Gevoeligheidskaart van krimp- en zwelgedrag van de bodem en ondergrond in Vlaanderen bij veranderend vochtgehalte

Eindrapport

DEPARTEMENT
OMGEVING

omgevingvlaanderen.be

Gevoeligheidskaart van krimp- en zwelgedrag van de bodem en ondergrond in Vlaanderen bij veranderend vochtgehalte

Deze studie heeft als doel het opmaken van een gevoeligheidskaart m.b.t. krimp- en zwelgedrag bij veranderend vochtgehalte voor Vlaanderen. De resulterende kaart maakt een inschatting van de gevoeligheid van de ondergrond tot 5m diepte voor krimp-/zwelfenomenen bij veranderend vochtgehalte.

Dit rapport bevat de mening van de auteur(s) en niet noodzakelijk die van de Vlaamse Overheid.

COLOFON

Verantwoordelijke uitgever
Toon Denys
Departement Omgeving
Vlaams Planbureau voor Omgeving
Koning Albert II-laan 20 bus 8, 1000 Brussel
vpo.omgeving@vlaanderen.be
www.omgevingvlaanderen.be

Auteurs
Vincent Wolfs – Sumaqua
Gust Van Lysebetten – Buildwise, Laboratorium Geotechniek en Monitoring
Noël Huybrechts – Buildwise, Directie R&D
Jan Maertens – Jan Maertens bv

Depotnummer
D/2024/3241/038

Wijze van citeren
Van Lysebetten G., Wolfs V., Maertens J. & Huybrechts N. (2024). Gevoeligheidskaart van krimp- en zwelgedrag van de bodem en ondergrond in Vlaanderen bij veranderend vochtgehalte. Studie in opdracht van Departement Omgeving, Vlaams Planbureau voor Omgeving.

PARTNERS

Sumaqua

Buildwise

DEPARTEMENT
OMGEVING

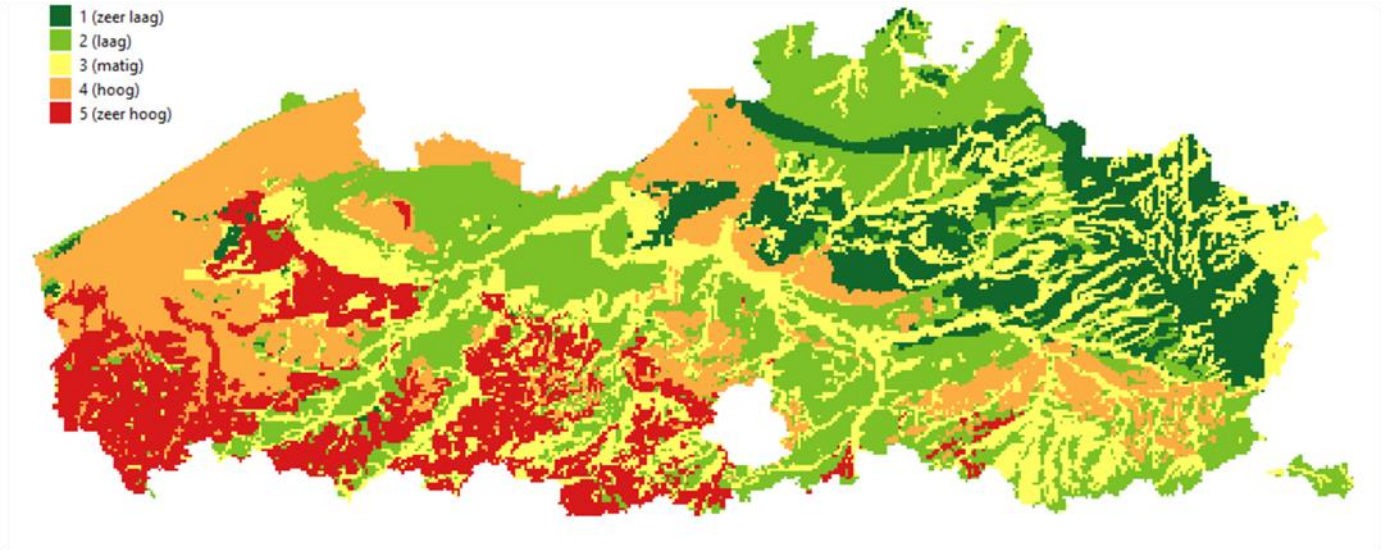
omgevingvlaanderen.be

MANAGEMENTSAMENVATTING

Vlaanderen kende sinds 2017 enkele extreem droge zomers. Wanneer het vochtgehalte in de bodem en de ondiepe ondergrond daalt, kunnen de bodem en de ondiepe ondergrond lokaal uitdrogen. Sommige gronden ondergaan een volumeverandering bij veranderend watergehalte. Deze volumeveranderingen kunnen leiden tot (differentiële) zettingen, die op hun beurt weer kunnen leiden tot schade aan gebouwen en infrastructuur. Plastische gronden zijn gronden die hier gevoelig voor zijn. Plastische gronden krimpen en zwellen bij het afgeven of opnemen van water. Het precieze krimp- en zwelgedrag is afhankelijk van onder andere de mineralogie, de diepte van de laag, de dikte van het pakket, ... Deze studie focust zich op het in het kaart brengen van het voorkomen van deze plastische gronden, alsook het inschatten van hun gevoeligheid aan krimp- en zwelgedrag.

In voorliggende studie werd een inventaris opgemaakt met schadegevallen die mogelijks te wijten zijn aan krimp- en zwelgedrag van plastische gronden. Schadegevallen aangeleverd door experten werden samengebracht met schadegevallen ingediend via het DOV-loket 'Registratie droogteschade aan de woning' en een dataset aangeleverd door Assuralia. In het totaal werden op die manier 249 schadegevallen geïnventariseerd die mogelijks veroorzaakt werden door krimp- en zwelgedrag van plastische gronden.

Verder werd er een literatuurstudie uitgevoerd naar de parameters die plastische gronden karakteriseren en bestaande classificatieschema's. Plastische gronden komen wereldwijd voor en kunnen problematisch zijn bij bouw- en infrastructuurwerken, waardoor er in de internationale vakliteratuur een groot aantal studies en richtlijnen terug te vinden zijn. Daarnaast werden relevante data en inzichten verzameld op basis van beschikbare literatuur van Vlaanderen en op basis van een diepgaande analyse van de beschikbare DOV-grondmonsters met laboproeven. Dit leidde tot een datafiche per laag van het geologisch model van Vlaanderen. Deze datafiches vormden de basis voor de classificatie van elke laag in een gevoeligheidscategorie. Deze informatie werd vervolgens vertaald naar een gebiedsdekkende gevoeligheidskaart voor krimp- en zwelgedrag voor Vlaanderen met 5 gevoeligheidscategorieën. Onderstaande figuur toont deze kaart.



Figuur 1. Gevoeligheidskaart Vlaanderen met resolutie 500 x 500 meter.

De resulterende gevoeligheidskaart brengt de gevoeligheid van de Vlaamse ondergrond tot 5m diepte voor krimp-/zwelfenomenen bij veranderend vochtgehalte in beeld. De focus werd gelegd op de bovenste 5 meter van de ondergrond, aangezien dit de zone is tot waar diepe vochtonttrekking door het wortelstelsel van bomen kan reiken, of waar bijvoorbeeld een geventileerde kruipkelder kan zorgen voor uitdroging. Het eindproduct werd getoetst aan de inventaris met (potentiële) schadegevallen. 82% van de schadegevallen waarvoor het adres minstens op straatniveau gekend is, liggen in een gevoeligheidscategorie van 3 (gemiddeld) of hoger. 49% ligt in de hoogste gevoeligheidscategorie 5 (zeer hoog).

De 3D modellen waarop deze kaart gebaseerd is, geven een verkennende indicatie van welke geologische lagen men op een bepaalde locatie kan verwachten. De gevoeligheidskaart die hiervan afgeleid is, ondersteund door terreindata, literatuur, grondmonsters en laboproeven, geeft een, op dit moment, beste indicatie van de gemodelleerde gevoeligheid. De gevoeligheidskaart moet gezien worden als een instrument op basis waarvan bijkomende maatregelen kunnen worden genomen. Bij elk gebruik van de kaart is een grondige en kritische interpretatie nodig. Om een uitspraak te kunnen doen over een specifieke locatie is er steeds aanvullend grondonderzoek op perceelniveau vereist. De richtlijnen voor het gebruik van de kaart worden uitvoerig besproken in paragraaf 6.2.1. Daarnaast werd er ook een voorstel gedaan voor de minimumeisen voor terreinonderzoek op basis van de gevoeligheidskaart (paragraaf 6.2.2).

In memoriam em. prof. ir. Jan Maertens

Jan Maertens was al verschillende jaren geboeid door de problematiek van plastische gronden en de daardoor veroorzaakte schade aan gebouwen. Hij werkte van nabij mee aan deze studie. Kort voor de oplevering overleed hij jammer genoeg na een slepende ziekte. We wensen de grote waarde van zijn expertise en inbreng gedurende het verloop van het project te benadrukken en zijn dankbaar voor de inspirerende discussies en vruchtbare samenwerking die we met hem hadden. Laat zijn toewijding aan geotechniek en grondmechanica een blijvende inspiratie zijn voor toekomstig onderzoek en projecten.

Namens Sumaqua, Buildwise, Departement Omgeving en de leden van de projectstuurgroep.

INHOUDSTAFEL

1 Inleiding 7
1.1 Context en doelstelling 7
1.2 Aanpak op hoofdlijnen en Leeswijzer 7
2 Inventarisatie schadegevallen 9
2.1 Aanpak en geraadpleegde bronnen 9
2.2 Datamodel 10
2.3 Overzicht schadegevallen 11
2.4 Geologische en topografische analyse locaties schadegevallen 13
2.5 Bijkomende analyse: schade huurwoningen 15
3 Literatuur- en dataonderzoek 19
3.1 Literatuuronderzoek 19
3.1.1 Algemeen 19
3.1.2 Krimp-/zwelgedrag beschrijvende parameters 19
3.1.3 Cartografie van de problematiek in het buitenland 22
3.2 Dataonderzoek 28
3.2.1 Algemeen 28
3.2.2 Literatuurbronnen en ruimtelijke databank 28
3.2.3 DOV-grondmonsters met laboproeven 39
3.2.4 Analyse dataonderzoek 42
4 Ruimtelijke analyse van bodembewegingen 49
4.1 Inleiding 49
4.2 InSAR-technologie 49
4.3 InSAR-analyse van een aantal schadegevallen 53
4.4 Conclusies 53
5 In-situ cases 58
5.1 Inleiding 58
5.2 Bespreking cases 60
5.2.1 Case 1: Ternat 60
5.2.2 Case 2: Lubbeek 69
5.3 Conclusies op basis van de cases 77
6 Opmaak synthetische gevoeligheidskaart 78
6.1 Methodologie 78
6.1.1 Basismethodologie 78
6.1.2 Kanttekeningen bij de basismethodologie 80
6.1.3 Herwerking van de basiskaart voor publicatie 84
6.2 Toelichting bij de synthetische gevoeligheidskaart 84
6.2.1 Gebruik van de synthetische gevoeligheidskaart 84
6.2.2 Minimumeisen voor terreinonderzoek op basis van de gevoeligheidskaart 86
6.3 Toetsing kaart aan inventaris schadegevallen 88
7 Conclusies en aanbevelingen 92
7.1 Algemene conclusies 92
7.2 Aanbevelingen voor onderzoek en beleid 93
7.2.1 Onderzoeksaanbevelingen 93
7.2.2 Beleidsaanbevelingen 94
7.3 Stap naar gevarenkaarten en risicokaarten 95
Referenties 97
BIJLAGEN 100
Bijlage A. Analyse op basis van topografie en geologische laagopbouw 100
Bijlage B. Datafiches per G3Dv3-laag 108
Bijlage C. Ruimtelijke verdeling plasticiteitsindex grondmonsters met laboproeven Quartair 109

1 INLEIDING

1.1 CONTEXT EN DOELSTELLING

Vlaanderen kende sinds 2017 enkele extreem droge zomers. Wanneer het vochtgehalte in de bodem en de ondiepe ondergrond daalt, kunnen de bodem en de ondiepe ondergrond lokaal uitdrogen. Sommige gronden ondergaan bij veranderend watergehalte een volumeverandering. Deze volumeveranderingen kunnen leiden tot (differentiële) zettingen, die op hun beurt weer kunnen leiden tot schade aan gebouwen en infrastructuur.

Plastische gronden zijn gronden die hier gevoelig voor zijn. Plastische gronden krimpen en zwellen bij het afgeven of opnemen van water. Het precieze krimp- en zwelgedrag is afhankelijk van onder andere de mineralogie, de diepte van de laag, de dikte van het pakket, ... Voorliggende studie richt zich specifiek op deze plastische gronden. De problematiek wordt ook geschetst in het Buildwise artikel 'Scheurvorming in gebouwen door het krimpen of zwellen van plastische gronden' (Van der Auwera et al., 2021).

Het doel van voorliggende studie is het opmaken van een gevoeligheidskaart m.b.t. krimp- en zwelgedrag bij veranderend vochtgehalte voor Vlaanderen. De focus wordt gelegd op de bovenste 5 meter van de ondergrond, aangezien dit de zone is tot waar diepe vochtonttrekking door het wortelstelsel van bomen kan reiken, of waar bijvoorbeeld een geventileerde kruipkelder kan zorgen voor uitdroging. Bij het gebruik van de resulterende kaart worden enkele aandachtspunten geplaatst die uitgebreid worden toegelicht in paragraaf 6.2. De kaart is een verkennend instrument en moet met de nodige interpretatie gebruikt worden. Ze moet gezien worden als een instrument op basis waarvan bijkomende maatregelen kunnen worden genomen. Om een uitspraak te kunnen doen over een specifieke locatie is er steeds aanvullend grondonderzoek op perceelniveau vereist.

Deze gevoeligheidskaart kan in de toekomst als insteek dienen voor de eventuele opmaak van een gebiedsdekkende gevarenkaart en/of risicokaart voor schade aan woningen in België.

Merk op dat deze opdracht niet tot doel heeft om ingenieurtechnische eigenschappen van woningen (zoals fundamenten, type constructie, etc.), noch de verhardingen, aanplantingen e.a. rond de gebouwen mee in rekening te nemen bij de opmaak van de gevoeligheidskaart. Evenmin heeft deze opdracht als doel om een gevoeligheidskaart te maken m.b.t. zettingen ten gevolge van grondwaterwinningen of bemalingen of ten gevolge van sterk samendrukbare grondlagen (zoals bv. veen).

1.2 AANPAK OP HOOFDLIJNEN EN LEESWIJZER

Voorliggende studie werd opgesplitst over 5 onderdelen. We beschrijven elk van deze onderdelen hieronder.

In deel 1 werd een inventaris opgemaakt van schadegevallen. Hiertoe werd informatie verzameld uit het "Meldpunt droogteschade woning" (https://www.dov.vlaanderen.be/page/registratie-droogteschade-aan-de-woning) zoals opgezet door het Departement Omgeving, alsook van diverse

experten, studiebureaus, verzekeraars en andere partijen. De aanpak en resultaten zijn samengevat in Hoofdstuk 2.

Deel 2 van de studie omvat een data- en literatuuronderzoek. Hierbij werd een literatuurstudie uitgevoerd naar parameters die het zwel- en krimpgedrag bepalen, alsook naar de reeds bestaande cartografie van krimp- en zwelgevoelige gebieden en impacts in Frankrijk en Groot-Brittannië. Daarnaast werd dataonderzoek uitgevoerd met als doel om zoveel mogelijk relevante informatie over het krimp- en zwelgedrag van de Vlaamse ondergrond te verzamelen. Deze informatie werd geconsolideerd in een ruimtelijke databank. Gezien de intrinsieke beperktheid van de beschikbare literatuurdata en deze data niet alle lagen van het geologisch model afdekt, werd de literatuurdata aangevuld met een analyse van de dataset "Grondmonsters met laboproeven" uit Databank Ondergrond Vlaanderen (DOV). Finaal werd een dataset van 25.196 grondmonsters geanalyseerd. Tot slot werd alle data (zowel uit literatuurbronnen als verkregen uit de DOV-grondmonsters met laboproeven) verzameld in een datafiche per G3Dv3-laag van het geologisch 3D model voor Vlaanderen (G3Dv3; Deckers et al., 2019). Een overzicht van alle datafiches is opgenomen in Bijlage B. De resultaten van dit data- en literatuuronderzoek zijn beschreven in Hoofdstuk 3.

Deel 3 richtte zich op de ruimtelijke analyse van bodembewegingen. Er werd summier nagegaan wat de mogelijkheden zijn van InSAR-technologie om krimp- en zwelgevoelige gebieden te lokaliseren. Daarvoor werd voor een aantal gekende schadegevallen gekeken naar de beschikbare historische InSAR-data. De analyse en bijhorende resultaten zijn beschreven in Hoofdstuk 4.

Deel 4 bespreekt de uitvoering en opvolging van 3 cases waar schade vastgesteld werd, namelijk in Ternat, Lubbeek en Rollegem. De analyse en resultaten zijn toegevoegd in Hoofdstuk 5.

In deel 5 werd een methodologie uitgewerkt voor de opmaak van de synthetische gevoeligheidskaart. Hoofdstuk 6 beschrijft deze methodologie. Daarnaast wordt ook toelichting gegeven bij het gebruik van de kaart en richtlijnen voor (bijkomend) terreinonderzoek in functie van de gevoeligheidscategorie van de opgemaakte kaart.

Hoofdstuk 7 geeft tot slot conclusies, onderzoeks- en beleidsaanbevelingen, alsook een aanzet om de gevoeligheidskaart verder te ontwikkelen tot een gevarenkaart en risicokaart.

2 INVENTARISATIE SCHADEGEVALLEN

2.1 AANPAK EN GERAADPLEEGDE BRONNEN

Er is in Vlaanderen nog geen sluitend inventaris beschikbaar van schadegevallen aan gebouwen gerelateerd aan droogte en/of zwel- en krimpgevoelige gronden. In voorliggend hoofdstuk wordt de beschikbare informatie van diverse bronnen samengevoegd om een eerste dergelijk inventaris te vormen.

Volgende bronnen werden geraadpleegd bij het opmaken van de inventaris:

- Registraties in het "Meldpunt droogteschade woningen" zoals opgezet door Departement Omgeving (lancering met persbericht op 26/11/2021) ;
- Data verzameld door diverse experten in het kader van de conferentie "Schade bij funderingen op kleigronden" die georganiseerd werd door BGGG en WTCB (Buildwise) op 11 februari 2020 in Zwijnaarde;
- Directe input van diverse experten die schadegevallen onderzoeken, waaronder Flor De Cock, Jan Maertens, Ignace Deconinck, Marc Vandewalle, het studiebureau Sileghem & partners, en andere;
- Nieuwsartikels in kranten en tijdschriften;
- Assuralia.

Om het gebruik van het meldpunt droogteschade woningen te stimuleren, werd in het kader van deze studie gevraagd aan diverse (publieke) organisaties om het meldpunt kenbaar te maken. In dat kader werd contact opgenomen met de bevoegde schepenen en/of administraties van de gemeenten Wevelgem, Kortrijk, Deerlijk, Kuurne, Lendelede, Waregem, Anzegem, Zwevegem, Ieper, Roeselare, Poperinge, Lo-Reninge, Menen, Veurne, Staden, Torhout, De Panne, Koksijde, Nieuwpoort, Middelkerke, Gistel, Oostende, Bredene, De Haan, Blankenberge, Mechelen, Gent, Antwerpen en Brugge. Deze gemeenten werden geselecteerd omdat geweten is dat in die regio's meer schadegevallen voorkomen, of omdat het centrumsteden zijn. Bij de contactname werd telkens gevraagd om het meldpunt onder de aandacht te brengen (bijvoorbeeld via publicatie in de nieuwsbrief of social media), en werd gepeild naar gekende schadegevallen in de gemeente. Verschillende gemeenten hebben gevolg gegeven aan de oproep, en hebben informatie over het meldpunt verspreid. Geen enkele gemeente heeft schadegevallen aangeleverd, noch van het eigen patrimonium, noch van inwoners.

Naast de gemeenten werd ook contact opgenomen met VVSG. Zij verspreiden een mailing ter bekendmaking van het meldpunt op 12 mei 2022.

Assuralia bezorgde op 13 juni 2023 een lijst met 127 schadegevallen die door verzekeraars geaccepteerd zijn als schadegevallen t.g.v. zettingen gerelateerd aan de problematiek die onderzocht wordt in deze studie. De schadegevallen zijn beperkt tot deze die opgetreden zijn tussen 2 december 2021 en 31 december 2022, en deze die gekend zijn op 28 februari 2023 door de verzekeraars. Mogelijks zijn er dus nog meer schadegevallen opgetreden binnen deze periode, maar waren deze nog niet erkend op 28 februari 2023. Daarnaast is het niet duidelijk of alle verzekeraars informatie hebben verschaft aan Assuralia. Het is dus niet geweten hoe volledig deze dataset is. Alle aangeleverde schadegevallen zijn opgenomen in de inventaris.

Alle (unieke) schadegevallen uit het meldpunt droogteschade woningen zijn opgenomen in de inventaris tot en met 16 juni 2023.

Niet alle schadegevallen in de inventaris werden op dezelfde manier onderzocht. Merk dus op dat mogelijks een schadegeval opgenomen in de inventaris veroorzaakt werd door een andere problematiek dan zwel- en krimpgedrag. Hoewel bij het inventariseren van schadegevallen telkens gefocust werd op zwel- en krimpgedrag, is het niet uit te sluiten dat schadegevallen door andere fenomenen veroorzaakt werden.

2.2 DATAMODEL

Voor elk van de schadegevallen werd getracht om dezelfde data te verzamelen. Hiervoor werd een eenvoudig datamodel opgezet. Dit datamodel bestaat uit 6 categorieën, met telkens bijhorende kenmerken. Onderstaande tabel vat het datamodel samen.

Tabel 1: Overzicht van de datavelden per schadegeval in de inventaris.

Basisdata	Woning & omgeving	Schade	Expertise	Bodem & ondergrond	JIRA & overige
ID	Bouwjaar	Datum eerste waarneming	Datum	Type (bodemkaart)	JIRA ID
Bron	Aard fundering	Datum verandering	Contactpersoon	Streek (bodemkaart)	Opmerking
Meldingsdatum	Aanwezigheid kelder	Maximale schade	Documentatie beschikbaar	Textuur (bodemkaart)	URL
Melder (naam)	Diepte fundering	Merkbare scheefstelling		Drainageklasse (bodemkaart)	
Melder (mail)	Aanwezigheid bomen	Bijkomende beschrijving		Profiel (bodemkaart)	
Melder (telefoon)	Eigenaar (naam)	Gedeelte woning met schade		GLG	
Adres	Eigenaar (mail)	Plaats scheuren & barsten		GHG	
Postcode	Eigenaar (telefoon)	Metingen schade beschikbaar		H3D: basisdiepte, -eenheid en dikte	
Gemeente		Scheurvorming toenemend of afnemend		G3D: basisdiepte, -eenheid en lid	
X-coörd.		Uitgevoerde herstelwerken		Labo-proef beschikbaar	
Y-coörd.		Tussenkomst verzekering		Sondering beschikbaar	
Vertrouwelijk					

Voor het invullen van deze datavelden gelden volgende opmerkingen:

- Voor veel schadegevallen is er onvoldoende informatie beschikbaar om alle velden aan te vullen. In dat geval werd het veld blanco gelaten, of “onbekend” toegevoegd.

- De X- en Y-coördinaten zijn uitgedrukt in het Lambert72 coördinatenstelsel.

- Gegevens van de gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG) en gemiddeld hoogste grondwaterstand (GHG) zijn het resultaat van een model, en betreffen dus *geen* in situ metingen. De GLG- en GHG-waarden zijn afkomstig van de studie "Impact wijzigende grondwaterstanden door klimaatverandering" zoals uitgevoerd door Sumaqua in opdracht van de Vlaamse Milieumaatschappij (2022).

- Indien er geen huisnummer beschikbaar is voor een schadegeval, werd het midden van de straat genomen als coördinaat. Indien er ook geen straat gekend is, werd er geen coördinaat toegekend.

De inventaris werd opgemaakt in Excel en in shapefile-formaat (punt-laag).

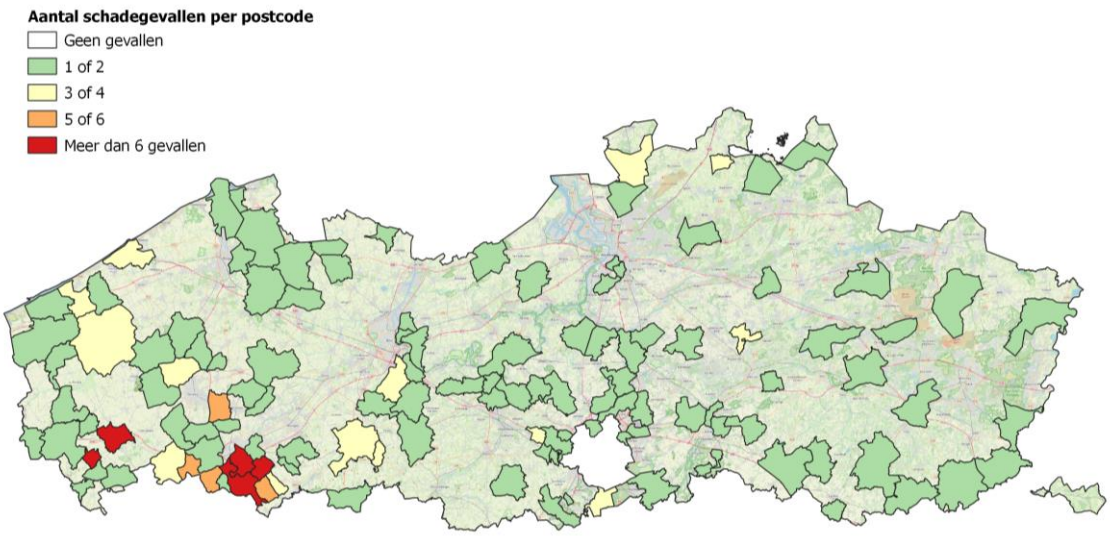
2.3 OVERZICHT SCHADEGEVALLEN

In het totaal werden er 249 schadegevallen opgenomen in de inventaris. Onderstaande tabel toont het aantal schadegevallen per bron. Voor 248 van deze schadegevallen is de postcode en gemeente gekend waarbinnen het schadegeval zich voordeed. Voor 230 van deze schadegevallen is bovendien minstens het adres, minstens op straatniveau, gekend. Van deze 230 schadegevallen werd bijgevolg ook een X- en Y-coördinaat afgeleid.

Tabel 2: Overzicht van het aantal schadegevallen opgenomen in de inventaris per geraadpleegde bron.

Bron	Aantal
Assuralia	127
Meldpunt droogteschade	40
BGGG conferentie/proceedings	39
Experten	34
Nieuwsartikels	8
Overige	1

Figuur 2 toont het aantal schadegevallen per postcode. Deze kartering is opgemaakt op basis van 248 individuele schadegevallen.



Figuur 2: Aantal schadegevallen per postcode afgeleid op basis van de opgemaakte inventaris.

