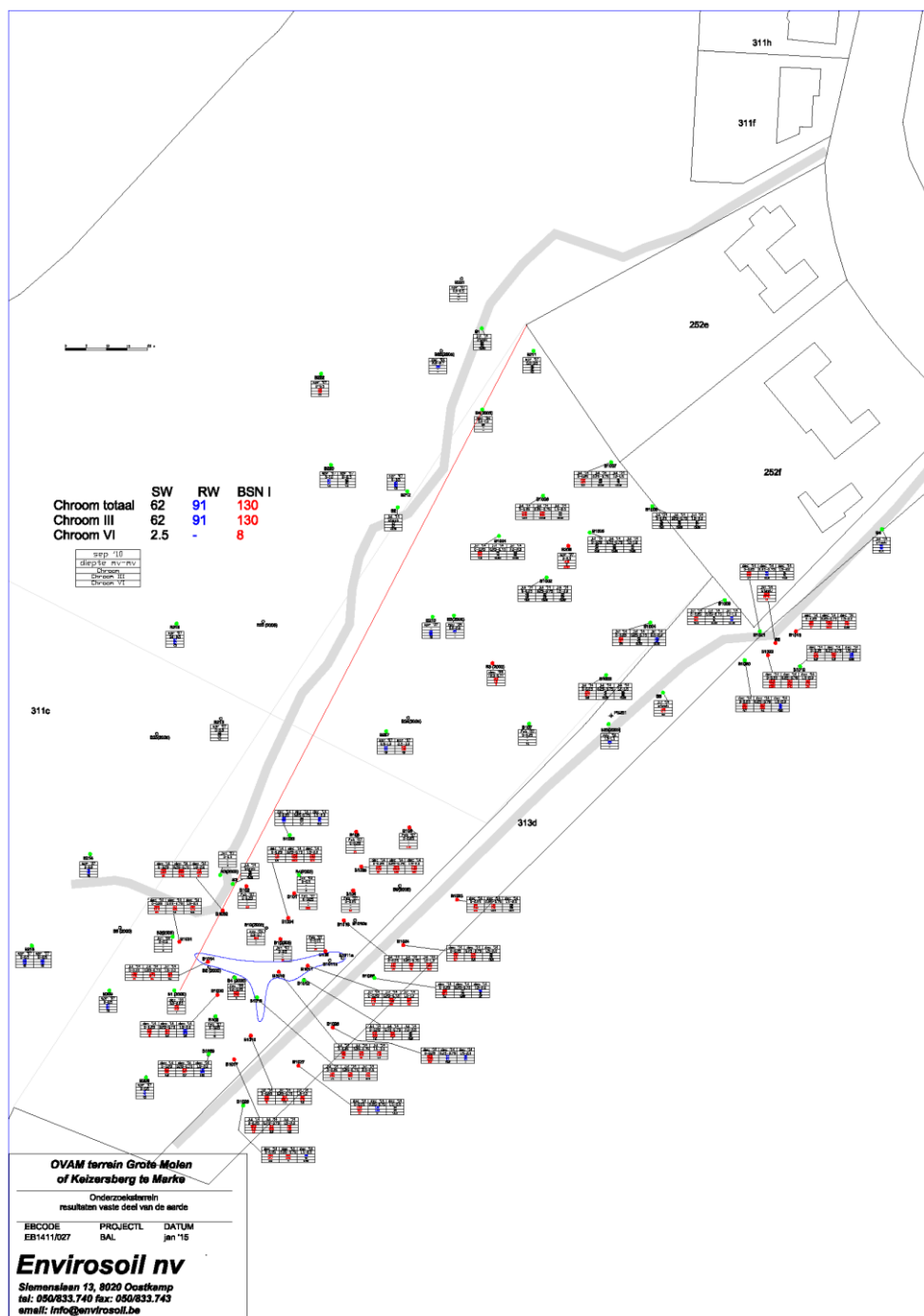


Figuur 4. Orthofoto met aanduiding van de bodempolygonen van de Belgische bodemkaart (rood omlijnd), de proefzone (geel omlijnd) en de bemonsterde bomen (witte stippen). Binnen elke bodempolygoon wordt de bodemserie (rode code).

2.1.2 Chroomverontreiniging in de bodem

In januari 2015 werd door het adviesbureau Envirosoil nv uit Oostkamp een synthese gemaakt van de bodemstaalnames die binnen het studiegebied uitgevoerd werden in nov/dec 2004, april 2007, juli 2014 en december 2014. De analyseresultaten werden uitgezet op kaart (Figuur 5) met voor elk staalnamepunt een kleine tabel met per rij vermelding van staalnamedatum, staalnamediepte (- mv), totaal chroomgehalte in de bodem, trivalent Cr(III) en hexavalent Cr(VI) gehalte.

////////////////////////////////////



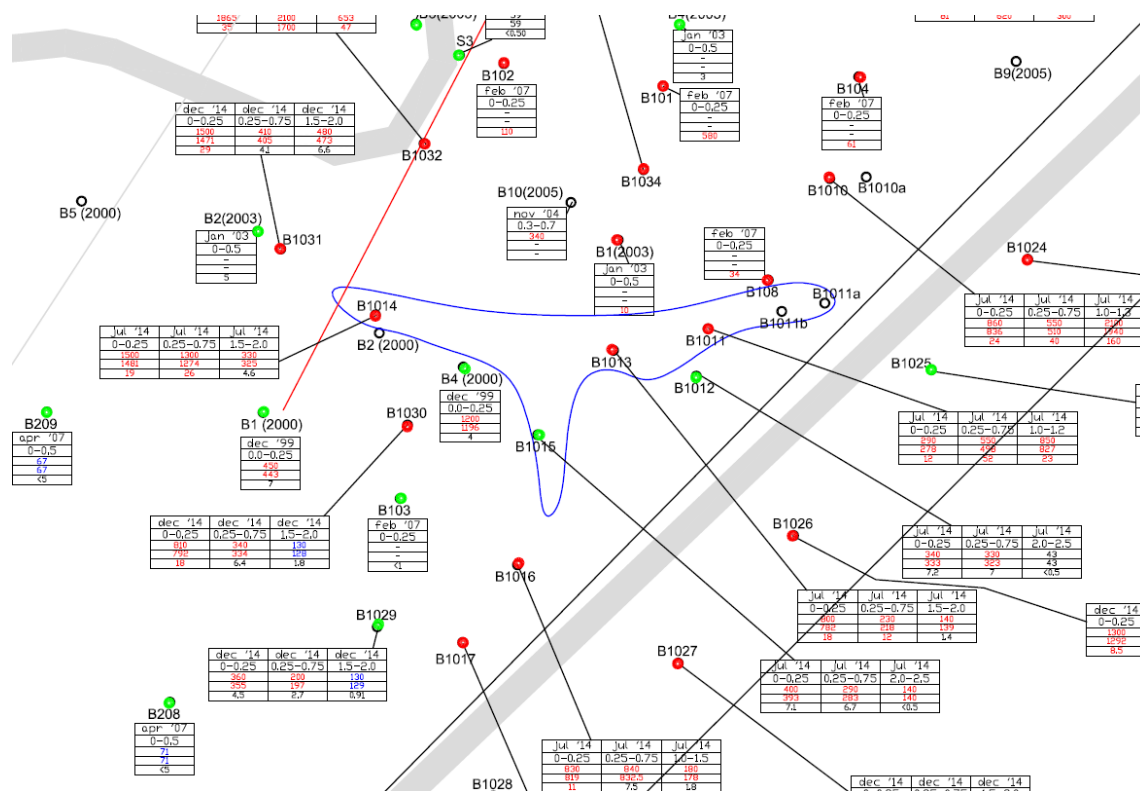
Figuur 5. Envirosoil nv syntheseskaart van de chroom bodemverontreiniging. Grijze lijnen zijn wandelpad en MTB pad, rode lijn is afsluiting van ANB doorheen terrein. De blauwe polygoon is de 'kale' zone waar tevens sterfte werd vastgesteld. Rood gemarkeerde boorlocaties zijn verontreinigd aan Cr(VI).

De kolommen zijn staalnamedieptes. Indien de meetwaarden de bodemsaneringsnorm I (BSN I, i.e. bestemmingstype natuur en landbouw) overschrijden werden deze in rood gemarkeerd. De staalnamelocatie werd met een rode stip aangeduid indien de concentratie aan hexavalent chroom de BSN I overschreed bij minstens 1 dieptestaal (Figuur 6). Ten noorden van de voetweg of ANB afsluiting werd relatief weinig chroom-verontreiniging vastgesteld met meetwaarden voor Cr totaal $< 130 \mu\text{g g}^{-1}$ DS (dus $< \text{BSN I}$) en voor Cr(VI) $< 8 \mu\text{g g}^{-1}$ DS.

////////////////////////////////////

Ter hoogte van de bewoning (NO zone) werden een beperkt aantal overschrijdingen vastgesteld, tenzij op de talud van de autoweg en ten zuiden van het MTB pad. Daar werden totaal Cr gehaltes vastgesteld tot $7200 \mu\text{g g}^{-1}$ DS en $2800 \mu\text{g g}^{-1}$ DS aan Cr(VI) (i.e. 350x de saneringsnorm). Deze zone werd inmiddels gesaneerd.

Een tweede hotspot is vast te stellen ter hoogte van de kale plek (blauwe polygoon), waarvan een detail in Figuur 6. Op bijna alle boorlocaties in en rond deze kale plek wordt overschrijding vastgesteld van Cr ($139\text{--}1471 \mu\text{g g}^{-1}$ DS) en op de rode locaties ook voor Cr(VI) (tot $1700 \mu\text{g g}^{-1}$ DS). Derhalve werd geopteerd om rond deze kale zone een pilootproef voor fytosanering en/of fytostabilisatie uit te werken.



Figuur 6. Detail van Envirosoil nv chroom-verontreinigingskaart rondom de kale zone (blauwe polygoon) met aangifte van de Cr totaal, Cr(III) en Cr(VI) verontreinigingsgraad in tabelvorm voor de staalnamelocaties. Rode meetwaarden indien BSNI werd overschreden; rode puntlocaties indien de bodemsaneringsnorm voor Cr(VI) werd overschreden.

2.1.3 Pilootproef

Op 10/09/2015 bezocht INBO samen met OVAM, ANB en Envirosol een eerste keer de verontreinigde site en werd de kale plek en de sterfte van plantsoenen vastgesteld. Een scherp afgeijnde onbegroeide plek was zichtbaar onderaan het talud (Figuur 7). Aanplantingen door ANB met zwarte els waren mislukt. De bomen stierven bovengronds af maar er trad wortelopslag op aan de voet (Figuur 8). Opmerkelijk was dat er ook geen andere kruidachtige vegetatie groeide (zelfs geen grassen) en op vele plaatsen zelfs geen mos. Zoals op de foto's in Figuren 7 en 8 is te zien is er ook geen vegetatiegroei in de greppel waar het water zich een weg zoekt naar beneden. De ecotoxicologie is dus hoogstwaarschijnlijk gelinkt aan de



Figuur 7. Deel van de onbegroeide 'kale plek' ter hoogte van de blauw omlijnde zone in Figuur 6.



Figuur 8. Door ANB aangeplante zwarte elzen sterven bovengronds af en vertonen nadien nog wortelopslag

hydrologie van het terrein. Er werden stalen genomen op de grens tussen begroeid en onbegroeid gedeelte (Figuur 9) om na te kijken of dit gelinkt was aan de totale chroomgehalten en hun speciatie (Cr(III) versus Cr(VI)).



Figuur 9. Staalname op een kort transect tussen begroeid en onbegroeid gedeelte: (1) onbegroeid, (2) zone met enkel mossen, (3) zone met kruidachtige vegetatie



Figuur 10. Scherpe overgang tussen zone met levende en dode mossen

Daarnaast werden bladmengstalen genomen aan een aantal bomen (berk en zwarte els) nabij de onbegroeide zone beneden de helling (aangetaste bomen) en gezonde exemplaren van dezelfde soorten bovenaan de helling.

2.2 SITE REKKEM E17 LAR – BRUG TRILOYSTRAAT.

Een vergelijkbare chroom VI verontreiniging van dezelfde oorsprong, op ongeveer 3.5 km van de proefsite Keizersberg, is gelegen langsheen de E17 in Rekkem ter hoogte van het brughoofd van de Triloystraat over de E17/A14 en nabij de verkeerswisselaar met de N58 (Figuur 11) (Mededeling ir. Daphné Tavernier, ABO NV). Hier werden geen stalen genomen door Envirosoil.

Op die locatie werd de bodem van de chroom VI verontreinigde taluds afgedekt met een polyesterweefsel gewapend membraan teneinde infiltratie van regenwater te vermijden en zowel begroeiing als erosie tegen te gaan (Figuur 12).



Figuur 11. Situering van afgedekte chroomverontreiniging in een nabijgelegen gebied



Figuur 12. Gebruik van een polyesterweefsel gewapend membraan om Cr(VI)-verontreinigde taluds civieltechnisch te isoleren.

Op drie locaties werden bladstalen genomen van 2 bomen/struiken (*Salix caprea* (boswilg) en *Juglans regia* (notelaar)) op het afgedekte talud en 1 boom (*Prunus avium* (kers)) op een niet met membraan afgedekte talud aan de overzijde van de snelweg (Figuren 13-15). Dit leverde vergelijkend materiaal op om na te gaan of de Cr opnames vergelijkbaar zijn met de opnames in Keizersberg.

3 MATERIAAL EN METHODEN

3.1 SURVEY BOOMSSOORTEN

3.1.1 Selectie boomsoorten

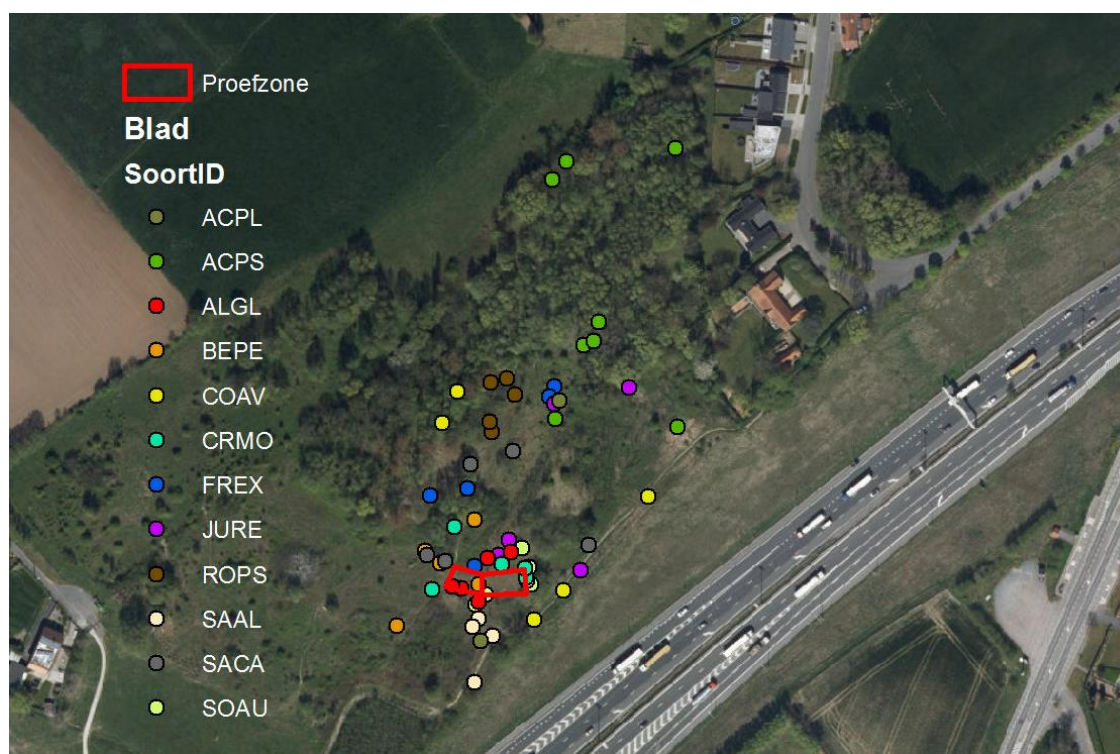
Binnen het omheinde deel van de pilootproef komen slechts een beperkt aantal boomsoorten voor. Daarom werd op 23/06/2017 het volledige terrein verkend en werden 12 boomsoorten in de directe nabijheid van de pilootproef aangetroffen. Deze boomsoorten zijn opgelijst in Tabel 1 en weergegeven in Figuur 16.

Tabel 1. Boom- en struiksoorten geselecteerd voor staalname in het beboste gedeelte van de Site Keizersberg. Doorklikken op nederlandse soortnaam geeft meer informatie over de boomsoort op website bomenwijzer.be

SoortID	Wetenschappelijke naam	Nederlandse naam
ACPL	Acer platanoides L.	Noorse esdoorn
ACPS	Acer pseudoplatanus	gewone esdoorn
ALGL	Alnus glutinosa (L.) Gaertn.	zwarte els
BEPE	Betula pendula Roth.	ruwe berk
COAV	Corylus avellana L.	hazelaar
CRMO	Crataegus monogyna Jacq.	eenstijlige meidoorn
FREX	Fraxinus excelsior L.	es
JURE	Juglans regia L.	gewone walnoot
PRAV*	Prunus avium (L.) L.	boskers
ROPS	Robinia pseudoacacia L.	valse acacia
SAAL	Salix alba L.	schietwilg
SACA	Salix caprea L.	boswilg
SOAU	Sorbus aucuparia L.	gewone lijsterbes

(*) alleen bemonsterd op site Rekkem

Merk op dat ALGL (zwarte els) vooral voorkomt nabij of in de proefzone, dat ook ROPS (valse acacia) geclusterd is in een aanplantingsgroepje en dat ACPS (esdoorn) vooral in de meer noordelijke zone voorkomt. De andere soorten zijn wat meer verspreid over het terrein (Figuur 16). Aan de voet van de bomen werd geen bodemstaal meer genomen gezien de vrij uitgebreide reeks bodemstaalnames die in het verleden reeds werden uitgevoerd (voor locaties zie Figuur 5).



Figuur 16. Locatie van de boomsoorten op de site Keizersberg

3.1.2 Staalname van bladeren, schors, wortels en vruchten

Van elke boomsoort werden 5 bomen bemonsterd voor blad (1 bladmengstaal) volgens de internationale methodologie van ICP Forests (Rautio *et al.*, 2016). De locatie van elke bemonsterde boom werd ingemeten met GPS, teneinde relaties te kunnen leggen met de meetlocaties voor bodemverontreiniging (Figuur 17).

Van elke kroon werden bladeren genomen in alle windrichtingen en voornamelijk van lichtbladeren. De staalname werd uitgevoerd in de tweede helft van het groeiseizoen en voor het begin van de bladverkleuring in de herfst (dus binnen de referentieperiode voor bladstaalname, in casu op 23 augustus en 14 september 2017). In die periode zijn de bladconcentraties het meest stabiel en vergelijkbaar tussen observatiejaren.

Bij hogere bomen werd een takkenschaar op verlengbare carbonvezelstok gebruikt (tot ca 15 m hoogte), bij kleine bomen en struiken een snoeischaar. Voor elk bladstaal werd een PE bakje gevuld (min 100 g vers bladmateriaal), lucht- en stofdicht afgesloten en donker en koel getransporteerd naar het labo.

Van elke boomsoort werd 1 individu, zo dicht mogelijk gelegen nabij de pilootproef, bemonsterd voor schors (Figuur 18) en wortels. Wortels werden met een spade, een mes en een snoeischaar handmatig verzameld. Op deze wijze werd van elke boomsoort per individu een blad-, schors- en wortelstaal genomen.

Eind augustus/september werden de rijpe vruchten van boom- en struiksoorten geplukt in Keizersberg en walnoten in Rekkem en in dezelfde periode ook in referentiegebieden (Geraardsbergen en Elst) (Tabel 2) om de concentraties aan zware metalen na te gaan.