Hierbij valt op dat er een duidelijke clustering is van het aantal schadegevallen in de omgeving van Kortrijk. Het meeste schadegevallen doen zich voor in postcodes 8510 (Bellegem; 21 schadegevallen), 8500 (Kortrijk; 19 schadegevallen), 8550 (Zwevegem, 9 schadegevallen), 8900 (Brielen, 7 schadegevallen) en 8930 (Menen, 6 schadegevallen). Daarnaast doen er zich in elke provincie schadegevallen voor.

De ernst van de opgetreden schade werd expliciet bevraagd in het "Meldpunt droogteschade woningen" van Departement Omgeving. Voor die 40 schadegevallen is er dus informatie gekend over de ernst van de schade. Hiervan is bij 3 schadegevallen de woning onstabiel, en bij 8 schadegevallen zijn de waargenomen scheuren en barsten groter dan 15 mm. Bij de overige 29 schadegevallen zijn de scheuren en barsten tussen de 3 mm en 15 mm. Het is dus duidelijk dat het geen architecturale schade betreft. Ook bij de 34 schadegevallen die aangeleverd werden door experten gaat het alleszins om significante schade.

Bij de inventaris moeten volgende kanttekeningen gemaakt worden:

- Hoewel alle beschikbare data rond schadegevallen geconsolideerd werd in de schade-inventaris, blijft het aantal schadegevallen beperkt tot 249. Het reëel aantal schadegevallen is onbekend, maar zal vermoedelijk aanzienlijk groter zijn. Bijgevolg is de inventaris wellicht (sterk) onvolledig.
- Daarnaast is de verdeling van het aantal schadegevallen mogelijks niet geheel representatief voor het reëel voorkomen van schadegevallen. Hoewel gepoogd werd om schadegevallen over gans Vlaanderen te inventariseren, zijn sommige van de geraadpleegde experten meer actief in de regio van Kortrijk. Ook is het niet ondenkbaar dat in die regio het Meldpunt droogteschade beter bekend is onder de bevolking en experten dan elders, wat kan leiden tot een hoger aantal aangemelde schadegevallen. Dit kan leiden tot een vertekend ruimtelijk beeld over Vlaanderen. Het aantal schadegevallen zoals aangeleverd door Assuralia vertoont bovendien een meer uniforme spreiding over Vlaanderen dan de andere bronnen wat het vermoeden versterkt dat de dataset niet geheel ruimtelijk representatief is voor de reële schadegevallen. Merk daarbij op dat de schadegevallen zoals aangeleverd door Assuralia bevestigd zijn als schadegevallen ten gevolge van zwel- en krimpgedrag.

- Tot slot wordt benadrukt dat het niet zeker is dat elk opgenomen schadegeval te wijten is aan zwel- en krimpgedrag. De individuele schadegevallen op basis van de deelinventarissen werden verder niet onderzocht i.k.v. dit project.

We verwijzen naar paragraaf 6.3 voor een toetsing van de finaal opgemaakte gevoeligheidskaart aan de gekende schadegevallen.

2.4 GEOLOGISCHE EN TOPOGRAFISCHE ANALYSE LOCATIES SCHADEGEVALLEN

Er gebeurde in het kader van dit project een nog meer doorgedreven analyse met betrekking tot de geologische lagenopbouw en de topografische ligging van de schadegevallen, hoewel het niet de bedoeling is om het voorkomen van de schadegevallen (of daaraan gelinkte parameters zoals geologie) te gebruiken als input voor de opmaak van de uiteindelijke gevoeligheidskaart. Binnen dit project zal de inventaris van schadegevallen hoofdzakelijk gebruikt worden om de uiteindelijke gevoeligheidskaart aan te toetsen (zie Hoofdstuk 6 en meer specifiek paragraaf 6.3).

Wanneer de schadegevallen op de geologische dagzoomgrenzen, gegenereerd op basis van G3Dv3 (Deckers et al., 2019), worden geplot, komen deze opvallend veel voor ter hoogte van of in de buurt van laagscheidingen. Omdat dergelijke laagscheidingen vaker voorkomen op plaatsen met een uitgesproken reliëf, werd er nagegaan of er een link is tussen geomorfologische parameters en het voorkomen van de schadegevallen. Daarvoor werd gekeken naar 3 parameters (TPI en DEV naar analogie met De Reu et al. (2013) en hellingspercentage):

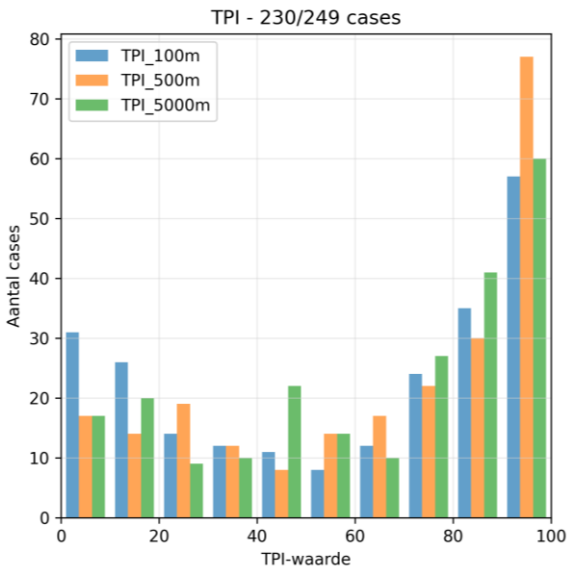
- TPI-waarde (Topographic Profile Index): deze wordt berekend op basis van een digitaal hoogtemodel en bekijkt de ligging van het beschouwde punt ten opzichte van de gemiddelde hoogte van de omgeving binnen een bepaalde straal ($z_0 - z_{gemiddeld,omgeving}$). In dit geval werden deze waarden herschaald naar een waarde tussen 0 en 100, waarbij een TPI-waarde groter dan 50 erop wijst dat een locatie hoger gelegen is dan het gemiddelde van de hoogteligging in de beschouwde cirkel. Deze kaart werd opgemaakt door Sumaqua voor gans Vlaanderen.
- DEV-waarde (Deviation from Mean Elevation): deze wordt berekend op basis van de TPI-waarde en de standaarddeviatie (SD) van de hoogte binnen de beschouwde straal: $(z_0 - z_{gemiddeld,omgeving})/SD$. De DEV-waarde meet de topografische positie als een fractie van het lokale reliëf genormaliseerd naar de lokale oppervlakteruwheid. Een positieve waarde wijst op een hogere hoogteligging van het centrale punt ten opzichte van zijn omgeving. Negatieve waarden wijzen op een lagere ligging. Volgens De Reu et al. (2013) liggen de waarden meestal tussen +1 en -1. Waarden buiten deze range zouden kunnen wijzen op anomalieën in het hoogtemodel volgens De Reu et al. (2013).
- Hellingspercentage.

Voor de analyse werden TPI- en DEV-kaarten gebruikt, berekend voor een straal van 100, 500 en 5000m. Kaarten van het hellingspercentage werden berekend over afstanden van 25 en 100m. Voor de TPI-kaarten werden bestaande TPI-kaarten gebruikt (berekend op basis van het Digitaal Hoogtemodel Vlaanderen II met 1m raster). De kaarten voor DEV en het hellingspercentage werden berekend op basis van het Digitaal Hoogtemodel Vlaanderen II met 25m raster.

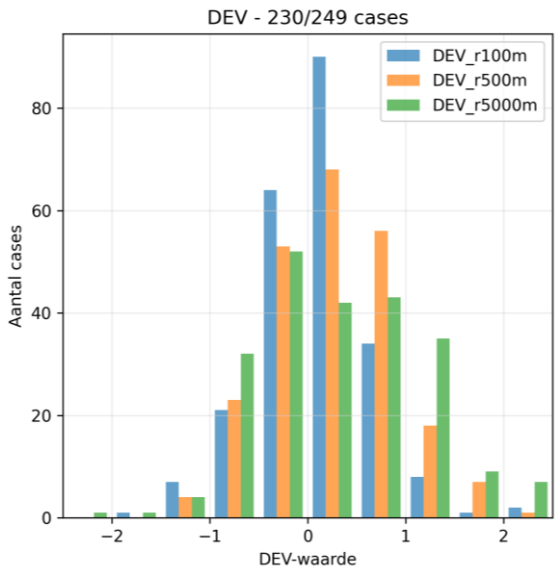
De TPI-, DEV- en hellingswaarden voor de schadegevallen waarvoor minstens een straatnaam en gemeente gekend is (en dus een vrij precieze lokalisatie mogelijk is) worden in Figuur 3 weergegeven

door middel van histogrammen. Relatief veel schadegevallen zijn gelinkt aan hoge TPI-waarden. Voor DEV is de link minder duidelijk. Wat het hellingspercentage betreft zijn er niet meteen opvallende vaststellingen en is het aantal schadegevallen dat gerelateerd kan worden aan hogere hellingspercentages in de minderheid. In Bijlage B worden deze histogrammen ook getoond voor de verschillende, gedefinieerde clusters (Figuur 48 voor de TPI-waarden en Figuur 49 voor de DEV-waarden).
Een belangrijke kanttekening die bij deze eerste, eenvoudige analyse zeker moet geplaatst worden is dat er in deze analyse abstractie wordt gemaakt van het relatieve voorkomen van de TPI-, DEV- en hellingswaarden, maar ook van de spreiding van de schadegevallen over Vlaanderen. Zoals aangegeven in paragraaf 2.3 is het bijvoorbeeld niet ondenkbaar dat de inventaris om verschillende redenen relatief meer schadegevallen bevat van bepaalde regio's en niet volledig representatief is voor de werkelijke spreiding van schadegevallen over heel Vlaanderen.

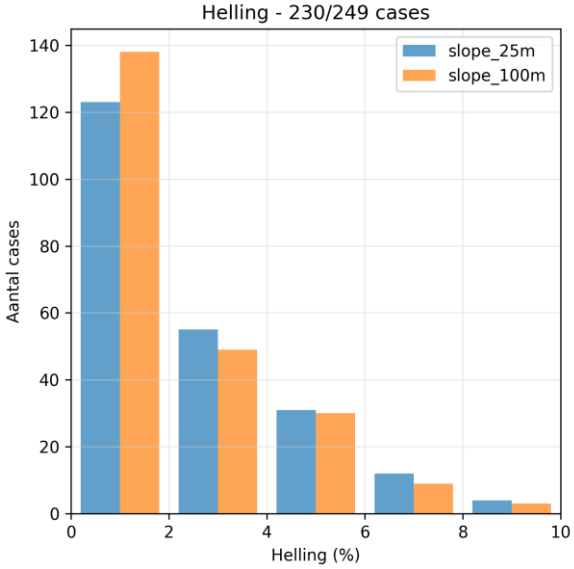
In Bijlage A wordt ten slotte per cluster nog een overzicht gegeven van de geologische laagopbouw van elk schadegeval op basis van een doorprik van het G3Dv3-model (Figuur 50 tot Figuur 57). Op deze figuren zijn ook de TPI- en DEV-waarden (straal 500m) voor elk schadegeval opgenomen. Daarnaast werd er ook informatie uit de inventaris overgenomen zoals een indicatie van de grondwaterstand (gemiddelde laagste en hoogste grondwaterstand), de aanwezigheid van bomen, de aanzetdiepte van de fundering, ...



a.



b.



c.

Figuur 3. Histogrammen van de schadegevallen voor de TPI-waarden, DEV-waarden en hellingen. (a) TPI berekend voor stralen gelijk aan 100, 500 en 5000m. (b) DEV berekend voor stralen gelijk aan 100 , 500 en 5000m. (c) Helling bepaald over een afstand van 25 en 100m.

2.5 BIJKOMENDE ANALYSE: SCHADE HUURWONINGEN

Deze paragraaf beschrijft een aparte analyse van het voorkomen van schade aan huurwoningen aan de hand van een dataset bezorgd door het agentschap Wonen in Vlaanderen. Hierbij moet meegegeven worden dat er geen onderzoek is uitgevoerd naar de oorzaak van schade. Wellicht zullen de meeste schadegevallen niet gerelateerd zijn aan zwel- en krimpgedrag. Desalniettemin is het interessant om het voorkomen van deze schadegevallen ruimtelijk en temporeel te onderzoeken. Mogelijks kunnen er immers patronen in het tijdstip van voorkomen van schadegevallen (bijvoorbeeld een opvallend hoog aantal in een bepaald jaar) of de locatie geïdentificeerd worden, die op hun beurt gelinkt kunnen worden aan zwel- en krimpgedrag. Dergelijke analyse wordt besproken in deze paragraaf. Merk op dat deze schadegevallen niet zijn

opgenomen in de schade-inventaris zwel-krimp zoals beschreven in voorgaande paragrafen omdat de oorzaak van het optreden van schade niet gekend is.

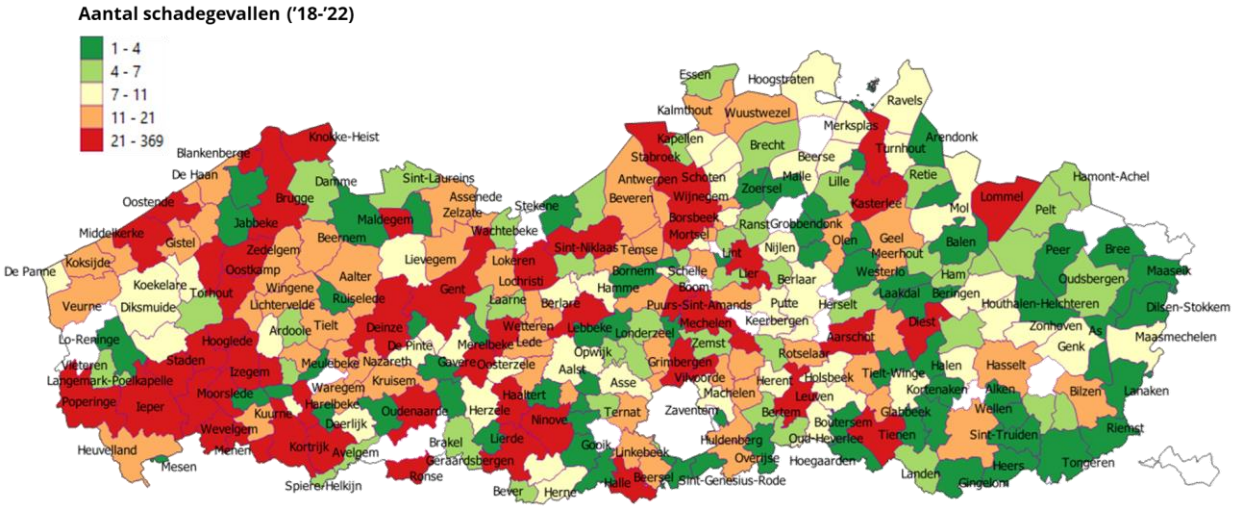
Het agentschap Wonen in Vlaanderen bezorgde in het kader van deze studie een dataset met schadegevallen bij huurwoningen. Deze dataset omvat alle woningen die in het Vlaams Gewest gecontroleerd werden op de minimale woningkwaliteitsvereisten sinds 2018 waarin gebreken inzake scheurvorming werden vastgesteld. De lijst bevat gegevens op schaal van gemeenten. Het agentschap Wonen in Vlaanderen heeft geen gericht onderzoek uitgevoerd naar de oorzaak van deze scheurvorming. De procedure voor het uitvoeren van controles is zeer vraaggestuurd in functie van huurders die vragen stellen bij de kwaliteit van hun woning. Dit impliceert dat woningen die bewoond worden door de eigenaar, op enkele uitzonderingen na, niet gecontroleerd worden op de vereisten van minimale woningkwaliteit en dus niet in de lijst opgenomen zijn.

Per gemeente en jaargang (2018-2022) is volgende informatie opgenomen:

- De **gebrekcode** verwijst naar de rubriek in het technisch verslag waar de scheurvorming wordt beoordeeld:
  - 11: aantasting en/of doorbuiging van de dragende dakelementen / buitendakse schouw onstabiel / …
  - 21: vervorming en/of scheurvorming van gevelvlak of gevelelementen
  - 31: vervorming en/of scheurvorming van dragende binnenmuren of elementen

- De **score** verwijst naar de zwaarte van het gebrek. De scheurvorming wordt beoordeeld volgens onderstaande drie categorieën van gebreken.
  - Een gebrek van categorie I is een klein gebrek. Dit heeft voor een ongeschikt- of onbewoonbaarverklaring geen onmiddellijk gevolg. Dit gebrek verdient opvolging opdat het niet zou evolueren naar een gebrek van categorie II.
  - Een gebrek van categorie II is een ernstig gebrek en leidt tot de ongeschiktverklaring van de woning.
  - Een gebrek van categorie III is een gebrek dat een direct gevaar oplevert (of een mensonwaardige situatie is, maar dit is niet van toepassing bij scheurvorming).

- Het **aantal** verwijst naar het aantal van de vermelde gebreken van categorie II en III die in betreffende rubriek van het technisch verslag zijn opgenomen.

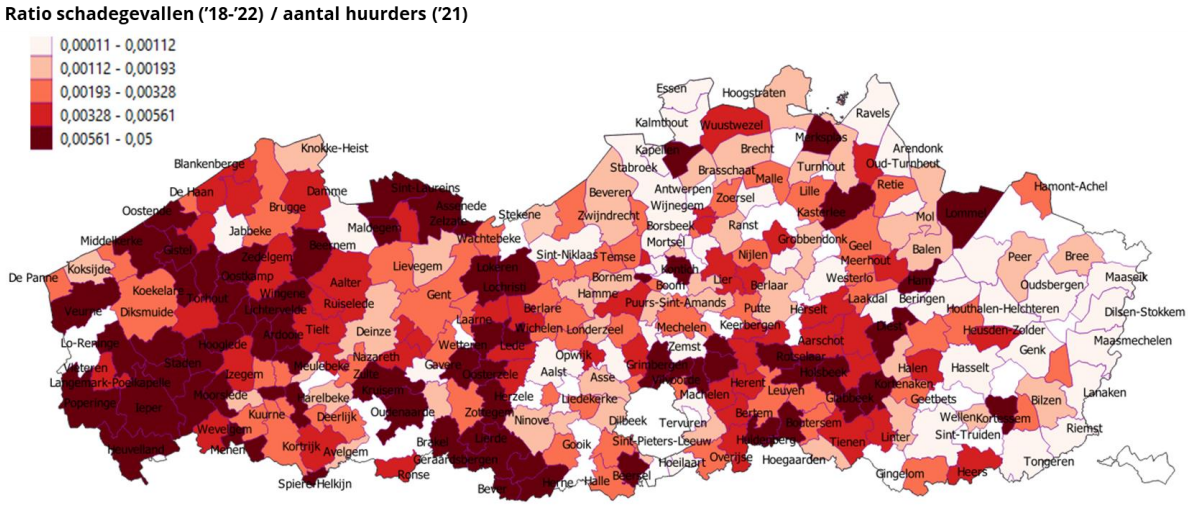


Figuur 4: Totaal aantal schadegevallen van de gecontroleerde huurwoningen in de periode 2018-2022 voor gebrekcodes 21 en 31 en alle scores (I, II en III).

Voor de verdere analyse werden enkel schades van scores II en III opgenomen, en enkel gebrekcodes 21 en 31. We verwachten immers dat scheurvorming ten gevolge van zwel- en krimp zich vooral (of minstens eerst) aan gevelvlakken en -elementen of dragende binnenmuren zal manifesteren. Door enkel schades met score II en III op te nemen beperken we de analyse bovendien tot de ernstige gebreken.

In 2018 werden 441 schadegevallen genoteerd die aan deze criteria voldoen, in 2019 865, in 2020 795, in 2021 241 en tot slot in 2022 256. Er is geen informatie gekend over het aantal uitgevoerde controles in elk jaar. Bijgevolg is het niet mogelijk om met zekerheid conclusies te trekken uit deze evolutie van het aantal schadegevallen doorheen de tijd. Wel valt op dat het aantal schadegevallen beduidend hoger is in 2019 en 2020 dan in andere jaren. Merk op dat de jaren 2017, 2018, 2019, 2020 en 2022 gekenmerkt werden door (uitzonderlijke) droogtes, maar de gegevens zijn te gebrekkig om een verband tussen het hogere aantal schadegevallen en de droogteperiodes te kunnen leggen.

Het aantal schadegevallen per gemeente is uiteraard afhankelijk van het aantal huurwoningen per gemeente (alsook het aantal uitgevoerde controles, maar daarover zijn er geen cijfers beschikbaar). Bijgevolg is het interessant om niet enkel de absolute cijfers van aantal schadegevallen te onderzoeken, maar ook het aantal schadegevallen te vergelijken met het aantal huurwoningen per gemeente. Figuur 5 toont daarom de verhouding van het aantal schadegevallen met gebrekcodes 21 en 31 en scores II en III van 2018 tot en met 2022 versus het aantal huurders. De legende werd opgemaakt met gelijke kwantielen, wat betekent dat elke klasse van de legende evenveel postcodes omvat. Hierbij valt op dat deze verhouding in de provincie West-Vlaanderen aanzienlijk hoger is dan in de andere provincies in Vlaanderen. Ook in de Vlaamse Ardennen (Geraardsbergen, Bever, …) zijn hogere cijfers terug te vinden. Het is moeilijk om een oorzakelijk verband te bepalen gezien de beperkte gegevens. Mogelijks komt dit door toeval, een verhoogd aantal controles in bepaalde regio's of toch stabiliteitsredenen gelinkt aan de bodem en ondergrond. Dit kan echter niet verder gespecifieerd worden met zekerheid.



Figuur 5: Verhouding van het aantal schadegevallen ('18-'22) met gebrekcodes 21 en 31 en scores II en III versus het aantal huurders in 2021.

3 LITERATUUR- EN DATAONDERZOEK

3.1 LITERATUURONDERZOEK

3.1.1 Algemeen

In het literatuuronderzoek (paragraaf 3.1) wordt nagegaan welke parameters het krimp-/zwelgedrag van grond het beste beschrijven (paragraaf 3.1.2). Bestaande classificatiesystemen worden opgelijst. Daarnaast wordt er ook ingegaan op hoe deze problematiek in omringende landen in kaart werd gebracht (paragraaf 3.1.3).

3.1.2 Krimp-/zwelgedrag beschrijvende parameters

3.1.2.1 Algemeen

Jones et al. (2020) beschrijven in een recente publicatie de problematiek van zwellende en krimpende gronden. Ze definiëren deze gronden als gronden die grote volumeveranderingen kunnen ondergaan bij veranderingen in watergehalte. Gewoonlijk gaat het om fijnkorrelige gronden met een hoog kleigehalte (vooral **smectiet**- maar ook vermiculietkleien staan bekend om hun groot krimp-/zwelpotentieel, zie Tabel 3). Asuri en Keshavamurthy (2016) wijzen er op dat deze kleimineralen gekarakteriseerd worden door o.a. zeer hoge Cation Exchange Capacity (CEC)-waarden (80-150 meq/100g) en een hoog specifiek oppervlak (400-900 m²/g).
Het **watergehalte** in de ondiepe ondergrond wordt beïnvloed door neerslag (of het tekort eraan) en de effecten van evapo-transpiratie (Jones et al., 2020). Dit resulteert typisch in seizoenschommelingen van het vochtgehalte tot een diepte van 3 meter. Andere factoren kunnen echter ook een belangrijk effect hebben op het vochtgehalte, zoals lokale veranderingen ten gevolge van een lekkende waterleiding of drainageleiding, veranderingen aan de oppervlaktedrainage (bv. verharding) of het landschap (bv. ophoging), het aanplanten, rooien of sterk insnoeien van bomen of hagen, ...

Tabel 3. Kleimineralen: eigenschappen en herkomst (Jones et al., 2020).

	Group	*Clay minerals*	*Physical properties*	*Principal sources*
Increasing swelling potential →	Smectite 2:1 phyllosilicates	Montmorillonite, beidellite, nontronite, talc, hectorite, saponite and sauconite	Weakly linked by cations (Na and Ca); Na montmorillonite particularly prone to swelling	Alteration of mafic igneous rocks rich in Ca and Mg
	Vermiculite 2:1 phyllosilicates		Also expansive upon heating	Decomposition of micas
	Illite 2:1 phyllosilicates	Phengite, brammalite, celadonite, glauconite and hydrous micas	Predominate in marine clays and shales; characteristic of weathering in temperate climates or high altitudes in the tropics	Decomposition of micas and feldspars
	Kandites 1:1 phyllosilicates	Kaolinite, dickite, nacrite and halloysite		Decomposition of orthoclase feldspar

De bepaling van de **(klei)mineralogie** is niet zo eenvoudig en vraagt specifieke laboapparatuur en interpretatie door een expert (Asuri en Keshavamurthy, 2016). Daardoor is dit een vrij dure aangelegenheid en wordt dit momenteel niet op grote/systematische schaal toegepast. Al maken recente ontwikkelingen het wel steeds haalbaarder om dergelijke analyses uit te (laten) voeren en zal er in de toekomst steeds meer data beschikbaar zijn.

Door de moeilijkheden met de bepaling van de (klei-)mineralogie werd er in het verleden gezocht naar alternatieve parameters om het krimp-/zwelpotentieel van grond in te schatten. Asuri en Keshavamurthy (2016) delen deze in volgens indirecte methodes (plasticiteitsindex, vloeigrens, krimpgrens, korrelgrootteverdeling, ...) en directe methodes (oedometer zwel proeven, vrije zwel proeven, enz.). Het is duidelijk dat directe methodes de meest rechtstreekse manier zijn om het krimp-/zwelpotentieel te bepalen. Dit zijn echter geen courant uitgevoerde proeven, die bovendien uitvoeringstechnisch zekere uitdagingen inhouden. Daardoor zijn er voor de Vlaamse ondergrond slechts zeer beperkte resultaten beschikbaar. Om die reden wordt in de volgende paragrafen voornamelijk toegespitst op de indirecte methodes om het krimp-/zwelpotentieel van grond in te schatten.

3.1.2.2 Directe methodes: zwel-/krimpproeven

In de literatuur werden er enkele classificatieschema's teruggevonden om het zwelpotentieel te beschrijven op basis van de resultaten van **oedometer zwel proeven** (Tabel 4). Merk op dat de voorgestelde grenzen sterk verschillen voor de lage en gemiddelde klassen.

Tabel 4. Zwelpotentieel op basis van oedometer zwel proeven (Asuri en Keshavamurthy, 2016).

Zwelpotentieel	% expansie in oedometer (Holtz and Gibbs, 1956)	% expansie in oedometer (Seed et al., 1962)
Laag	<10	0-1.5
Gemiddeld	10-20	1.5-5
Hoog	20-30	5-25
Zeer hoog	>30	>25

Een andere classificatie gebeurt op basis van de **COLE-index** ("Coefficient of Linear Extensibility"), die als volgt wordt berekend (Grossman et al., 1968; Cornelis et al., 2006):

$$COLE = \frac{z_w}{z_d} - 1,$$

met z_w de lengte van het monster in natte toestand bij -33kPa en z_d de lengte van het monster in droge toestand (oven gedroogd). Soil Conservation Service (1971) stelde een classificatie voor om het krimp-/zwelgedrag te beschrijven op basis van de COLE-index (Tabel 5). Soil Conservation Service (1971) verwijst hierbij ook naar de **Potential Volume Change (PVC) waarde**, gebruikt door de Federal Housing Administration (Henry en Dragoo, 1965). Deze PVC-waarde wordt bepaald met de FHA Soil PVC Meter en is daardoor wellicht minder bruikbaar in de Vlaamse praktijk (zie Tabel 5 voor de classificatie op basis van de PVC-waarde). Voor hoe de PVC-waarde juist wordt bepaald, wordt verwezen naar Henry en Dragoo (1965).