////////////////////////////////////



Figuur 17. Staalname van bladeren met geopositionering



Figuur 18. Staalname van berkenschors

Op die wijze konden 6 mengstalen van vruchten gegroeid binnen Cr verontreinigd gebied vergeleken worden met 5 mengstalen uit een niet verdacht gebied.

Tabel 2. Overzicht van de stalen en genomen in Keizersberg/Rekken en in referentiegebieden.

Staalnamelocatie	Boomsoort	Referentie	Datum staalname	Type vrucht
Keizersberg	Sorbus aucuparia	nee	23/08/2017	bes
Keizersberg	Juglans regia	nee	14/09/2017	walnoot
Keizersberg	Malus domestica	nee	14/09/2017	appeltjes
Keizersberg	Prunus spinosa	nee	14/09/2017	sleedoorn bessen
Keizersberg	Crataegus monogyna	nee	14/09/2017	meidoorn bessen
Rekkem	Juglans regia	nee	14/09/2017	walnoot
Geraardsbergen	Sorbus aucuparia	ja	15/09/2017	bes
Elst	Juglans regia	ja	16/09/2017	walnoot
Elst	Malus domestica	ja	17/09/2017	appeltjes
Elst	Prunus spinosa	ja	18/09/2017	sleedoorn bessen
Elst	Crataegus monogyna	ja	20/09/2017	meidoorn bessen

////////////////////////////////////

Zodoende werden in totaal 101 monsters verkregen voor chemische analyse:

- 60 bladstalen (12 soorten x 5 mengstalen)
- 12 schorsstalen (12 soorten x 1 mengstaal)
- 12 wortelstalen (12 soorten x 1 mengstaal)
- 6 bladmengstalen Pilootproef (4 mengstalen Berk en 2 mengstalen vegetatie)
- 11 vrucht-mengstalen (Keizersberg en Referentiegebieden)

3.1.3 Chemische analyse van blad, schors, wortels en vruchten

Alle stalen werden koel en donker getransporteerd naar het analytisch labo van INBO in Geraardsbergen. De stalen werden vervolgens gedroogd in een geventileerde oven bij 40°C tot constant gewicht. Nadien werden de stalen vernalen in een hamerslagmolen (Pulverisette 14, Fritsch) met een titanium binnenwerk om contaminatie van Cr of andere metalen te vermijden.

De stalen werden ontsloten via micro-golfovendestructie (Ethos, Milestone) onder gecontroleerde druk en temperatuur.

Op elk staal werden volgende parameters bepaald:

- Droge stof
- Totaal koolstof en stikstof (dus ook C:N ratio)
- Macro-elementen (N, P, K, Ca, Mg, S) om de voedingstoestand van de soorten na te gaan
- Zware metalen (**Cr**, Ni, Cd, Pb, As, Zn, Al, Co, Fe, Mn, Se). Voor Cr wordt de totale concentratie (Cr(VI) + Cr(III)) gemeten.

Droge stof werd bepaald via standaard analyse procedure (SAP) SAP205a. Totaal C en N werden bepaald volgens SAP253a en 253b met een CN-analyser (Primacs NC100, Skalar). Alle andere elementen en (zware) metalen werden bepaald met ICP-AES (Optima 8300, Perkin Elmer) volgens SAP261b. Tien percent van de stalen werden in duplo meegenomen voor kwaliteitscontrole.

Alle procedures (SAPs) zijn opvraagbaar bij het analytisch labo van het INBO.

3.2 PILOOTPROEF

3.2.1 Aanleg van de pilootproef

Eind december 2016 werd de pilootproef aangelegd ter hoogte van de kale zone (Figuur 6). Voor een diepte van ca 30 cm werd een zone van 10x21 m uitgegraven en vervangen door een afdeklaag (materiaal afkomstig van een poel verderop) (Figuur 19).



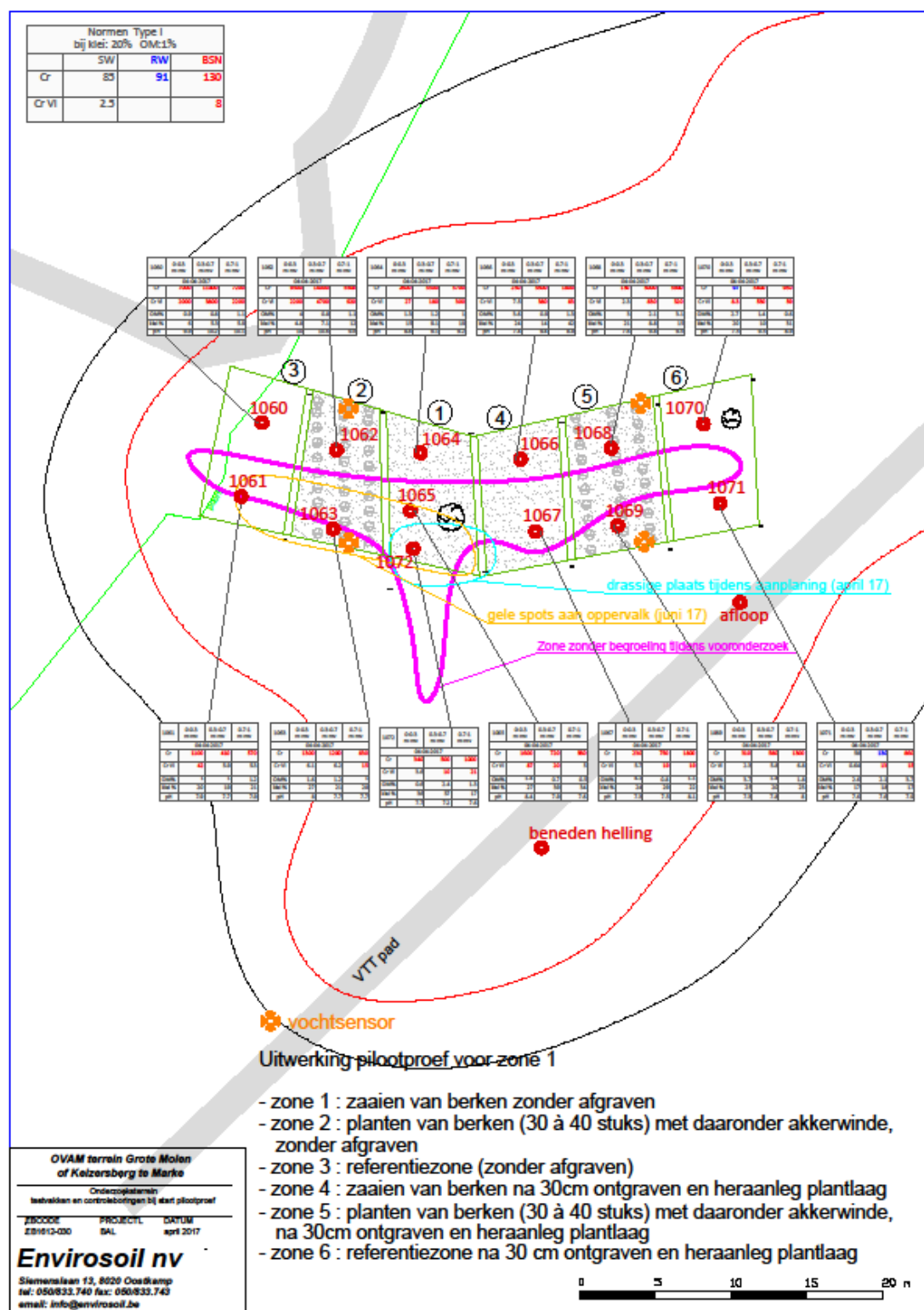
Figuur 19. Linksboven: uitgegraven zone met doorgang naar poort volgens schema rechtsboven. Onder: aanbrengen van de afdeklaag op het talud bovenop de gecontamineerde bodem

Na de graafwerken werden loodrecht op het talud 6 zones onderscheiden van ca 6 m breed en 10 lang (Figuur 20) en afgepaald. Zones 1-2-3 zijn gelegen op het niet afgegraven gedeelte en zones 4-5-6 op het gedeelte met afdeklaag. Alle behandelingen werden uitgevoerd in zowel de zones met afdeklaag als zonder afdeklaag om het effect van de afdeklaag te kunnen evalueren.

Elk van de 6 zones werd verder opgedeeld in 2 blokken, een blok (ca 30 m²) bovenaan het talud en een blok onderaan het talud. In elk van de blokken werd door Envirosoil NV op 04/04/2017 een staalname gedaan van de bodem volgens vaste dieptes 0-30 cm, 30-70 cm en 70-100 cm op de locaties 1060 tot 1072 (Figuur 20). Deze 39 stalen werden onderzocht op Droge stof (%), Organisch materiaal (%), Organische koolstof, Klei (%), pH-KCl, Arseen (As), Cadmium (Cd), Chroom totaal (Cr), Chroom (Cr(VI)), Koper (Cu), Kwik (Hg), Lood (Pb), Nikkel (Ni) en Zink (Zn). De resultaten van de bladanalyses binnen elk blok worden vergeleken met de resultaten van de bodemanalyses binnen elk blok.

Deze bodemstaalname werd in de monitoringsperiode 2017 tot en met 2020 jaarlijks herhaald telkens rond de maand mei door Envirosoil NV en werd het totaal Cr en Cr(VI) gehalte bepaald, teneinde dit te kunnen vergelijken met de Cr concentraties vastgesteld in de bladeren van de proefbomen.

////////////////////////////////////



Figuur 20. Schematische voorstelling van de finale indeling van de pilotproef in 6 zones.

De planting van de berken werd tevens uitgevoerd op 04/04/2017 (Figuur 21) . Het betrof per zone telkens 30 bomen, aangeplant in 3 rijen van 10 bomen van bovenaan tot onderaan het talud (Figuur 22). In totaal werden dus 60 berken aangeplant.



Figuur 21. Aanplanting van de berken door ANB/INBO.



Figuur 22. Overzicht van de proefzone voor en na aanplanting van de proefbomen

Bijzondere zorg werd besteed aan correcte planting, met het verkrumelen van de aarde omheen de wortels van het plantsoen. In de zones 1 en 2 werden berken ingezaaid. Zones 3 en 4 werden niet beplant of bezaaid en dienden als referentie met een spontane ontwikkeling.

Vitaliteitopnames

De vitaliteit van de berken werd opgemeten met een 5-delige score (Tabel 3). Alle aangeplante berken werden 2 maal per groeiseizoen (lente en zomer) geëvalueerd door INBO voor de groeijaren 2017, 2018, 2019 en 2020.

Tabel 3. Vijfdelige vitaliteitsscore voor evaluatie van plantsoen tijdens opvolgingsperiode

Score	Evaluatiecriteria
2	Goede vitaliteit, volledige bladbezetting en duidelijke groeischeut
1	Matige vitaliteit, beperkte of moeilijk te onderscheiden groeischeut maar wel groene bladeren
0	Geen groei aan eindscheut of zijscheuten; groei kan hernemen
-1	Verdroogde en groene blaadjes samen op de boom, afgestorven zijscheuten, kwijnend
-2	Alles verdroogd, kans op bovengronds herstel of overleving gering

////////////////////////////////////

Bodemvochtmeting



Wegens het uitzonderlijk droge voorjaar 2017 werden tevens aan de voet van elke boom bodemvochtmetingen uitgevoerd met een draagbare HH2 ML3 sensor (metingen in vol% bodemvocht van toplaag 0-10 cm). Zo kan een mogelijke relatie gelegd worden tussen droogte(stress) en vitaliteit. Daarnaast werden op de 4 hoekpunt van het terrein PlantCare sensoren geplaatst die op een diepte van 20 cm continu de bodemtemperatuur en relatief vochtgehalte registreerden bij de aanvang van de proef (jaren 2017 en 2018) (Figuur 23).

Figuur 23. Bodemvochtsensor HH2 (rechts) voor meting aan voet van testbomen en PlantCare sensor (links) voor continue bodemtemperatuur en bodemvochtmeting

SITE REKKEM

Staalname en analyse blad

Omdat de Cr(III) en Cr(VI) verontreiniging verder reikt dan het gebied in Marke werd ook een beperkte staalname uitgevoerd op de site aan de Triloystraat E17/Lar (zie hoger).

Zoals beschreven werden op drie locaties bladstalen genomen van 2 bomen/struiken (*Salix caprea* (boswilg) en *Juglans regia* (notelaar)) op de membraan-afgedekte talud en 1 boom (*Prunus avium* (kers)) op een niet met membraan afgedekte talud aan de overzijde van de snelweg (Figuur 15).

De staalname aan de bladeren gebeurde op dezelfde wijze als de staalname in Keizersberg, net als de analyse in het labo. De gegevens werden tevens verwerkt in dit rapport.

STATISTISCHE VERWERKING

Statistische technieken

Alle statistische analyses en grafieken werden uitgevoerd met de statistische taal R 4.2.0 (R Core Team, 2022) in Rstudio v2022.02.2. De principale componentenanalyse (PCA) werd uitgevoerd met het R pakket *ggbiplot*. Voor analyse en weergave van temporele data werd extended timeseries analysis (*XTS* package) gebruikt.

Op de gemiddelden wordt een 95% betrouwbaarheidsinterval ($CI_{95\%}$) berekend en gerapporteerd. Indien het bereik van het $CI_{95\%}$ van een gemiddelde overlapt tussen groepen dan worden de groepsgemiddelden als niet significant verschillend beschouwd. Verschillen tussen groepen werden getest met een gepaarde t-test (parametrisch) of een wilcoxon test (niet parametrisch). Deze laatste werd o.a. gebruikt bij het aanduiden van verschillen aangegeven in boxplots.

Waarden onder bepaalbaarheidsgrens

In het bijzonder liggen chemische concentraties van zware metalen geregeld onder de bepaalbaarheidsgrens of zogenaamde 'limit of quantification' (LoQ), wat wordt gerapporteerd als " $< X$ " met X als bepaalbaarheidsgrens.

Voor het berekenen van statistieken (bvb gemiddelden, percentielen, ...) van groepen meetwaarden kunnen de meetwaarden onder de bepaalbaarheidsgrens niet meegenomen worden omdat hun exacte waarde niet is gekend. Arbitraire waarden zoals de helft van de LoQ zijn statistisch onjuist, chemische nulwaarden bestaan eigenlijk niet en de bepaalbaarheidsgrens zelf zou een overschatting van de berekende statistiek tot gevolg hebben, net als het negeren van deze links-gecensureerde meetwaarden (term “left-censored values” in wetenschappelijke literatuur). Concentraties van zware metalen onder de bepaalbaarheidsgrens zijn eco(toxico)logisch zeer belangrijk omdat ze net niet-gecontamineerde situaties aangeven.

Het R pakket *NADA* (Lee, 2017) gebaseerd op de algoritmen ontwikkeld door Helsel (2005) houdt rekening met links-gecensureerde waarden bij het berekenen van statistieken.

////////////////////////////////////

4 RESULTATEN

4.1 BOOMSOORT SPECIFIEKE OPNAMEPATRONEN

4.1.1 Bladconcentraties

4.1.1.1 Macronutriënten

De gemiddelde bladgehalten aan macronutriënten zijn opgenomen in Tabel 4. Interessant is het hoge stikstof gehalte in het blad van ALGL (zwarte els) en ROPS (valse acacia) en vermits het C gehalte niet veel verschilt tussen de soorten, de resulterende relatief lage C:N verhouding die maakt dat het blad van die soorten snel afbreekt.

Tabel 4. Gemiddelde met 95% betrouwbaarheidsinterval van macro-nutriënten in bladeren van de bemonsterde boom- en struiksoorten in Keizersberg. Aantal observaties (n) per soort staat vermeld onder boomsoort ID. Bomen uit Site Rekkem zijn cursief aangeduid en met een *.

SoortID	C:N	N mg g ⁻¹	P µg g ⁻¹	K µg g ⁻¹	Ca µg g ⁻¹	Mg µg g ⁻¹	S µg g ⁻¹	Na µg g ⁻¹
ACPL (n=2)	26.0 (25.5-26.4)	19.7 (18.6-20.7)	2728 (1182-4273)	12547 (7632-17462)	18848 (17863-19833)	2239 (620-3857)	4386 (2881-5891)	84.6 (43.5-125.7)
ACPS (n=5)	23.8 (20.9-26.6)	21.0 (18.7-23.3)	4105 (2945-5266)	16480 (14563-18396)	25522 (22704-28340)	2467 (2035-2899)	2481 (2000-2962)	204 (115-293)
ALGL (n=5)	17.9 (17.1-18.7)	30.1 (28.4-31.7)	1649 (1440-1859)	8901 (7041-10762)	12471 (9394-15549)	3540 (2883-4196)	1998 (1792-2205)	104 (76.4-131)
BEPE (n=5)	26.5 (21.2-31.9)	21.2 (17.4-25.1)	1843 (1190-2496)	7256 (4460-10053)	11704 (7932-15476)	3902 (2971-4834)	1628 (1099-2157)	321 (47.7-595)
COAV (n=5)	25.1 (22.6-27.7)	20.4 (18.7-22.0)	2246 (1814-2678)	12379 (10656-14101)	18669 (14245-23094)	2545 (2181-2909)	1555 (1376-1734)	360 (295-424)
CRMO (n=5)	31.9 (30.4-33.4)	15.6 (14.9-16.3)	4595 (2814-6376)	11058 (10071-12045)	26017 (20937-31097)	5869 (4702-7036)	2890 (2507-3273)	325 (264-386)
FREX (n=5)	24.2 (21.8-26.6)	19.7 (17.9-21.5)	3695 (2807-4583)	15187 (12509-17866)	30166 (25094-35237)	3967 (2613-5321)	7664 (5660-9668)	148 (76.5-218)

////////////////////////////////////

4.1.1.2 Zware metalen

Ook voor zware metalen verschillen de concentraties per boomsoort aanzienlijk (Tabel 5).

Tabel 5. Aantal en aandeel meetwaarden onder bepaalbaarheidsgrens (LoQ) van concentraties aan zware metalen in het blad ($\mu\text{g g}^{-1}$ DS) en hun min-max bereik

SoortID	n	n.cen	%cen	LoQ	Min	Max
Cd	63	46	73	0.1	0.10	2.79
Zn	63	0	0	1	16.4	462
Cr	63	7	11	0.5	0.50	13.1
Ni	63	2	3.2	0.5	0.50	13.7
As	63	29	46	0.5	0.50	2.00
Cu	63	0	0	1	3.59	15.3
Pb	63	44	70	0.5	0.50	2.09
Co	63	53	84	0.5	0.50	3.84
Se	63	62	98	2	2.00	2.02

Verscheidende zware metalen werden in concentraties aangetroffen onder de bepaalbaarheidsgrens (LoQ). Voor zover er per soort voldoende meetwaarden boven de LoQ werden gerapporteerd konden gemiddelden berekend worden op basis van left-censored statistics (zie sectie 3.4.2). Een overzicht van de gecensureerde waarden per metaal is gegeven in Tabel 5, de statistieken per soort in Tabel 6.

Tabel 6. Gemiddelde en 95% betrouwbaarheidsinterval van zware metalen in bladeren van de bemonsterde boom- en struiksoorten. Betrouwbaarheidsinterval enkel berekend wanneer percentage censored data < 60%. Bomen uit Site Rekkem zijn cursief aangeduid en met *

SoortID	Cd	Zn	Cr	Ni	As	Cu	Pb	Co	Se
	$\mu\text{g g}^{-1}$	$\mu\text{g g}^{-1}$	$\mu\text{g g}^{-1}$	$\mu\text{g g}^{-1}$	$\mu\text{g g}^{-1}$	$\mu\text{g g}^{-1}$	$\mu\text{g g}^{-1}$	$\mu\text{g g}^{-1}$	$\mu\text{g g}^{-1}$
ACPL (n=2)	< 0.1	30.3 (21.8-38.8)	5.9 (0-14.2)	1.0 (0.76-1.25)	< 0.5	7.02 (6.28-7.76)	< 0.5	< 0.5	< 2
ACPS (n=8)	0.11 (0.10-0.11)	38.1 (31.4-44.8)	1.40 (1.09-1.72)	1.10 (0.84-1.36)	0.76 (0.63-0.88)	7.94 (7.15-8.74)	0.52 (0.51-0.54)	< 0.5	< 2

////////////////////////////////////

ALGL (n=5)	< 0.1	48.8 (40.8- 56.7)	10.5 (7.41- 13.7)	1.98 (1.35- 2.62)	0.84 (0.51- 1.18)	11.5 (9.01- 14.1)	< 0.5	< 0.5	< 2
BEPE (n=5)	0.23	115 (67.2- 162.1)	2.0 (1.46- 2.53)	2.36 (0.96- 3.77)	0.78 (0.38- 1.17)	5.21 (4.07- 6.35)	< 0.5	< 0.5	< 2
COAV (n=5)	< 0.1	32.8 (28.5- 37.1)	3.1 (0.63- 5.57)	2.24 (0.85- 3.62)	1.06 (0.56- 1.56)	9.06 (7.94- 10.2)	1.56 (1.14- 1.98)	< 0.5	< 2
CRMO (n=5)	< 0.1	42.0 (34.3- 49.8)	3.71 (2.53- 4.90)	1.24 (0.96- 1.52)	< 0.5	6.88 (6.17- 7.59)	< 0.5	< 0.5	< 2
FREX (n=5)	< 0.1	17.5 (16.7- 18.3)	1.1 (0.7-1.5)	1.55 (1.11- 1.99)	0.60 (0.47- 0.73)	8.25 (7.08- 9.41)	< 0.5	< 0.5	< 2
JURE (n=5)	< 0.1	33.5 (30.1- 37.0)	0.99 (0.78- 1.20)	1.67 (1.23- 2.10)	0.82 (0.62- 1.01)	9.71 (8.15- 11.26)	< 0.5	< 0.5	< 2
JURE*	< 0.1	38.4	2.37	1.9	0.96	9.9	0.56	< 0.5	< 2
PRAV* (n=1)	< 0.1	19.2	1.54	1.5	< 0.5	6.7	1.28	< 0.5	< 2
ROPS (n=5)	< 0.1	27.5 (23.1- 31.9)	1.43 (0.84- 2.02)	1.92 (1.33- 2.52)	1.00 (0.84- 1.17)	7.59 (6.27- 8.91)	0.82 (0.82- 0.83)	0.70 (0.60- 0.81)	< 2
SAAL (n=5)	1.42 (1.18- 1.65)	322 (252- 392)	4.0 (0-8.49)	1.73 (1.11- 2.35)	0.79 (0.67- 0.91)	5.48 (5.23- 5.73)	1.24	0.59 (0.55- 0.63)	< 2
SACA (n=5)	2.38 (2.17- 2.60)	288 (272- 303)	2.07 (0.97- 3.17)	8.45 (4.48- 12.4)	0.81 (0.33- 1.29)	8.1 (5.36- 10.8)	1.25 (0.73- 1.78)	2.40 (1.50- 3.30)	< 2
SACA*	0.78	462	1.41	4.92	0.82	10.7	1.77	1.85	2.02
SOAU (n=5)	< 0.1	31.9 (20.9- 43.0)	2.02 (1.59- 2.44)	1.34 (0.94- 1.74)	0.72 (0.56- 0.87)	4.99 (4.59- 5.39)	< 0.5	< 0.5	< 2
Alle soorten (n=63)	0.40 (0.22- 0.57)	90.1 (62.1- 118)	2.85 (2.04- 3.65)	2.24 (1.66- 2.82)	0.74 (0.66- 0.82)	7.76 (7.18- 8.34)	0.70 (0.59- 0.80)	0.74 (0.59- 0.89)	< 2

Merk op dat meer dan 50% van de meetwaarden voor de zware metalen Cd, As, Pb, Co en Se onder de bepaalbaarheidsgrens liggen zodat voor sommige soorten geen accurate gemiddelden konden berekend worden. In het bijzonder Co en Se werden weinig tot niet aangetroffen in meetbare concentraties in de bladeren.

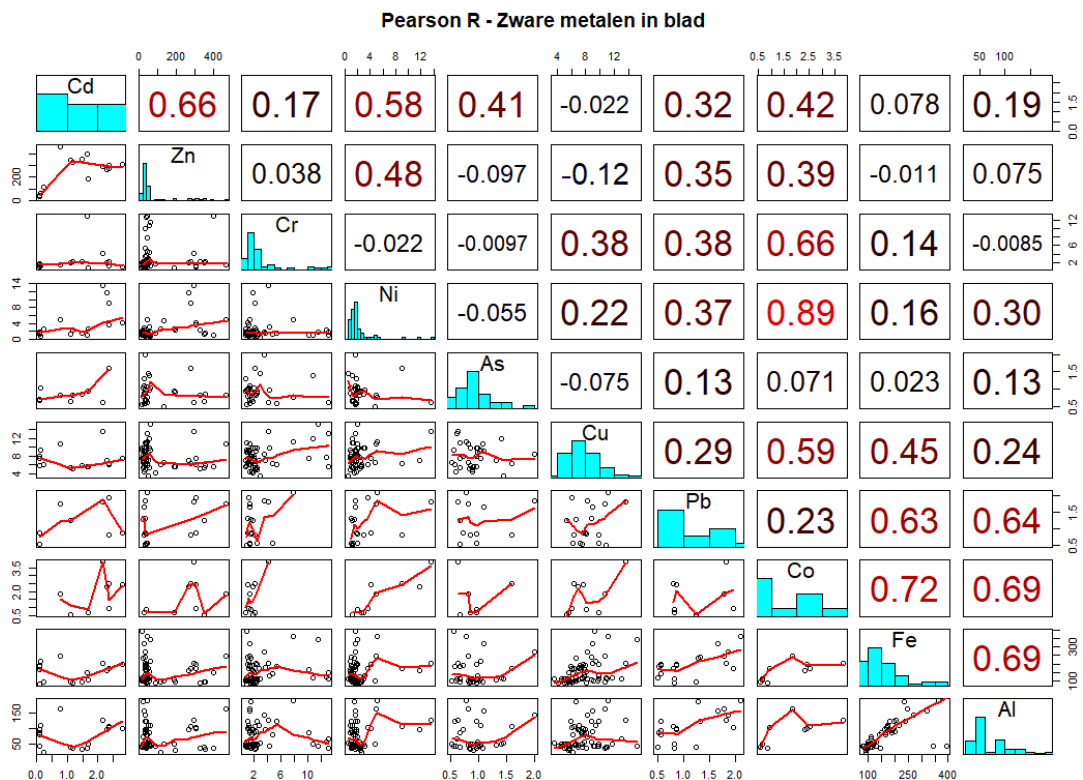
Er wordt wel aangenomen dat de meetwaarden onder bepaalbaarheidsgrens een gering tot onbestaand ecotoxicologisch effect ressorteren op het boscossysteem. Voor het

////////////////////////////////////

Zoals bekend wordt cadmium en zink preferentieel door wilg en populier opgenomen. De hoogste Cd en Zn bladgehalten zijn ook in dit gebied waargenomen bij SAAL (schietwilg) en SACA (boswilg). Ook BEPE (berk) vertoont een iets hoger Cd en Zn gehalte in vergelijking met de meeste andere boomsoorten maar beduidend lager dan de wilgen. Opvallend is dat het hoogste Cr gehalte werd aangetroffen in blad van ALGL (zwarte els), de boomsoort die de meeste schadesymptomen en sterfte vertoonde in het studiegebied wat gelinkt werd met de Cr verontreiniging. Deze soort heeft wellicht minder exclusie-mechanismen om Cr opname te beperken, vermoedelijk wateroplosbaar Cr(VI). Daarnaast vertonen ACPL (Noorse esdoorn) en SAAL (Schietwilg) ook licht hogere Cr gehalten in het blad maar dit is niet alarmerend. Nikkel wordt dan weer meest aangetroffen in het blad van SACA (boswilg) en niet in verhoogde mate in zwarte els. Arseen wordt weinig opgenomen in de bladeren (meestal $< 1 \mu\text{g g}^{-1}$ DS), tenzij in hazelaar en robinia.

Voor de 3 geteste soorten uit Rekkem zijn er licht afwijkende waarden in vergelijking met dezelfde soorten uit Keizersberg. Voor SACA ligt het Cd gehalte lager, het Zn gehalte hoger en zijn alle andere metalen vergelijkbaar met Keizersberg (m.a.w. ligt de meetwaarde in het 95% betrouwbaarheidsinterval). Bij JURE (notelaar) is enkel het Cr gehalte ($2.37 \mu\text{g g}^{-1}$) licht hoger dan in Keizersberg, terwijl alle andere metalen in vergelijkbare concentraties voorkomen.

De correlaties tussen de zware metalenconcentraties in het blad over alle soorten heen is weergegeven in Figuur 26. Relatief hoge positieve correlaties zijn vast te stellen tussen Cd en Zn, Cr en Co, Ni en Co, Co en Fe en Al en Fe. Opvallend is dat Cr quasi niet is gecorreleerd met Ni, As, Zn en Al.



Figuur 26. Pearson correlatietabel voor alle zware metaal-bladconcentraties over alle soorten heen. Histogram van elke variabele op diagonaal, scatterplot met lowess regressie onder diagonaal en Pearson correlatiecoëfficiënt boven de diagonaal. Hoe roder (positief gecorreleerd) en groter het getal hoe hoger de correlatie. Waarden onder LoQ zijn niet gebruikt.

Als we de bladconcentratie aan Cr voorstellen met een bubble plot, zien we dat de hoogste bladconcentraties (grootste cirkels, $\sim 10 \mu\text{g g}^{-1}$ Cr) voorkomen nabij de proefzone, waar ook de hoogste bodemconcentraties aan Cr werden vastgesteld. In de NO zone nabij de bewoning zijn die Cr concentraties overwegend laag (Figuur 27).

////////////////////////////////////

Tabel 8. Aantal en aandeel meetwaarden van zware metalen onder bepaalbaarheidsgrens (LoQ) en hun min-max bereik in schors.

SoortID	n	n.cen	%.cen	LoQ	Min	Max
Cd	12	8	67	0.1	<0.1	1.31
Zn	12	0	0	1	11.4	271
Cr	12	0	0	0.5	0.84	6.56
Ni	12	1	8	0.5	<0.5	3.37
As	12	7	58	0.5	<0.5	1.08
Cu	12	0	0	1	4.17	18.30
Pb	12	5	42	0.5	<0.5	6.78
Co	12	11	92	0.5	<0.5	0.67
Se	12	12	100	2	<2	<2

In schors is de hoogst aangetroffen Cr concentratie $6.56 \mu\text{g g}^{-1}$ DS. De gemiddelde Cr concentratie is $2.52 \mu\text{g g}^{-1}$ DS (Tabel 8) en dit is niet significant verschillend van de Cr concentratie in het blad van alle bemonsterde soorten.

Tabel 9. Concentratie aan zware metalen in schors voor één testboom per soort.

SoortID	Cd $\mu\text{g g}^{-1}$	Zn $\mu\text{g g}^{-1}$	Cr $\mu\text{g g}^{-1}$	Ni $\mu\text{g g}^{-1}$	As $\mu\text{g g}^{-1}$	Cu $\mu\text{g g}^{-1}$	Pb $\mu\text{g g}^{-1}$	Co $\mu\text{g g}^{-1}$	Se $\mu\text{g g}^{-1}$
ACPL	<0.1	105	1.95	1.25	1.08	11	<0.5	<0.5	<2
ACPS	<0.1	49.0	1.40	0.76	<0.5	7.84	<0.5	<0.5	<2
ALGL	<0.1	46.1	3.29	0.85	0.51	7.34	0.74	<0.5	<2
BEPE	<0.1	93.0	1.75	0.66	<0.5	5.61	0.56	<0.5	<2
COAV	<0.1	15.7	1.29	0.94	<0.5	9.2	0.59	<0.5	<2
CRMO	0.15	113	3.33	1.18	0.52	12.4	<0.5	<0.5	<2
FREX	<0.1	11.4	0.92	<0.5	<0.5	4.17	0.58	<0.5	<2
JURE	<0.1	14.0	1.69	0.59	<0.5	5.95	<0.5	<0.5	<2
ROPS	0.35	82.9	3.22	2.33	<0.5	15.9	6.47	<0.5	<2
SAAL	0.99	271	6.56	2.22	0.87	18.3	6.78	0.57	<2
SACA	1.31	205	0.84	3.37	<0.5	8.51	0.5	<0.5	<2
SOAU	<0.1	51.4	4.06	0.65	0.64	8.36	0.89	<0.5	<2

////////////////////////////////////

4.1.3.2 Zware metalen

Met uitzondering van Se zijn voor de meeste boomsoorten meetbare gehalten aan zware metalen bepaald in de wortels (Tabel 11).

Tabel 11. Aantal en aandeel meetwaarden van zware metalen onder bepaalbaarheidsgrens (LoQ) en hun min-max bereik ($\mu\text{g g}^{-1}$ DS) in wortels

SoortID	n	n.cen	%cen	LoQ	Min	Max
Cd	12	4	33	0.1	<0.1	0.94
Zn	12	0	0	1	18.38	147
Cr	12	0	0	0.5	0.85	675
Ni	12	0	0	0.5	0.85	5.22
As	12	6	50	0.5	<0.5	1.69
Cu	12	0	0	1	4.66	15.8
Pb	12	0	0	0.5	0.67	5.74
Co	12	3	25	0.5	<0.5	1.4
Se	12	12	100	2	<2	<2

Tabel 12. Concentratie aan zware metalen in wortels voor één testboom per soort.

SoortID	Cd µg g ⁻¹	Zn µg g ⁻¹	Cr µg g ⁻¹	Ni µg g ⁻¹	As µg g ⁻¹	Cu µg g ⁻¹	Pb µg g ⁻¹	Co µg g ⁻¹	Se µg g ⁻¹
ACPL	<0.1	18.4	0.85	0.85	0.65	4.9	1.87	<0.5	<2
ACPS	0.19	36.6	11.4	3.3	0.96	10.3	3.65	1.02	<2
ALGL	0.13	35.4	158	4.95	<0.5	10.6	3.12	1.4	<2
BEPE	<0.1	32.2	468	5.22	<0.5	4.66	0.76	1.34	<2
COAV	0.17	28.6	23.0	1.27	<0.5	7.14	2.37	<0.5	<2
CRMO	<0.1	52.0	18.3	2.38	<0.5	7.24	0.67	<0.5	<2
FREX	0.13	51.2	1.72	1.47	1.32	14.9	5.74	0.78	<2
JURE	0.34	34.5	28.9	3.71	0.67	15.8	1.7	0.73	<2
ROPS	0.23	50.8	2.6	3.24	0.6	7.21	3.35	0.77	<2
SAAL	0.67	147	675	1.98	<0.5	13.8	3.76	0.5	<2

////////////////////////////////////

SACA	0.94	124	6.59	4.77	1.69	12.2	4.13	0.74	<2
SOAU	<0.1	29.8	191	3.09	<0.5	6.36	1.3	0.64	<2
Alle soorten (n=12)	0.28 (0.13-0.43)	53.4 (30.8-76.1)	132 (8.08-256)	3.02 (2.19-3.85)	0.79 (0.58-1.00)	9.60 (7.39-11.81)	2.70 (1.84-3.56)	0.78 (0.60-0.97)	<2 (p=100%)

De hoogste Cr gehalten in de wortels worden niet bij ALGL (zwarte els) maar bij SAAL (schiefwilg) en BEPE (berk) vastgesteld. Sommige soorten hebben dan weer bijzonder lage Cr gehalten in de wortels (Noorse esdoorn, es, robinia).

4.1.4 Gehalten in vruchten

Op de site in Keizersberg werden de vruchten van 5 boom- en struiksoorten op zware metalen onderzocht (Figuur 29) en op de site Rekkem ook in walnoten omdat enkel die er voorkwamen (Tabel 13). Als referentie werden vruchten van dezelfde soorten geplukt in de buurt van INBO Geraardsbergen.

Het Cd gehalte in de vruchten van de Cr-verontreinigde sites is steeds onder de LoQ van 0.1 $\mu\text{g g}^{-1}$ DS, net zoals de referenties. Het Zn gehalte is licht hoger op de verontreinigde sites ten opzichte van de referenties in lijsterbes, walnoot en appeltjes maar lager in de bessen van sleedoorn en meidoorn. De Cr gehalten in alle onderzochte vruchten lagen onder de LoQ. Nikkel werd enkel in meetbare concentraties aangetroffen in walnoten van Keizersberg en Rekkem, maar deze concentraties waren lager dan de helft van de referentie.



Figuur 29. Verse vruchten van site Keizersberg om na te gaan welke concentratie aan Cr ze bevatten. Van links naar rechts: meidoornbessen, walnoot (zonder en met schil), lijsterbes en (wilde) appel.

Tabel 13. Zware metalen in de vruchten van 5 boom- en struiksoorten genomen op de Site Keizersberg, Site Rekkem (enkel walnoot) en referentiesites (Geraardsbergen en Elst)

		Cd		Zn		Cr	
Boomsoort	Vrucht	Keizersberg	Referentie	Keizersberg	Referentie	Keizersberg	Referentie
Sorbus aucuparia	Bes	<0.1	<0.1	8.02	6.92	<0.5	<0.5
Juglans regia	Walnoot	<0.1/<0.1	<0.1	17.1/18.7	13.5	<0.5/<0.5	<0.5
Malus domestica	Appeltjes	<0.1	<0.1	12.7	1.95	<0.5	<0.5
Prunus spinosa	Sleedoorn bessen	<0.1	<0.1	6.44	12.5	<0.5	<0.5
Crataegus monogyna	Meidoorn bessen	<0.1	<0.1	12.6	15.1	<0.5	<0.5

		Ni		As		Cu	
Boomsoort	Vrucht	Keizersberg	Referentie	Keizersberg	Referentie	Keizersberg	Referentie
Sorbus aucuparia	Bes	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	4.83	3.99
Juglans regia	Walnoot	0.91/0.7	1.94	<0.5/<0.5	<0.5	10.07/7.36	9.2
Malus domestica	Appeltjes	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	3.75	2.03
Prunus spinosa	Sleedoorn bessen	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	4.22	4.34
Crataegus monogyna	Meidoorn bessen	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	5.3	8.06

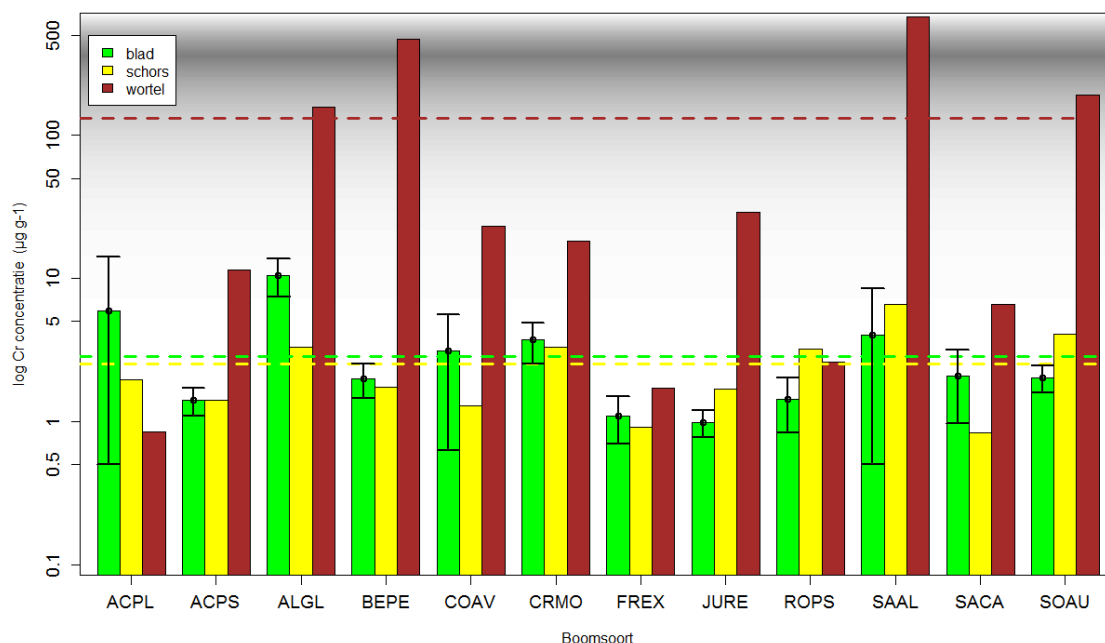
		Pb		Co		Se	
Boomsoort	Vrucht	Keizersberg	Referentie	Keizersberg	Referentie	Keizersberg	Referentie
Sorbus aucuparia	Bes	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<2	<2
Juglans regia	Walnoot	<0.5/<0.5	<0.5	<0.5/<0.5)	<0.5	<2/<2	<2
Malus domestica	Appeltjes	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<2	<2
Prunus spinosa	Sleedoorn bessen	<0.5	0.59	<0.5	<0.5	<2	<2
Crataegus monogyna	Meidoorn bessen	<0.5	0.68	<0.5	<0.5	<2	<2

De gehalten aan As, Pb, Co en Se lagen allen onder de LoQ en waren derhalve niet kwantificeerbaar. Enkel Cu was goed meetbaar en vertoonde vergelijkbare gehalten tussen de verontreinigde sites en de referentiesites.