Tabel 5. Krimp-/zwelpotentieel op basis van de COLE-index (Soil Conservation Service, 1971).

Krimp-/zwelpotentieel	COLE-index	Potential Volume Change (PVC)
Zeer laag	≤0.01	≤1
Laag	0.01-0.03	1-2
Gemiddeld	0.03-0.06	2-4
Hoog	0.06-0.09	4-6
Zeer hoog	≥0.09	≥6

3.1.2.3 Indirecte methodes: Atterbergse grenzen (plasticiteitsindex, vloeigrens, ...)

De meest gehanteerde parameter om het krimp-/zwelpotentieel van een grond te bepalen is de **plasticiteitsindex**. Daarnaast werden er in het verleden ook classificaties opgesteld op basis van de

vloeigrens (en in beperkte mate op basis van de **krimpgrens**). Zoals Jones et al. (2020) terecht opmerken, is het hierbij belangrijk te beseffen dat dergelijke plasticiteitsparameters, die gebaseerd zijn op bewerkte grondmonsters, niet altijd nauwkeurig het krimp-/zwelgedrag van de in-situ grond beschrijven. Tijdens de stuurgroepen van voorliggend studie werd dit ook verschillende keren benadrukt. Niet alleen gaat het om bewerkte monsters, bovendien is het resultaat afhankelijk van de toegepaste procedure, de operator, e.d. Tabel 6 geeft een overzicht van in de literatuur voorgestelde grenzen om het krimp-/zwelpotentieel te beschrijven op basis van plasticiteitsindex en vloeigrens.

De plasticiteitsindex wordt klassiek bepaald op de korrelfractie kleiner dan 425 µm. Om de invloed van het hele monster in rekening te brengen, stelde de Building Research Establishment (Verenigd Koninkrijk) in 1993 een **gemodificeerde plasticiteitsindex** (IP') voor (BRE, 1993). Hierbij wordt de plasticiteitsindex herschaald op basis van de korrelfractie kleiner dan 425µm (IP' = IP x %<425µm / 100%). Merk op dat het niet in rekening brengen van dergelijke herschaling leidt tot een meer conservatieve benadering. Voor gronden waarvoor 100% van de korrelfractie < 425µm is het resultaat uiteraard hetzelfde, in alle andere gevallen leidt de toepassing van IP' tot een meer optimistische benadering (IP' < IP). NHBC (2023) gaat nog steeds uit van deze gemodificeerde plasticiteitsindex met gelijkaardige grenzen. Zij omschrijven grond als 'shrinkable soil' indien minstens 35% van de korrelfractie kleiner is dan 60µm en de gemodificeerde plasticiteitsindex groter is of gelijk aan 10%.

Daarnaast bestaan er ook classificatieschema's op basis van o.a. de **krimpgrens** (Asuri en Keshavamurthy, 2016). Hier wordt niet verder op ingegaan omdat de auteurs zelf aangeven dat verschillende onderzoekers zouden hebben opgemerkt dat het krimp-/zwelpotentieel niet goed kan voorspeld worden op basis van deze parameter.

Tabel 6. Internationaal voorgestelde grenzen voor het bepalen van het krimp-/zwelpotentieel van gronden bij veranderd vochtgehalte op basis van plasticiteitsindex, vloeigrens en kleifractie. Gebaseerd op Asuri en Keshavamurthy (2016) en Giannakogiorgos et al. (2020), aangevuld met andere info.

	PI (*PI')				Vloeigrens			
	low	**medium/ marginal**	**high**	**very high**	**low**	**medium/ marginal**	**high**	**very high**
AASHTO T258-81:2018 (USA)	<25	25-35	>35		<50	50-60	>60	
NHBC, 2023 (UK)	10-20(1+2)	20-40(1+2)	>40(1+2)					
BRE, 1993 (UK)	<20(1)	20-40(1)	40-60(1)	>60(1)				
NZ3604, 2011 (NZ)					Uitgesloten van 'goede grond' indien vloeigrens >50%			
Chen, 1975	<15	10-35	20-55	>35	<30	30-40	40-60	>60
Holtz and Gibbs, 1956	<18	15-28	25-41	>35				
IS, 1970	<12	12-23	23-32	>32	20-35	35-50	50-70	70-90
Snethan et al., 1977					<50	50-60	>60	

(1) Op basis van de gemodificeerde plasticiteitsindex PI'
(2) Karakterisering als 'shrinkable soil' op voorwaarde dat ook de korrelfractie < 60µm minstens 35% bedraagt.

3.1.2.4 Indirecte methodes: kleifractie en activiteit, A_c

Naast de criteria op basis van de Atterbergse grenzen worden er in de literatuur (Asuri en Keshavamurthy, 2016) ook classificaties voorgesteld op basis van kleifractie (dit is de korrelfractie kleiner dan 2µm) en activiteit, A_c (d.i. de verhouding tussen de plasticiteitsindex en de kleifractie). Voorbeelden van dergelijke classificaties zijn opgenomen in Tabel 7. De oorsprong van de

classificatie op basis van A_c is echter niet duidelijk af te leiden uit deze publicatie. Asuri en Keshavamurthy (2016) maken de (wellicht terechte) bedenking dat classificatie op basis van korrelgrootte zekere beperkingen inhoudt. Op zich bevat het percentage aan kleifractie in een monster slechts beperkte informatie over het krimp-/zwelgedrag van grond, aangezien dit hoofdzakelijk wordt bepaald door de hoeveelheid aan zwellende kleimineralen.

Tabel 7. Zwelpotentieel op basis van % kleifractie en activiteit A_c (Asuri en Keshavamurthy, 2016).

Krimp/zwelpotentieel	% kleifractie (Chen, 1965)	Activiteit (A_c) A_c = plasticiteitsindex/%kleifractie
Laag	<30	<0.75
Gemiddeld	30-60	0.75-1.25
Hoog	60-95	>1.25
Zeer hoog	>95	/

3.1.2.5 Afsluitende bedenkingen

De grote hoeveelheid aan data en informatie die in de literatuur wordt teruggevonden, wijst erop dat het krimp-/zwelgedrag van gronden bij veranderend vochtgehalte een internationaal wijdverspreide problematiek is, die onderzoekers al decennia bezighoudt. Analyses op basis van klei- en bulkmineralogie kunnen een duidelijk idee geven van het krimp-/zwelpotentieel door de aanwezigheid van bepaalde krimp/zwelgevoelige mineralen (zie Tabel 3). Toch lijkt de meest directe manier om het krimp-/zwelpotentieel te bepalen het uitvoeren van zwel-/krimpproeven. Dergelijke proeven geven namelijk een beeld van de volumeverandering in functie van het watergehalte.
Bij gebrek aan data omtrent mineralogie en krimp-/zwelproeven voor de Vlaamse ondergrond, is men genoodzaakt een beroep te doen op indirecte methodes en classificaties op basis van parameters zoals plasticiteitsindex, vloeigrens en kleifractie. Hoewel er verschillende classificatieschema's worden voorgesteld op basis van deze parameters, die vaak in dezelfde lijn liggen, werd er weinig of geen data teruggevonden waarbij deze parameters direct worden gelinkt aan de mineralogie of krimp-/zwelproeven. Het is belangrijk dit in het achterhoofd te houden bij het gebruik van deze classificatieschema's.

3.1.3 Cartografie van de problematiek in het buitenland

In zowel Frankrijk als Groot-Brittannië werd de krimp-/zwelproblematiek in kaart gebracht. In onderstaande paragrafen worden deze kaarten en de gebruikte methodologie toegelicht.

3.1.3.1 Frankrijk

In Frankrijk werden 2 kaarten opgesteld (beschikbaar via deze link):

1. een **gevoeligheidskaart** ("carte de susceptibilité du territoire au phénomène de retrait-gonflement des argiles") : deze kaart lokaliseert de grondlagen die onderhevig zijn aan krimp-/zwelfenomenen en verdeelt deze onder volgens gevoeligheidsgraad.
2. een **blootstellingskaart** ("carte d'exposition du territoire au phénomène de retrait-gonflement des argiles") : deze kaart heeft als doel de zones te identificeren die blootgesteld zijn aan krimp-/zwelfenomenen. Deze kaart werd opgesteld op basis van de gevoeligheidskaart, gecombineerd met de densiteit van schadegevallen per formatie. In de zones afgebakend door deze kaart gelden de wettelijke bepalingen zoals vastgesteld door artikel 68 van de ELAN-wet.

De **gevoeligheidskaart** (Figuur 6) werd opgesteld op basis van een analyse van de geologische kaarten van Frankrijk (schaal 1/50 000). Hierbij werden meer dan 2 000 (bijna) dagzomende

formaties geïdentificeerd. Deze formaties werden vervolgens onderverdeeld in 3 klassen (zwak, gemiddeld, sterk) volgens hun krimp-/zwelgevoeligheid. Dit gebeurde op basis van de combinatie van volgende 3 criteria:

- lithologische aard: hoeveelheid klei, dikte en continuïteit van de lagen
- mineralogische samenstelling: kleimineralogie die meer of minder vatbaar is
- geotechnisch gedrag: mechanische eigenschappen

Daarnaast werd voor elke dagzomende formatie, geïdentificeerd als gevoelig voor zwel-/krimpfenomenen, de **schadegevaldensiteit per verstedelijkte km²** berekend. Dit gebeurde op basis van de SILECC database ('Sinistres Indemnisés Liés aux Evènements Climatiques") van Mission Risques Naturels. Deze database vertegenwoordigt ongeveer 70% van de verzekeringsmarkt in Frankrijk en bevat ongeveer 180 000 schadegevallen die vergoed werden onder de dekking Cat Nat "droogte" in de periode 1989-2017. Opnieuw werden de formaties opgedeeld in 3 categorieën:

- Lage schadefrequentie: schadegevaldensiteit per verstedelijkte km² kleiner dan 2,
- Gemiddelde schadefrequentie: schadegevaldensiteit per verstedelijkte km² tussen 2 en 10,
- Hoge schadefrequentie: schadegevaldensiteit per verstedelijkte km² groter dan 10.

18 000 schadegevallen (9% van het totaal) kwamen voor buiten zones geïdentificeerd als gevoelig voor zwel-/krimpfenomenen (zie gevoeligheidskaart). Om deze toch zo veel mogelijk mee in rekening te brengen, werd een buffer van 100m toegepast op de voorkomensgrenzen van de krimp-/zwelgevoelige zones. De schadegevallen werden dan toegekend aan de dichtstbij gelegen formaties. Op deze manier kon 5% van de schadegevallen voorkomend buiten krimp-/zwelgevoelige gebieden toch gelinkt worden aan gemiddelde of sterke blootstellingszones.

De **blootstellingskaart** (Figuur 7) werd opgesteld op basis van de gevoeligheidskaart en de schadegevalfrequentie. De blootstellingsgraad is het product van de gevoeligheid en schadegevalfrequentie:

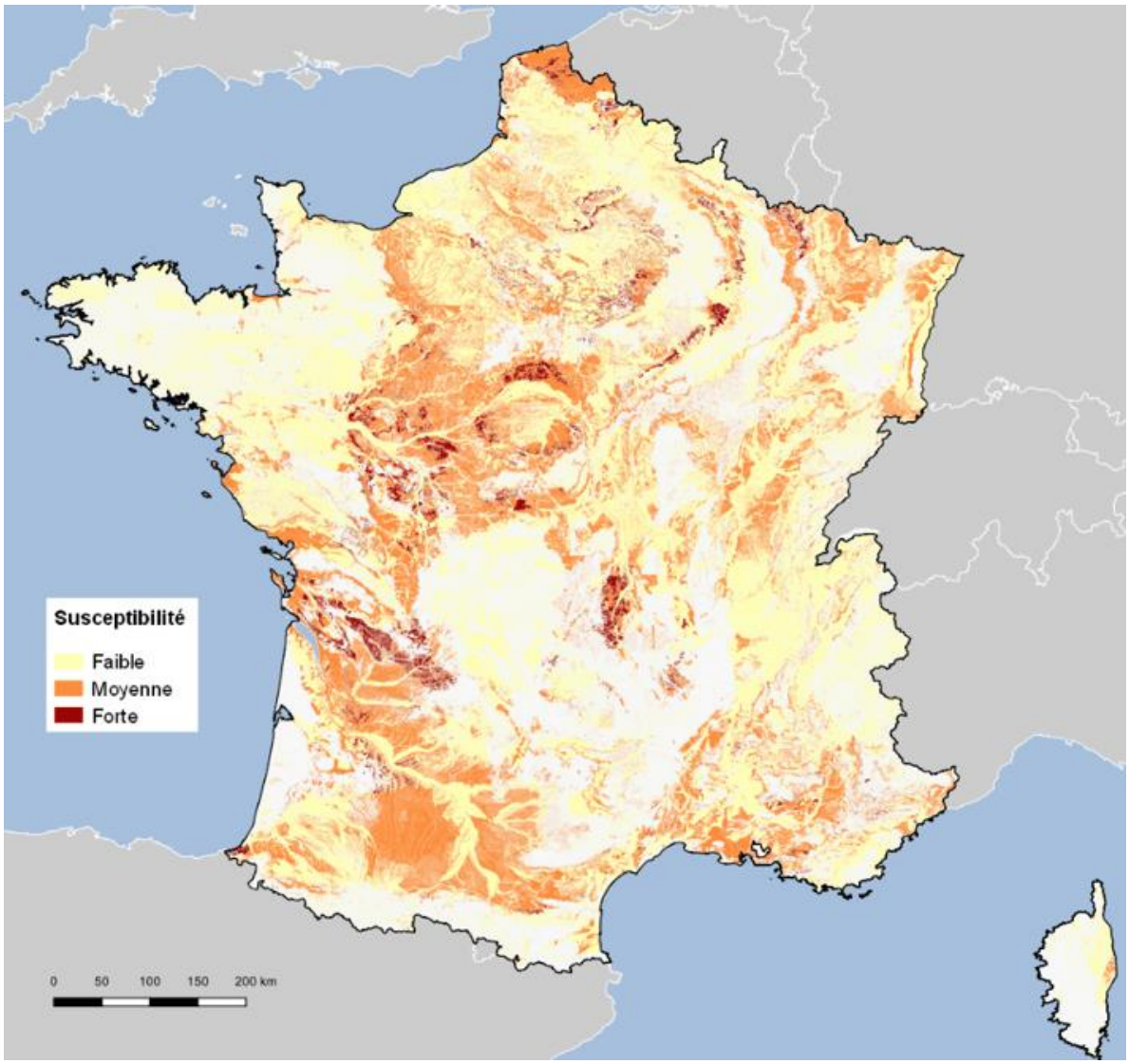
- Lage blootstelling:
  - lage gevoeligheid lage schadegevalfrequentie
- Gemiddelde blootstelling:
  - lage gevoeligheid x gemiddelde of hoge schadegevalfrequentie
  - gemiddelde gevoeligheid x lage of gemiddelde schadegevalfrequentie
- Hoge blootstelling:
  - gemiddelde gevoeligheid x hoge schadegevalfrequentie
  - hoge gevoeligheid x lage, gemiddelde of hoge schadegevalfrequentie

Deze methodologie resulteerde erin dat 93% van de geïnventariseerde schadegevallen voorkomen in zones met een gemiddelde (38%) of hoge (55%) blootstelling.

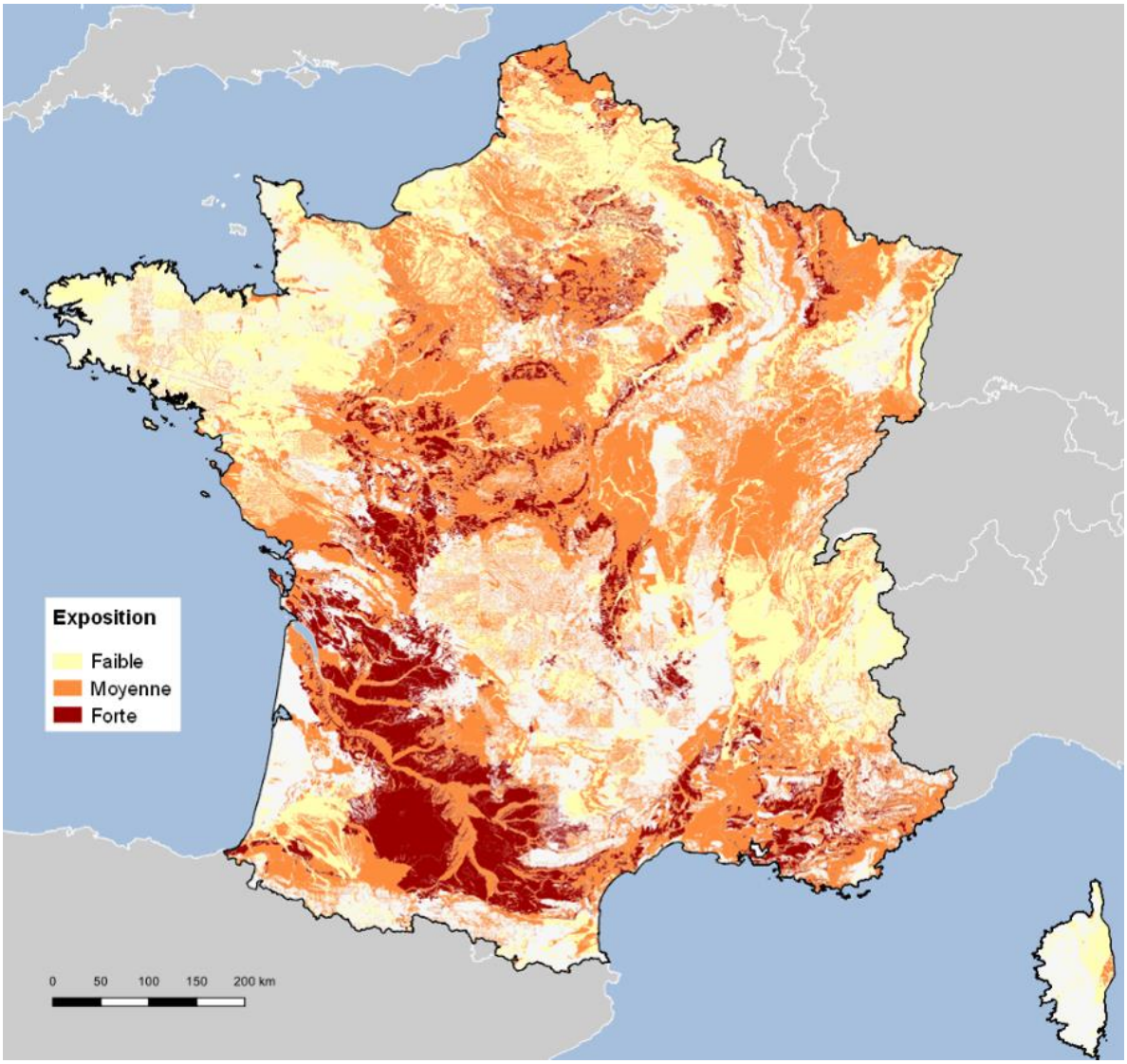
Merk verder op dat deze kaarten zijn opgenomen in een online tool, die na ingave van het adres of perceelnummer, een overzicht geeft van alle georisico's (aardbevingsgevoeligheid, mogelijke grondverontreiniging en de aanwezigheid van krimp-/zwelgevoelige gronden).

Tenslotte wijst men ook op de gebruiksbeperkingen van de kaarten. Zo vestigt men de aandacht erop dat de graad van precisie en betrouwbaarheid van de blootstellingskaart wordt beperkt door de kwaliteit van de identificatie en onderverdeling van de krimp-/zwelgevoelige formaties en vooral door de kwaliteit van de geologische kaart. De gebruiker moet zich bewust zijn van de onzekerheid die er bestaat op de voorkomensgrenzen van de (bijna) dagzomende formaties. Men duidt expliciet dat de kaarten in geen geval de werkelijke aard van het terrein/de ondergrond weergeven. Zo kunnen er ook binnen zones die niet als krimp-/zwelgevoelig zijn geïdentificeerd om verschillende redenen toch (lokaal) krimp-/zwelgevoelig lagen voorkomen. Ook het tegenovergestelde is mogelijk,

namelijk dat in zones geïdentificeerd als krimp-/zwelgevoelig lokaal toch niet-gevoelige grondlagen voorkomen.
Men wijst er op dat dit kan vastgesteld door specifiek geotechnisch onderzoek, bv. bij de opstart van een bouwproject.



Figuur 6. Gevoeligheidskaart voor krimp-/zwelfenomenen in Frankrijk (bron).



Figuur 7. Blootstellingskaart voor krimp-/zwelfenomenen in Frankrijk (bron).

3.1.3.2 Groot-Brittannië

De Britse Geologische Dienst (BGS) stelt eveneens kaarten ter beschikking van het krimp-/zwelpotentieel van de ondiepe ondergrond in Groot-Brittannië. Deze kaarten werden door BGS opgesteld op basis van gedetailleerde geotechnische en mineralogische onderzoeken, al werd er weinig bijkomende achtergrondinformatie over gevonden. De kaarten maken deel uit van de BGS GeoSure Dataset, die kaarten van potentiële geo-hazards bundelt (krimp-zwel, hellingsinstabiliteit, karst, sterk samendrukbare gronden, ...).

De shrink swell dataset met 5km hexagonaal grid wordt gratis ter beschikking gesteld (zie Figuur 8). Deze kaart maakt een onderscheid tussen 3 categorieën: laag, gemiddeld en significant. Daarnaast zijn er meer gedetailleerde kaarten te verkrijgen, zoals:

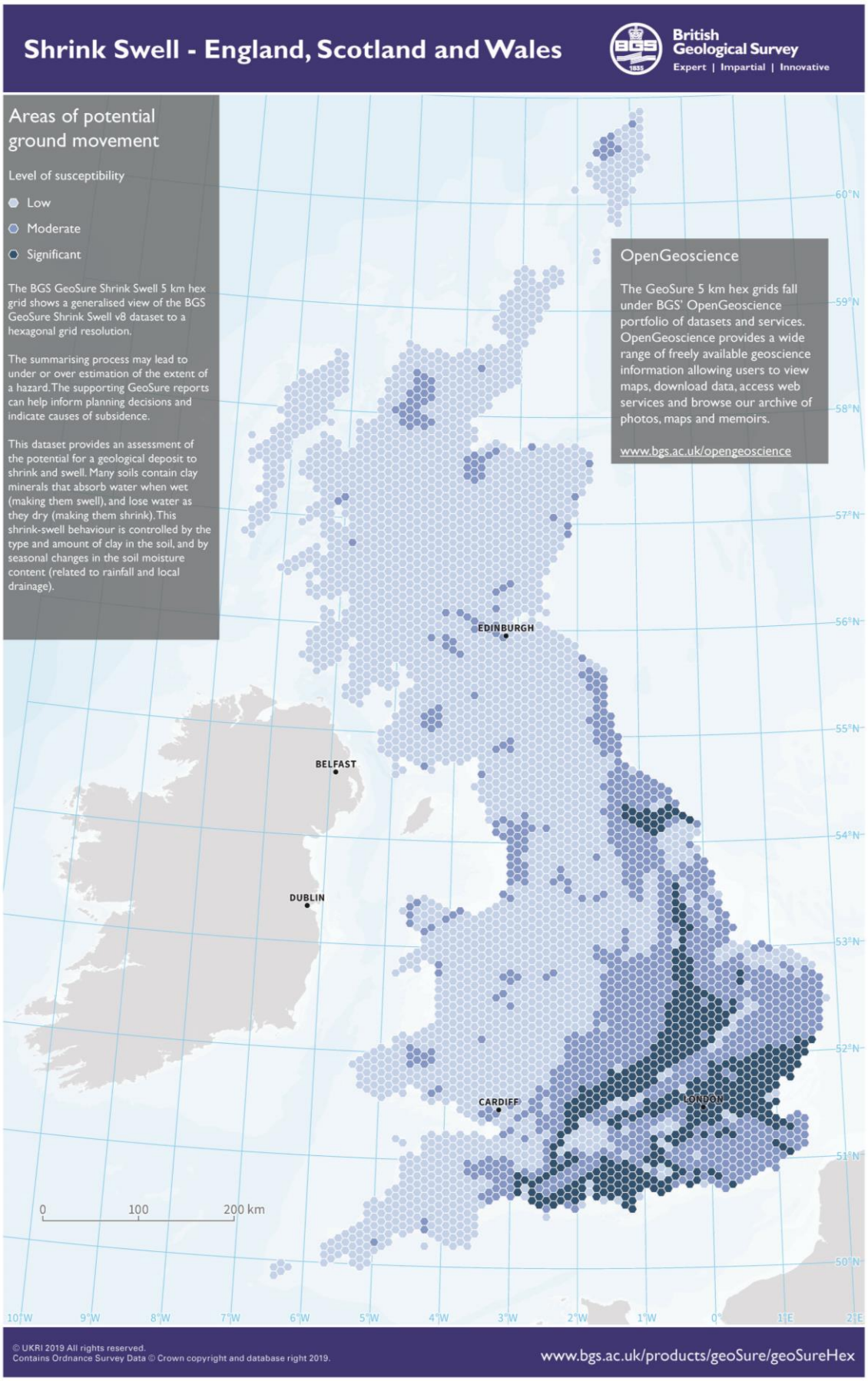
- de BGS GeoSure shrink-swell dataset (Figuur 9): het voorkomen van dagzomende krimp-/zwelgevoelige gronden werd gecombineerd met informatie uit diktekaarten, wetenschappelijke en studierapporten.
- de BGS GeoSure shrink-swell subsurface dataset: krimp-/zwelgevoelige gronden die niet dagzomen, tot een diepte van ongeveer 10m.

Deze kaarten geven een 'hazard rating' van A tot E (Tabel 8). Verder geeft men een aantal aanbevelingen mee zoals (BGS Geosure: property hazard information):

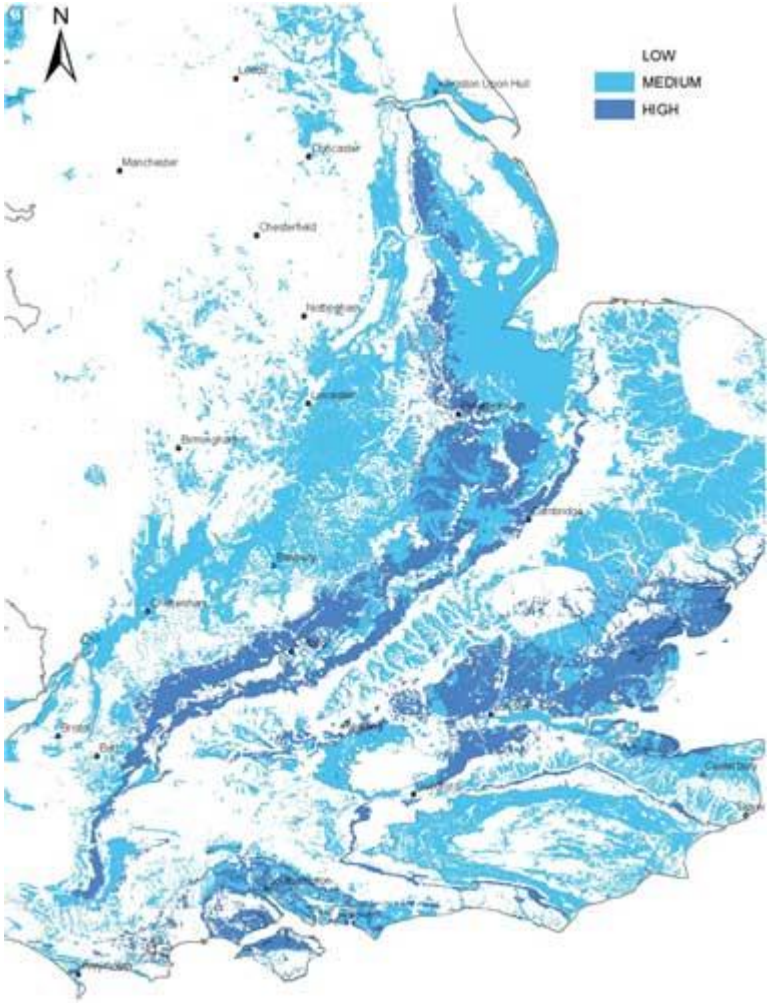
- Bij nieuwe (grote) bouwwerken wordt aangeraden gespecialiseerd advies in te winnen. Zorg ervoor dat de fundering van nieuwe constructies of uitbreidingen ontworpen zijn voor de krimp-/zwelgevoelige ondergrond.
- Hou rekening met het effect van het aanleggen van ondoorlaatbare opritten, paden of verharde ondergronden op het vochtgehalte in de onderliggende bodem (verminderde regenwaterinfiltratie).
- Vraag advies aan een expert voor het aanplanten van bomen in de nabijheid van een gebouw. De veilige afstand is afhankelijk van de boomsoort, het funderingstype en de grondsamenstelling. Plant geen potentieel grote bomen naast een gebouw.
- Rooi geen volwassen bomen die reeds aanwezig waren voor de oprichting van het gebouw vooraleer advies in te winnen. Het kan een betere oplossing zijn de kroon te reduceren of uit te dunnen omdat dit zal leiden tot een stabieler vochtgehalte in de bodem.

Tabel 8. "Hazard rating" en bijhorende adviezen bij de BGS GeoSure shrink-swell dataset (bron).

Hazard rating	Advice for public	Advice for specialist
A — ground conditions predominantly non-plastic.	No actions required to avoid problems due to shrink–swell clays.	No special ground investigation required or increased construction costs or increased financial risk due to potential problems with shrink–swell clays.
B — ground conditions predominantly low plasticity.	No actions required to avoid problems due to shrink–swell clays	No special ground investigation required or increased construction costs or increased financial risk due to potential problems with shrink–swell clays.
C — ground conditions predominantly medium plasticity.	Do not plant trees with high soil moisture demands near to buildings.	New build — test for plasticity index is recommended. Possible increase in construction cost to remove possibility of potential shrink–swell problems. Existing property — possible increase in insurance risk in droughts or where high moisture demand vegetation is present due to shrink–swell clay problems if foundations are not suitable.
D — ground conditions predominantly high plasticity.	Do not plant or remove trees or shrubs near to buildings without expert advice about their effect and management.	New build — test for plasticity index is necessary. Probable increase in construction cost to remove possibility of potential shrink–swell problems. Existing property — probable increase in insurance risk in droughts or where high moisture demand vegetation is present due to shrink–swell clay problems if foundations are not suitable.
E — ground conditions predominantly very high plasticity.	Do not plant or remove trees or shrubs near to buildings without expert advice about their effect and management.	New build — test for plasticity index is essential. Definite increase in construction cost to remove possibility of potential shrink–swell problems. Existing property — significant increase in insurance risk in droughts or where high moisture demand vegetation is present due to shrink–swell clay problems if foundations are not suitable.



Figuur 8. De shrink swell dataset met 5km hexagonaal grid (bron).



Figuur 9. Extract van de BGS GeoSure shrink–swell hazard potential map (bron).

3.2 DATAONDERZOEK

3.2.1 Algemeen

Het doel van het dataonderzoek is zo veel mogelijk relevante informatie over het krimp-/zwelgedrag van de Vlaamse ondergrond (op het niveau van de Leden en Formaties) te verzamelen. Enerzijds wordt er zo veel mogelijk data verzameld uit de beschikbare literatuur. Deze gegevens worden geconsolideerd in een ruimtelijke databank (zie paragraaf 3.2.2). Anderzijds wordt ook de beschikbare data van DOV-grondmonsters met laboproeven geëxploiteerd (paragraaf 3.2.3). Alle monsters en datapunten worden aan een geologische laag toegekend, wat verdere analyse mogelijk maakt (paragraaf 3.2.4).

3.2.2 Literatuurbronnen en ruimtelijke databank

Voor het literatuuronderzoek werd uitgegaan van de reeds beschikbare documenten in de bestaande literatuurlijst voor de start van het onderzoek en een reeks aangeleverde documenten vanuit de stuurgroep. Enkel wanneer de brondata beschikbaar was (in tabellen of uitzonderlijk via Excel-sheets) werd deze gedigitaliseerd en opgenomen in een (ruimtelijke) databank. Dit wilt zeggen dat data die enkel beschikbaar was in figuren zonder vermelding van exacte cijferwaarden, niet werd weerhouden. Zo veel mogelijk relevante parameters werden opgenomen in de ruimtelijke databank,

in de vorm van een Excel-bestand. De opgenomen inputvelden in dit Excel-bestand zijn samengevat in Tabel 9. Hierbij wordt ook een toelichting gegeven bij elk veld. Naast een aantal vaste, minimaal vereiste parameters (referentie, geologische laag, enz.) groeide het aantal en type inputvelden systematisch naarmate er relevante data werd gevonden in de literatuur. Vooral voor de bulk- en kleimineralogie was het niet altijd eenvoudig de data samen te voegen in een enkel bestand, gezien de verschillende gebruikte benamingen, onderverdelingen en methodes. Alle databronnen worden met de database meegeleverd in een aparte map.

De ruimtelijke databank bevat data van volgende bronnen (zie Hoofdstuk “Referenties” voor de details):

- Ottenburgs et al., 1983
- Henriet, 1998
- I.N.I.S.Ma, 1998
- Mohammad, 2009
- Van Den Eeckhaut en Poesen, 2009
- Honty, 2010
- Zeelmaekers, 2011
- Adriaens, 2015
- Zeelmaekers et al., 2015
- Adriaens et al., 2017
- Adriaens en Vandenberghe, 2019
- Frederickx, 2019
- Braekman, 2020
- Rijk, 2021
- Sau Valenzuela, 2021
- VPO-project 2023_VPO_2021_002: in situ proeven (zie ook Hoofdstuk 5 “In-situ cases” van dit rapport), nog geen officiële rapportage

Tabel 9 (deel 1). Overzicht van de inputvelden van de Excel-file met literatuurdata (ruimtelijke databank).

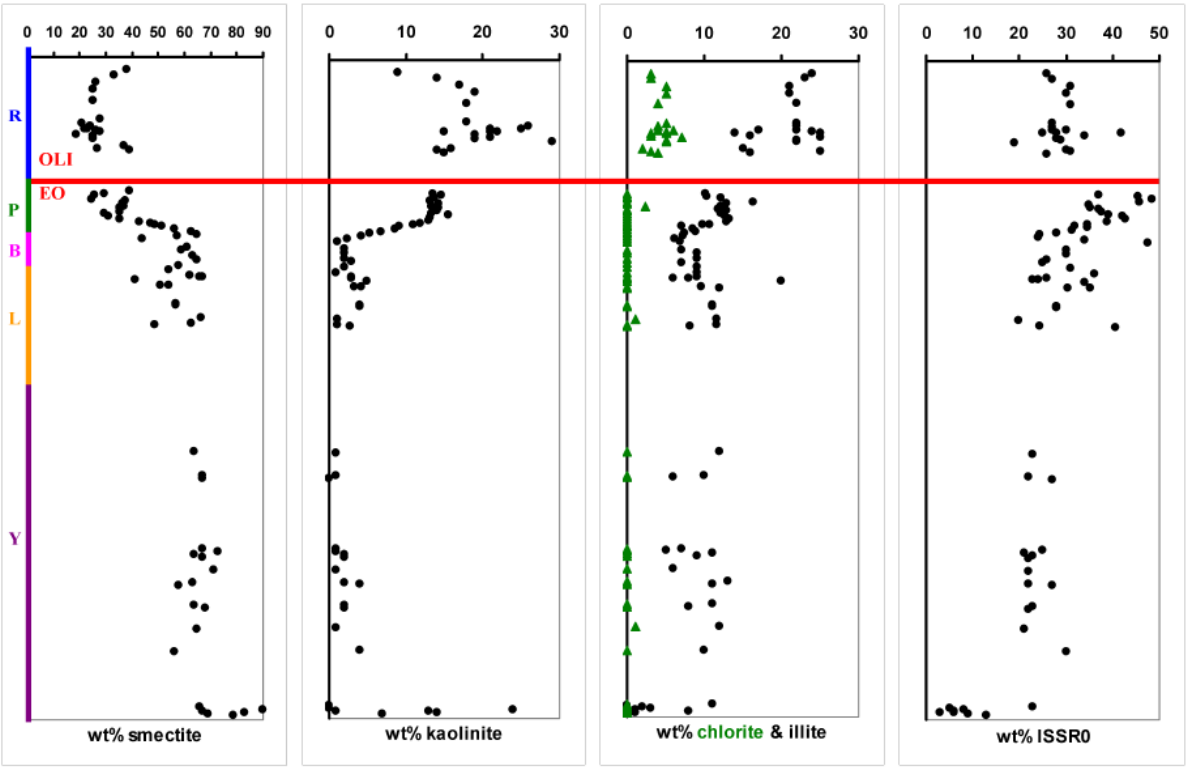
Verzamelnaam	Inputveld	Toelichting
Geologie	Formatie/Lid G3Dv3	De G3Dv3-codes van het Lid of de Formatie waaraan het monster werd toegekend.
	g3dv3_code	
	Benaming rapport	De geologische benaming die in de databron werd toegekend
Referentie	Reference	Documentnaam van de databron
Identificatie	boring	Naam boring
	kern	Identificatie van de kern waaruit het monster afkomstig is
	sample code	Identificatie van het sample
Locatie	CRS	Coördinatenreferentiesysteem
	X	X-, Y- en Z-coördinaat van de boring, Z-coördinaat steeds in mTAW
	Y	
	Z	
Diepte	mTAW of mv	Aanduiding of diepte is meegegeven in mTAW of t.o.v. het maaiveld (mv)
	diepte_up	Diepte van de bovenkant van het monster
	diepte_down	Diepte van de onderkant van het monster
	diepte_midden	Gemiddelde diepte van het monster
Korrelgrootte	>75µm	Grenzen van de korrelgrootteverdeling, waarden in %
	75 to 40µm	
	40 to 20µm	
	20 to 5µm	
	5 to 2µm	
	>63µm	
	2 to 63µm	
	<2µm	
	<2µm_min	De minimale en maximale waarde van de korrelfractie <2µm, in het geval hiervoor een range werd opgegeven.
	<2µm_max	
Atterbergse grenzen	vloeigrens	Vloeigrens
	uitrolgrens	Uitrolgrens
	PI	Plasticiteitsindex
	Pfefferkorn	Plasticiteit bepaald volgens Pfefferkorn
Zwel-krimpgedrag (deltaV/Vi)/w%)	Krimp	Volumeverandering i.f.v. afnemend watergehalte
	Zwel	Volumeverandering i.f.v. toenemend watergehalte
Cation Exchange Capacity	CEC (meq/100g)	CEC-waarde bepaald op het bulkstaal
	CEC<2µm	CEC-waarde bepaald op de kleifractie
Specific Surface Area	External specific surface area -BET technique (m2/g)	
	Total specific surface area -Methylen Blue technique (m2/g)	

Tabel 9 (deel 2). Overzicht van de inputvelden van de Excel-file met literatuurdata (ruimtelijke databank).

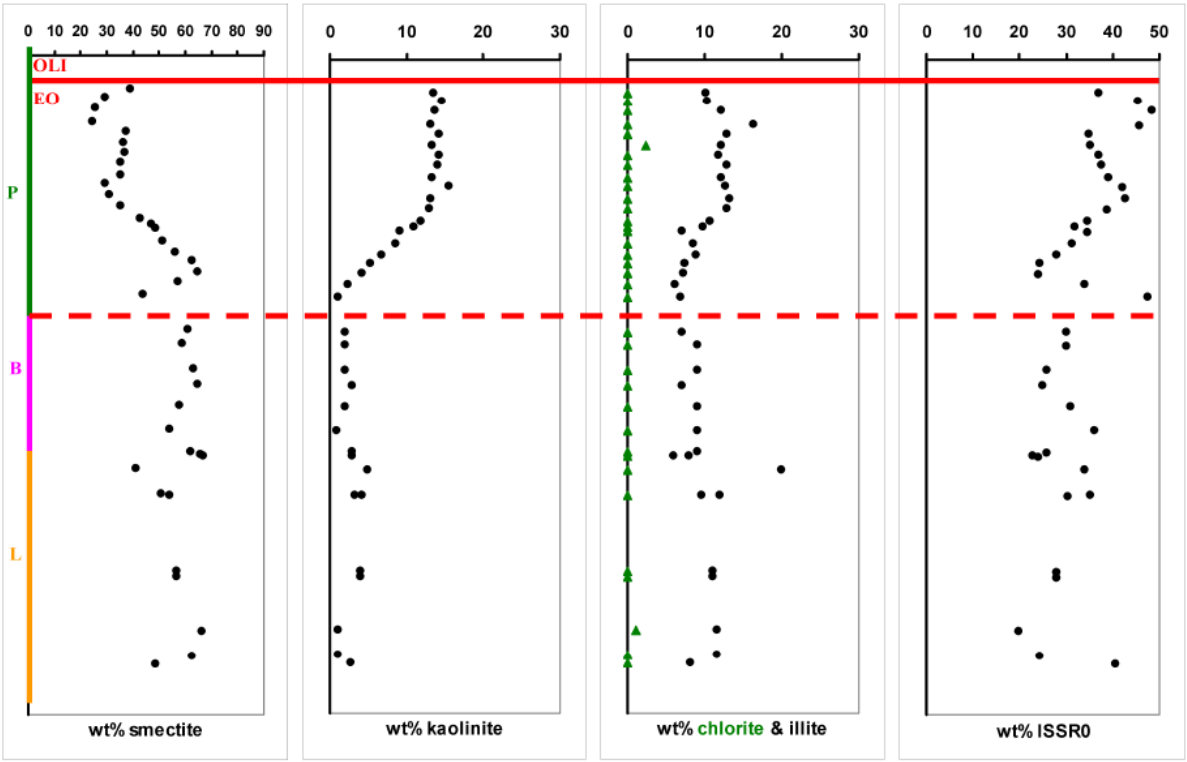
Verzamelnaam		Inputveld	Toelichting
Bulkmineralogie	Silicates	Quartz	Bulk- en kleimineralogie, waarden in %
		Alkali Feldspar	
		Kspar	
		Plagioclase	
		Clinoptilolite	
	Carbonates	%carb	
		Calcite	
		Dolomiet	
		Sideriet	
		Ankerite	
	Oxides/ hydroxides	Hematite	
		Apatite	
		Magnetite	
		Ilmenite	
		Rutile	
		Anatase	
		Org. Mat.	
	Sulphides/ Sulphates	Pyrite	
		Gypsum	
	Layer silicates	Zeolite	
		Kaolinitic	
		Kln-Sme	
		Chlorite	
		2:1 Layer silicates	
		2:1 Al-clay	
		Muscovite	
		Disordered layer silicates	
		Glauconite	
		Total layer silicates	
		Discrete smectite in bulk	
		Interstratified smectite-illite	
		Discrete illite in bulk	
		Amorphous (Opal)	
		Total clays	
		Total non-clays	
		Sm. Eq.	
		Ill. Eq.	
Kleimineralogie		Kaoliniet%	
		Chloriet%	
		Glauconiet/smectiet%	
		Smectiet%	
		Smectiet/illiet%	
		Illiet%	
		Clay-sized glauconite (low exp)	
		Clay-sized glauconite (high exp)	

Een aantal van de bronnen vervat in de ruimtelijke databank (Zeelmaekers, 2011; Adriaens, 2015; Frederickx, 2019 ...), maar ook andere (bv. Saeys et al., 2004; Adriaens en Vandenberghe, 2020; ...) bevatten nog veel meer relevante informatie, bv. weergegeven in figuren of beschreven in de tekst. Deze gegevens zijn (binnen de scope van dit project) moeilijk in de ruimtelijke database te integreren maar leveren wel zeer nuttige inzichten voor het onderzoek.

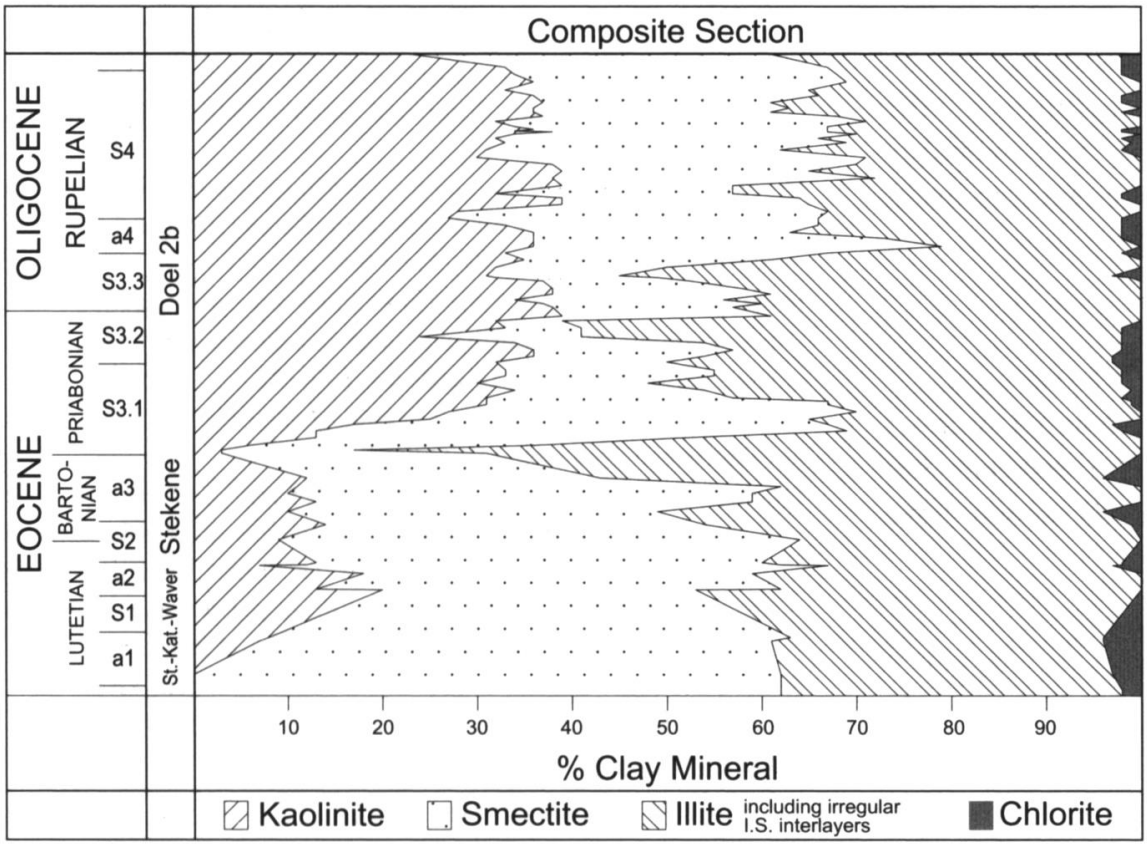
Zo toont Zeelmaekers (2011) de evolutie van het smectietgehalte in de kleimineralogie voor 2 tijdsintervallen (het Ieperiaan tot Rupeliaan interval (Figuur 10) en meer gedetailleerd het Lutetiaan tot Priaboniaan interval (Figuur 11)). Deze figuren tonen een zeer consistente kleimineralogie over de volledige dikte van de bestudeerde Ieperiaan afzettingen met hoge smectietgehaltes. De kleimineralogie van de bestudeerde Lutetiaan en Bartoniaan afzettingen is zeer gelijkaardig aan deze van het Ieperiaan. In het zand van Bassevelde (vroeg Priaboniaan) neemt het smectietgehalte sterk af (van 60% naar 30-35%) en neemt het kaolinietgehalte toe. De kwalitatieve kleimineralogie van het smectiet blijft zeer gelijkaardig in het Rupeliaan (Boomse klei, 19-39%). Dit is een bevestiging van eerdere observaties door Saeys et al. (2004), zie Figuur 12.
Adriaens (2015) geeft deze info weer in een driehoeksdiagram van de kleimineralogische samenstelling voor de belangrijkste kleirijke Cenozoïsche afzettingen, dagzomend in het Scheldebekken (Figuur 13). Ook op basis van deze figuur kan de kleimineralogische evolutie in Paleogene stratigrafie mooi gevolgd worden.



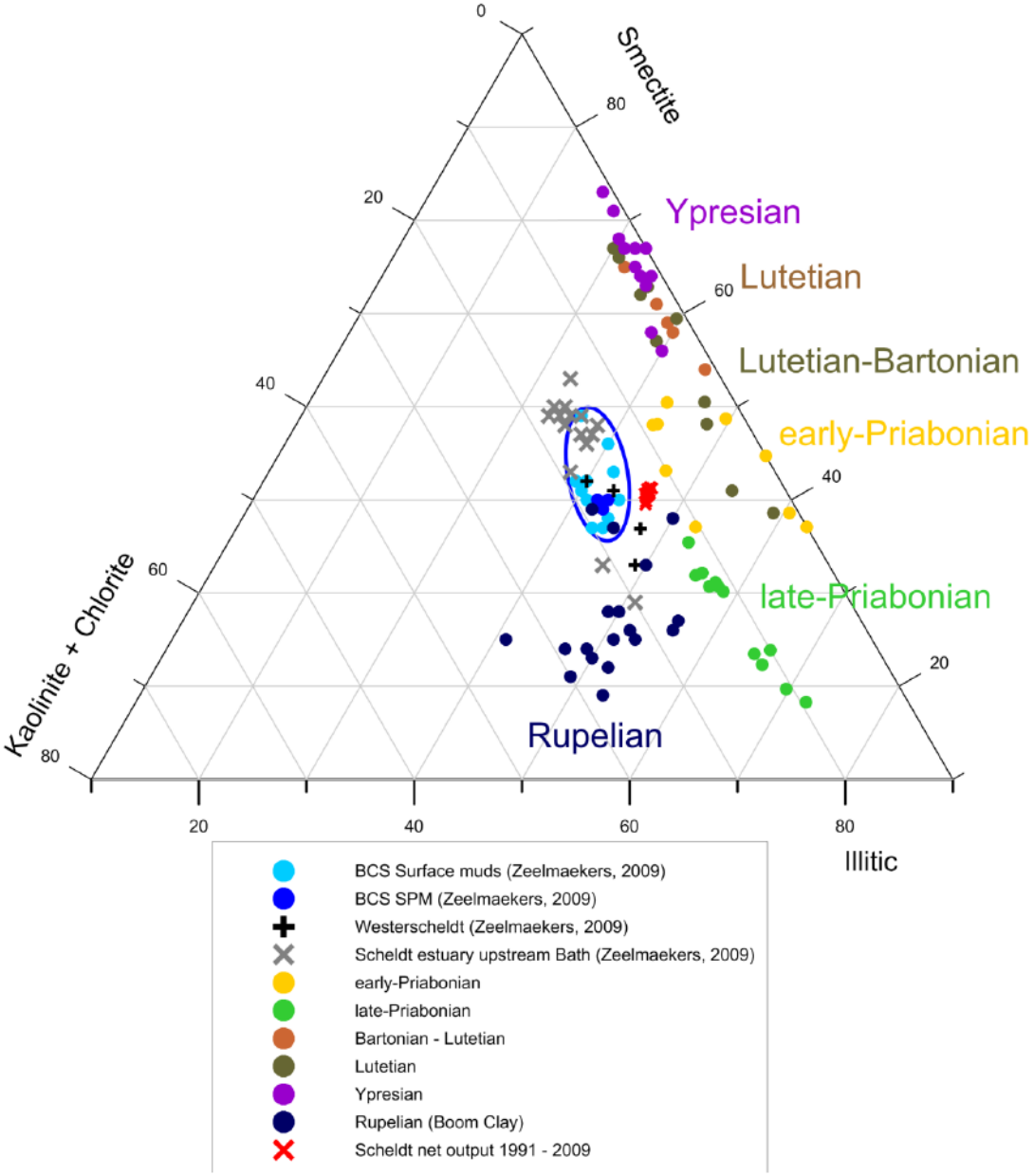
Figuur 10. Kwantitatieve kleimineralogie van de 2µm fractie voor het Ieperiaan tot Rupeliaan interval (gecorrigeerd voor glauconiet wanneer aanwezig), bron: Zeelmaekers (2011). (R=Rupeliaan, P=Priaboniaan, B=Bartoniaan, L=Lutetiaan, Y = Ieperiaan, OLI = Oligoceen, EO=Eoceen)



Figuur 11. Kwantitatieve kleimineralogie van de 2µm fractie voor het Lutetiaan tot Priaboniaan interval (gecorrigeerd voor glauconiet wanneer aanwezig), bron: Zeelmaekers (2011). Vergelijk deze figuur met Figuur 12. (P=Priaboniaan, B=Bartoniaan, L=Lutetiaan, OLI = Oligoceen, EO=Eoceen)



Figuur 12. Samengestelde doorsnede van de kleimineralogie (Lutetiaan tot Rupeliaan) op basis van de Sint-Katelijne-Waver, Stekene en Doel 2b boringen (Saeys et al., 2004). Vergelijk deze figuur met Figuur 11.



Figuur 13. Driehoeksdiagram met kleimineralogie (Adriaens, 2015). Vooral interessant is de kleimineralogie van de belangrijkste kleirijke Cenozoïsche afzettingen (dagzomend in het Scheldebekken), waaruit de kleimineralogische evolutie in Paleogene stratigrafie in België kan gevolgd worden. De kleimineralogie van de slibafzettingen zijn hier minder relevant.