////////////////////////////////////

4.1.5 Verhoudingen tussen compartimenten inzake Cr gehalten

Figuur 30 geeft per boomsoort de concentraties weer in blad, schors en wortels per boomsoort. Vermits de concentraties in de wortels een factor 100 hoger kunnen zijn dan in blad of schors wordt een logaritmische schaal gebruikt. Bij sommige soorten is de Cr-concentratie in het blad significant hoger dan in de schors (es, boswilg), bij andere soorten is het dan weer lager (walnoot, valse acacia, lijsterbes). De hoogste bladconcentraties worden waargenomen in zwarte els (ALGL) en schietwilg (SAAL), de laagste in walnoot (JURE) en gewone es (FREX).



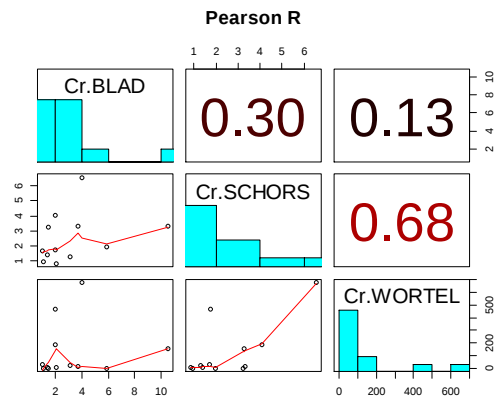
Figuur 30. Chroom gehalten (log schaal) in blad, schors en wortels van de boomsoorten op de site Keizersberg. Horizontale streeplijn geeft het gemiddelde van alle boomsoorten weer. Errorbars bij bladgehalten zijn 95% betrouwbaarheidsintervallen van het gemiddelde van 5 individuen.

In de wortels vinden we, relatief t.o.v. het gemiddelde van alle soorten, de hoogste Cr concentraties in schietwilg (SAAL), berk (BEPE), lijsterbes (SOAU) en zwarte els (ALGL) en de laagste bij Noorse esdoorn (ACPL) en gewone es (FREX).

De hoogste concentraties in de schors vinden we in schietwilg (SAAL), lijsterbes (SOAU), zwarte els (ALGL), meidoorn (CRMO) en valse acacia (ROPS), de laagste in gewone es (FREX) en boswilg (SACA).

Er is een beperkte correlatie tussen de Cr concentraties in blad, schors en wortels over de soorten heen. De correlatie is niet significant verschillend van nul tussen blad-schors ($r=0.30$, $p=0.34$) en blad-wortel ($r=0.13$, $p=0.69$), maar wel significant tussen schors-wortel ($r=0.68$, $p=0.02$). Hogere wortelconcentraties kunnen dus hogere Cr gehalten opleveren in de schors, maar niet noodzakelijk in het blad (Figuur 31).

////////////////////////////////////

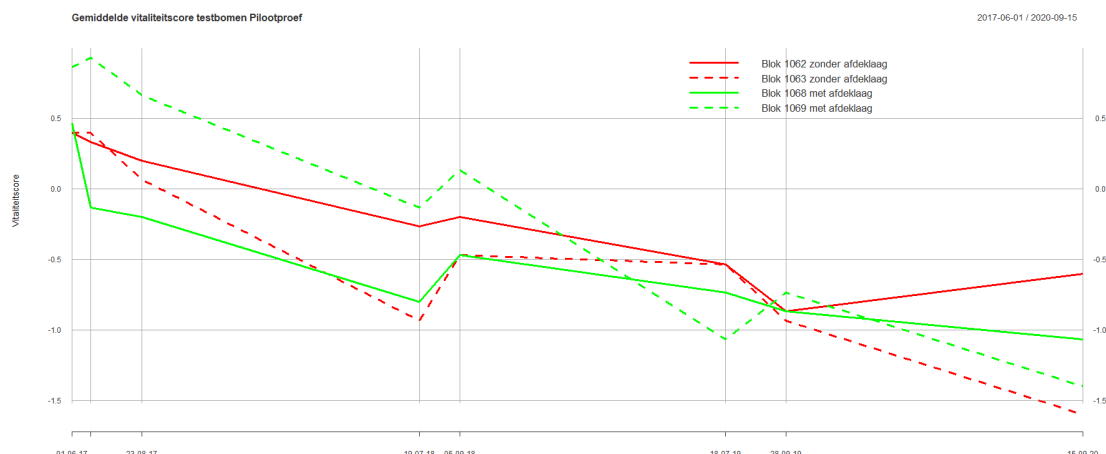


Figuur 31. Pearson correlatietabel voor Cr in blad, schors en wortel.

4.2 PILOOTPROEF

4.2.1 Vitaliteit en groei

De 60 testbomen van berk werden 4 jaren (2017-2020) individueel opgevolgd qua groei en vitaliteit. In 8 observaties (2 x per jaar tijdens groeiseizoen) werd met een scoresysteem (Tabel 3) de vitaliteit beoordeeld in 4 proefblokken, twee zonder afdeklaag (rood in Figuur 32) en twee met 30 cm afdeklaag (groen). De gemiddelde vitaliteitscore nam jaar na jaar systematisch af, voornamelijk door een opeenvolging van uitzonderlijk droge zomers, vooral 2017 en 2018 (Figuur 32).



Figuur 32. Evolutie van de gemiddelde vitaliteitscore per proefblok van 2017 tot 2020. Rode kleur verwijst naar blokken zonder afdeklaag, groene kleur met afdeklaag

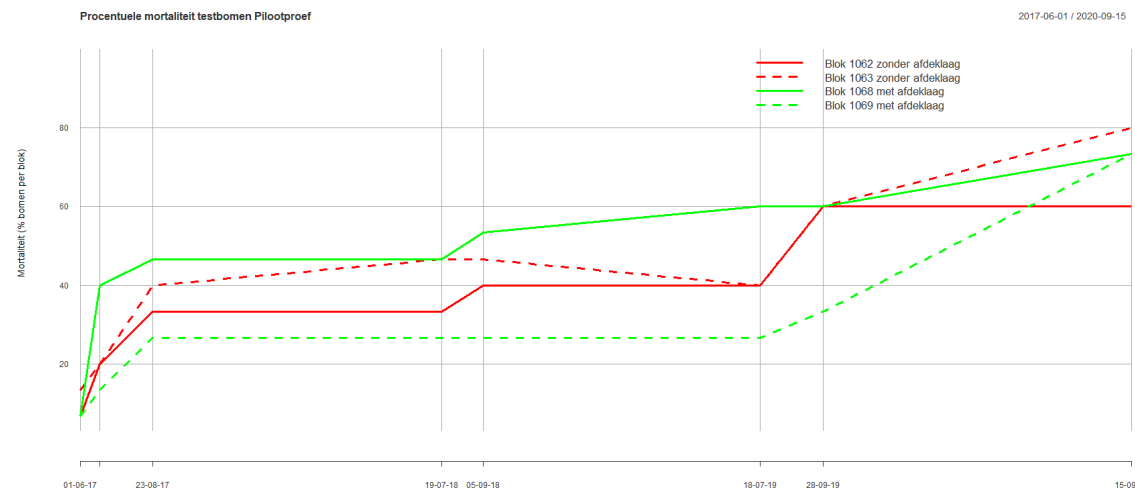
Opmerkelijk is dat de testbomen geplant in de afdeklaag niet noemenswaardig beter scoren qua vitaliteit dan deze die rechtstreeks geplant werden in de verontreinigde grond. Ook de verschillen tussen de blokken bovenaan het talud (volle lijn) en deze onderaan het talud (stippellijn) zijn niet groot terwijl er onderaan het talud een grotere vochtreserve wordt verwacht. Reeds kort na de aanplant duikt de vitaliteitscore onder nul, wat erop wijst dat de gemiddelde boom (per blok van 15 bomen) een groeistagnatie heeft. Negatieve waarden wijzen op verdroging van bladeren en taksterfte. Soms herpakten de testbomen binnen het groeizeen zich enigszins (zoals in september 2018) maar over het algemeen is er een duidelijk dalende trend.

De dalende vitaliteit gaat gepaard met een toenemende mortaliteit, uitgedrukt in percentage afgestorven bomen per blok (Figuur 33). Reeds tijdens het eerste groeijaar was er al tussen de 25 en 50% uitval. Elk jaar stierven testbomen af en na 4 groeijaren overleefde slechts tussen de 20 en 40% van de bomen. In blok 1063 was er het fenomeen van bovengrondse sterfte in het droogtejaar 2018, maar opslag vanuit de wortels in juli 2019, maar die heropleving was van korte duur. Consequentie voor de proef was: (1) dat er steeds minder vitale testbomen waren om jaarlijks bladeren van te bemonsteren voor bladanalyse en (2) dat door de bemonstering de testbomen een deel van hun fotosynthese organen verloren en daardoor verder verzwakten. Daardoor werd in 2020 beslist de jaarlijkse monitoring stop te zetten bij gebrek aan voldoende bladmateriaal voor de staalname.

Hoewel niemand bij het begin van de pilootproef had kunnen inschatten dat er 4 droogtejaren elkaar gingen opvolgen, was wel al van in 2017 duidelijk dat de droogte de proefaanplanting

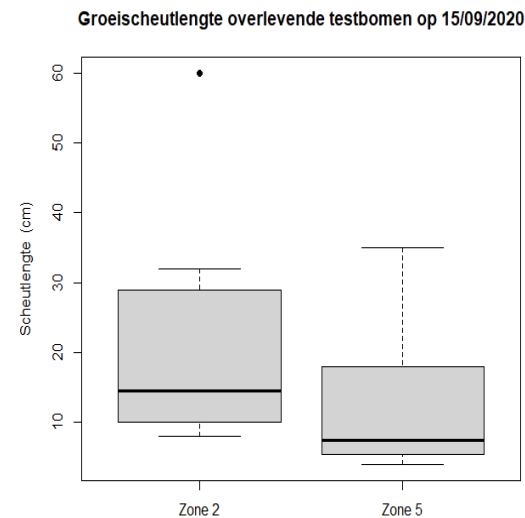
////////////////////////////////////

kon bedreigen, gezien helling en Zuid-expositie. Van in het begin werden daarom de testbomen regelmatig bewaterd. Zonder deze bewatering was de proefaanplanting wellicht al na 1 jaar opgegeven.



Figuur 33. Evolutie van de mortaliteit (%) van proefbomen per blok

In september 2020 werden slechts 8 van de 30 testbomen in Zone 2 (zonder afdeklaag) levend aangetroffen en ook 8 exemplaren in Zone 5 (met afdeklaag). Dus na 4 groeijaren is 73% van



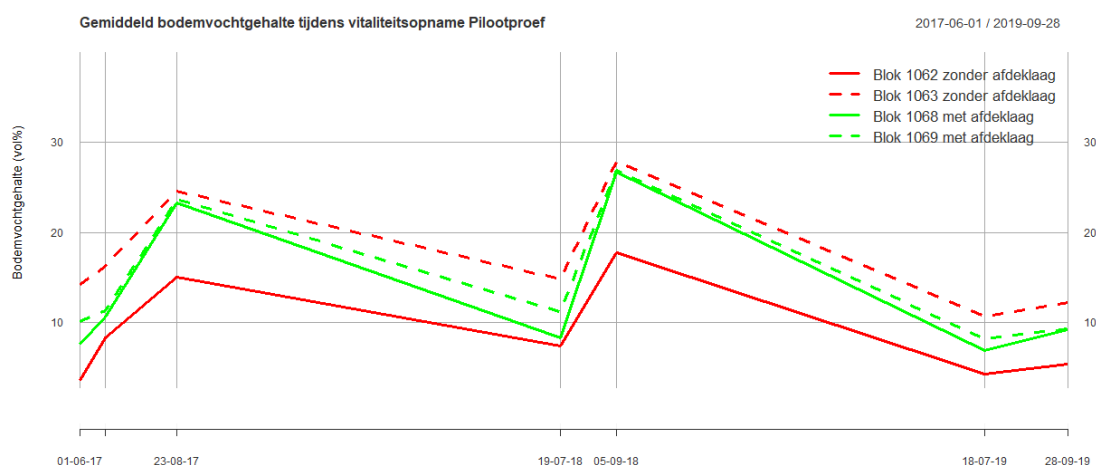
Figuur 34. Boxplot van groeischeutlengte van testbomen gegroeid in zone zonder (Zone 2) en met afdeklaag (Zone 5).

de bomen in beide zones afgestorven. Van de overlevende bomen werd de groeischeutlengte gemeten en weergegeven in de boxplot in Figuur 34. Het gemiddelde (21.9 cm) en de mediaan (14.5 cm) is zelfs groter in de onafgedekte zone dan in de zone met afdeklaag (respectievelijk 12.6 en 7.5 cm), waar de concurrentie (vooral voor vocht) met de kruidachtige vegetatie beduidend hoger was. Door het beperkt aantal waarnemingen is dit verschil echter statistisch niet significant (Wilcoxon test, $p = 0.103$).

Wat betreft de overleving, vitaliteit en groeiprestaties van de berk had het aanbrengen van een afdeklaag van 30 cm na 4 groeijaren dus geen enkele toegevoegde waarde. Dit is een belangrijke vaststelling.

4.2.2 Bodemvocht

Het bodemvochtgehalte aan de voet van elke testboom werd opgemeten bij elke vitaliteitsbeoordeling. Het verloop van het gemiddelde bodemvochtgehalte is weergegeven in Figuur 35. Merk op dat de meetwaarden een gelijkaardig verloop kennen tussen de blokken met hogere vochtgehalte onderaan het talud (streeplijn) wat te verwachten was. Het droogste blok is 1062 (zonder afdeklaag en met heel wat steenpuin in de bodem), het minst droge blok (1063) situeert zich eronder. Opmerkelijk is dat de blokken met afdeklaag een sterk vergelijkbaar vochtgehalte hebben. Het hogere gehalte aan klei en organisch materiaal van de afdeklaag resulteert in een hoger bodemvochtgehalte dan de droge condities in blok 1062, maar resulteert niet in meer vocht onderaan de helling in blok 1063. Omdat op de afdeklaagen er een veel dichtere vegetatie voorkwam zorgt de transpiratie er vermoedelijk voor dat het netto beschikbaar bodemvochtgehalte lager is dan de onbegroeide zone in blok 1063.



Figuur 35. Verloop gemiddeld bodemvochtgehalte (0-10 cm) per proefblok gemeten tijdens de vitaliteitsopnames.

4.2.3 Bodemconcentraties

4.2.3.1 Initiële bodemconcentraties (T₀) pilotproef

Op 10 september 2015 werd één verkennend bodemstaal genomen voorafgaand aan de aanleg van de pilotproef. Dit staal werd genomen in de onbegroeide zone (onderaan talud rond punt 1072) en de resultaten ervan, geanalyseerd door INBO labo, zijn weergegeven in

Tabel 14.

Tabel 14. Analyseresultaten van bodemstaal in onbegroeide zone. Alle concentraties in $\mu\text{g g}^{-1}$ DS.

Staal	P	K	Ca	Mg	S	Na	Fe	Mn	Cd	Pb	Zn	Cu	Co	Cr	Ni	As	Se
Bodem 7279	311	5436	18112	8046	231	302	33964	141	0.46	14.9	75.5	12.9	18.6	947	39.4	11.7	<2

////////////////////////////////////

In de zone zonder mossen (kale plek, Figuur 9) werd ook door Envirosoil NV een staal genomen. Daar was de totaal Cr concentratie nog een factor 10 hoger, te weten $9100 \mu\text{g g}^{-1}$. Er werd vastgesteld dat de concentratie aan Cr(VI) steeg in de zone met vegetatie tot max. $270 \mu\text{g g}^{-1}$ DS. Dat is **34x** de saneringsnorm.

Het aandeel van Cr(VI) tot totaal Cr in de bodem varieerde in 2017 van 0.4% tot 35%. Toch is Cr(VI) te schatten uit de totale Cr concentratie met een simpele lineaire regressie die tussen de 80 en 95% van de variantie verklaart (Tabel 15).