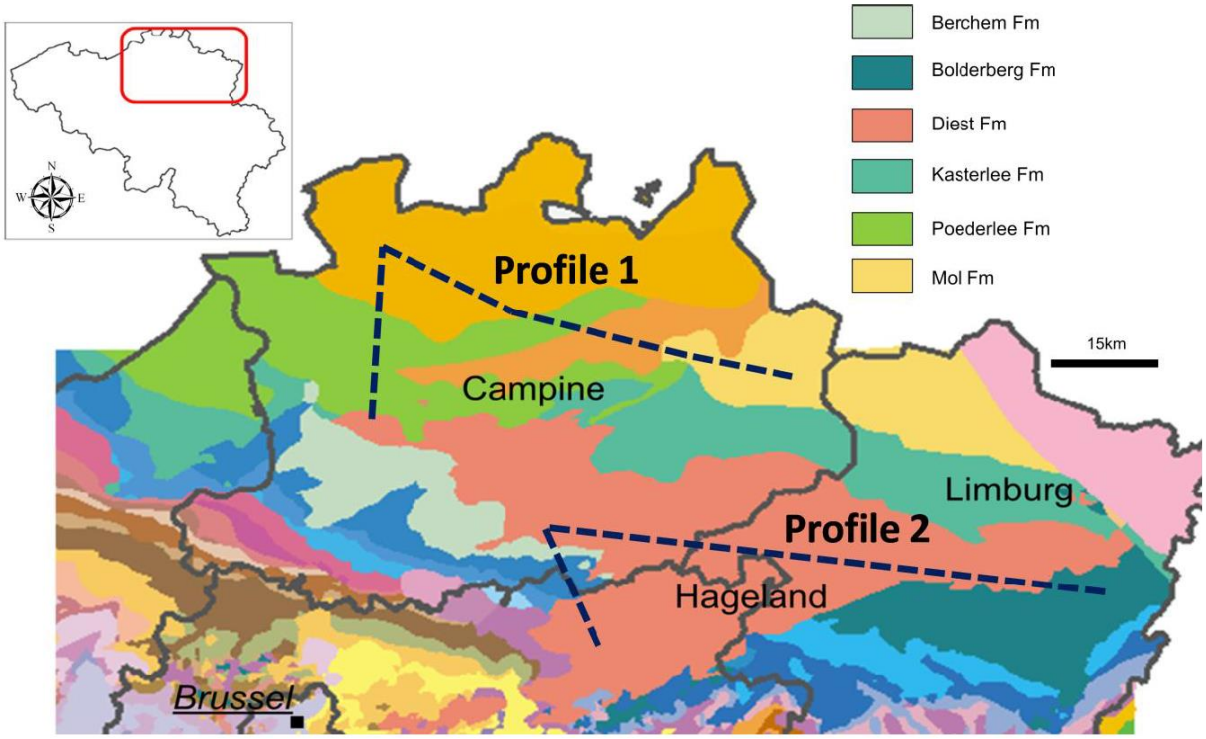
Adriaens (2015) karakteriseerde o.a. de (klei)mineralogische eigenschappen van de Formaties van Berchem, Bolderberg, Diest, Kasterlee, Poederlee en Mol. De resultaten van deze karakterisering zijn weergegeven in de vorm van 2 profielen (ligging zie Figuur 14):

- Een profiel door het Kempens bekken (Figuur 15). Hierbij wijst Adriaens (2015) op de zeer gelijkaardige kleimineralogie voor alle leden binnen de Formatie van Berchem (smectietrijke samenstelling met variërende hoeveelheden van relatief sterk uitzetbare glauconiet-smectiet). Deze kleimineralogie wordt ook teruggevonden in de Leden van Deurne en Dessel van de Formatie van Diest. De basis van de Formatie van Diest (Diest D1 – DN9) wordt gekenmerkt door een belangrijke scheiding met grover zand en met een laag uitzetbare glauconiet-smectiet gedomineerde kleimineralogie. De analyses wijzen er op dat de Diest

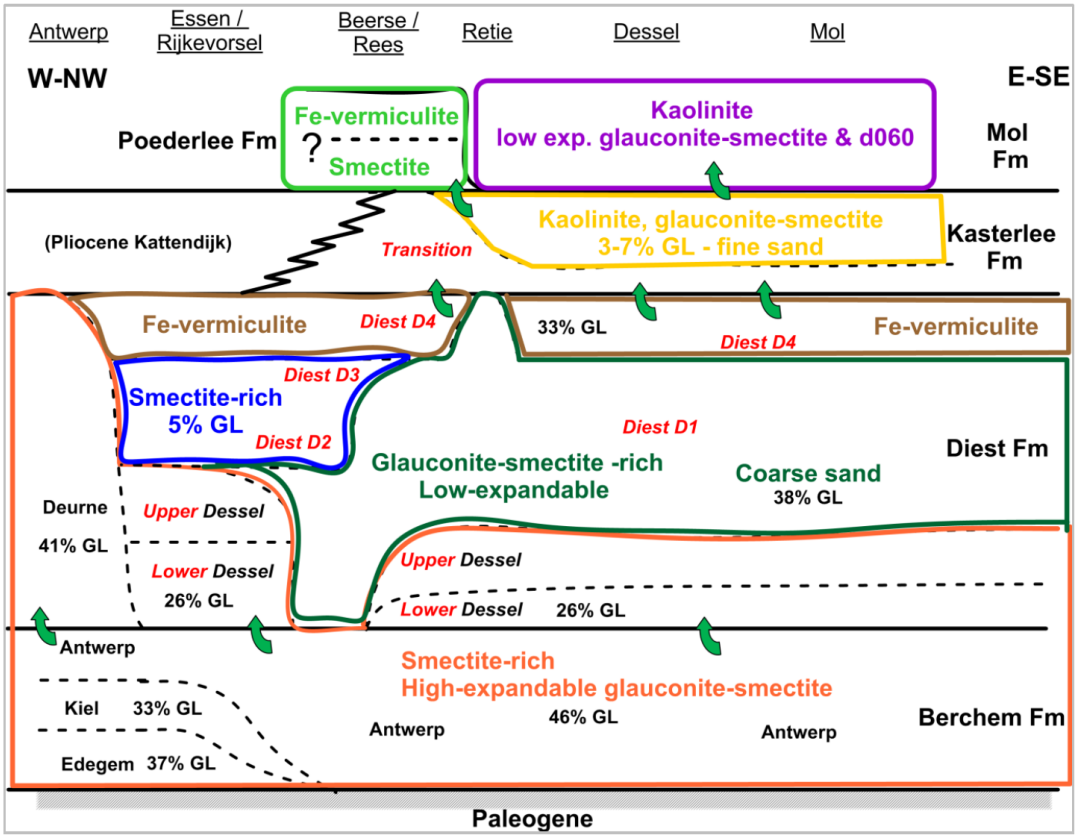
D1-eenheid in het Hageland en de Kempen niet van elkaar moeten worden onderscheiden. Wel wordt erop gewezen dat de top van de Vlaamse heuvelafzettingen, die traditioneel aan de Formatie van Diest worden toegekend, kaoliniet- en illietrijk zijn en significant verschillen van de afzettingen van de Formatie van Diest in het Hageland (niet weergegeven in het schema).

- Een profiel door het Hageland (Figuur 16). Er werd vastgesteld dat de kleimineralogie zeer constant is met een smectietrijke samenstelling voor zowel alle leden van de Formatie van Berchem als voor de leden van Houthalen tot Genk van de Formatie van Bolderberg. Daarnaast wordt er onder andere op gewezen dat het Diest D1 zand in het westelijke deel van het Kempens bekken gradueel evolueert naar kleiig zand (Diest D2 en Diest D3), gekarakteriseerd door een smectietrijke kleimineralogie.

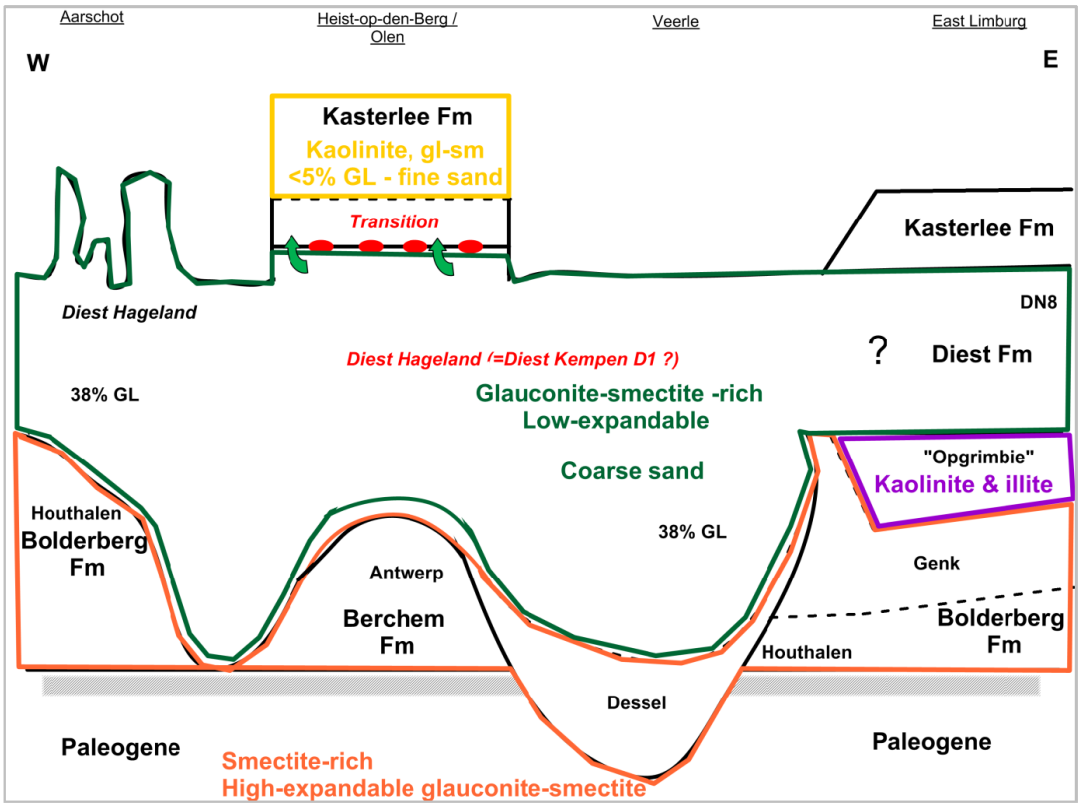
In zijn conclusies wijst Adriaens (2015) er nogmaals op dat de lithologie en kleimineralogie binnen verschillende delen van de Formatie van Diest zeer heterogeen is.



Figuur 14. Geologische kaart van het Kempens bekken met aanduiding van de profielen (zie Figuren 15 en 16). Bron: Adriaens, 2015.



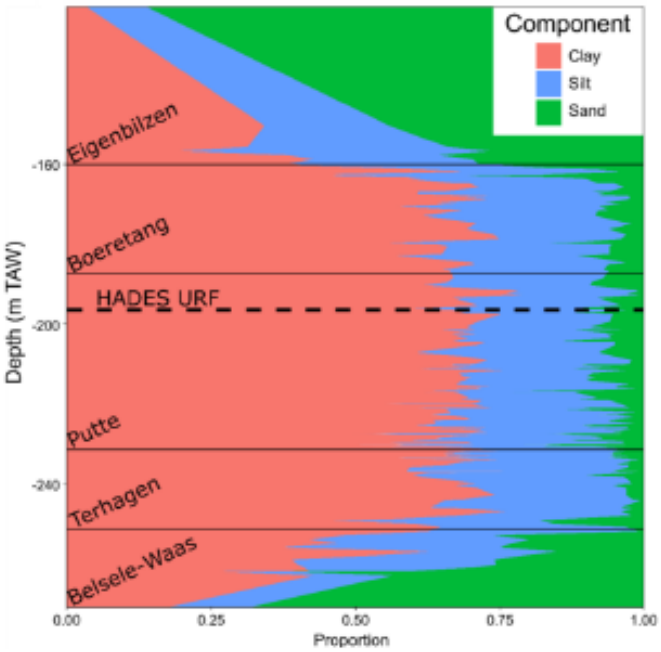
Figuur 15. Geologisch profiel door de Neogene lagen in het Kempens bekken (zie Figuur 14 voor de ligging van het profiel). Bron: Adriaens, 2015.



Figuur 16. Geologisch profiel door de Neogene lagen in het Hageland (zie Figuur 14 voor de ligging van het profiel). Bron: Adriaens, 2015.

Adriaens en Vandenberghe (2020) gaan verder in op de mineralogische samenstelling van de Neogene formaties in België, voornamelijk met als doel nauwkeuriger de grenzen van lithostratigrafische eenheden te kunnen identificeren, maar ook de ontwikkeling van laterale verschillen binnen eenheden.

Frederickx (2019) spitst zich toe op de kleimineralogie van de Boomse klei. Veel data werd opgenomen in de ruimtelijke databank, maar het manuscript bevat ook interessante figuren zoals Figuur 17 met de evolutie van de korrelgrootteverdeling in de Formatie van Boom. In de leden van Terhagen, Putte en Boeretang is de kleifractie het grootst, terwijl het Lid van Belsele-Waas een stijgende kleifractie vertoont naar het Lid van Terhagen toe. De auteur wijst hierbij nog eens op de grote verschillen die worden verkregen bij bepaling van de korrelgrootteverdeling afhankelijk van de gebruikte methode en zelfs tussen verschillende laboratoria.
Daarnaast wijst Frederick (2019) ook op de correlaties tussen kleimineralogie, Total Surface Area en CEC-waarde en tussen korrelgrootteverdeling en Specific Surface Area.
Verder onderzocht Frederickx (2019) in detail de aanwezigheid van kleimineralen in de bulkmineralogie. Terwijl eerdere studies zich toespitsten op de mineralogie van de kleifractie, stelde Frederickx (2019) vast dat ook grovere fracties een belangrijke rol kunnen spelen in de kleimineralogie van het globale monster.



Figuur 17. Inschatting van de korrelgrootteverdeling in functie van de diepte voor de Boomse klei op basis van gemeten en geconverteerde data (Frederickx, 2019).

Ten slotte geeft de publicatie van Gullentops en Wouters (1996) over de delfstoffen in Vlaanderen nog een bondig maar duidelijk overzicht van de kleimineralogie van een aantal geologische formaties zoals die destijds gekend was (met het oog op hun exploitatie als delfstof):

- De **Ieperiaan-kleien** worden gekenmerkt door een zeer hoog gehalte aan zwellende kleimineralen (ongeveer 45% smectiet), een laag gehalte aan illiet (glimmerachtig kleimineraal) en het (haast volledig) ontbreken van kaoliniet en van carbonaten.
- (**Formatie van Tielt**) De dikke kleilenzen van het Lid van Kortemark worden ontgonnen voor de baksteenindustrie ten noorden van Kortrijk. Het hoge smectietgehalte stelt problemen bij de verwerking van de klei.

- (**Henis klei**) De klei is bijzonder zwaar, met tot 65% kleifractie. Hierbij domineert de smectietgroep zodat de klei de zeer hoge specifieke oppervlakte van 250 m^2/g haalt.
- (**Boomse klei**) Het kleigehalte van de Boomse Klei schommelt tussen 25% en 60%, en bestaat uit 70 tot 80% zwellende kleimineralen, 10 tot 20% illiet en gemiddeld 10% kaoliniet. Het siltig kleipakket bevat maximaal 3% zandfractie (> 63 µm). Het zandig siltgedeelte wordt gekenmerkt door een kleigehalte kleiner dan 30% en een zandgehalte groter dan 30%. Het hoge smectietgehalte in deze grondstoffen zorgt voor een goede plasticiteit en een hoog specifiek oppervlak.
- (**Formatie van de Kempen**) De dikte van de Formatie van de Kempen bedraagt maximaal 40 meter. De zandige gedeelten zijn grijs van kleur en bevatten 25 tot 30% zandfractie en ongeveer 40% kleifractie. In de kleirijkere niveaus loopt de kleifractie op tot ongeveer 50% en de siltfractie tot 40%. De kleimineralogie bestaat voor ongeveer 65% uit zwellende kleimineralen (smectieten), 25% glimmerachtig illiet (en wat glauconiet) en 10% kaoliniet. Er komen geen carbonaten voor. De zware klei bezit een hoog specifiek oppervlak en een daarmee gepaard gaande grote plasticiteit.
- (**Eolische leem**) De kleimineralen zijn vooral illiet, met ondergeschikt kaoliniet en smectiet. Daardoor is de plasticiteit goed en de krimp klein.
- (**Alluviale leem**) Door hun gering verval vervoeren Leie en Schelde weinig zand. Bovendien komen in hun stroombekkens, naast eolische leem, ook zware kleien voor: enerzijds residu's van de verwering van het krijt in Artesië, anderzijds de Ieperiaan-kleien. De alluviale leem bevat daardoor gemiddeld 30% klei, waarin de smectiet mineralen tot 75% van het gewicht vertegenwoordigen. Temidden een grind- en zandlandschap is de alluviale leem van de Maas zeker een waardevol element. De laag is gemiddeld 2 m dik en is een zandhoudende leem met ongeveer 20% klei; de illiet-groep overtreft hierbij krap de smectieten.
- (**Polderklei**) Polderklei bevat gemiddeld 20 tot 25% kleifractie en 25 tot 45% zandfractie. De kleifractie bestaat voor 70 tot 75% uit smectiet, 20 tot 25% illiet en ongeveer 5% kaoliniet. De plasticiteit en het specifiek oppervlak vertonen middelmatige waarden.

3.2.3 DOV-grondmonsters met laboproeven

Omdat de beschikbare en voor deze studie bruikbare literatuurdata eerder beperkt bleef en zeker niet alle lagen van het geologisch model afdekken, werd er verder gekeken welke data er beschikbaar is in de DOV-dataset 'Grondmonsters met laboproeven'. Met behulp van de Python-bibliotheek pydov werden voor heel Vlaanderen alle beschikbare grondmonsters gedownload waarvoor minstens de korrelgrootteverdeling werd bepaald of onderkenningsproeven (properties 'korrelverdeling' of 'onderkenning') werden uitgevoerd. Dit gebeurde gemeente per gemeente met de GrondmonsterSearch()-methode van pydov. Deze query werd uitgevoerd op 19 juli 2022. Op basis van de toen beschikbare data ('samples_20220719_165900.parquet') gebeurde de verdere analyse. In het totaal leverde dit een **dataset met 25196 grondmonsters** op (d.w.z. grondmonsters met een unieke permkey 'pkey_grondmonster').

Deze data werd vervolgens een eerste keer behandeld:

- Uitrolgrenzen en vloeigrenzen kleiner dan 0 werden niet weerhouden en vervangen door 'NaN'. Op die manier kan deze data niet gebruikt worden om een plasticiteitsindex te berekenen.
- De plasticiteitsindex werd berekend (vloeigrens – uitrolgrens) en aan de data toegevoegd. Waarden van de plasticiteitsindex kleiner dan 0 werden opnieuw vervangen door 'NaN' en op deze manier verder niet gebruikt.
- De data van korreldiameter en bijhorende korrelfractie wordt in 2 aparte datavelden gestockeerd als een array (array van korreldiameters en een array van corresponderende korrelfracties). Aan de globale dataset werden om latere data-analyse te vergemakkelijken 2 datavelden toegevoegd met de korrelfracties het dichtst gelegen bij 0.002mm (kleifractie) en 0.425mm (op de fractie kleiner dan 0.425mm wordt bij conventie de plasticiteitsindex bepaald). Merk op dat voor korrelgrootteverdelingen bepaald met laserdiffractie een korreldiameter van 0.011mm werd gehanteerd om de kleifractie te bepalen! Zowel de resulterende fractie als de bijhorende korreldiameter worden in de dataset opgeslagen ('fractie_kleifractie' en 'diameter_kleifractie'; 'fractie_425micron' en 'diameter_425micron').
- Ook de gemodificeerde plasticiteitsindex werd berekend voor de monsters waarvoor zowel plasticiteitsindex als korrelgrootteverdeling beschikbaar zijn.

Op een totaal van 25196 monsters waren er op deze manier 3791 monsters waarvoor er een plasticiteitsindex werd bepaald.

In een volgende stap werd voor alle monsters de **formele en informele stratigrafische beschrijving van de boring** gedownload. Hiervoor werd opnieuw een beroep gedaan op het pydov-pakket, meer bepaald de methodes FormeleStratigrafieSearch() en InformeleStratigrafieSearch(). Deze data wordt in afzonderlijke files opgeslagen ('formal_strat_*datetime*.parquet' en 'informal_strat_*datetime*.parquet', waarbij de *datetime* de datum en tijdstip is waarop de data werd gedownload). Bij de behandeling van de formele en informele stratigrafie dienen nog enkele aandachtspunten geplaatst worden:

- Vaak zijn er meerdere formele en informele stratigrafische beschrijvingen beschikbaar voor eenzelfde boring. In onderling overleg met de opdrachtgever werd een methodologie vastgelegd om de meest betrouwbare beschrijving te weerhouden. Deze methodologie geeft voorkeur aan bepaalde opdrachten waarin de interpretatie gebeurde, bepaalde auteurs/auteuraffiliaties in combinatie met de aard van de laag (bv. Quartair, Neogeen).
- Om algemeen bruikbaar te zijn werden de formele en informele stratigrafische beschrijvingen omgezet naar de corresponderende laag van het G3Dv3-model. Voor de

formele stratigrafie, waarvoor de benaming per definitie gestandaardiseerd is, is deze toewijzing vrij eenduidig. Voor de informele stratigrafie is dit enigszins complexer, aangezien de systematiek in de benamingen soms verder te zoeken is, vaak nog oude benamingen worden gebruikt, e.d. Dit gebeurde op basis van een trefwoordenlijst per G3Dv3-laag, die toeliet de informele stratigrafische beschrijvingen zo veel mogelijk om te zetten naar de best corresponderende G3Dv3-benaming. Deze lijsten zijn terug te vinden in de Python-code (parameters 'formal_codes' en 'informal_regrouping' in de Python-file '1_analyse_samples_with_PI.py').

- Voor een aantal formele stratigrafische beschrijvingen, waarvoor er op basis van de toegepaste methodiek niet in werd geslaagd dubbele interpretaties te filteren, werd een manuele toekenning gedaan in overleg met de opdrachtgever.

Ook werd voor alle boorlocaties een doorprik gemaakt van het **geologisch model G3Dv3**. De grondmonsters en G3Dv3-lagen werden aan elkaar gekoppeld op basis van mTAW-niveaus (gemiddelde van boven- en onderkant van het grondmonster).

Op dit moment zijn voor alle monsters en bijhorende boringen de beschikbare stratigrafische gegevens (formele en informele stratigrafie en G3Dv3-doorprik) verzameld op een gestandaardiseerde manier. D.w.z. dat de verschillende beschrijvingen, bewoordingen, afkortingen, ... omgezet werden naar een G3Dv3-laag op een zo gedetailleerd mogelijk niveau (waar mogelijk op het niveau van de leden). Op die manier kan aan elk monster een zo nauwkeurig en betrouwbaar mogelijke G3Dv3-laag toegekend worden. Voor een goed begrip is het belangrijk erop te wijzen dat in sommige gevallen helemaal geen formele of informele stratigrafische beschrijving beschikbaar is, in andere gevallen zijn beide beschikbaar of slechts een van beide. Voor elk monster werd de beschikbare stratigrafische data gecombineerd tot een G3Dv3-laag op basis van de volgende methodologie (opgesteld in overleg met de opdrachtgever):

- Als de formele stratigrafische interpretatie beschikbaar is, wordt abstractie gemaakt van de informele stratigrafische interpretatie. Als er geen formele stratigrafische interpretatie voorhanden is, wordt er verder gewerkt met de informele stratigrafische interpretatie.
- Daarna wordt stapsgewijs gekeken of de weerhouden stratigrafische interpretatie kan bevestigd worden of verfijnd worden op basis van de G3Dv3-doorprik in deze volgorde (als een stap leidt tot toekenning van een G3Dv3-laag worden de volgende stappen niet meer doorlopen):
    - Als de stratigrafische interpretatie overeenkomt met de laag volgens het G3Dv3-model, dan wordt deze zonder meer overgenomen.
    - Als de stratigrafische interpretatie wijst op een antropogene oorsprong, wordt dit ook zonder meer zo toegekend (G3Dv3-laag 'g_A_b').
    - Als de stratigrafische interpretatie wijst op een Quartaire laag zonder verdere detaillering, wordt getracht deze verder te detailleren op basis van de G3Dv3-doorprik op voorwaarde dat deze doorprik ook wijst op een quartaire laag.
    - Als de stratigrafische interpretatie wijst op een Quartaire laag met verdere detaillering, wordt deze zonder meer toegekend.
    - Als de stratigrafische interpretatie wijst op een laag anders dan antropogeen of quartair, dan wordt gecheckt of de stratigrafische interpretatie overeenkomt met de G3Dv3-doorprik op formatieniveau. Als dit het geval is, wordt de laag volgens het G3Dv3-model weerhouden. Zoniet wordt de stratigrafische interpretatie behouden.

Voor een aantal G3Dv3-lagen leverde deze analyse geen gegevens op (zie Tabel 10 voor een overzicht van deze lagen).

Tabel 10. Overzicht van G3Dv3-lagen waarvoor geen informatie werd bekomen op basis van de DOV-grondmonsters met laboproeven.