Diepte	Regressierechte	R ²	p
0-30 cm	Cr(VI) = 0.2547 Cr - 142.9	0.92	<0.001***
30-70 cm	Cr(VI) = 0.3495 Cr - 388.4	0.95	<0.001***
70-100cm	Cr(VI) = 0.2664 Cr - 308.6	0.80	<0.001***
0-100 cm	Cr(VI) = 0.313 Cr - 310.8	0.91	<0.001***

////////////////////////////////////

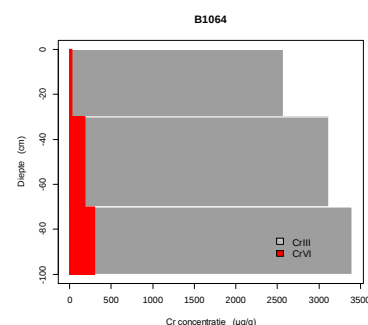
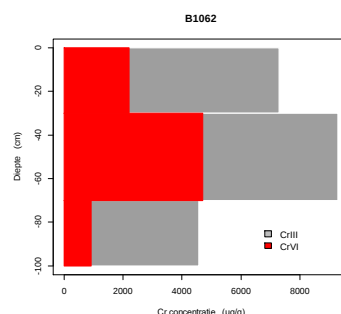
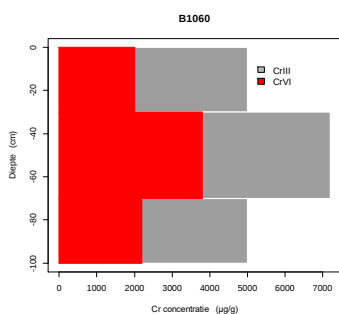
GEEN AFDEKLAAG (jaar 2017)

Referentiezone (Zone 3)

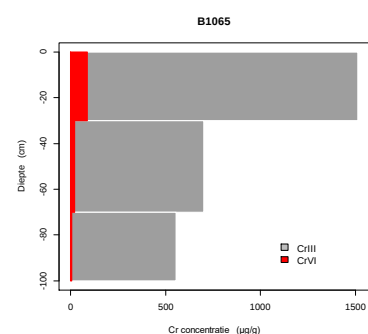
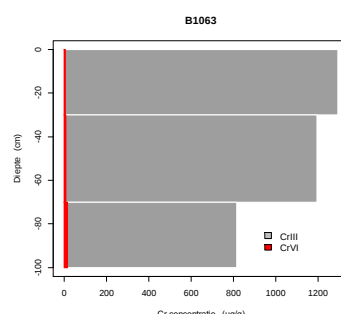
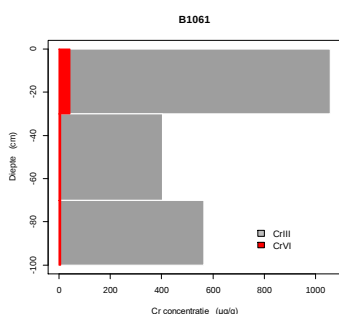
Berk geplant (Zone 2)

Berk ingezaaid (Zone 1)

BOVEN HELLING



ONDERAAN HELLING



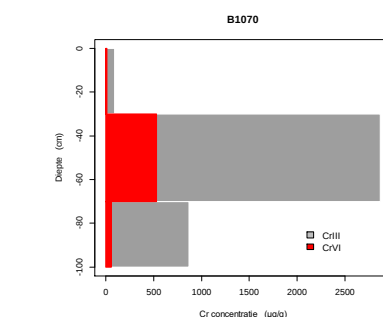
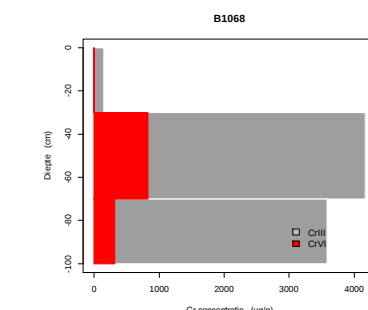
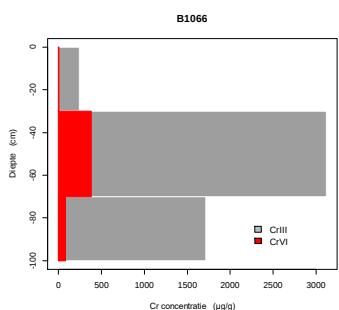
WEL AFDEKLAAG (~30 cm dikte)

Berk ingezaaid (Zone 4)

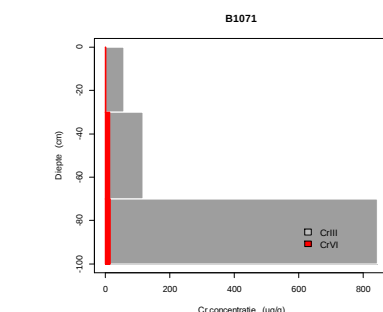
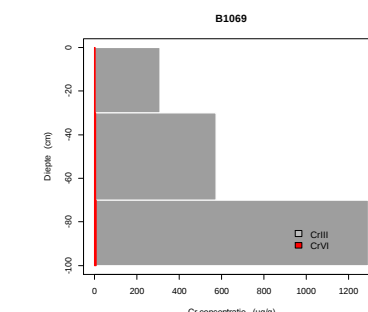
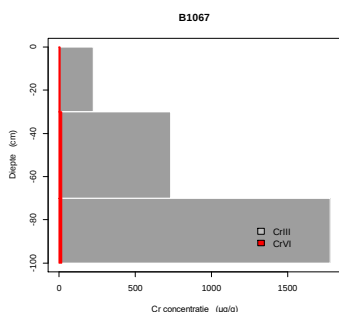
Berk geplant (Zone 5)

Referentiezone (Zone 6)

BOVEN HELLING

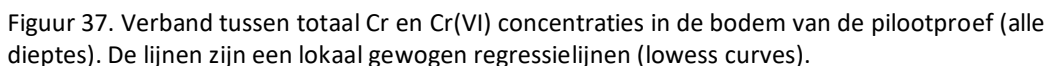


ONDERAAN HELLING



Figuur 36. Diepteverspreiding van de bodemconcentraties aan Cr(III) en Cr(VI) bij aanvang van de pilotproef. Merk op dat de schaal van de X-as tot een factor 10 kan verschillen.

////////////////////////////////////

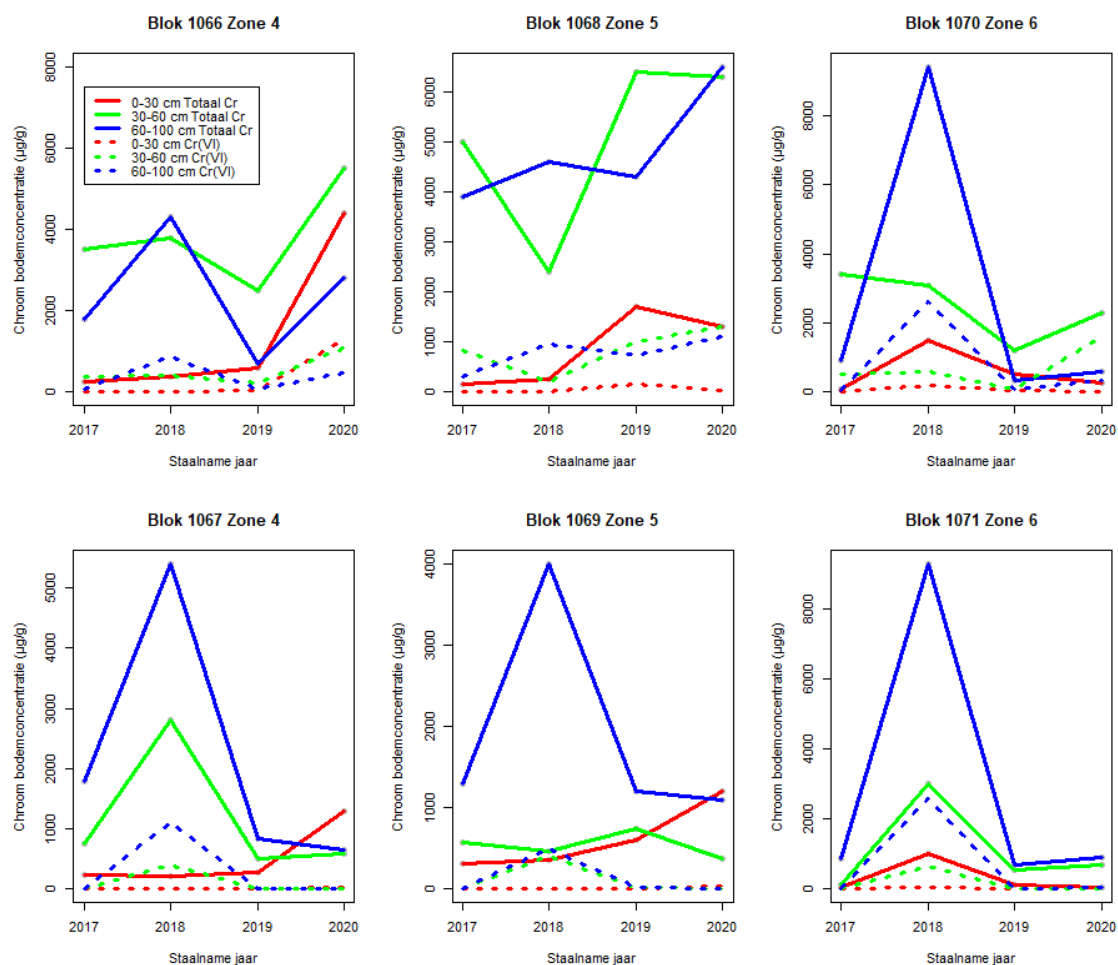


De bodemconcentraties aan totaal Cr en Cr(VI) werden tussen 2017 en 2020 jaarlijks bepaald in april/mei door Envirosoil in elk van de 12 proefblokken. Deze concentraties zijn ondermeer geplot in Figuur 37.

In de blokken zonder afgraven of afdeklaag (zones 1, 2 en 3) is de evolutie van die bodemconcentraties weergegeven in Figuur 38. Zoals reeds in het begin van de pilootproef werd vastgesteld werden de hoogste totaal en Cr(VI) concentraties aangetroffen in de blokken 1060, 1062 en 1064 bovenaan de helling en op vrijwel elke diepte. De Cr(VI) concentratie volgt het patroon van de totale Cr concentratie in de tijd, wat logisch volgt uit hun autocorrelatie (Figuur 37).

Opvallend is een serieuze daling van de concentraties van 2017 naar 2018 (een extreem droogtejaar) voor de meeste blokken en dieptes, maar dan wel weer een stijging in 2019.

Men zou verwachten zoals in blok 1061 dat de totale Cr concentratie in de opperbodem (rode lijn) zou dalen door uitloging en zou toenemen op grotere diepte, maar dat is eerder de uitzondering. In alle andere blokken neemt de waargenomen totaalconcentratie aan Cr eerder toe en in blok 1065 zelfs sterk toe in de toplaag.



Figuur 39. Evolutie van Cr-totaalgehalten en Cr(VI)-gehalten over de 4 jaar in de bodem van de pilootproef in het gedeelte met afdeklaag

////////////////////////////////////

4.2.4 Bladanalyses

4.2.4.1 Verkennende bladanalyses 2015

Op 10 september 2015 werden 4 bladstalen genomen voorafgaand aan de aanleg van de pilootproef. Er werd een onderscheid gemaakt tussen aangetaste en kwijnende elzen en berken onderaan het talud en gezonde exemplaren van dezelfde twee soorten bovenaan het talud.

De hoofdtoevoedingselementen van els en berk (Tabel 16) zijn hoger in de gezonde bomen bovenaan de helling dan in de kwijnende bomen onderaan de helling, met uitzondering van Ca en Mg in het blad van berk die hoger zijn onderaan de helling. Betere groei reflecteert zich doorgaans in hogere bladgehalten.

Tabel 16. Macro-elementen in het blad van geteste boomsoorten: gezonde versus kwijnende exemplaren

Boomsoort	Status	Positie talud	P $\mu\text{g g}^{-1}$	K $\mu\text{g g}^{-1}$	Ca $\mu\text{g g}^{-1}$	Mg $\mu\text{g g}^{-1}$	S $\mu\text{g g}^{-1}$	Na $\mu\text{g g}^{-1}$	Fe $\mu\text{g g}^{-1}$	Mn $\mu\text{g g}^{-1}$
Berk	Gezond	Boven	1795	5913	7886	6246	1495	68.8	100	15.4
	Kwijnend	Onder	1040	3342	10632	8386	858	70.5	199	7.43
Els	Gezond	Boven	2072	8759	15643	3721	1831	154	113	11.3
	Kwijnend	Onder	879	5707	8323	3595	1212	196	187	38.6

De referentiewaarden voor fosfor (P) in berk (2000-3000 $\mu\text{g P g}^{-1}$) en els (2000-4000 $\mu\text{g P g}^{-1}$) worden enkel gehaald voor de gezonde els, maar zijn dus overwegend laag. Ook het kalium gehalte is relatief laag, gezien het referentiebereik (7000-10000 $\mu\text{g K g}^{-1}$ voor berk en 10000-22000 $\mu\text{g K g}^{-1}$ voor els. Het niveau van het Ca-gehalte is goed (referentiebereiken 9000-11000 en 7000-12000 $\mu\text{g Ca g}^{-1}$ voor resp. berk en els). Ook het Mg gehalte is voldoende (referentiebereiken 3000-8000 en 3700-5400 $\mu\text{g Mg g}^{-1}$). Het zwavelgehalte is dan weer relatief laag (referentiebereiken 2000-3000 en 2000-4000 $\mu\text{g S g}^{-1}$). Om de groei te bevorderen zou een beperkte P en K aanrijking (via bvb groencompost) nuttig zijn.

Tabel 17. Zware metalen ($\mu\text{g Cr g}^{-1}$) in het blad van geteste boomsoorten: gezonde versus kwijnende exemplaren van berk en els.

Boomsort	Status	Positie talud	Cd	Zn	Pb	Cu	Ni	Cr	As	Co	Se
Berk	Gezond	Boven	<0.1	54.1	<0.5	6.41	0.50	1.74	0.99	<0.5	<2
	Kwijnend	Onder	<0.1	99.5	<0.5	5.90	<0.5	0.86	1.05	<0.5	<2
Els	Gezond	Boven	<0.1	51.5	<0.5	11.02	1.43	9.54	0.79	<0.5	<2
	Kwijnend	Onder	<0.1	33.3	<0.5	6.09	0.54	24.4	0.69	<0.5	<2

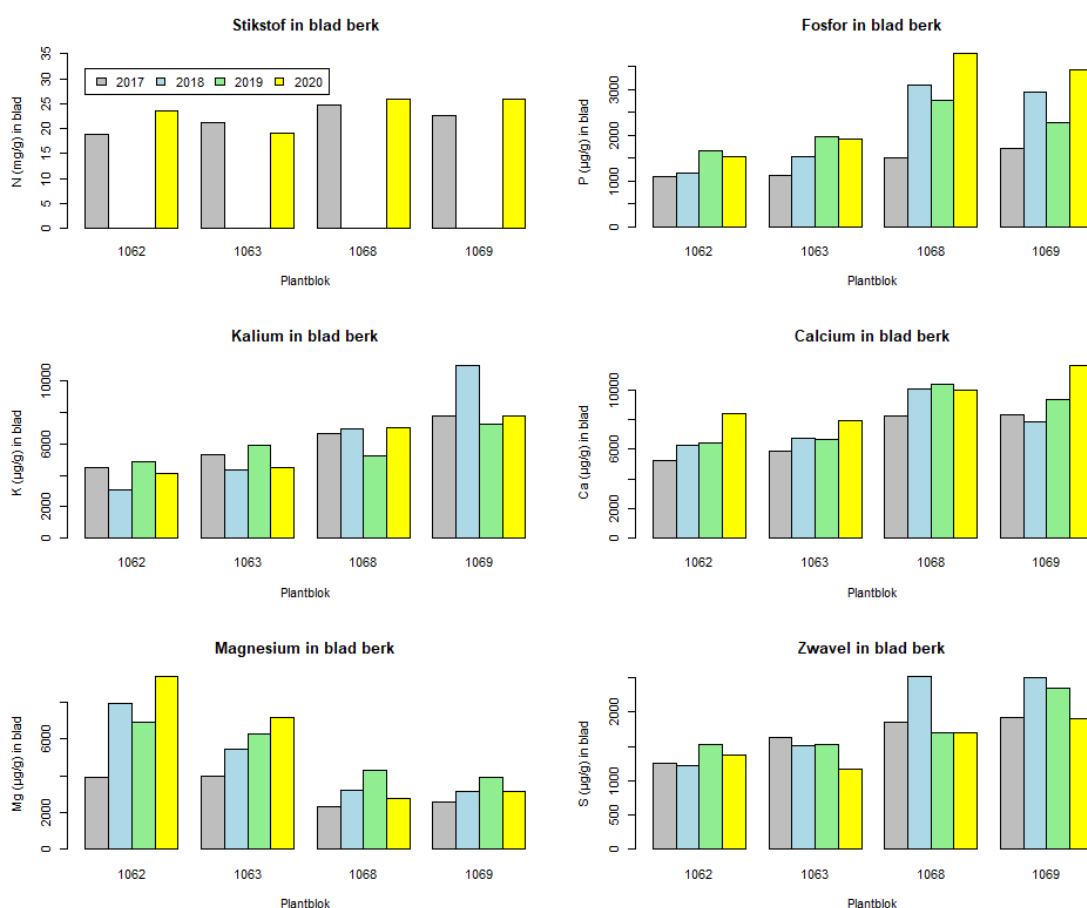
Inzake biobeschikbaarheid (opname in bladeren van els en berk) van de onderzochte zware metalen (Tabel 17) stellen we enkel voor Cr een verhoogde opname vast en ook enkel in de zwarte els, niet in berk.

Bladreferentiewaarden voor Cr voor beide soorten is ca $2 \mu\text{g Cr g}^{-1}$ DS; we vonden $0.86 \mu\text{g Cr g}^{-1}$ in berk onderaan de helling en $1.74 \mu\text{g Cr g}^{-1}$ bovenaan de helling. Dus geen verhoogde opname voor berk.

Voor zwarte els echter, die ook groeiretardatie en sterfte vertoonde beneden de helling vonden we $24.4 \mu\text{g Cr g}^{-1}$ (dus 12 x referentiewaarde), maar ook bovenaan de helling in gezonde elzen werd nog $9.54 \mu\text{g Cr g}^{-1}$ aangetroffen. Alle andere bladconcentraties aan zware metalen liggen binnen een normaal bereik, conform wat de bodemconcentraties doen vermoeden.

4.2.4.2 Evolutie bladanalyses testbomen 2017-2020

De evolutie van de bladconcentratie van alle chemische elementen van de berken en elzen tijdens de monitoringsperiode 2017-2020 is weergegeven in tabellen in Bijlage voor macro-elementen (Tabel 23) en zware metalen (Tabel 24) en voor de belangrijkste elementen in onderstaande figuren.



Figuur 40. Evolutie van de concentratie aan macro-nutriënten in het blad van berk in de pilootproef.

In het berkenplantsoen zien we in de meeste plantblokken een geleidelijke toename aan N, P, K, Ca en Mg, maar niet direct voor S (Figuur 40). Bladstikstof werd enkel gemeten bij het begin

////////////////////////////////////

Stikstof in blad Zwarte Els

Plantblok	2017	2018	2019	2020
1062	32	32	32	32
1063	30	30	30	30
1068	28	28	28	28
1069	31	31	31	38

Fosfor in blad Zwarte Els

Plantblok	2017	2018	2019	2020
1062	1900	1500	1400	2200
1063	1500	1300	1400	1600
1068	1500	1500	1300	2100
1069	2000	2000	1400	2200

Kalium in blad Zwarte Els

Plantblok	2017	2018	2019	2020
1062	6500	7000	7000	9500
1063	10500	6500	7500	7500
1068	6800	6500	5500	6800
1069	10500	9500	6800	10500

Calcium in blad Zwarte Els

Plantblok	2017	2018	2019	2020
1062	12500	8500	7500	9000
1063	8000	8000	8500	10500
1068	16500	9500	8500	10500
1069	13500	9000	10500	11000

Magnesium in blad Zwarte Els

Plantblok	2017	2018	2019	2020
1062	4800	4500	5000	4800
1063	2800	2500	3000	2800
1068	3500	6500	6000	5500
1069	3000	2500	3200	2800

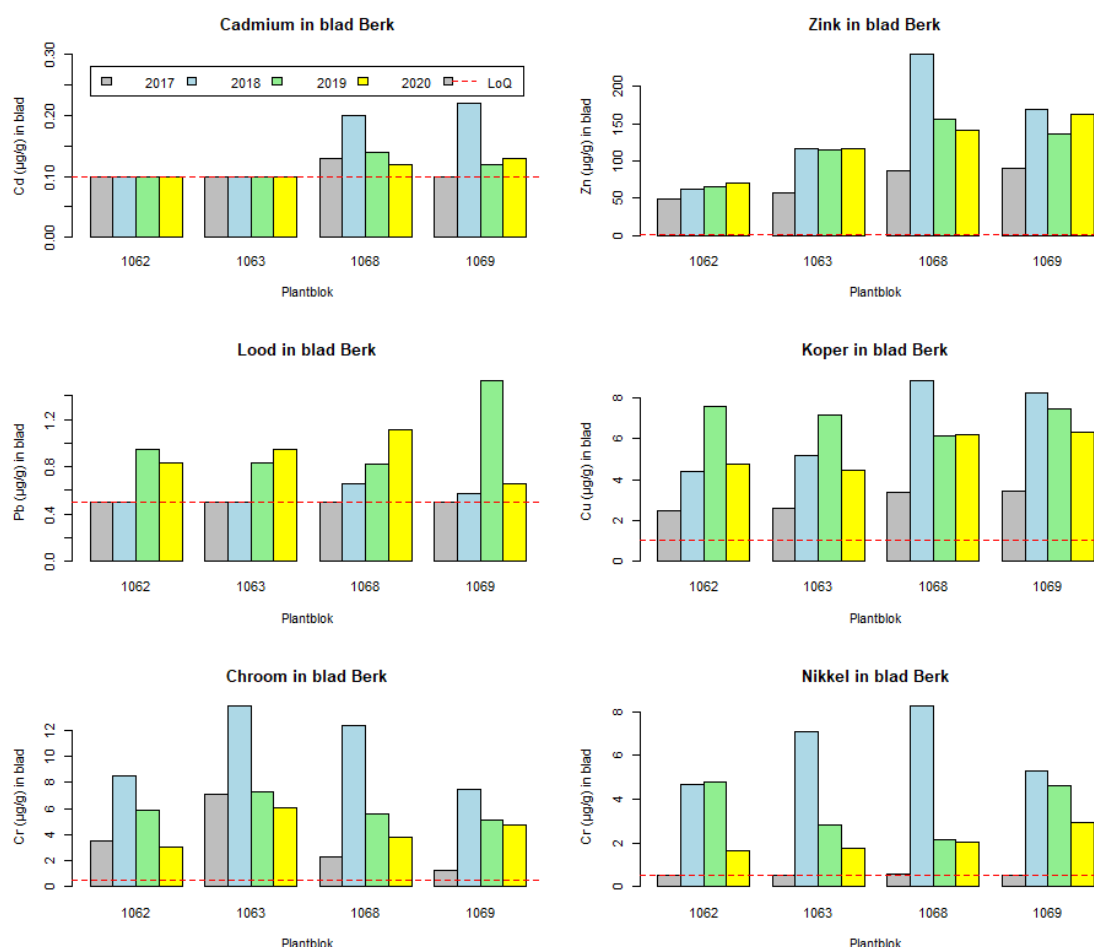
Zwavel in blad Zwarte Els

Plantblok	2017	2018	2019	2020
1062	2050	1850	1850	1950
1063	1850	1650	1750	1750
1068	2250	1950	1650	1950
1069	1950	2150	1550	2050

Bij zwarte els wordt een lagere Mg concentratie vastgesteld onderaan het talud (blokken 1063 & 1069), terwijl dit voor de andere macro-nutriënten niet wezenlijk verschilt.