Afkorting/code G3Dv3	Naam Formatie/Lid G3Dv3	Lithologie (textuur)
g_010602Q_StHa_b	Ld Hamont	grof zand
g_010603Q_StBo_b	Ld Bocholt	grof zand
g_020302NE_KzBr_b	Ld Brunssum	klei en zand intercalatie met ligniet
g_020303NE_KzWb_b	Ld Waubach	grof zand
g_0207NE_Di_Bb_b	Fm Diest en Bolderberg Roer Valley Graben	fijn tot grof zand met glauconiet
g_030101PA_VoSo_b	Ld Someren	fijn kleirijk zand met glauconiet en schelpen
g_030102PA_VoVe_b	Ld Veldhoven	klei
g_030502PA_BoOb_b	Ld Alden Biesen	kalkrijk zand
g_031702PA_TiLo_TiDo_b	Ld Loksbergen en Dormaal	zand
g_031803PA_HnWa_b	Ld Waterschei	klei
g_031804PA_HnBe_b	Ld Beselare	klei
g_031901PA_HsMa_b	Ld Maaseik	mergel met klei
g_031902PA_HsGe_b	Ld Gelinden	mergel
g_031903PA_HsOr_b	Ld Orp	zand met glauconiet
g_0320PA_Op_b	Fm Opglabbeek	kalkrijke klei met ligniet en fijn zand
g_032001PA_OpEi_b	Ld Eisden	fijn zand met schelpen
g_032002PA_OpOp_b	Ld Opoeteren	klei met ligniet
g_0321PA_Ho_b	Fm Houthem	kalkareniet
g_0402KR_Ne_Do_Gu_Va_Be_Vg_Es_Ms_b	Fm Nevele, Dorne, Gulpen, Vaals, Bernissart, Vert Galand, Esplechin en Maisière	krijt met mergel en zand
g_0403KR_Ak_b	Fm Aken	zand
g_05JU_Aa_Sl_b	Fm Aalburg en Sleen	kleisteen met silt tot zand
g_06TR_Ke_Mu_Ro_Bu_07PE_He_b	Fm Keuper, Muschelkalk, Röt, Buntsandstein en Helchteren	zandsteen met klei, evaporiet en mergel
g_0801CA_We_b	Fm Neeroeteren, Flénu, Charleroi en Châtelet	zandsteen met steenkool, kleisteen en conglomeraat
g_0802CA_Na_b	Fm Andenne, Chokier en Gottignies	kleisteen en zandsteen met steenkool en kalksteen
g_0803CA_Di_b	Dinantiaan	kalksteen
g_09DE_b	Devoon	zandsteen met kleisteen en kalksteen

3.2.4 Analyse dataonderzoek

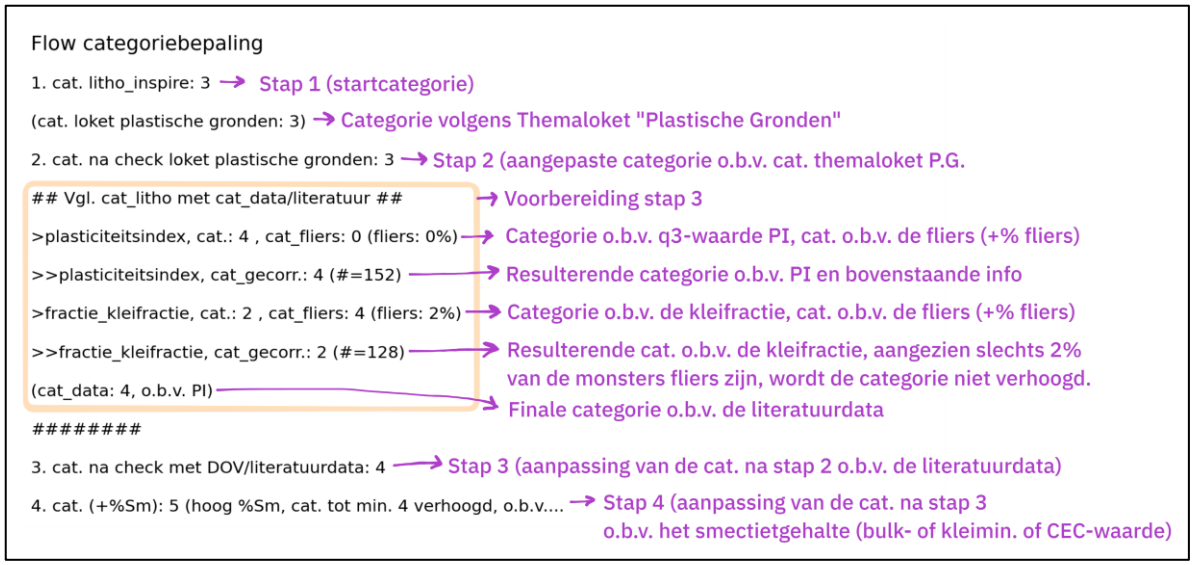
Alle data (zowel uit literatuurbronnen als verkregen uit de DOV-grondmonsters met laboproeven) werd verzameld in een datafiche per G3Dv3-laag. Een overzicht van alle datafiches is opgenomen in Bijlage B. Figuur 19 toont als voorbeeld de datafiche die werd opgesteld met de beschikbare data voor Ld Orchies (Fm Kortrijk). Elke datafiche is volgens een vast patroon opgebouwd:

- In de linkerhelft van de datafiche:
    A. In de linker kolom bovenaan: algemene informatie omtrent het Lid of de Formatie.
    B. In de linker kolom centraal staat de informatie over de toegewezen gevoeligheidscategorie:
        - (*Categorie litho_inspire*) De categorie op basis van de lithologische beschrijving volgens Inspire = startcategorie (stap 1 van de methodologie voor de bepaling van de gevoeligheidscategorie voor elke G3Dv3-laag, zie paragraaf 6.1.1).
        - (*Categorie loket_PG*) De categorie op basis van de informatie gebruikt in Themaloket 'Plastische Gronden' (stap 2 van de methodologie).
        - (*Categorie verfijnd*) De uiteindelijk toegekende categorie (na stap 4 van de methodologie).
        - (*Flow categoriebepaling*) Verder geeft dit deel gedetailleerd de flow weer ter bepaling van de uiteindelijke gevoeligheidscategorie. Een detail van deze flow met bijkomende toelichting is opgenomen in Figuur 18.
- In de rechterhelft van de datafiche:
    1. Plasticiteitsindex in functie van de kleifractie voor zowel DOV-grondmonsters met laboproeven (blauw) als literatuurdata (groen).
    2. Boxplots van de plasticiteitsindex (tussen haakjes telkens het aantal beschikbare monsters):
        - PI = plasticiteitsindex o.b.v. DOV-grondmonsters met laboproeven
        - PI_literatuur = plasticiteitsindex o.b.v. literatuurdata
        - DOV+lit. = plasticiteitsindex o.b.v. data van 'PI' en 'PI_literatuur' samengevoegd
        - PI' = de gemodificeerde plasticiteitsindex (voor DOV-grondmonsters met laboproeven)
        - Pfefferkorn = de plasticiteit bepaald volgens Pfefferkorn
        - PI_bovenliggend_Q = plasticiteitsindex van de bovenliggende quartaire lagen
    3. Boxplots van de vloeigrens (tussen haakjes telkens het aantal beschikbare monsters):
        - Vloeigrens = vloeigrens o.b.v. DOV-grondmonsters met laboproeven
        - Vloeigrens lit. = vloeigrens o.b.v. literatuurdata
    4. Boxplots van de kleifractie (tussen haakjes telkens het aantal beschikbare monsters):
        - Monsters met PI = kleifractie o.b.v. DOV-grondmonsters met laboproeven waarvoor ook de plasticiteitsindex werd bepaald
        - Alle monsters = kleifractie o.b.v. alle DOV-grondmonsters met laboproeven (ook deze waarvoor geen plasticiteitsindex werd bepaald)
        - Literatuur = kleifractie o.b.v. literatuurdata
        - DOV + lit. = kleifractie o.b.v. data van 'Alle monsters' en 'Literatuur' samengevoegd
        - Literatuur (min-max) = kleifractie o.b.v. literatuurdata waarvoor een range (minimale en maximale waarde) werd opgegeven
    5. Boxplots van de CEC (tussen haakjes telkens het aantal beschikbare monsters):
        - CEC_literatuur = CEC o.b.v. literatuurdata

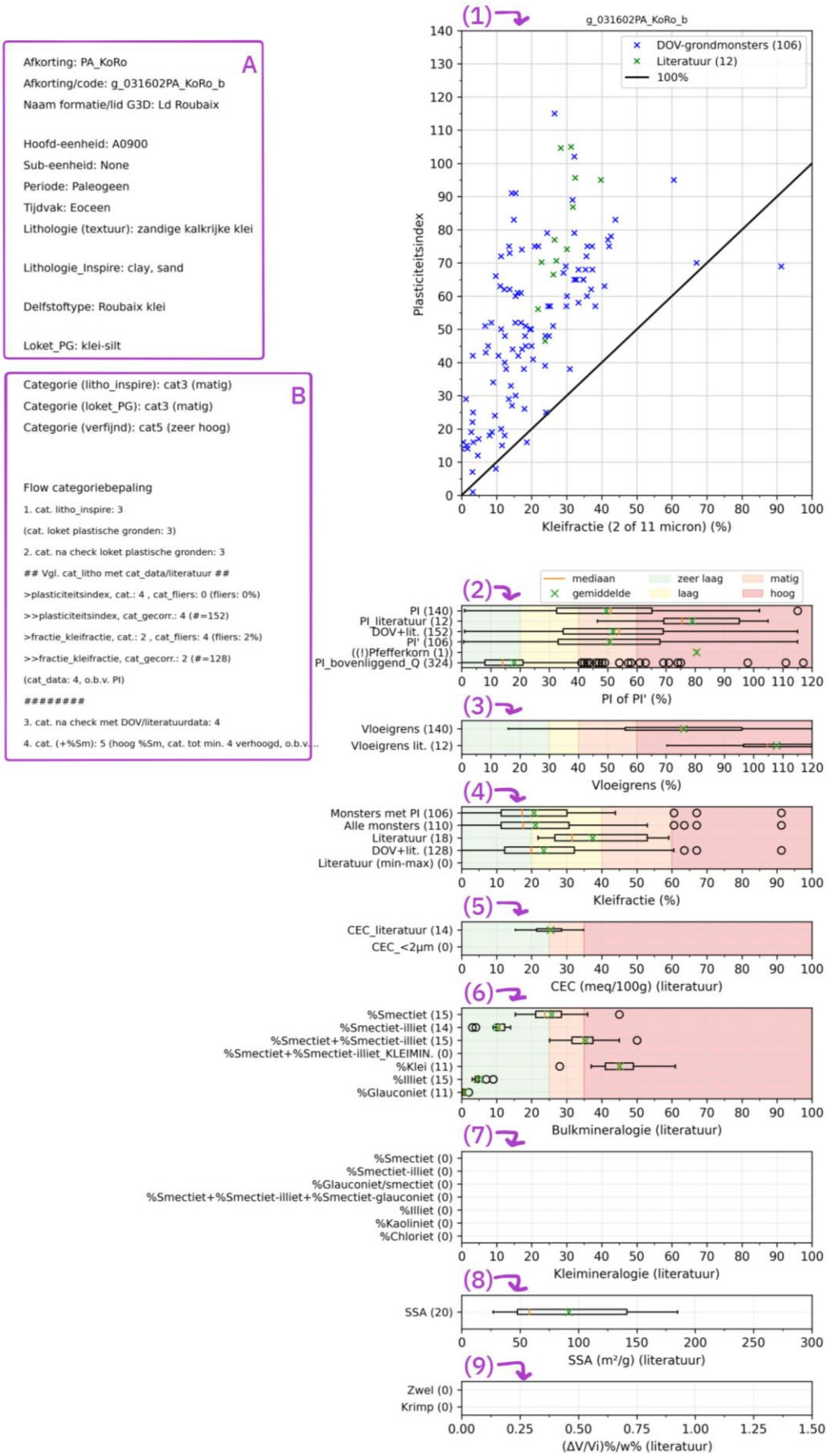
- CEC_<2µm = CEC bepaald voor de kleifractie o.b.v. literatuurdata

6. Boxplots van de bulkmineralogie (tussen haakjes telkens het aantal beschikbare monsters):
   - % van de aangegeven mineralen in de bulkmineralogie
   - %Smectiet+%Smectiet-Illiet_KLEIMIN = aanwezigheid van smectiet en smectiet-illiet in de bulkmineralogie bepaald op basis van de aanwezigheid in de kleimineralogie vermenigvuldigd met de kleifractie (q_3-waarde van de kleifractie van de hele beschikbare dataset)
7. Boxplots van de kleimineralogie (tussen haakjes telkens het aantal beschikbare monsters):
   - % van de aangegeven mineralen in de kleimineralogie
8. Boxplot van de SSA of Specific Surface Area (tussen haakjes telkens het aantal beschikbare monsters)
9. Boxplot van de volumeverandering bij veranderend watergehalte op basis van zwel- en krimpproeven (tussen haakjes telkens het aantal beschikbare monsters)

(!) Ter herinnering: de q_1-/25%- en q_3-/75%-kwantielwaarden worden in een boxplot weergegeven een rechthoek.

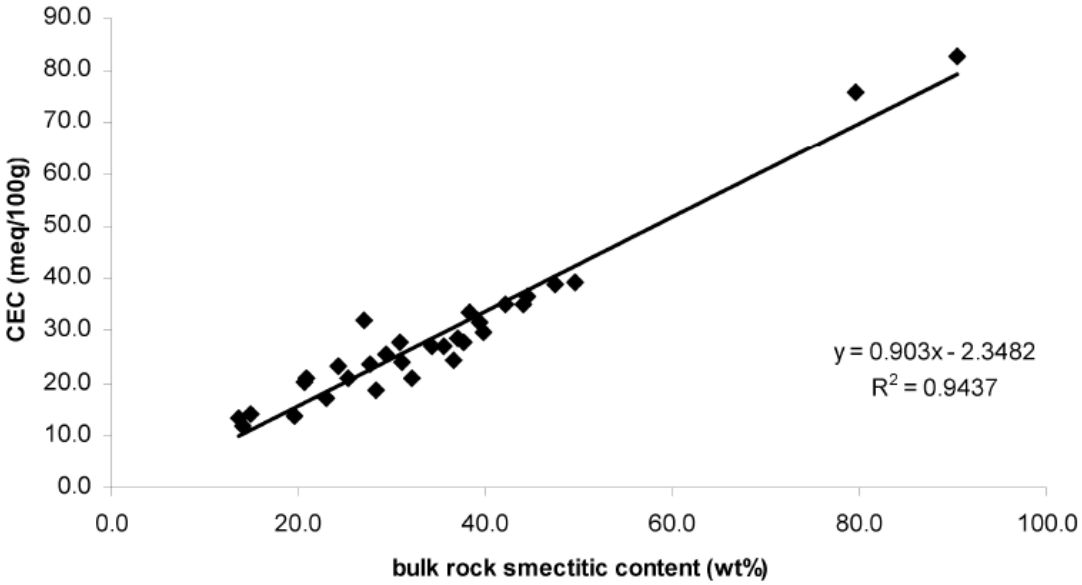


Figuur 18. Voorbeeld van de flow voor de bepaling van de gevoeligheidscategorie zoals opgenomen in de datafiches (Figuur 19) met bijkomende toelichting.

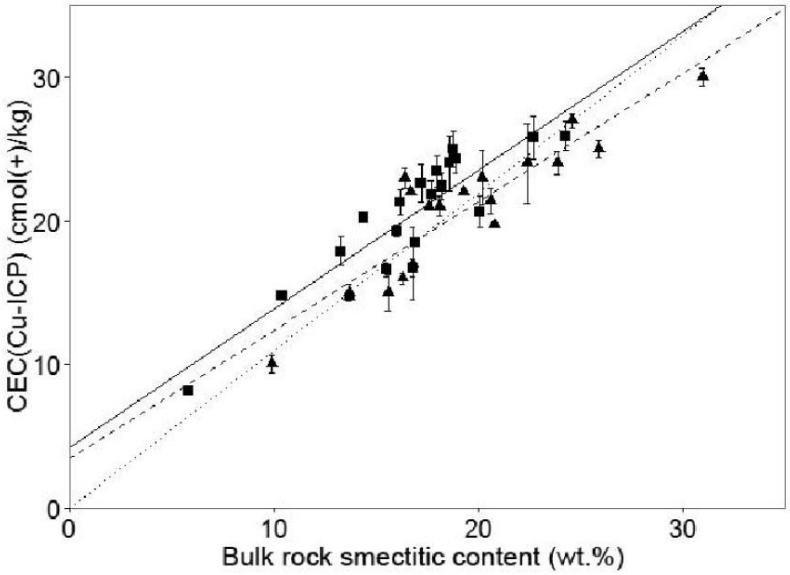


Figuur 19. Datafiche van Ld Orchies (Fm Kortrijk) als voorbeeld. Zo is er voor elke G3Dv3-laag een datafiche opgemaakt.

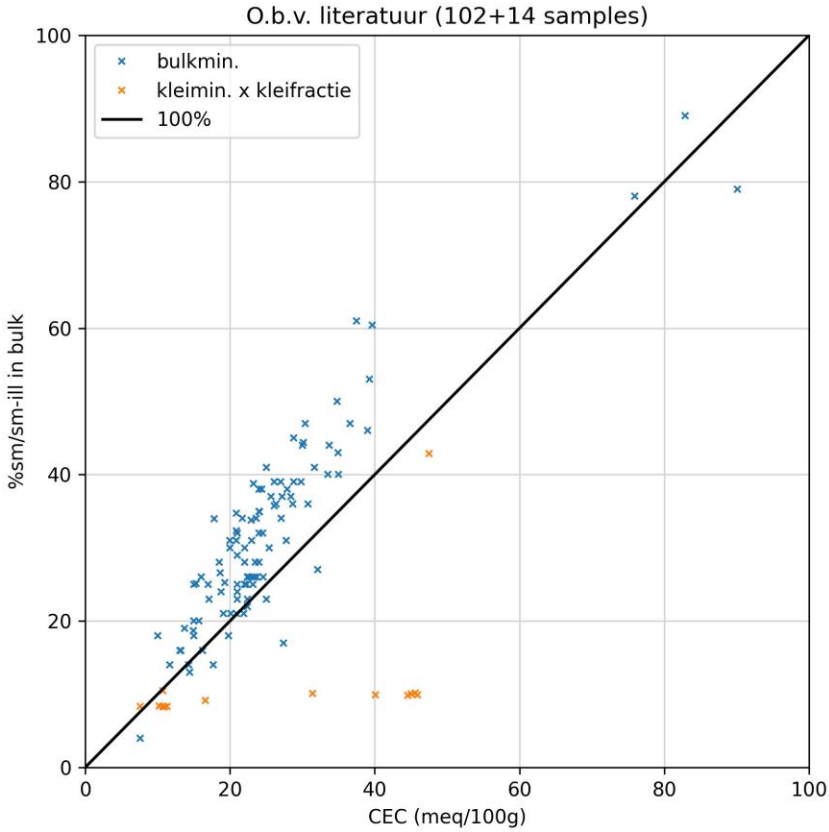
Naast de verzamelde data en een aantal globale inzichten omtrent de mineralogische en lithologische samenstelling van de Vlaamse ondergrond (zie paragraaf 3.2.2 “Literatuurbronnen en ruimtelijke databank”), bracht het dataonderzoek ook een aantal interessante inzichten in de correlatie tussen verschillende paramaters. Onder andere Zeelmaekers (2011), Frederickx et al. (2018) en Frederickx (2019) wezen al op de relatie tussen smectietgehalte in de bulkmineralogie en de CEC-waarde (voor de Boomse klei). De CEC-waarde blijkt een goede voorspeller te zijn van het smectietgehalte in de bulkmineralogie (geïllustreerd in Figuren 20 en 21). Deze link komt ook terug uit de verzamelde literatuurdata (zie Figuur 22 voor alle samples).



Figuur 20. Link tussen smectietgehalte in de bulkmineralogie (inschatting) en de CEC-waarde voor de Boomse klei, zoals gerapporteerd door Zeelmaekers (2011).

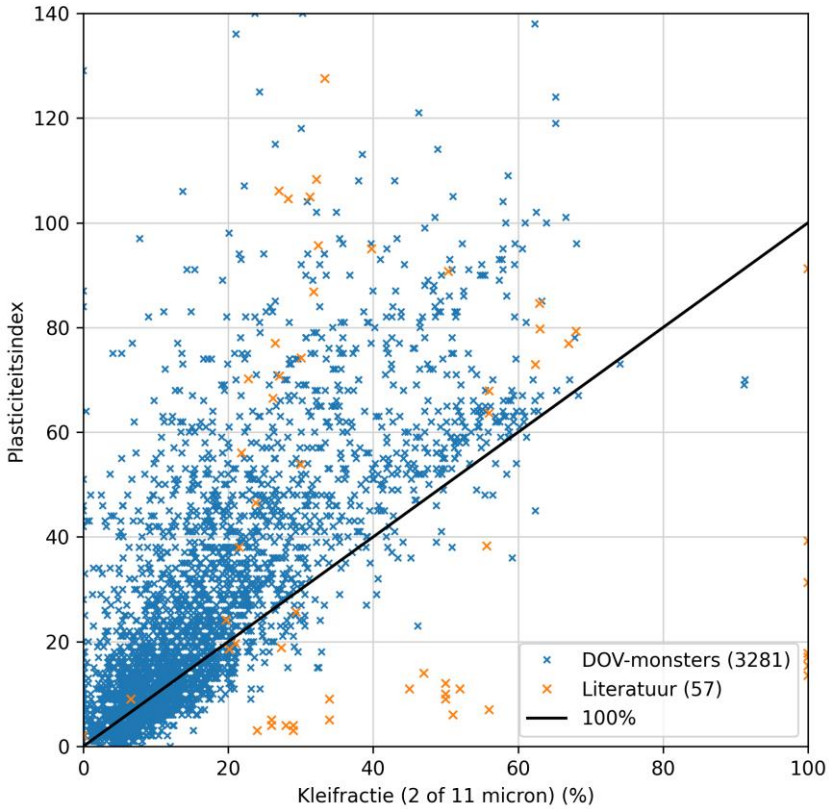


Figuur 21. Smectietgehalte vs. CEC-waarde voor de Boomse klei zoals getoond door Frederickx et al. (2018).



Figuur 22. Som van %smectiet en %smectiet-illiet (bulkmineralogie) in functie van de CEC-waarde, op basis van alle beschikbare literatuurdata.

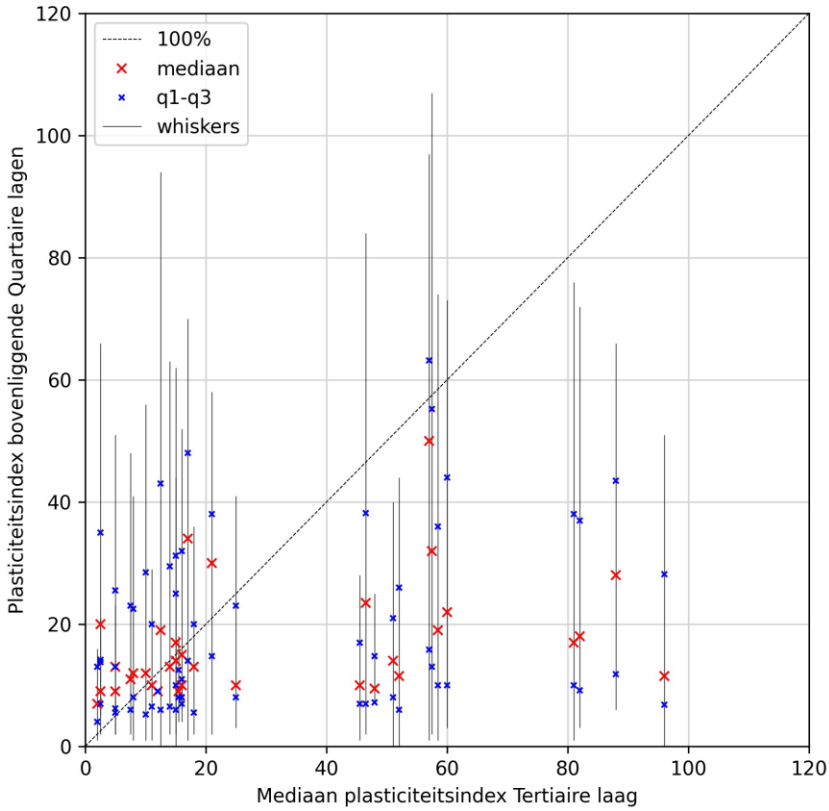
Figuur 23 toont de plasticiteitsindex in functie van de kleifractie voor alle DOV-grondmonsters met laboproeven en literatuurdata. Op basis van deze figuur kan gesteld worden dat de kleifractie als een vrij betrouwbare minimummaat kan worden gehanteerd voor de plasticiteitsindex. Deze benadering laat toe om ook voor G3Dv3-lagen waar weinig of geen data over de plasticiteit beschikbaar is een inschatting te maken van het krimp-/zwelpotentieel. Het is wel belangrijk de beperkingen van het gebruik van korrelgrootteverdeling voor de inschatting van het zwel-krimppotentieel in achterhoofd te houden (paragraaf 3.1.2.4).



Figuur 23. Plasticiteitsindex in functie van kleifractie voor alle DOV-grondmonsters met laboproeven en literatuurdata.

Verder werd er op basis van de verzamelde data (DOV-grondmonsters met laboproeven) een (ruwe) analyse gemaakt van de link tussen de plasticiteitsindex van quartaire lagen en die van de eerst ondergelegen Tertiaire laag. Figuur 24 toont in functie van de mediaan van de plasticiteitsindex van de Tertiaire laag de range van de plasticiteitsindex van alle bovengelegen quartaire lagen. Merk op dat deze data ook is opgenomen in de datafiches per G3Dv3-laag (onderste parameter in de boxplots van de plasticiteitsindex, "PI_bovenliggend_Q"). Op basis van deze data is er niet meteen een duidelijke link waar te nemen tussen de plasticiteitsindex van de ondergelegen Tertiaire laag en die van het bovengelegen quartair.

Ten slotte werd ook onderzocht of bepaalde Quartaire lagen ruimtelijk nauwkeuriger kunnen worden onderverdeeld dan de huidige G3Dv3-modellering. Hiervoor werd de plasticiteitsindex (maximale waarde per boring) voor de verschillende Quartaire G3Dv3-lagen ruimtelijk uitgezet (figuren zie Bijlage C). Op basis van de beschikbare gegevens lijkt het momenteel echter moeilijk om dergelijke ruimtelijke verfijning uit te voeren. Zo zijn er op het eerste zicht geen duidelijke clusters met hogere/lagere waarden van de plasticiteitsindex te identificeren. Merk op dat enkel de figuren worden getoond voor lagen met beschikbare data.



Figuur 24. Plasticiteitsindex (mediaan, q_1- en q_3-waarde en whiskers) van de bovenliggende Quartaire lagen in functie van de mediaan van de plasticiteitsindex van de eerst onderliggende Tertiaire laag, op basis van de beschikbare data van de DOV-grondmonsters met laboproeven.

4 RUIMTELIJKE ANALYSE VAN BODEMBEWEGINGEN

4.1 INLEIDING

Deze deeltaak maakte slechts een beperkt deel uit van de studie. Er werd vrij summier nagegaan wat de mogelijkheden zijn van InSAR-technologie om krimp-/zwelgevoelige gebieden te lokaliseren. Daarvoor werd voor een aantal gekende schadegevallen gekeken naar de beschikbare, historische InSAR-data.

4.2 INSAR-TECHNOLOGIE

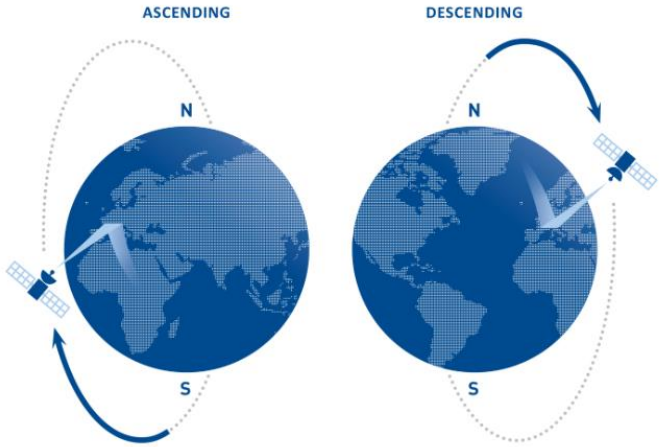
InSAR staat voor Interferometric Synthetic Aperture Radar. Aan de hand van radarbeelden van het aardoppervlak gemaakt door satellieten kunnen (langzame) verplaatsingen op het aardoppervlak tot op millimeterschaal worden opgevolgd. Hierbij komen complexe en geavanceerde analyses kijken. Een van de voordelen van InSAR is dat ook historische satellietbeelden kunnen gebruikt worden en dat er op die manier dus informatie uit het verleden kan worden verkregen.
Er kan gewerkt worden met beelden van verschillende satellietsystemen. Elk systeem gaat gepaard met bepaalde eigenschappen zoals frequentie van de beelden, spatiale resolutie (aantal meetpunten per vierkante kilometer), nauwkeurigheid, e.d.

Wanneer een radarsatelliet een signaal uitstuurt, wordt dit op het aardoppervlak gereflecteerd (De Vos, 2023). De reflectie (faseverschuiving) geeft info over de afstand tussen het object en de satelliet. Door gebruik te maken van 2 satellieten (2 kijkrichtingen: ascending en descending) is een ontbinding van deze afstand in een horizontale en verticale beweging (oost-west) mogelijk. Dit principe wordt geïllustreerd in Figuur 25. De analyse van meerdere beelden laat toe om de evolutie van verplaatsingen doorheen de tijd op te volgen (nauwkeurigheid 1mm/jaar bij de beste omstandigheden).

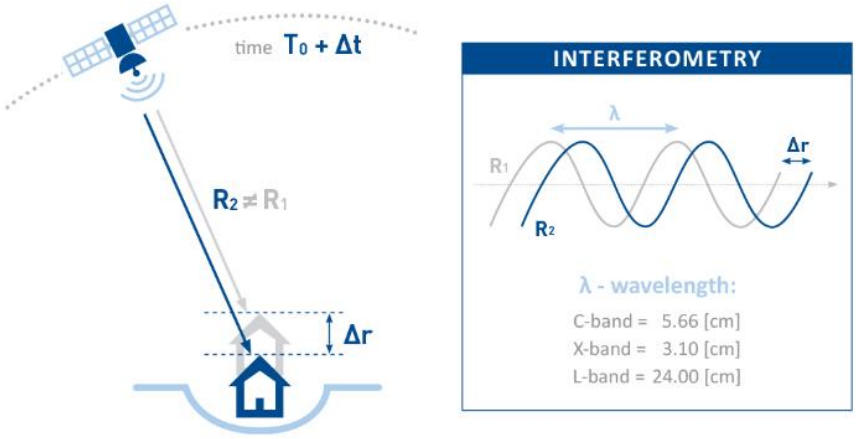
Aandachtspunten bij deze technologie zijn o.a. (onder meer op basis van De Vos (2023)):

- Objecten moeten voldoende reflecteren.
- Nabijheid van water kan het resultaat beïnvloeden.
- Vegetatie is een probleem (afhankelijk van de golflengte van het radarsignaal en het type vegetatie).
- De maximale opmeetbare verplaatsing is functie van de golflengte van het radarsignaal.
- Het is onduidelijk wat precies reflecteert binnen een pixel (precieze locatie reflector is niet gekend).
- Zoals al aangegeven zijn er verschillende satellietsystemen met elk hun eigen performantie en eigenschappen. Sentinel-1 beelden kunnen gratis gebruikt worden. De European Ground Motion Service (EGMS) stelt jaarlijks een update de verwerkte beelden online ter beschikking. Meer nauwkeurige beelden van de Terrasar-X satellieten zijn dan weer betalend.
- De omzetting van de beelden tot direct bruikbare verplaatsingen is eerder complex. Enkel met speciaal ontwikkelde algoritmes wordt de beste nauwkeurigheid verkregen.
- De InSAR-technologie ontwikkelt zich nog volop. Zo worden er nog steeds nieuwe, meer geavanceerde satellieten gelanceerd die bv. beelden met kleinere pixels kunnen maken (en dus een grotere spatiale resolutie hebben).

- Andere studies wezen uit dat het momenteel nog niet mogelijk is om differentiële zettingen rond gebouwen te detecteren (onderzoek Deltares, mondeling meegedeeld).



a.

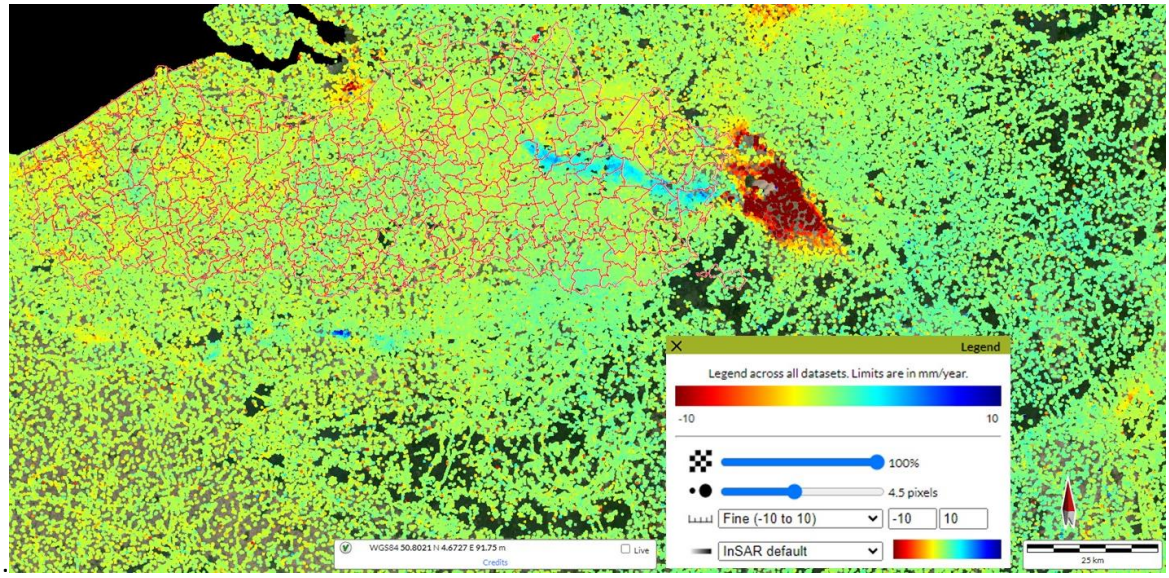


b.

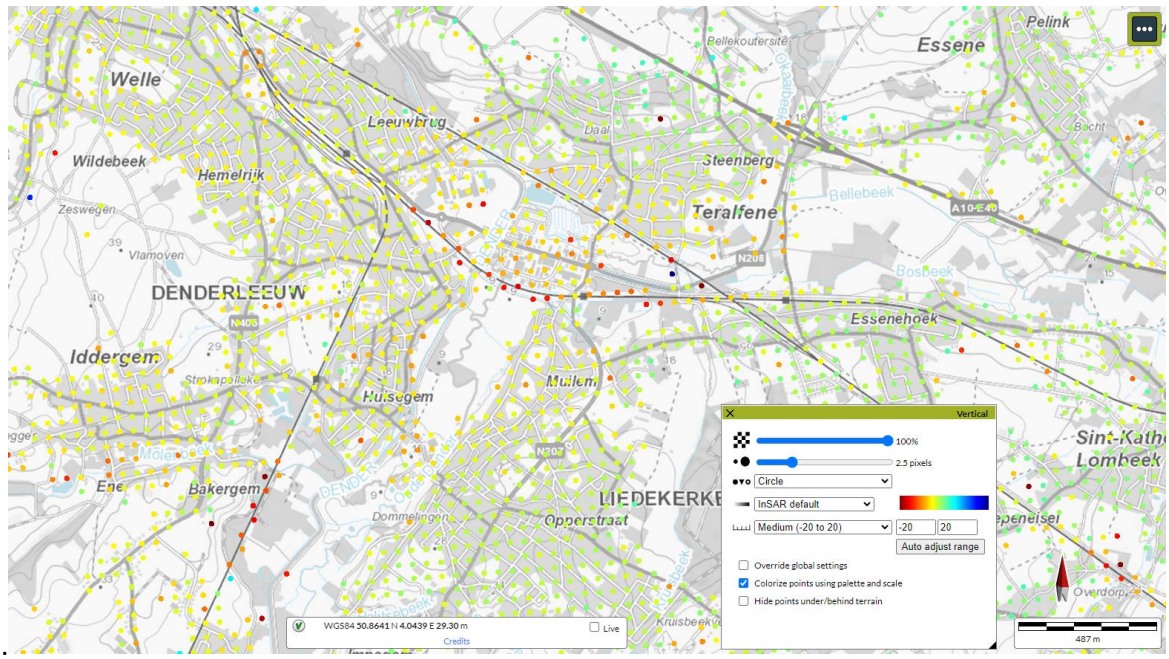
Figuur 25. Principe van de werking van InSar. (a) 2 satellieten draaien in omgekeerde draairichting rond de aarde (ascending en descending). (b) De phase shift van het gereflecteerde radarsignaal t.o.v. het uitgestuurde signaal geeft informatie over de afstand tussen het object en de satelliet.

Enkele voorbeelden van de Sentinel-1 beelden die gratis kunnen worden geraadpleegd op de EGMS-website worden gegeven in Figuur 26. Ter vergelijking met de Sentinel-1 beelden wordt in Figuur 27 een voorbeeld getoond van de Terrasar-X beelden. Deze beelden zijn enkel tegen betaling te verkrijgen. In het kader van de innovatieve overheidsopdracht "Monitoring structural health of bridges with InSAR" werden er beelden aangekocht (periode 2014-2016), die ook ter beschikking werden gesteld van dit project. Het betreft een beperkt gebied dat zich uitstrekt van Brussel tot Antwerpen (Figuur 27a). Het valt meteen op dat de Terrasar-X beelden een veel denser pixelpatroon leveren en bovendien niet volgens een rasterpatroon zijn gepositioneerd (Figuur 27b en c).

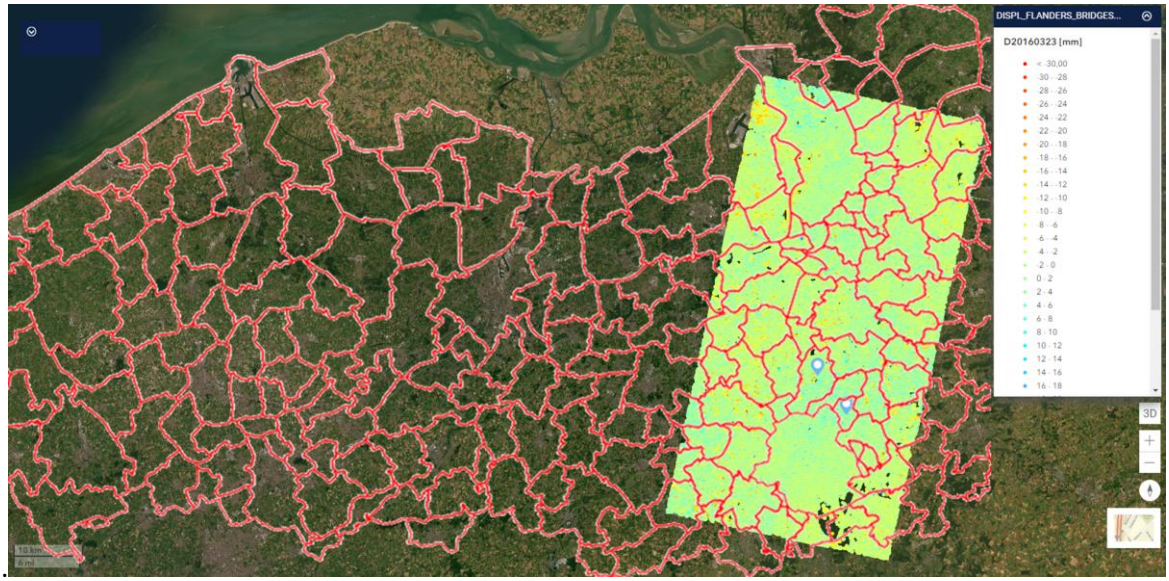
a.



b.



Figuur 26. Voorbeeld van de verwerkte Sentinel-1 beelden gratis ter beschikking gesteld via de EGMS-website. (a) Voor heel Vlaanderen (de gemeentegrenzen werden voor dit voorbeeld bij benadering manueel over de kaart gelegd). (b) Een detailvoorbeeld van de gegevens die op de EGMS-website ter beschikking worden gesteld. De beschikbare datapunten worden in een raster weergegeven. Er is geen informatie over de precieze locatie(s) van elk datapunt.

a.


b.

c.

Figuur 27. (a) Het gebied waarvoor Terrasar-X beelden beschikbaar zijn (2014-2016) in het kader van een innovatieve overheidsopdracht. (b) Een voorbeeld van het dense pixelpatroon verkregen met de betalende Terrasar-X beelden. (c) Een zoom van het pixelpatroon op basis van de Terrasar-X beelden.

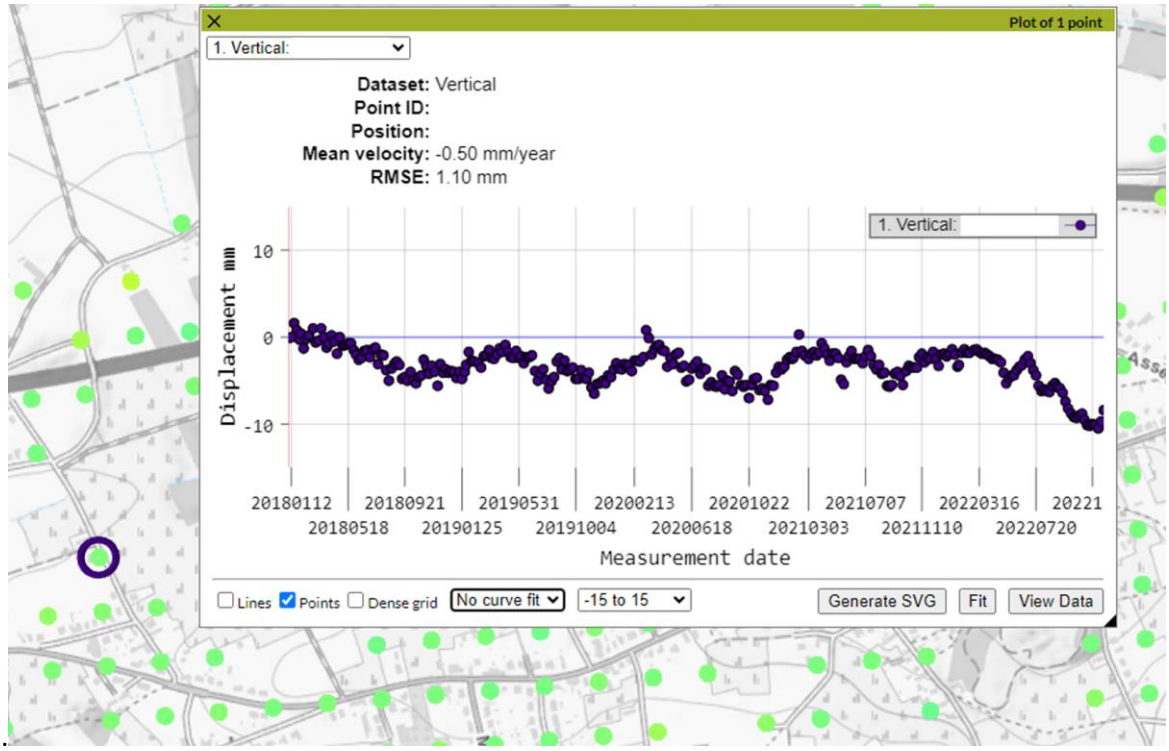
4.3 INSAR-ANALYSE VAN EEN AANTAL SCHADEGEVALLEN

Figuren 28, 29 en 30 tonen telkens 2 meetreeksen (verticale verplaatsingen) op basis van de Sentinel-1 beelden in de buurt van gekende schadegevallen, waar grote (differentiële) zettingen werden opgemeten, soms tot meer dan 20cm. De data toont dan wel een licht dalende trend doorheen de tijd, maar de sterke (differentiële) zettingen die bij deze cases werden opgemeten, kunnen niet uit deze data afgeleid worden. Merk wel op dat de meetreeksen wel vrij consistent zijn en ook kleine seizoensgebonden variaties capteren.
Ter vergelijking wordt in Figuur 31 opnieuw het schadegeval uit Figuur 28 getoond, maar dan op basis van de Terrasar-X data. De online toepassing die deze gegevens ontsluit, bevat bovendien meer geavanceerde functies, die bv. toelaten gemiddelde tijdsreeksen van meerdere pixels weer te geven. Dit werd gedaan voor de beschikbare pixels rond het schadegeval. Uit de resulterende tijdsreeks, die enkel de periode 2014-2016 beslaat, valt echter weinig af te leiden. Ze toont weinig of geen evolutie aan het maaiveld. Aangezien er geen tijdsoverlap is met de Sentinel-1 beelden, is het niet mogelijk beide met elkaar te vergelijken.

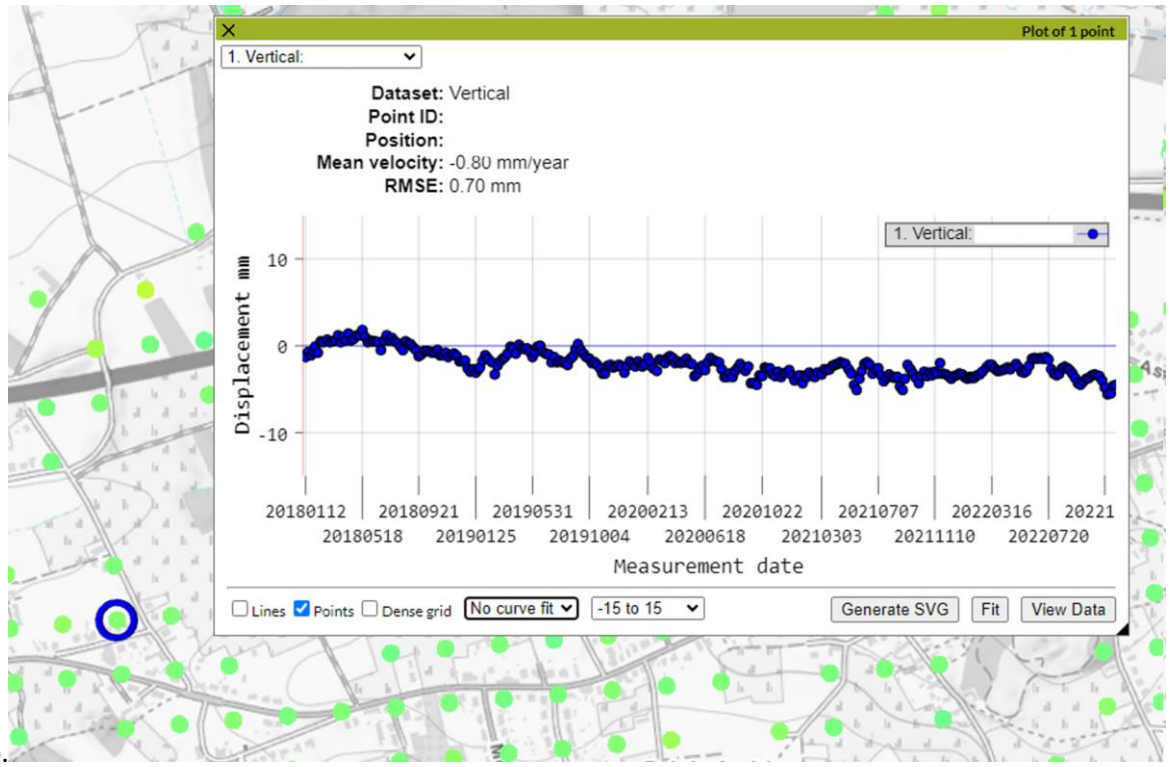
4.4 CONCLUSIES

De voorbeelden tonen dat InSAR erg veel potentieel heeft. Op lokale schaal is het echter (voorlopig nog) moeilijk om lokale fenomenen nauwkeurig te capteren. Op grote schaal is de data wellicht wel te exploiteren, maar dan stelt zich vooral de vraag hoe verticale verplaatsingen ten gevolge van krimp-/zwelfenomenen te onderscheiden van andere fenomenen die eveneens een effect hebben op de evolutie van het maaiveldniveau (zoals bv. een variërende grondwatertafel, (oude) ondergrondse ontginningen, enz.). Het gebruik van dergelijke data om de krimp-/zwelproblematiek van plastische gronden mee in kaart te brengen, zal dus een globale aanpak vragen door specialisten, die een gedetailleerd en volledig inzicht hebben in alle fenomenen die bodemdalingen/-stijgingen veroorzaken.
Daarnaast moet er ook gewezen worden op het belang van de kwaliteit van de processing van de radarbeelden en hun omzetting naar verticale verplaatsingen. Afhankelijk van de gebruikte algoritmes is deze kwaliteit verschillend.
Ten slotte moet men zich ook bewust zijn van de enorme hoeveelheid aan data die met deze beelden gepaard gaat. Het gebruik ervan voor analyses op grote schaal zal specifieke software vragen.

a.

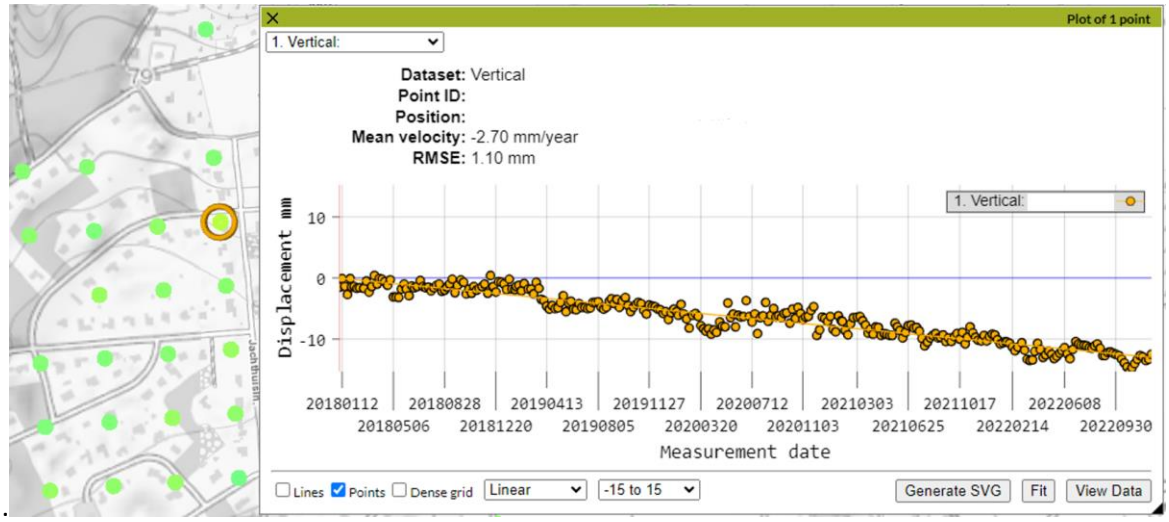


b.

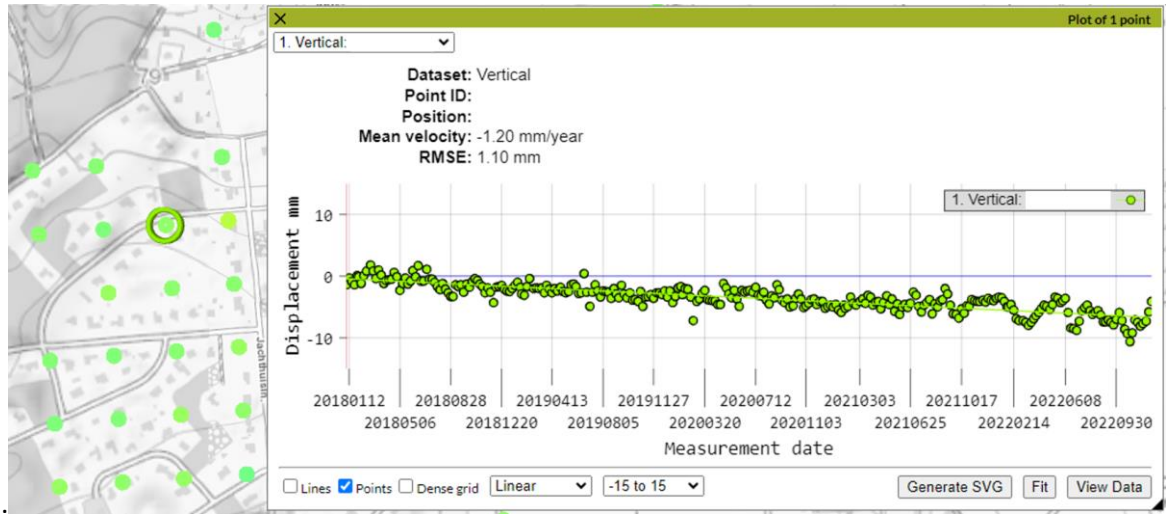


Figuur 28. (a) en (b) Twee meetreeksen van pixels in de buurt van een gekend schadegeval met differentiële zettingen van meer dan 20cm op basis van de Sentinel-1 beelden ter beschikking gesteld door EGMS (achtergrondkaart: NGI Cartoweb).

a.

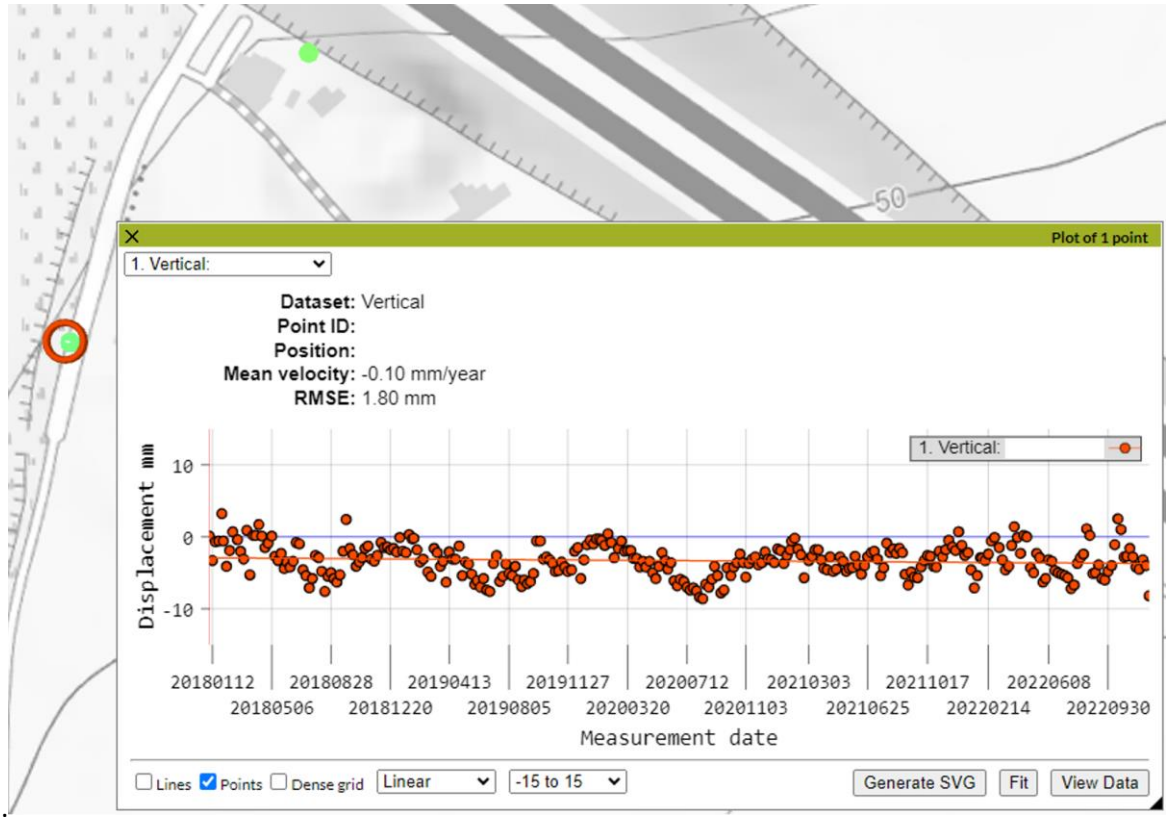


b.