////////////////////////////////////

kunnen verklaard worden door de nabijheid van de autoweg (looddepositie op de bladeren), maar de concentraties zijn nauwelijks hoger dan LoQ. Het koper gehalte is duidelijk meetbaar, maar vertoont weinig verschil tussen de plantblokken of een temporeel patroon.



Figuur 42. Evolutie van de concentratie aan zware metalen in het blad van berk in de pilootproef.

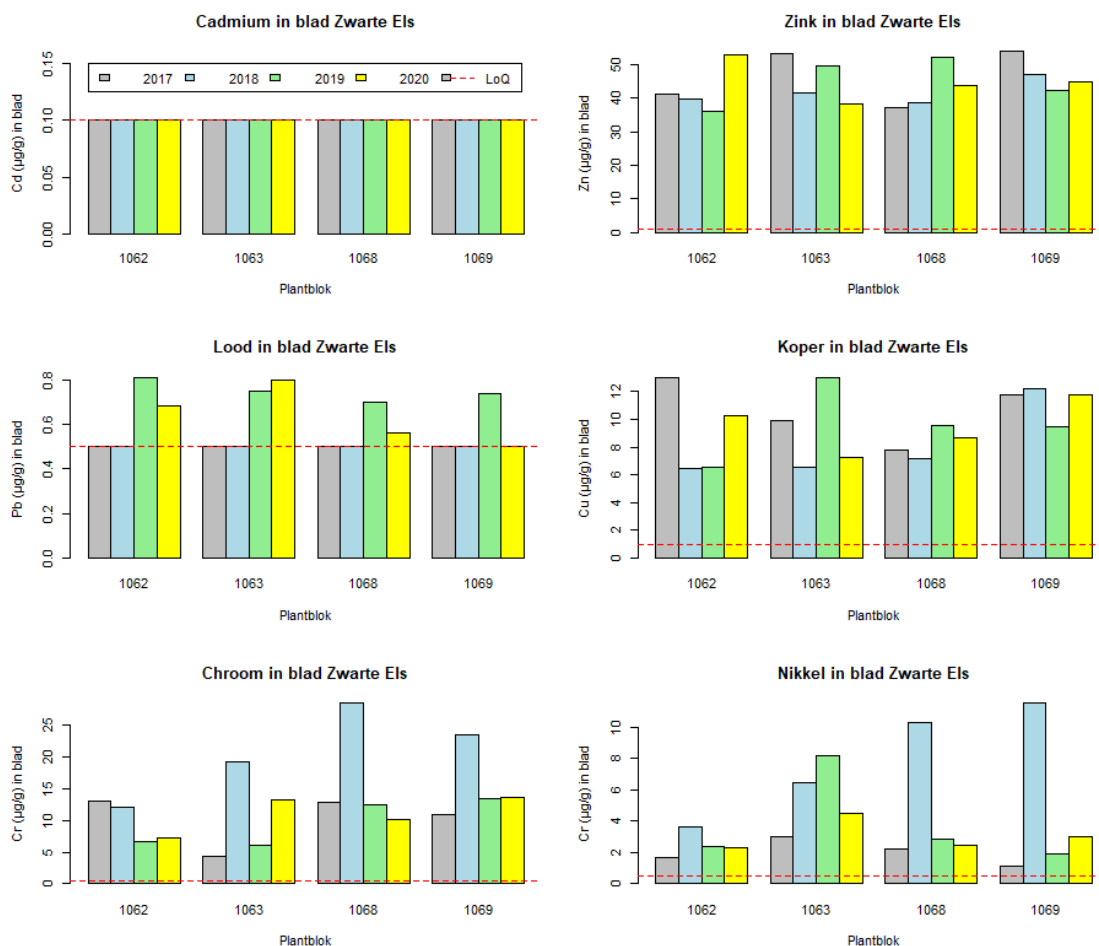
Het chroom gehalte in berkenbladeren is opvallend hoger in 2018 dan in de andere jaren, zoals ook voor Ni wordt vastgesteld. Er is geen significant verschil tussen de blokken (zie ook Figuur 50) en geen duidelijke temporele trend, tenzij ene mogelijke afname na 2018. Tussen Cr en Ni is wel enige temporele correlatie te zien.

Voor zwarte els zijn nog andere patronen te zien dan voor berk, deels omdat de elzen groeiden bovenaan en onderaan het talud en niet in of op de afdeklaag. Maar ook omdat de elzen er reeds groeiden vooraleer de pilootproef met berken werd aangelegd (dus geen kwekerij-effect). De concentraties het groeijjaar 2017 zijn wel meer vergelijkbaar met de andere jaren.

Het cadmium gehalte is zeer laag en bleef steeds onder bepaalbaarheidsgrens in alle blokken. De Zn concentratie varieert weinig en is beduidend lager dan wat berk opneemt uit de afdeklaag. Ook het Pb gehalte is laag en enkel betrouwbaar meetbaar in 2019 en 2020. Het koper gehalte varieert tussen de groeijaren zonder duidelijk patroon. Net als bij berk zien we ook bij zwarte els voor Cr en Ni verhoogde concentraties in 2018 ten opzichte van de andere jaren. Het fenomeen van een op-concentratie van metalen (of nutriënten) tijdens droogtejaren komt voor doordat het blad door de droogte niet volledig kan ontluiken (en dus klein blijft) en

////////////////////////////////////

per eenheid bladmassa de concentratie toeneemt. In dat geval echter neemt de concentratie evenredig toe voor alle chemische elementen en hier wordt dit enkel bij Cr, Ni en mogelijks Cd vastgesteld. De verklaring zal dus eerder liggen bij droogte-effecten in het bodemmilieu die de specifieke opname van deze metalen determineren. Dit kan te maken hebben met specifieke redox condities (Cr(III) vs. Cr(VI)) maar ook met micro-biologische processen (bacteriën) of werking van fungi (mycorrhizen, ...)

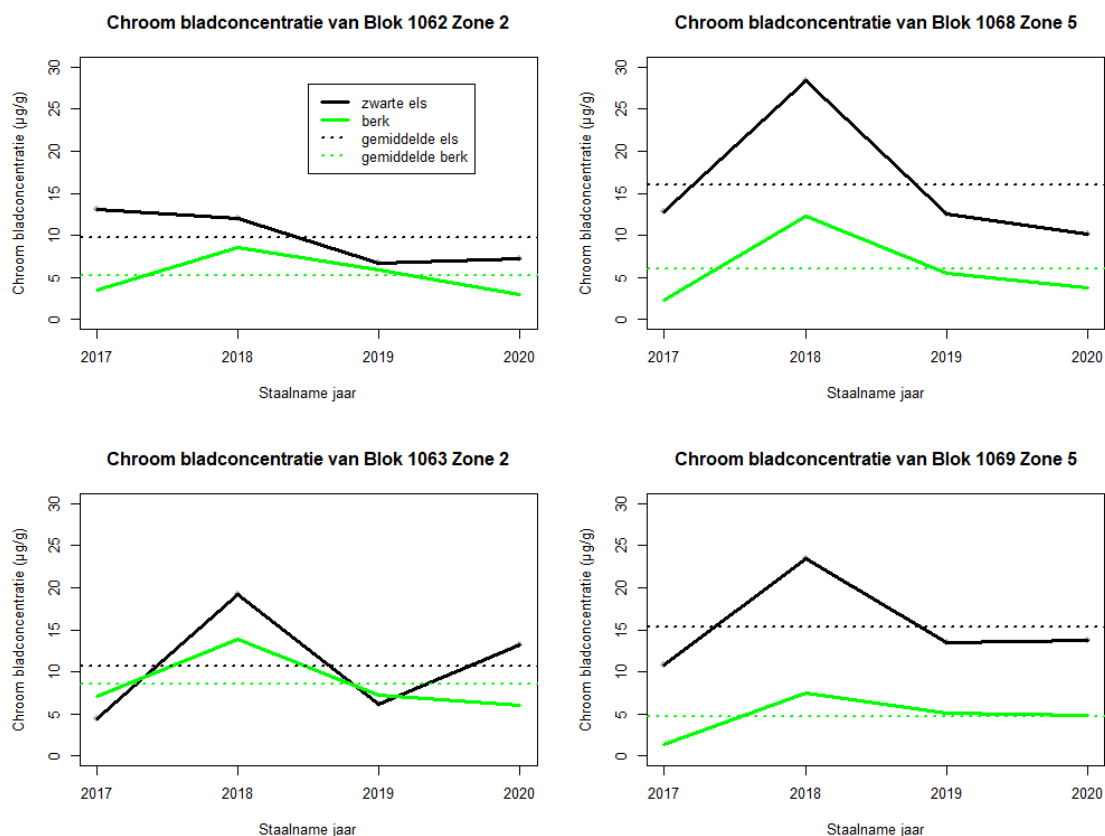


Figuur 43. Evolutie van de concentratie aan zware metalen in het blad van zwarte els in de pilootproef.

De evolutie van de Cr concentratie in het blad van zowel berk als els is weergegeven in Figuur 44. Zoals initieel waargenomen is de (gemiddelde) concentratie in het blad van els steeds hoger dan in dat van berk. In het extreme droogtejaar 2018 pieken de Cr concentraties voor beide soorten en in alle blokken. Na 2018 zien we een overwegend dalende trend.

De hoogste gemiddelde concentratie (stippellijn) in het blad van berk vinden we in blok 1063, dus zonder afdeklaag. De andere gemiddelde concentraties zijn zeer vergelijkbaar. In het blad van zwarte els vinden we de hoogste concentratie terug bovenaan het talud (blok 1068), maar gemiddeld is dit vergelijkbaar met blok 1069 onderaan het talud. Een per observatiejaar gepaarde t-test wijst alvast op niet significant verschil ($p=0.75$).

////////////////////////////////////

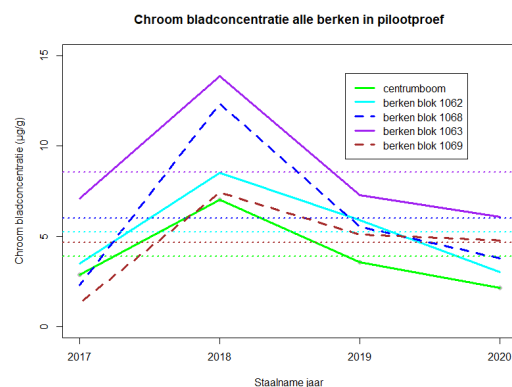


Figuur 44. Evolutie van Cr concentratie in het blad van berk en els in de pilootproef. De gemiddelde bladconcentratie voor de periode 2017-2020 wordt aangegeven door de stippellijn. Zone 2 is niet afgedekt en zone 5 wel.

Bij de monitoring van de bladgehalten in de pilootproef werd tevens de 'centrumboom' bemonsterd, die reeds een 5-6 m hoogte had bij de aanleg van de pilootproef (Figuur 45) en dus diep geworteld in de zone zonder begroeiing (zie blok 1065 in Figuur 20).



Figuur 45. Centrumboom van berk reeds aanwezig in pilootproef (Foto april 2017)



Figuur 46. Evolutie bladconcentratie van alle gemonitorde berken in de pilootproef voor de periode 2017-2020.

4.2.5 Bioconcentratiefactoren voor Chroom in blad van berk en zwarte els

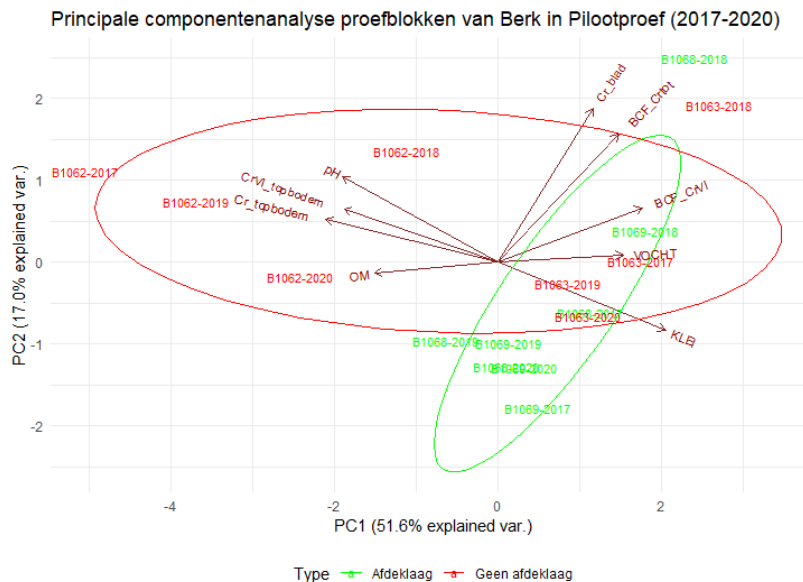
Een bioconcentratiefactor (BCF) is simpelweg de bladconcentratie gedeeld door de bodemconcentratie. Het is dus een maat voor de opname van een zwaar metaal in een plantenorgaan. Wanneer deze factor hoger is dan 1 dan wordt wel degelijk het metaal opgeconcentreerd in het blad en is ecotoxicologische doorvergiftiging mogelijk.

Vooreerst is onmiddellijk duidelijk dat er in geen enkel proefblok BCF-Cr waarden boven 1 voorkomen. De maximale BCF-Cr waarde bij berk is 0.045 en bij zwarte els 0.105 en de verschillen tussen deze boomsoorten is statistisch significant ($p=0.001$ in een gepaarde t-test). Dus zwarte els neemt gemiddeld meer Cr op in het blad dan berk in hetzelfde blok en tijdens hetzelfde groeijjaar.

Ook vinden we significant hogere BCF waarden terug bij zwarte els dan bij berk, met BCF Cr(VI) die kunnen oplopen tot 5.7. Dit bevestigt dat zwarte els gevoeliger is voor Cr en wellicht ook meer Cr(VI) opneemt dan berk.

Jaar	Proefblok 1062				Proefblok 1068			
	Berk		Els		Berk		Els	
	BCF Cr	BCF Cr(VI)	BCF Cr	BCF Cr(VI)	BCF Cr	BCF Cr(VI)	BCF Cr	BCF Cr(VI)
2017	0.000	0.002	0.001	0.006	0.015	1.000	0.086	5.587
2018	0.013	0.426	0.018	0.599	0.046	0.725	0.105	1.673
2019	0.001	0.007	0.001	0.008	0.003	0.033	0.007	0.074
2020	0.001	0.108	0.002	0.257	0.003	0.086	0.008	0.231

Jaar	Proefblok 1063				Proefblok 1069			
	Berk		Els		Berk		Els	
	BCF Cr	BCF Cr(VI)	BCF Cr	BCF Cr(VI)	BCF Cr	BCF Cr(VI)	BCF Cr	BCF Cr(VI)
2017	0.005	1.161	0.003	0.716	0.004	0.565	0.035	4.709
2018	0.022	0.990	0.031	1.372	0.021	1.048	0.065	3.303
2019	0.009	0.428	0.008	0.359	0.008	0.426	0.022	1.122
2020	0.006	0.216	0.013	0.470	0.004	0.122	0.011	0.351



Figuur 47. PCA van de proefblokken (blok-observatiejaar) van Berk met Cr concentraties in bodem en blad en verklarende bodemvariabelen.

Wanneer we een principale componenten analyse uitvoeren voor de proefblokken met berkenplantsoen verklaren de eerste twee assen van de PCA samen 69% van de totale variantie (Figuur 47). De eerste as (PC1) wordt vooral bepaald door het totaal Cr gehalte (hoe negatiever op de PC1 as, hoe meer Cr in de bovenste bodemlaag van 0-30 cm werd vastgesteld) en het klei gehalte dat hiermee negatief is gecorreleerd (dus in positieve richting op PC1).

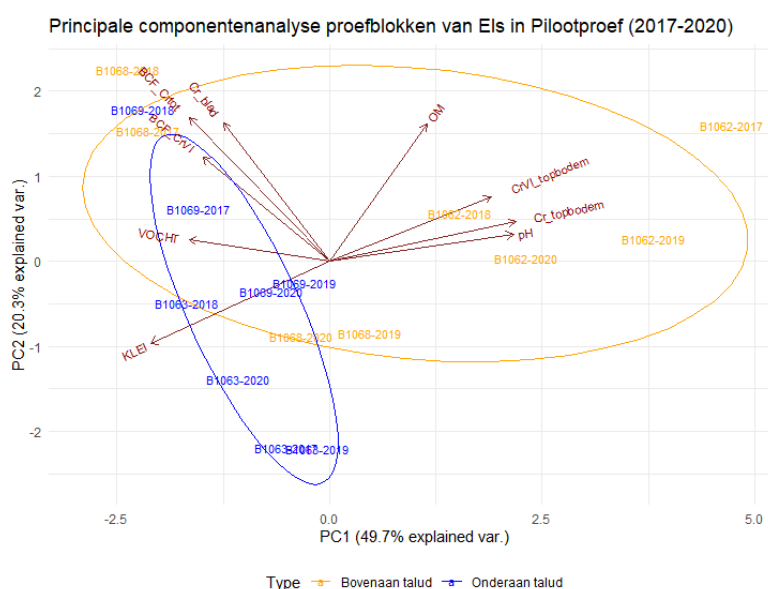
Het Cr(VI) gehalte is sterk gecorreleerd met het totale Cr gehalte (zoals voorheen aangetoond) wat zichtbaar is in de kleine hoek die beide vectoren maken. Hogere Cr bodemconcentraties zijn gecorreleerd met een hogere pH en een hoger gehalte aan organisch materiaal (OM), maar negatief gecorreleerd met een hoger kleigehalte. Het vochtgehalte in de bodem op het moment van de bladstaalname correleert vooral met meer klei in de bovenste bodemlaag.

////////////////////////////////////

Het Cr gehalte in het blad (Cr_{blad}) bepaalt in de sterkste mate (loading van 0.63) de tweede component (PC2) en correleert logischerwijs met een hogere BCF voor totaal Cr. Opmerkelijk is dat de vectoren van de bladconcentraties aan Cr loodrecht staan op de bodemconcentraties (zowel voor totaal Cr als Cr(VI)) wat aangeeft dat die niet gecorreleerd zijn.

De ellipsen groeperen de blokken met en zonder afdeklaag. De blokken met afdeklaag situeren zich duidelijk aan de rechterkant van de PCA wijzend op een hoger klei en vochtgehalte, en lager Cr bodemgehalte in de afdeklaag. In blok 1068 op de afdeklaag komt echter wel in 2018 een hoger Cr gehalte in het blad van berk voor, terwijl dat in 2019 veel lager is. Dit maakt dat er grote variatie is in Cr bladconcentraties tussen de groeijaren op de afdeklaag en dat andere factoren, niet bepaald in deze studie, hier een determinerende rol spelen.

Eenzelfde PCA analyse werd ook uitgevoerd op zwarte els in de pilootproef, waarbij onderscheid wordt gemaakt tussen de proefbomen onderaan en bovenaan het talud (Figuur 48). Beide assen PC1 en PC2 verklaren samen 70% van de variatie waarbij de eerste component 50%. De milieuvariabelen creëren dezelfde multidimensionele ruimte als in Figuur 46, alleen is hier het bodem-Cr gehalte in de positieve richting van PC1 georiënteerd.



Figuur 48. PCA van de proefblokken (blok-observatiejaar) van zwarte els met Cr concentraties in bodem en blad en verklarende bodemvariabelen

Ook hier geldt dat de hoogste bodemconcentraties aan Cr (en Cr(VI)) voorkomen in proefblok B1062 (alle jaren), maar de hoogste bladconcentraties onafhankelijk hiervan B1068 en B1069 te vinden zijn voor het jaar 2017 en 2018, terwijl in 2019 en 2020 eerder lage bladconcentraties werden vastgesteld. Ook hier geen eenduidig verband tussen bodemconcentratie en bladconcentratie voor het metaal Cr.

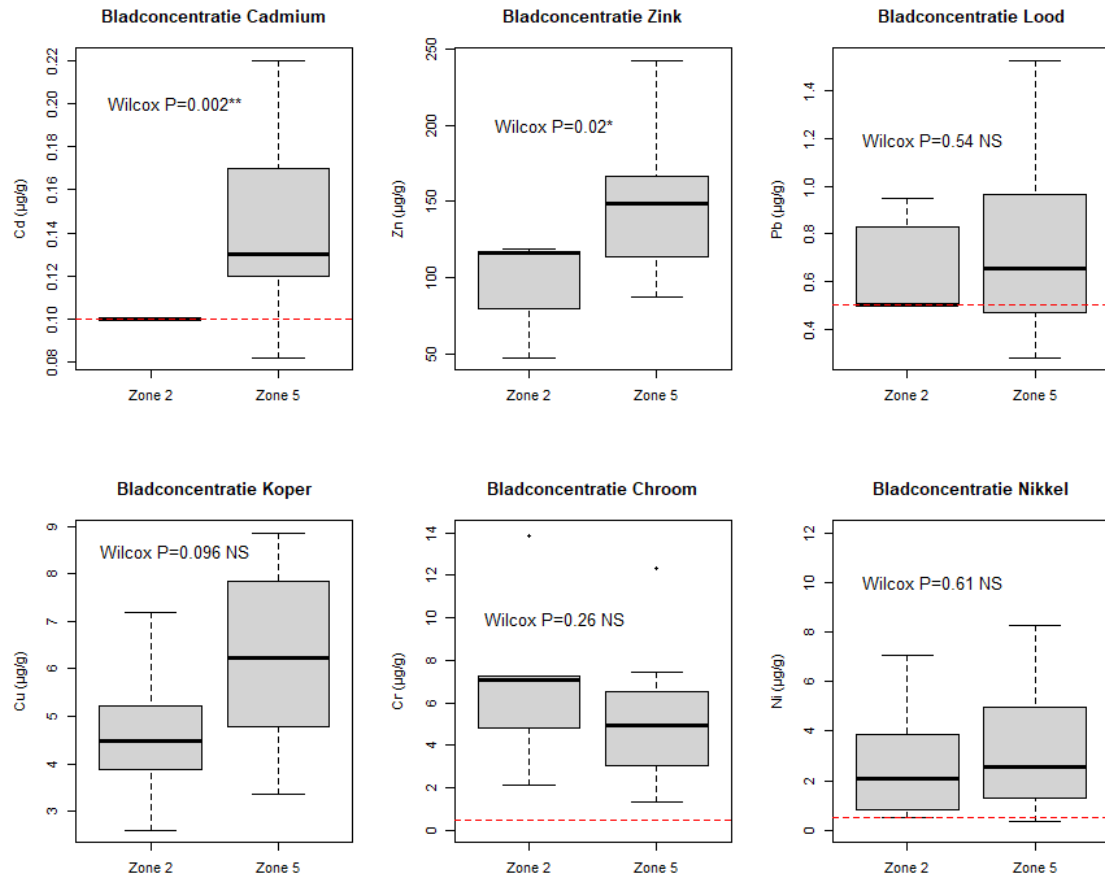
4.2.6 Effect van afdeklaag op bladconcentraties proefbomen

Tabel 19 lijst de eigenschappen op van de afgedekte en niet afgedekte zone en de concentraties in de bladeren van de aangeplante berken bij aanvang van de pilootproef. Deze bladconcentraties in de berken uit 2017 moeten met de nodige omzichtigheid worden

////////////////////////////////////

Tabel 19. Concentraties in bodem en berkenbladeren van plantsoen bij aanvang van de pilootproef (2017)

////////////////////////////////////



Figuur 50. Boxplots van bladconcentraties van zware metalen in het blad van berk jaarlijks opgemeten (2017-2020) in het onafgedekte deel van de pilootproef (Zone 2) versus de afgedekte zone (Zone 5). Significante verschillen volgens een 2 sample Wilcoxon test zijn in de figuur weergegeven. De rode stippellijn geeft de LoQ aan.

In het blad van de proefbomen die groeien in de afdeklaag werden significant hogere concentraties aan Cd en Zn vastgesteld, maar geen significant hogere concentraties aan Pb, Cu, Cr of Ni. De aangebrachte afdeklaag op deze verontreinigde site heeft blijkbaar geen enkele meerwaarde om (bovengrondse) opname van Cr in het proefplantsoen van berk te beperken.

De verhoogde concentraties van Cd en Zn in het blad van de bomen gegroeid op de afdeklaag blijven bovendien sterk onder de risicowaarden en zijn vergelijkbaar met concentraties op niet verontreinigde gronden.

4.2.7 Effect van afdeklaag op bladconcentraties akkerwinde

Het planten van de akkerwinde in het eerste groeijaar was niet echt succesvol. Slechts twee exemplaren konden bemonsterd worden in 2017: één in het niet afgedekte en één in het afgedekte gedeelte. Tabel 20 geeft de verschillen weer tussen de bladconcentraties. Opvallend is dat enkel voor het zware metaal Cr het gehalte hoger is in het onafgedekte gedeelte dan in het deel met afdeklaag. De maximale concentratie van $31 \mu\text{g g}^{-1}$ is weliswaar hoger dan

////////////////////////////////////

BIJKOMENDE ANALYSES

4.3.1 Zware metalen concentraties in twee soorten paddenstoelen

In november 2017 verschenen spontaan paddenstoelen die werden geanalyseerd op zware metalen omdat zwammen gekend zijn als metaal-accumulatoren.

De analyseresultaten wijzen op een duidelijk verschil tussen de twee soorten wat opname van zware metalen betreft, waarbij de Vaalhoed soort 2.6 tot 14x hogere concentraties heeft dan de Melkzwam. Cd, Cr en Al worden een factor 5 tot 15x meer geaccumuleerd in Vaalhoeden dan in Melkzwammen.

De Cr concentraties op droge stofbasis tot **209 $\mu\text{g g}^{-1}$** waren de hoogste concentraties die we in de periode 2017-2020 hebben kunnen waarnemen in bovengrondse organen van de onderzochte soorten op de Keizersberg site. De wortelconcentraties in berk lagen weliswaar hoger (468 $\mu\text{g Cr g}^{-1}$) en mogelijks is er een link tussen het wortelstelsel van berk en de Ectomycorrhiza van de Vaalhoed soort.

Tabel 21. Concentraties aan zware metalen ($\mu\text{g g}^{-1}$ DS) in twee dominante paddenstoelsoorten aangetroffen in de pilootproef

Metaal	Melkzwam (M)			Vaalhoed (V)			Factor
	Deelstaal 1	Deelstaal 2	Gem	Deelstaal 1	Deelstaal 2	Gem	V/M
Pb	1.44	2.02	1.73	4.78	5.14	4.96	2.9
Ni	2.69	2.44	3	11.7	9.76	10.8	4.2
Cr	33.1	31.5	32.3	156	209	183	5.7
Cd	0.18	0.2	0.19	1.74	3.74	3	14.4
Zn	66.0	66.3	66	187	280	233	3.5
Cu	9.35	9.42	9	21.12	27.94	25	2.6
Co	0.88	0.89	0.89	3.54	2.89	3.22	3.6
As	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	
Se	<2	<2	<2	<2	<2	<2	
Al	225	351	288	1660	1993	1826	6.3
Fe	377	549	463	2172	2131	2151	4.6
Mn	7.54	8.28	8	32.25	27.41	30	3.8

////////////////////////////////////

4.3.2 Wateranalyses

Envirosoil NV liet in de monitoringsperiode diverse stalen van oppervlaktewater analyseren door EUROFINS Belgium NV, ondermeer in de gracht langsheen de pilootproef en in een verzamelput lager op de helling. De resultaten zijn opgenomen in Tabel 22.

Opvallend zijn de zeer hoge concentraties in 2018, waarbij zelfs meer Cr(VI) gerapporteerd werd dan totaal Cr (theoretisch niet correct, maar mogelijks te wijten aan verschillende analysetechnieken). In 2018 werd in de gracht dus 3x meer Cr totaal en 20x meer Cr(VI) vastgesteld dan in 2017, terwijl in de verzamelput een vergelijkbaar totaal Cr gehalte maar een ~80 maal hogere Cr(VI) concentratie werd gemeten. In 2019 waren de concentraties in het grachtwater lager dan 2018, maar nog steeds verontrustend hoog.

Tabel 22. Totaal Cr en Cr(VI) concentraties in de gracht en verzamelput van de pilootproef.

Oppervlaktewater	Gracht		Verzamelput	
Jaar	Totaal Cr µg l ⁻¹	Cr(VI) µg l ⁻¹	Totaal Cr µg l ⁻¹	Cr(VI) µg l ⁻¹
2017	1900	390	1800	43
2018	6600	7600	1600	3400
2019	3700	3600	-	-

In 2019 werd geen waterstaal verzameld in de verzamelput maar wel het slib ervan. In het slib werd een totaal Cr concentratie van $2200 \mu\text{g g}^{-1}$ DS vastgesteld en $51 \mu\text{g g}^{-1}$ Cr(VI).

5 DISCUSSIE

5.1 CR CONCENTRATIES IN BODEM EN OPPERVLAKTEWATER

5.1.1 Bodem

Cr is een element dat voornamelijk in twee oxidatiestaten voorkomt: trivalent (Cr(III)) en hexavalent (Cr(VI)). Elementair chroom (Cr(0)) komt zelden voor in het natuurlijke milieu en de andere oxidatiestaten zijn ook onstabiel in de bodem (Guertin *et al.*, 2004). De valentie van Cr heeft een belangrijk effect op het transport en gedrag van Cr en dus ook op het type en kostprijs van remediëring en sanering (Hawley *et al.*, 2004).

Cr(VI) is water-oplosbaar en veel meer mobiel dan Cr(III) en dus moeilijker te verwijderen uit water. Bovendien is het de meer toxische vorm van Cr, ongeveer 10 tot 100x meer toxisch dan Cr(III) via de acute orale route bij mens en dier, vermoedelijk door het sterkere oxidatie-potentiaal en membraan transport van Cr(VI) (Hawley et al., 2004). De hoofdreden waarom bij planten Cr(VI) meer toxisch is dan Cr(III) is dat het vrije OH-radicalen genereert wanneer het afgebouwd wordt tot Cr(III). Deze energetische OH radicalen kunnen DNA muteren en leiden tot andere toxische effecten. Cr(VI) veroorzaakt doorgaans groeireductie voornamelijk te wijten aan schade berokkend aan het wortelsysteem (Salunkhe et al., 1974).

In de bodem en gesteenten is er een vrij wijde natuurlijke variatie aan Cr concentratie. Leisteen en bodems met fijne textuur hebben meestal de grootste concentraties, terwijl bodems met als moedermaterialen graniet, carbonaten of sedimenten met grove texturen (zand) eerder de laagste Cr concentraties vertonen.

Natuurlijke achtergrondswaarden van Cr in Vlaamse bosbodems (n=2458 observaties uit INBOdem) variëren tussen 4.97 en 81.1 $\mu\text{g Cr g}^{-1}$ DS (P₅-P_{97.5}) met een gemiddelde van 27.2 $\mu\text{g Cr g}^{-1}$ en mediaan van 20 $\mu\text{g Cr g}^{-1}$. Deze achtergrondswaarden komen overeen met deze bekomen door Martens et al. (1994) vermeld in OVAM (2010) die variëren van 17.3 $\mu\text{g g}^{-1}$ in zandbodems; 27 $\mu\text{g g}^{-1}$ in leembodems en 45.4 $\mu\text{g g}^{-1}$ in kleibodems. In Vlaamse overstromingsgebieden, meestal aangerijkt met zware metalen door sedimentafzet (slib), werden door INBO Cr bodemgehalten gemeten tussen de 6 en 652 $\mu\text{g Cr g}^{-1}$.

VLAREBO 2008 rekent voor bestemmingstype I en II (Natuur en Landbouw) met een streefwaarde van $85.8 \mu\text{g g}^{-1}$, een richtwaarde van $91 \mu\text{g g}^{-1}$ en een bodemsaneringsnorm van $130 \mu\text{g Cr g}^{-1}$ bij gehanteerde bodemeigenschappen klei = 20%, OM = 1% en pH = 7 (berekeningen Envirosol NV). Leefmilieu Brussel hanteert in CODES VAN GOEDE PRAKTIJK N°4 ([versie 27/03/2019](#)) een saneringsnorm voor Cr(III) in bodem van $91 \mu\text{g g}^{-1}$ (de richtwaarde in Vlaanderen) en vermeldt geen norm voor Cr(VI).

In een OVAM rapport (OVAM, 2010) wordt een herziening voorgesteld voor de BSN van 130 $\mu\text{g Cr g}^{-1}$ naar 70.3 $\mu\text{g Cr g}^{-1}$ en wordt een ecotoxicologische BSN voor landbouwgebieden op 560 $\mu\text{g Cr g}^{-1}$ gesuggereerd. Deze waarden zijn echter (nog) niet officieel geïmplementeerd. De

Opmerkelijk is de enorme variatie aan Cr(VI) concentraties die tussen de jaren werd vastgesteld, waarbij vermoedelijk het neerslagregime een rol speelt.

Momenteel is er nog geen bodemsaneringsnorm voor Cr(VI) in het grondwater bepaald. Indien men als criterium voor de norm drinkwaterkwaliteit hanteert, kan men -bij gebrek aan andere voldoende onderbouwde grenswaarden- terugvallen op de richtwaarde van WHO voor Cr-totaal (WHO, 1993, 1996a). Hierdoor wordt voorgesteld om de bodemsaneringsnorm voor Cr(VI) op $50 \mu\text{g l}^{-1}$ te stellen (i.e. dezelfde norm als voor 3-waardig Cr) en als de drinkwaternorm (OVAM, 2010). Het oppervlaktewater is gecontamineerd met een factor 7 tot 152x ten opzichte van deze voorgestelde norm.

De algemeen beschouwde veilige concentratie van Cr in drinkwater voor vee is $100 \mu\text{g l}^{-1}$ (OVAM, 2010). Het water in de gracht en in de verzamelput overschrijdt deze concentratie 19x in 2017, 34-76x begin 2018 en 36x in 2019. Tot op heden werd wel vastgesteld dat de gracht en verzamelput voor een groot deel van het jaar droog staat, maar er is wel een potentieel risico voor dieren.

5.2 CONCENTRATIES IN BOVENGRONDSE PLANTENDELEN EN ECOTOXICOLOGISCHE RISICO'S

5.2.1 Algemeen

Er is nog geen overtuigend bewijs geleverd dat Cr een essentiële rol speelt in het metabolisme van planten. Wat vaststaat is dat Cr-opname in planten niet door een specifiek en actief opnameproces verloopt. De Cr concentratie in planten wordt grotendeels gecontroleerd door de oplosbare Cr concentratie in de bodem (Kabata-Pendias, 2001), m.a.w. plantconcentraties kunnen een goede indicator zijn voor de biobeschikbare fractie. De hoeveelheid Cr-opname is afhankelijk van allerlei bodem- en plant gerelateerde factoren. Over het algemeen wordt er een hogere Cr accumulatie vastgesteld in de wortels dan in stengel of blad en de laagste concentratie in de vruchten (Kabata-Pendias, 2001). In gebieden met van nature hoge Cr bodemconcentraties wordt dit vaak gerelateerd met de slechte groei van bosbomen (Kabata-Pendias, 2001)

Symptomen voor Cr toxiciteit zijn vooral verwelking van de topscheuten en wortelschade, maar ook chlorose aan jonge bladeren. Volgens sommige bronnen wordt de fytotoxische grens reeds op $5 \mu\text{g g}^{-1}$ DS (plant) gelegd (OVAM, 2010).

5.2.2 Bladconcentraties in boomsoorten

In Vlaanderen vertonen bladconcentraties in bomen meestal $< 2 \mu\text{g Cr g}^{-1}$ DS. In wilgen en populieren in landbouwgebied worden soms hogere bladconcentraties gemeten tot $10 \mu\text{g Cr g}^{-1}$. In overstromingsgebieden waar de bodemconcentraties aan Cr kunnen oplopen tot $652 \mu\text{g Cr g}^{-1}$ lagen alle bladconcentraties van geteste bomen ($n=136$) onder de $14 \mu\text{g Cr g}^{-1}$ en kwam de [blad]/[bodem] bioconcentratiefactor (BCF) niet boven de 0.21 uit. Dus nergens vonden we totnogtoe een hogere Cr concentratie in het blad dan in de bodem.

In deze studie werd maximaal een Cr bladconcentratie van $28.4 \mu\text{g Cr g}^{-1}$ gemeten in de pilootproef (aangetaste bomen) en $13.7 \mu\text{g Cr g}^{-1}$ over de gehele site, beide in zwarte els, maar

////////////////////////////////////

Er bestaan geen normen voor aanvaardbare gehalten in het blad van boomsoorten, maar wel voor mogelijks afgeleiden zoals groencompost. Volgens VLAREA bedraagt het maximale Cr gehalte in groencompost 250 µg Cr g⁻¹ DS. Normen voor VLACO groencompost zijn strenger en mogen niet meer dan 70 µg Cr g⁻¹ DS bevatten. In beide gevallen voldoen de bladconcentraties van de site aan deze normstellingen.

Pulford *et al.* (2001) onderzocht Cr in berken (blad, twijgen, schors, hout, wortel) op een stort van chroomafval (Cr totaal: 1630 $\mu\text{g g}^{-1}$ in de 0-25 cm bodemlaag). In alle bovengrondse delen waren de concentraties kleiner dan hun LoQ van 5 $\mu\text{g g}^{-1}$, terwijl in de wortels tot 157 $\mu\text{g Cr g}^{-1}$ DS werd gemeten.

5.2.3 Bladconcentraties in kruidachtige soorten

Akkerwinde slaagde erin om $3800 \mu\text{g Cr g}^{-1}$ DS te accumuleren in vitro. In veldproeven zou $2100 \mu\text{g Cr g}^{-1}$ DS moeten haalbaar zijn waardoor de plant volgens de literatuur potenties heeft als hyperaccumulator ($> 1000 \mu\text{g Cr g}^{-1}$).



Figuur 53. Aangeplante akkerwinde.

In onze terreinproef werd meermaals door ANB getracht om akkerwinde te introduceren door planting en nadien vegetatief te vermeerderen. Door het uitzonderlijk droge voorjaar 2017 (en ook in 2018) echter stierven de meeste planten af. Slechts 2 “pollen” hadden het overleefd en werden geanalyseerd. Maximaal werd een concentratie van $31 \mu\text{g Cr g}^{-1}$ bereikt, maar mogelijks was de blootstellingsduur (enkele maanden groei) veel te kort om dit afdoend te evalueren. Akkerwinde is meerjarig en we vermoeden dat pas na enkele jaren en bij volle ontwikkeling van de wortels (mogelijks tot 150 cm diep) het accumulatiepotentieel in situ aangetoond kan worden.

In deze pilootproef kon enige accumulatie dus niet aangetoond worden.

5.2.4 Schorsconcentraties

De waargenomen Cr concentraties in de schors variëren van 0.84 tot $6.56 \mu\text{g g}^{-1}$ met de hoogste in SAAL (schietwilg). De hoogste Ni concentratie bedroeg $3.37 \mu\text{g g}^{-1}$.



Figuur 54. Schorsvraat door schapen op Keizersberg.

Er zijn voor zover bekend geen kwaliteitseisen waaraan diervoeding moet voldoen inzake de aanwezigheid van chroom (OVAM, 2010).

In het Nederlandse LNV-rapport (LNV, 1991) wordt vermeld dat vee tot 300 à $2000 \mu\text{g Cr g}^{-1}$ in veevoeding kan verdragen. Dit is dus $> 50\times$ hoger dan de hoogste concentratie die we in wilgenschors vonden.

Op basis van literatuur vermeldt OVAM (2010) dat inname van meer dan ca. $2 \mu\text{g Cr(VI) g}^{-1}$ lichaamsgewicht per dag schadelijk kan zijn voor runderen. Dit komt overeen met $65 \mu\text{g Cr g}^{-1}$ in het dagelijkse rantsoen van 15 kg droge stof.

Met een dosis van $6.5 \mu\text{g Cr g}^{-1}$ zou reeds zowat 150 kg DS aan schors door runderen (of schapen) moeten opgenomen worden om schadelijk te kunnen zijn, wat niet realistisch is.

5.2.5 Paddenstoelen

De hoge Cr concentraties die we aangetroffen hebben in de Vaalhoed paddenstoelen is enigszins opmerkelijk omdat volgens Garcia *et al.* (2013) alle paddenstoelen eerder Cr-excluders zijn.



Figuur 55. Bemonsterde paddenstoelen (vers) op de site van de pilootproef. Links is melkzwam soort, rechts hoogstwaarschijnlijk een vaalhoed soort.

Toch stelden we in de Melkzwammen gemiddeld $32.3 \mu\text{g Cr g}^{-1}$ en in de Vaalhoeden $182.8 \mu\text{g Cr g}^{-1}$ vast. Garcia *et al.* (2013) vonden in 3 soorten (*Lycoperdon utriforme*, *Coprinus comatus* en *Agaricus campestris*) geen hogere concentraties dan $8 \mu\text{g Cr g}^{-1}$ DS. Alle paddenstoelen (22 soorten, 126 samples) hadden voor Cr een BCF < 1 , terwijl voor Cd de BCF veelal > 1 is. Ook Zn en Hg wordt vaak geaccumuleerd in vruchtlichamen.

Zhu *et al.* (2011) analyseerden 14 in het wild groeiende paddenstoelen in de Chinese Yunnan provincie en stelden voor Cr een bereik vast tussen $10.7 - 42.7 \mu\text{g g}^{-1}$, vergelijkbaar met wat in de Melkzwam werd aangetroffen.

Volgens Kalač (2016) is het meest gerapporteerde Cr gehalte in (eetbare) paddenstoelen minder dan $5 \mu\text{g g}^{-1}$ DS, maar is een range van $5-10 \mu\text{g g}^{-1}$ DS niet uitzonderlijk. Accumulerende soorten bevatten meer dan $20 \mu\text{g g}^{-1}$ DS. Volgens die referentie zouden beide soorten die in Keizersberg werden aangetroffen accumulerende soorten zijn.

Echter, Figueiredo *et al.* (2007) bestudeerde de concentratie van Cr(VI) in 34 stalen van wilde paddenstoelen (15 soorten) ten opzichte van hun bodemconcentraties in twee Portugese

////////////////////////////////////

In de literatuur wordt geregeld gewag gemaakt van rhizofiltratie (Hawley et al., 2004; Pal Singh et al., 2013) wat wijst op de potentie van plantenwortels voor extractie van Cr uit afvalwaters. Vooral terrestrische planten met lange fijne wortels en met een hoge specifieke oppervlakte zouden geschikt zijn voor sorptie en opname van Cr uit een waterlichaam. Enkel levende wortels zouden in staat zijn om Cr uit een waterige oplossing te verwijderen.

5.4.1 Aanplanting

Naarmate de bomen zich verder ontwikkelen (boven- en ondergronds) zullen wellicht de concentraties in blad, schors en wortels verder evolueren. Vooral de accumulatiesnelheid van Cr in de wortels (in situ) is wetenschappelijk onontgonnen terrein en kan ook bepaald worden bij de ruimere set van boomsoorten buiten de pilootproef.

Uit deze vierjarige monitoring bleek dat er geen eenduidig verband is tussen de concentraties van Cr(III) en Cr(VI) in de vaste bodemfase (minerale bodem en OM) enerzijds en de bladconcentraties anderzijds. Ook variëren de bodemconcentraties van beide Cr-species sterk tussen de jaren.

Een essentiële schakel om dit complexe opnameproces beter te begrijpen is dan ook na te gaan wat de Cr(VI) en Cr(III) concentraties zijn in de waterige fase (de bodemoplossing; soil solution) van waaruit de wortels de metalen opnemen. En vooral om na te gaan welke variabelen de mobilisatie van zowel trivalent als hexavalent Cr van vaste bodemfase naar bodemoplossing bepalen.

5.4.5 Oppervlaktewater

Contaminatie van oppervlaktewater met Cr(VI) kan levensbedreigend zijn voor aquatische biota, terrestrische invertebraten en zoogdieren. Er dient nagegaan wat de risico's zijn voor directe opname van gecontamineerd water door deze organismen. Eventueel kunnen in vitro ecotox testen worden uitgevoerd met water verzameld in de pilootzone.

5.4.6 Kiemtesten

Het is opvallend dat de 'kale' zone lange tijd onbegroeid is gebleven in tegenstelling tot de afgedekte zone. Deze laatste had natuurlijk een voorsprong door de aanwezigheid van een zaadbank, maar natuurlijk ook lage Cr concentraties. Door kiemtesten kan nagegaan worden of de Cr bodemverontreiniging een kiemremmend effect heeft en welke zaden daar het meest gevoelig voor blijken te zijn.

Deze kiemtesten zouden potentieel ook kunnen ontwikkeld worden als screeningstest voor bodemkwaliteit.

6 CONCLUSIES

De site Keizersberg is wetenschappelijk interessant door de specifieke contaminatie van zowel trivalent als hexavalent chroom in de bodem door historische verontreiniging en maakt daardoor specifiek en gericht onderzoek naar effecten van Cr bodemverontreiniging mogelijk.

Er zijn grote verschillen tussen de Cr concentraties in blad, schors en wortels zoals vastgesteld bij 12 boom- en struiksoorten. De hoogste bladgehalten aan Cr werden vastgesteld bij zwarte els, de soort die bovengronds de meest duidelijke vitaliteitsproblemen en sterfte vertoonde.

Chroom accumuleert vooral in de wortels en deze gehalten zijn een factor 10 tot 100 hoger dan in blad of schors van zowat alle onderzochte boomsoorten.

Tijdens de monitoringsperiode 2017-2020 van de pilootproef werden de hoogste Cr concentraties in het blad van berk vastgesteld in het droogtejaar 2018, wat doet vermoeden dat het neerslagregime een rol speelt bij het opnameproces.

De afdeklaag van 30 cm heeft een duidelijk effect op de groei van kruiden, maar zorgt tegelijk voor een verhoogde (wortel)concurrentie voor vocht met de proefbomen. Berken die groeien op de afdeklaag bevatten gemiddeld niet minder Cr dan de referentie dus de afdeklaag heeft geen duidelijke meerwaarde om bovengrondse Cr opname in bomen te beperken.

Akkerwinde kon zich niet bewijzen als potentiële Cr hyperaccumulator. De vitaliteit en groei van de aangeplante exemplaren tijdens de droge zomers van 2017 en 2018 was ondermaats en de Cr accumulatie ruim onder de verwachting.

De hoogste concentraties van Cr in bovengrondse biomassa werden vastgesteld in spontaan ontwikkelde paddenstoelen in de nabijheid van de centrale berk in de proefzone. Zij vormen een mogelijk risico voor doorvergiftiging in het voedselweb.

De waarnemingen van Cr gehalten in de vruchten van bomen en struiken bevestigen de literatuur dat Cr helemaal niet opgenomen wordt in vruchten en zaden, eventuele doorvergiftiging naar insecten, vogels en zoogdieren (incl de mens) is onwaarschijnlijk.

Cr(VI) is wateroplosbaar en het meest toxisch en het gedrag ervan baart dan ook de meeste zorgen. Door de hoge neutrale tot basische bodem-pH binnen het onderzoeksgebied wordt Cr(III) eerder geïmmobiliseerd in de bodem en in de planten ter hoogte van de wortelmembranen.

Fytoextractie van Cr met behulp van boomsoorten is niet realiseerbaar via het oogsten van bovengrondse biomassa. Fytostabilisatie van de Cr verontreiniging lijkt wel een aanvaardbare optie.

De hoge concentraties van trivalent en vooral hexavalent Cr in het oppervlaktewater van grachten en poelen in het studiegebied vormt het grootste toxicologische risico, zowel voor aquatische en terrestrische fauna, als voor de dieren die ingezet worden voor begrazing (schapen, paarden).

Een beter inzicht in het gedrag van Cr in het (bos)ecosysteem door verder praktijkonderzoek zal toelaten het meest verantwoorde bodem- en natuurbeheer in deze gecontamineerde gebieden uit te werken. Er zijn derhalve suggesties gedaan voor verder onderzoek.

7 REFERENCES

- Figueiredo, E., Soares, M. E., Baptista, M. E., Castro, P. & Bastos, M. L. 2007. Validation of an electrothermal atomization atomic absorption spectrometry method for quantification of total chromium and chromium(VI) in wild mushrooms and underlying soils. *J. Agric. Food Chem.*, 55, 7192-7198.
- Garcia, M. A., Alonso, J. & Melgar, M. J. 2013. Bioconcentration of chromium in edible mushrooms: Influence of environmental and genetic factors. *Food and Chemical Toxicology*, 58, 249-254.
- Gardea-Torresdey, J. L., Peralta-Videa, J. R., Montes, M., de la Rosa, G. & Corral-Diaz, B. 2003. Bioaccumulation of cadmium, chromium and copper by *Convolvulus arvensis* L.: impact on plant growth and uptake of nutritional elements. *Bioresource technology*, 92, 229-235.
- Guertin, J., Jacods, J. A. & Avakian, C. P. 2004. Chromium (VI) handbook, CRC Press.
- Hawley, E. L., Deeb, R. A., Kavanaugh, M. C. & James Jacobs, R. G. 2004. Treatment technologies for Chromium(VI). In: *Chromium(VI) Handbook*. (ed J. Guertin, Jacobs, J.A., Avakian, C.P.), CRC Press, Boca Raton, Florida, pp. 275-311.
- Helsel, D. 2005. Nondetects and data analysis: Statistics for censored environmental data., John Wiley and Sons, New York.
- Kabata-Pendias, A. (ed) 2001. Trace elements in Soils and Plants, CRC Press, Florida.
- Kalač, P. 2016. Edible Mushrooms: Chemical Composition and Nutritional Value, Academic Press.
- Lee, L. R. 2017. R Package 'NADA'. Nondetects and data analysis for environmental data. In., CRAN repository.
- LNV 1991. Ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Visserij. Landbouwadviscommissie milieukritische stoffen. Werkgroep verontreinigde gronden. LAC-signaalwaarden. Den Haag; Nederland.
- OVAM 2010. Voorstel voor herziening bodemsaneringsnormen voor chroom, OVAM, pp. 76.
- Pal Singh, H., Mahajan, P., Kaur, S., Batisch, D. R. & Kohli, R. K. 2013. Chromium toxicity and tolerance in plants. *Environ Chem Lett*, 11, 229-254.
- Pulford, L. D., Watson, C. & McGregor, S. D. 2001. Uptake of Chromium by trees: prospects for phytoremediation. *Environmental Geochemistry and Health*, 23, 307-311.
- R Core Team 2014. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>.
- Rautio, P., Fürst, A., Stefan, K., Raitio, H. & Bartels, U. 2016. Part XII: Sampling and Analysis of Needles and Leaves. In: UNECE ICP Forests Programme Co-ordinating Centre (ed.): Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. Thünen Institute of Forest Ecosystems, Eberswalde, Germany, 19 p. [<http://www.icp-forests.org/Manual.htm>].

Zhu, F., Qu, L., Fan, W., Qiao, M., Hao, H. & Wang, X. 2011. Assessment of heavy metals in some wild edible mushrooms collected from Yunnan Province, China. *Environ Monit Assess*, 179, 191-199.

www.vlaanderen.be/inbo

8 BIJLAGEN

Tabel 23. Bijlage. Macro-elementen in bladanalyse van berk en els van de pilootproef tijdens de periode 2017-2020. Blokken met grijze achtergrond zijn aangelegd op de 30 cm afdeklaag.

Boomsoort	Jaar	Blok	N mg g ⁻¹	P µg g ⁻¹	K µg g ⁻¹	Ca µg g ⁻¹	Mg µg g ⁻¹	S µg g ⁻¹	Na µg g ⁻¹	Al µg g ⁻¹	Fe µg g ⁻¹	Mn µg g ⁻¹	
Berk	2017	1062	18,9	1094	4518	5267	3935	1248	129,3	60,7	122,1	23,3	
		1063	21,3	1112	5349	5836	3957	1638	154,4	71,1	135,5	32,4	
		1068	24,7	1496	6673	8274	2292	1858	169,1	63,6	134,7	57,0	
		1069	22,7	1705	7824	8372	2579	1918	132,2	68,2	136,0	50,6	
	2018	1062	-	1165	3107	6269	7942	1222	<50	124,8	191,5	26,4	
		1063	-	1521	4365	6732	5471	1505	59,0	108,0	191,7	40,5	
		1068	-	3101	6955	10038	3241	2520	59,2	142,5	274,2	108,4	
		1069	-	2931	11022	7851	3131	2510	<50	134,1	222,1	73,8	
	2019	1062	-	1660	4886	6447	6918	1529	93,6	65,6	134,4	118,0	
		1063	-	1964	5889	6704	6254	1525	91,5	99,8	161,4	92,5	
		1068	-	2765	5278	10425	4271	1702	132,2	90,6	161,1	97,1	
		1069	-	2273	7271	9363	3943	2348	198,7	105,2	184,3	99,5	
	2020	1062	23,6	1525	4115	8372	9401	1382	75,7	128,7	1705,8	21,6	
		1063	19,0	1914	4487	7927	7193	1162	136,8	124,4	169,1	11,9	
		1068	25,9	3771	7022	9968	2748	1703	183,8	151,9	203,9	40,6	
		1069	26,0	3436	7810	11680	3162	1902	217,4	127,2	177,8	46,7	
	Zwarte els	2017	1062	32,4	1870	6396	12988	4787	2133	70,1	67,7	110,1	22,4
			1063	30,0	1514	10555	8144	2912	1804	71,0	44,3	130,6	33,9
			1068	27,7	1449	6779	17462	3615	2338	137,5	58,1	123,3	20,4
			1069	31,4	1946	10179	13416	3043	1932	121,7	48,9	119,2	24,3
2018		1062	-	1454	7188	8727	4247	1802	89,4	105,0	158,4	26,4	
		1063	-	1246	6264	8158	2659	1591	<50	108,9	187,3	42,8	
		1068	-	1471	6190	9510	6694	1920	67,6	96,8	205,4	11,9	
		1069	-	2001	9124	9535	2441	2179	54,8	110,8	231,5	20,2	
2019		1062	-	1371	6908	7725	4996	1774	127,0	89,5	153,5	68,7	
		1063	-	1368	7426	8684	3039	1691	63,9	100,2	175,4	81,2	
		1068	-	1252	4689	8642	6098	1570	91,2	96,2	160,0	18,3	
		1069	-	1362	6877	10751	3222	1477	84,3	89,3	150,1	30,5	

////////////////////////////////////

	2020	1062	32,2	2500	9189	9282	4569	1969	203,9	112,5	153,8	23,8
		1063	29,8	1521	7245	10744	2890	1667	124,4	103,7	158,5	55,3
		1068	31,7	2138	6497	10917	5649	1858	187,3	97,8	133,6	16,3
		1069	37,8	2291	10081	11662	2680	2056	146,5	94,3	153,4	18,9

Tabel 24. Bijlage. Oligo-elementen (zware metalen in $\mu\text{g g}^{-1}$ DS) in bladanalyse van berk en els van de pilootproef tijdens de periode 2017-2020. Blokken met grijze achtergrond zijn aangelegd op de 30 cm afdeklaag.

Boomsoort	Jaar	Blok	Cd	Zn	Pb	Cu	Cr	Ni	As	Co	Se	Hg
Berk	2017	1062	<0,1	48,7	<0,5	2,48	3,51	<0,5	<0,5	<0,5	<2	-
		1063	<0,1	58,1	<0,5	2,6	7,08	<0,5	0,62	<0,5	<2	-
		1068	0,13	87,5	<0,5	3,37	2	0,56	<0,5	<0,5	<2	-
		1069	<0,1	90,7	<0,5	3,41	1,3	<0,5	<0,5	<0,5	<2	-
	2018	1062	<0,1	62,0	<0,5	4,4	8,51	5	<1,5	<0,5	<1,5	<0,05
		1063	<0,1	117,2	<0,5	5,21	13,86	7,08	<1,5	<0,5	<1,5	<0,05
		1068	0,2	242,9	0,66	8,87	12,32	8,25	<1,5	<0,5	<1,5	<0,05
		1069	0,22	170,2	0,57	8,26	7,44	5,31	<1,5	<0,5	1,8	<0,05
	2019	1062	<0,1	65,1	0,95	7,58	5,91	5	<1,5	1,26	1,67	<0,05
		1063	<0,1	115,2	0,83	7,19	7,27	2,81	<1,5	<0,5	1,72	<0,05
		1068	0,14	155,9	0,82	6,14	5,55	2,15	<1,5	<0,5	<1,5	<0,05
		1069	0,12	136,2	1,53	7,46	5	5	<1,5	0,55	2,13	<0,05
	2020	1062	<0,1	71,0	0,83	4,75	3,01	1,67	<1,5	<0,5	<1,5	2,19E-02
		1063	<0,1	116,7	0,95	4,49	6,06	1,78	<1,5	<0,5	<1,5	1,90E-02
		1068	0,12	141,2	1	6,19	3,78	2,02	<1,5	<0,5	<1,5	1,90E-02
		1069	0,13	162,5	0,65	6,3	4,76	2,94	<1,5	<0,5	<1,5	1,70E-02
Zwarte els	2017	1062	<0,1	41,3	<0,5	13,01	13,10	1,66	0,61	<0,5	<2	-
		1063	<0,1	53,2	<0,5	9,86	4,37	3,04	0,99	<0,5	<2	-
		1068	<0,1	37,2	<0,5	7,76	12,85	2,24	<0,5	<0,5	<2	-
		1069	<0,1	53,9	<0,5	11,79	10,83	1,09	1,40	<0,5	<2	-
	2018	1062	<0,1	39,9	<0,5	6,46	11,97	3,64	<1,5	1,66	1,78	<0,05
		1063	<0,1	41,7	<0,5	6,58	19,21	6,48	<1,5	<0,5	1,80	<0,05
		1068	<0,1	38,8	<0,5	7,18	28,44	10,25	<1,5	1,01	2,15	<0,05
		1069	<0,1	47,2	<0,5	12,21	23,45	11,53	<1,5	<0,5	<1,5	<0,05

////////////////////////////////////