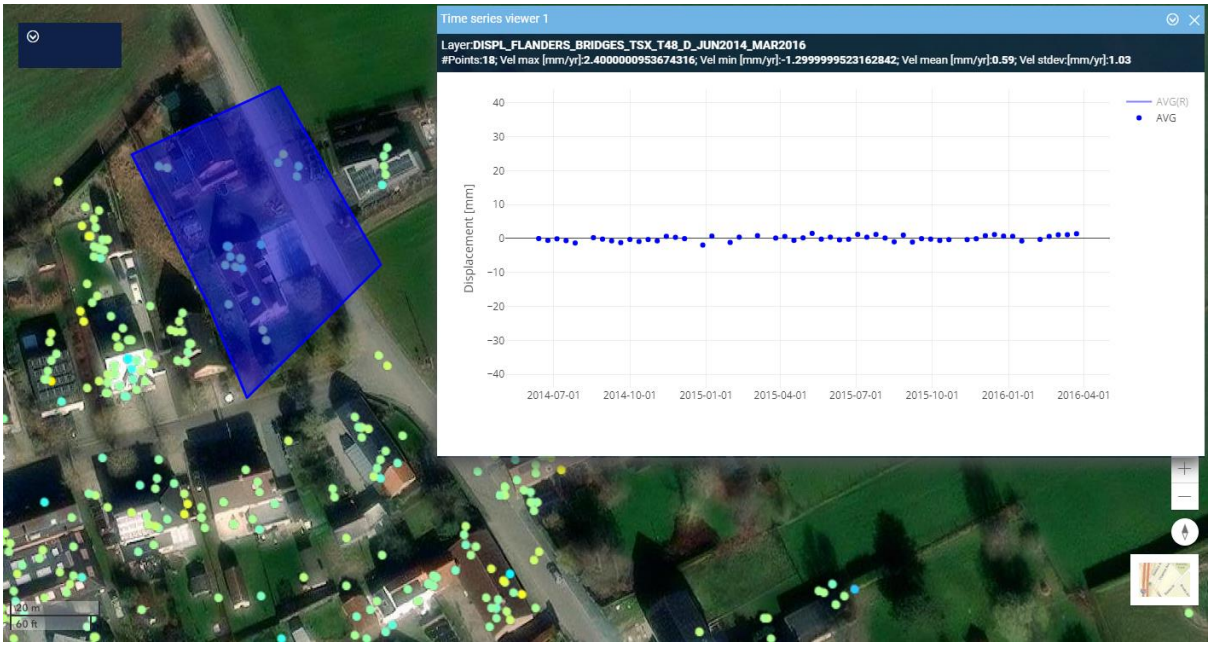
Figuur 29. (a) en (b) Twee meetreeksen van pixels in de buurt van een gekend schadegeval met differentiële zettingen van ongeveer 10cm op basis van de Sentinel-1 beelden ter beschikking gesteld door EGMS (achtergrondkaart: NGI Cartoweb).

a.



b.

Figuur 30. (a) en (b) Twee meetreeksen van pixels in de buurt van een gekend schadegeval (aanzienlijke zettingen, maar grootte onbekend) op basis van de Sentinel-1 beelden ter beschikking gesteld door EGMS (achtergrondkaart: NGI Cartoweb).



Figuur 31. Terrasar-X beeld ter hoogte van het schadegeval van Figuur 28. De meer geavanceerde software geeft mogelijkheid een gemiddelde meetreeks weer te geven van geselecteerde punten. Let op, de weergegeven data beslaat enkel de periode van 2014-2016.

5 IN-SITU CASES

5.1 INLEIDING

In het kader van voorliggende studie werd er vooropgesteld om een drietal cases (schadegevallen) van naderbij te bestuderen. Het idee was om hierbij sites te selecteren met uiteenlopende grondtypes (Formatie van Kortrijk, Formatie van Diest, ...). Uiteindelijk werden er 3 sites uitgekozen, waarvan er 2 cases in sectie 5.2 in detail worden besproken. Van de derde site waren er op het moment van opstelling van deze rapportage nog geen finale laboresultaten beschikbaar. Enerzijds werd er op deze sites bijkomend grondonderzoek (boringen en sonderingen) uitgevoerd (inclusief laboproeven op geroerde en ongeroerde monsters, zoals korrelverdeling, Atterbergse grenzen, watergehalte, volumieke massa, kalk/humusgehalte, krimp-/zwelproeven, ..., maar ook bepaling van de mineralogische samenstelling). Anderzijds monitorde Buildwise de waterverzadiging van de ondiepe ondergrond op twee van deze sites met behulp van Watermark-sensoren.

Buildwise werkte in het verleden al vaker met Watermark-sensoren om de zuigspanningen in de ondiepe ondergrond op te volgen. Dit gebeurde in het kader van onderzoek naar schijnbare cohesie in onverzadigde gronden (Tomboy et al., 2008). Watermark-sensoren (Irrometer) bestaan uit een granulaire matrix waarin elektrodes zijn ingebed. De gemeten weerstand varieert met het watergehalte in de matrix (Whenham et al., 2010) en wordt door het toestel omgerekend naar de zuigspanning of matrixpotentiaal van de grond (via een kalibratie van de sensor bij productie). Een matrixpotentiaal van 0 kPa komt overeen met een volledig verzadigde grond, waarin geen zuigspanningen optreden. De sensor heeft een meetbereik tot 239 kPa, wat overeenkomt met een zeer laag watergehalte. De conversie tussen matrixpotentiaal/zuigspanning en watergehalte dient te gebeuren op basis van waterretentiecurves, die in principe site-specifiek moeten opgesteld worden. Ook zonder dergelijke waterretentiecurves zijn dergelijke metingen nuttig in het kader van dit project, aangezien ze ook zo een goed beeld geven van de evolutie van de waterverzadiging van de ondergrond. Het voordeel van deze sensoren is hun kostprijs en laag energieverbruik, waardoor ze lang en autonoom kunnen meten.

Figuur 32. Foto van een Watermark-sensor (bron: www.irrometer.com).

Op de Watermark-meetboxen waarover Buildwise beschikt, kunnen een 7-tal sensoren worden aangesloten, inclusief een temperatuursensor. Typisch worden de Watermark-sensoren in verschillende kleine boorgaten naast elkaar op verschillende dieptes geïnstalleerd. De boorgaten worden uitgevoerd met een handboor en hebben een diameter die iets groter is dan de Watermark-sensor zelf. De laatste 10-tal centimeter van de boring wordt uitgevoerd met een diameter gelijk aan die van de Watermark-sensor. Vervolgens wordt de Watermark-sensor in het boorgat neergelaten en zacht tot op de bodem van het boorgat geduwd. Op deze manier wordt een goed contact met de omringende grond verzekerd. Tenslotte wordt het boorgat opgevuld met bentoniet om waterinsijpeling via het boorgat te voorkomen. De temperatuursensor wordt typisch bij de bovenste Watermark-sensor gepositioneerd.

5.2 BESPREKING CASES

5.2.1 Case 1: Ternat

De eerste case bevindt zich in Ternat. De woning onderging de voorbije jaren een sterke differentiële zetting van 25cm die zich voordoet op de zuidoosthoek van de woning ten opzichte van de noordwesthoek (zie Figuur 33). De woning is gefundeerd op een strookfundering die is aangezet op vorstvrije diepte (naar schatting 0.7 à 0.8m diepte). Op deze site werden door Afdeling Geotechniek (departement MOW) 2 boringen en 1 handboring uitgevoerd, alsook 3 sonderingen. Buildwise installeerde in de buurt van boring B1 (zijde boom) en handboring HB3 (zijde oprit) 2 sets Watermark-sensoren. De laboproeven op de grondmonsters werden uitgevoerd door Afdeling Geotechniek, met uitzondering van de kleimineralogie en de CEC-waarden die door Qmineral bepaald werden in opdracht van VPO. De grondmonsters worden na het project bewaard in de Geotheek van departement Omgeving.

Figuur 33. Situering van case 1 (Ternat): de ligging van de woning, de boringen, de Watermark-sensoren en de treurwilg aan de voorkant van de woning. De 3 sonderingen zijn uitgevoerd in de buurt van de boringen. De richting van de optredende differentiële zetting is aangegeven in het rood.

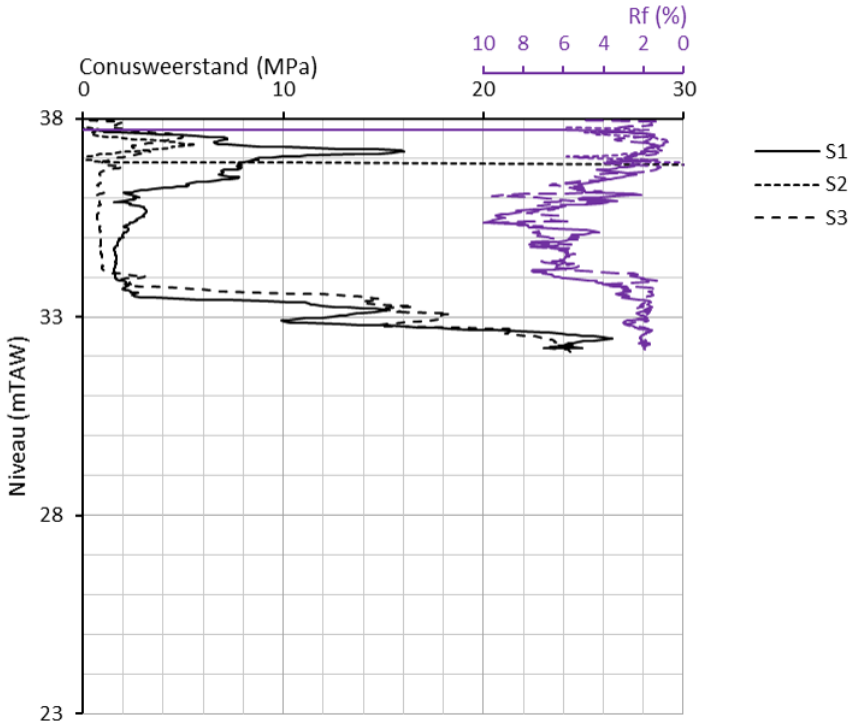
De resultaten van de sonderingen zijn weergegeven in Figuur 34. De sonderingen zijn uitgevoerd in de buurt van de boringen. Sondering S2 is niet op de vooropgestelde diepte geraakt. Sondering S1 toont in de bovenste 4m hogere conusweerstanden dan sondering S3. Tabellen 11, 12, 13 en 14 geven een overzicht van de monsters en hun (lithologische) beschrijving, de resultaten van de onderkenningsproeven, de kleimineralogie en CEC-waarde (bulkstaal) en de watergehaltes van de grondmonsters. Zowel in boring B1 als B2 werden zeer hoge waarden van de plasticiteitsindex opgemeten (73 tot 91). Voor B3 zijn geen waarden beschikbaar. De monsters met een hoge plasticiteitsindex vertonen volgens de krimp-/zwelproeven ook een grote krimp-/zwelgevoeligheid (zie Figuur 35 voor een detailresultaat van deze proeven) en hebben hogere CEC-waarden (rond 45 meq/100g). Door het percentage smectiet in de kleimineralogie te vermenigvuldigen met het % kleifractie voor dat staal, kan het percentage smectiet in de bulkmineralogie geschat worden. Deze waarden liggen vrij goed in lijn met de CEC-waarden van het bulkstaal, al zijn ze systematisch iets hoger (zie ook relatie in Figuren 20 en 21). Het percentage van de som van smectiet, illiet-smectiet en glauconiet-smectiet in de bulkmineralogie geschat op basis van het % kleifractie ligt voor de kleistalen dan weer aanzienlijk hoger dan de gemeten CEC-waarden van de bulkstalen. Voor de meer zandige stalen is de overeenkomst dan weer beter.

Deze metingen tonen dat er in de ondergrond van deze site sterk krimp-/zwelgevoelige lagen voorkomen. De waarden voor plasticiteitsindex, vloeigrens en kleifractie van meerdere grondmonsters vallen binnen grenzen die wijzen op hoog en zelfs zeer hoog krimp-/zwelpotentieel, ongeacht de gebruikte classificatie (zie Tabellen 6 en 7). De hoge waarden voor de vloeigrens zijn opvallend. Deze aanwijzingen werden teruggevonden in de 3 boringen rond het huis. De diepteprofielen van de watergehaltes bepaald op de verschillende ongeroerde en geroerde monsters zijn voor de 3 boringen weergegeven in Figuur 36. Het watergehalte in boring B1 is opvallend lager dan in boring HB3 (ongeveer 20% lager over de volledige diepte). Dit beeld wordt ook bevestigd door de Watermark-sensoren. Figuur 37 toont de tijdsevolutie van de matrixpotentiaal op verschillende dieptes en aan beide zijden van de woning. In deze figuur is ook een inschatting van de dagelijkse neerslaghoeveelheid opgenomen op basis van de meetgegevens van 3 meetstations in de buurt (meetreeksen van waterinfo.be) en de temperatuur opgemeten ter hoogte van de bovenste Watermark-sensoren. In Figuur 38 worden maandelijkse diepteprofielen getoond van de matrixpotentiaal voor beide meetlocaties. Uit deze figuren is de invloed van de treurwilg die zich ter hoogte van de zuidoosthoek van de woning bevindt, op het vochtgehalte van de ondergrond zeer duidelijk. Deze invloed reikt tot meer dan 3m diep (Figuur 36 en Figuur 38a). Midden februari 2023 werd de treurwilg gerooid. Volgens de metingen nam het watergehalte van de ondergrond daarna snel toe (afname van de matrixpotentiaal). Gedurende de zomer van 2023 (vooral augustus en september 2023) wordt er een zekere afname van het watergehalte waargenomen rond 1.5 à 2m diepte, die zich daarna weer hersteld. Opvallend is dat aan de andere kant van de woning, waar ook beplanting staat meer geen (hoogstammige) bomen het watergehalte in de ondergrond nagenoeg constant blijft doorheen het jaar (Figuur 38b). In de zomerperiode wordt er in de bovenste meter een beperkte toename van de matrixpotentiaal (afname van het watergehalte) geobserveerd. Het grote verschil in watergehalte langs beide zijden van de woning verklaart hoogstwaarschijnlijk de grote differentiële zettingen van de ondergrond die optreden ter hoogte van de woning. Op basis van de metingen kan de opgetreden differentiële zetting van 25cm nagerekend worden. Op basis van volgende inputparameters:

- een laagdikte van 2m (zie verlaagde conusweerstand tussen 2 en 4m diepte in de sonderingen (Figuur 34) en het verlaagde watergehalte tot deze dieptes (Figuren 36 en 38)),
- een verschil in watergehalte van 20% (zie metingen watergehalte grondmonsters: Figuur 36 en Tabel 14),
- een 3D krimpcoëfficiënt (ΔV/Vi)/w% van 1.0 (zie Tabel 12, de 3D krimpcoëfficiënt moet gedeeld worden door 3 om enkel het effect in verticale richting te bekomen),

wordt een zetting berekend van 13cm. Deze waarde bedraagt ongeveer de helft van de opgemeten differentiële verplaatsing van de woning. Deze afwijking zou kunnen toegeschreven worden aan een of meerdere van volgende redenen:

- De woning onderging niet alleen een zetting aan de zijde van de treurwilg maar ook een stijging aan de tegenovergestelde kant. Deze stijging zou veroorzaakt kunnen zijn door herbevochtiging van de ondergrond na het rooien van bomen/beplanting aan deze zijde voor de bouw van de woning.
- In realiteit (licht) afwijkende (of met de diepte variërende) watergehaltes en/of krimp-/zwelcoëfficiënten dan deze gehanteerd voor de berekening. Er is bv. meer onderzoek nodig om de representativiteit van de uitgevoerde krimp-/zwelproeven voor het in-situ gedrag van de ondergrond (invloed van bv. bovenbelasting, zijwaartse druk, ...) na te gaan.



Figuur 34. Resultaten (conusweerstand en wrijvingsgetal, Rf) van de 3 sonderingen uitgevoerd te Ternat door Afdeling Geotechniek (dep. MOW). De sonderingen zijn uitgevoerd in de directe nabijheid van de boringen

Tabel 11. Overzicht van de grondmonsters ontnomen op de site van Ternat, inclusief diepte en (lithologische) codering van de grondsoort van het grondmonster.

Staalnummer (boring)	Diepte (m)	Beschrijving	Lithologie
1 (B1)	0.75	Pleistocene afzettingen	weinig kleih. zand
2 (B1)	1.75	Pleistocene afzettingen? Verweerd materiaal Fm Kortrijk?	klei
3 (B1)	2.75	Pleistocene of Paleogene afzettingen?	klei
4 (B1)	4.75	Formatie van Tielt	fijn zand
5 (B2)	0.75	Pleistocene afzettingen?	weinig kleih. à weinig leemh. fijnzand
6 (B2)	1.75	Pleistocene afzettingen? Verweerd materiaal Fm Kortrijk?	klei
7 (B2)	1.75		zand
8 (B2)	2.75	Pleistocene of Paleogene afzettingen?	klei
9 (B2)	3.75	Pleistocene of Paleogene afzettingen?	klei
10 (HB3)	1.75	Pleistocene afzettingen? Verweerd materiaal Fm Kortrijk?	zeer plastische klei
11 (HB3)	2.25	Pleistocene of Paleogene afzettingen?	zeer plastische klei
12 (HB3)	4.25	Formatie van Tielt	stevige klei

Tabel 12. Resultaten van de onderkenningsproeven en krimp-/zwelproeven voor de site van Ternat

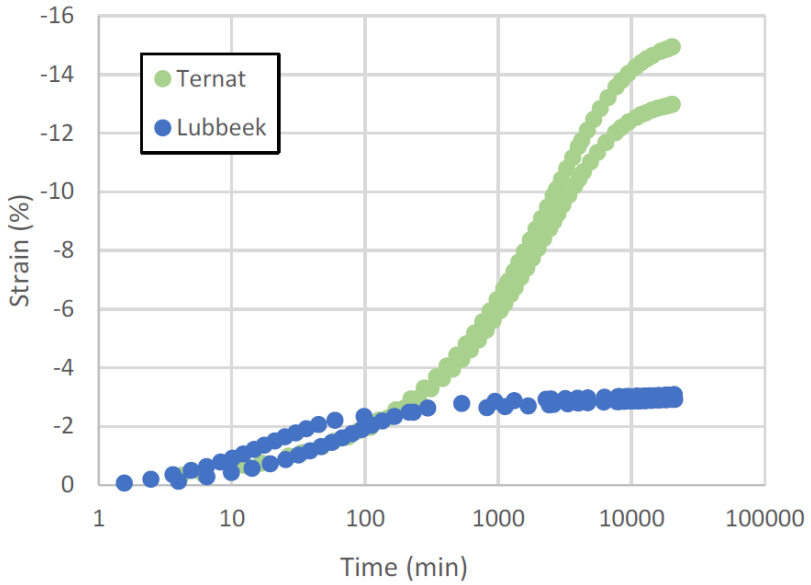
Staalnummer (boring)	Diepte (m)	Fractie <2µm	Fractie <63µm	Vloei-grens	Uitrol-grens	PI	3D krimp (ΔV/Vi)/w%)	1D zwel (Δh/hi)/w%)
1 (B1)	0.75	6.6	38.3	23	14	9	0.14	0.00
2 (B1)	1.75	62.4	99.7	102	29	73	1.11	1.23
3 (B1)	2.75	68.0	94.0	110	31	79	1.00	1.16
4 (B1)	4.75	0.0	29.0	24	22	2	0.00	0.00
5 (B2)	0.75	19.7	65.7	42	17	24	0.00	0.37
6 (B2)	1.75	63.0	100.0	106	26	80	1.05	1.18
7 (B2)	1.75	-	-	-	-	-	-	-
8 (B2)	2.75	67.0	100.0	110	34	77	0.99	0.93
9 (B2)	3.75	13.0	88.0	126	34	91	0.74	0.45
10 (HB3)	1.75	-	-	-	-	-	-	-
11 (HB3)	2.25	-	-	-	-	-	-	-
12 (HB3)	4.25	-	-	-	-	-	-	-

Tabel 13. Kleimineralogie via XRD en bulk-CEC (door spectrophotometrische analyse van Co-Hexamine-Trichloride uitwisseling) bepaald op de monsters van de site in Ternat. Het percentage smectiet in de bulkmineralogie werd geschat o.b.v. de kleimineralogie door vermenigvuldiging met het % kleifractie.

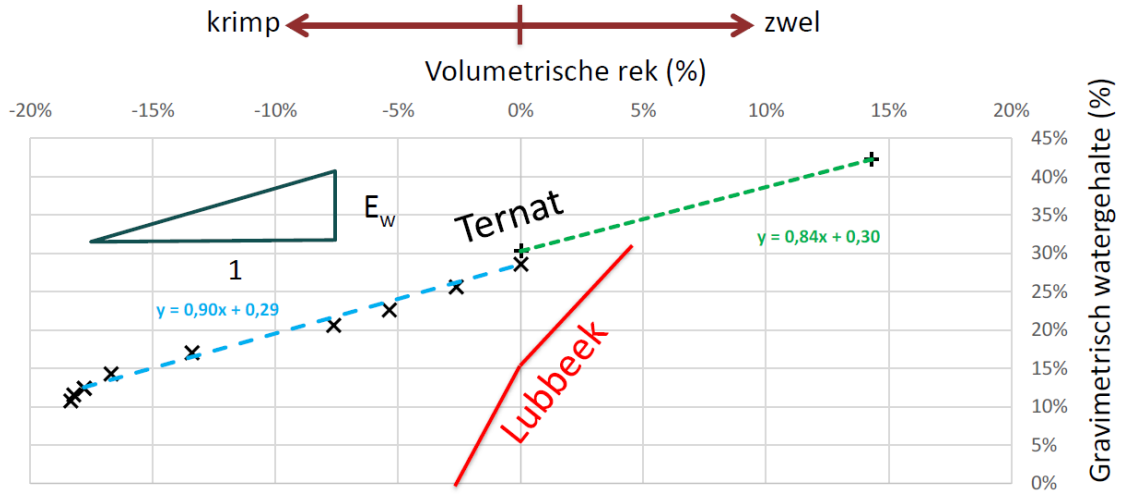
Staalnummer (boring)	Diepte (m)	%Sm	%Sm-Ill	%Ill	%Kaol	%Chl	%Gl-Sm	CEC (bulk) (meq /100g)	%Sm (~bulk)	%Sm +Ill-Sm +Gl-Sm (~bulk)
1 (B1)	0.75	26.5	51.8	14.8	4.4	2.5	0.1	7.6	1.7	5.2
2 (B1)	1.75	78.5	17.2	4.3	0.1	0.1	0.1	45.6	49.0	59.8
3 (B1)	2.75	69.8	23	6.5	0.7	0.1	0.1	44.6	47.5	63.2
4 (B1)	4.75	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5 (B2)	0.75	58.6	27.9	11.5	2	0.1	0.1	16.6	11.5	17.1
6 (B2)	1.75	87.8	6.6	5.3	0.3	0.1	0.1	45	55.3	59.5
7 (B2)	1.75	0.1	0.1	0.1	1.2	0.1	98.8	10.7	-	-
8 (B2)	2.75	79	14.4	6.1	0.5	0.1	0.1	45.9	52.9	62.6
9 (B2)	3.75	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10 (HB3)	1.75	76.8	18.1	4.6	0.5	0.1	0.1	31.4	-	-
11 (HB3)	2.25	79.9	13.6	6.2	0.3	0.1	0.1	40.1	-	-
12 (HB3)	4.25	79	11.3	9.4	0.3	0.1	0.1	47.5	-	-

Tabel 14. Watergehalte, poriënvolume, verzadigingsgraad en natte en droge volumemassa bepaald op de ongeroerde en geroerde grondmonsters te Ternat. Boring B1 is uitgevoerd op 25/08/2022, boring B2 op 26/08/2022 en handboring B3 op 06/09/2022.

	Boring	Diepte (m)	Water-gehalte (%)	Porien-volume (%)	Water-gehalte bij verzadiging (%)	Verzadigings-graad (%)	Volume-massa nat (t/m³)	Volume-massa droog (t/m³)
ongeroerd	B1	0.75	5.91	37.5	22.6	26.1	1.754	1.656
	B1	1.75	30.31	43.8	29.4	103.2	1.942	1.49
	B1	2.75	35.35	47.5	34.2	103.5	1.882	1.391
	B1	4.75	27.13	43.1	28.6	95.0	1.917	1.508
	B2	0.75	13.96	36.3	21.5	64.8	1.922	1.687
	B2	1.75	33.11	46.2	32.4	102.3	1.899	1.426
	B2	2.75	42.9	52.6	41.9	102.5	1.795	1.256
	B2	3.75	44.19	53.3	43.2	102.4	1.783	1.236
geroerd	B1	0.75	13.03					
	B1	1.25	17.1					
	B1	1.75	31.07					
	B1	2.25	30.18					
	B1	2.75	28.23					
	B1	3.25	31.58					
	B1	3.75	27.77					
	B1	4.25	29.05					
	B1	4.75	28.27					
	B1	5.25	30.19					
	B1	5.75	31.14					
	B2	0.75	13.63					
	B2	1.25	13.57					
	B2	1.75	34.91					
	B2	2.25	34.46					
	B2	2.75	41.51					
	B2	3.25	42.76					
	B2	3.75	27.57					
	B2	4.25	26.32					
	B2	4.75	38.97					
	HB3	0.75	25.84					
	HB3	1.25	32.7					
	HB3	1.75	56.8					
	HB3	2.25	52.5					
	HB3	2.75	53.38					
	HB3	3.25	53.76					
	HB3	3.75	46.59					
	HB3	4.25	47.43					

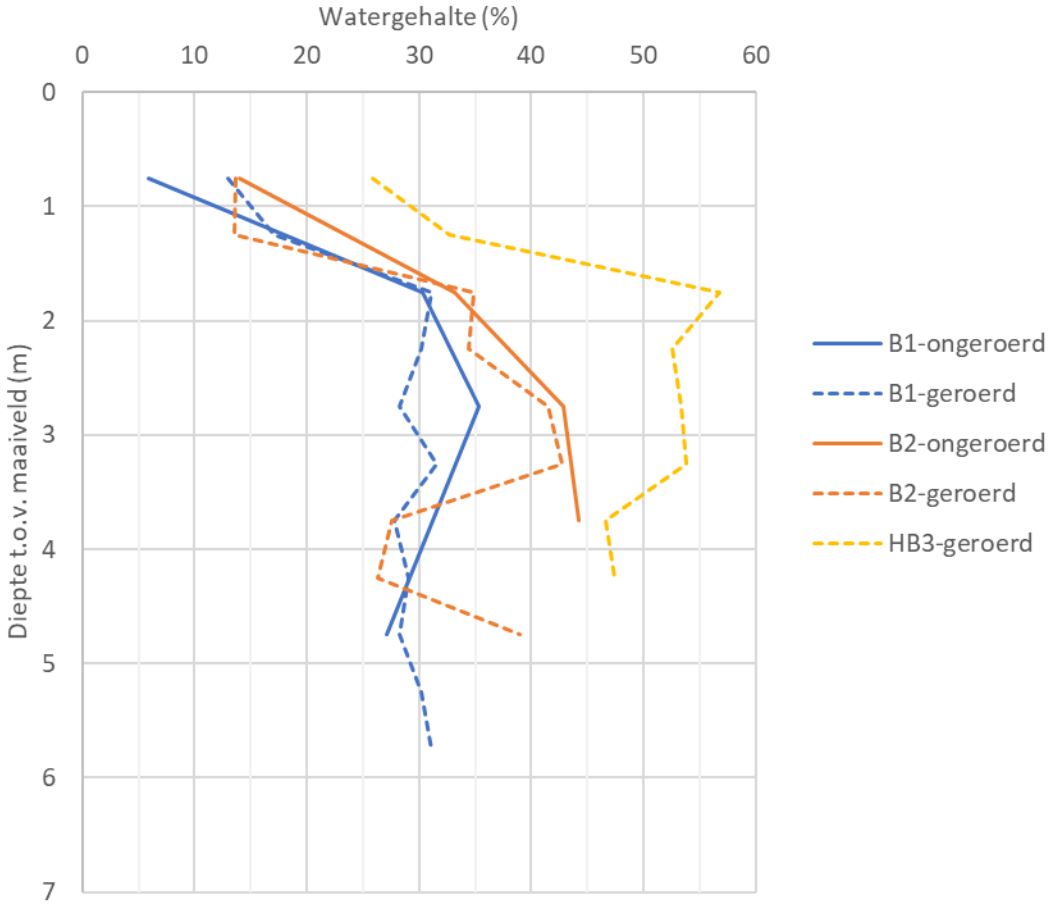


a.

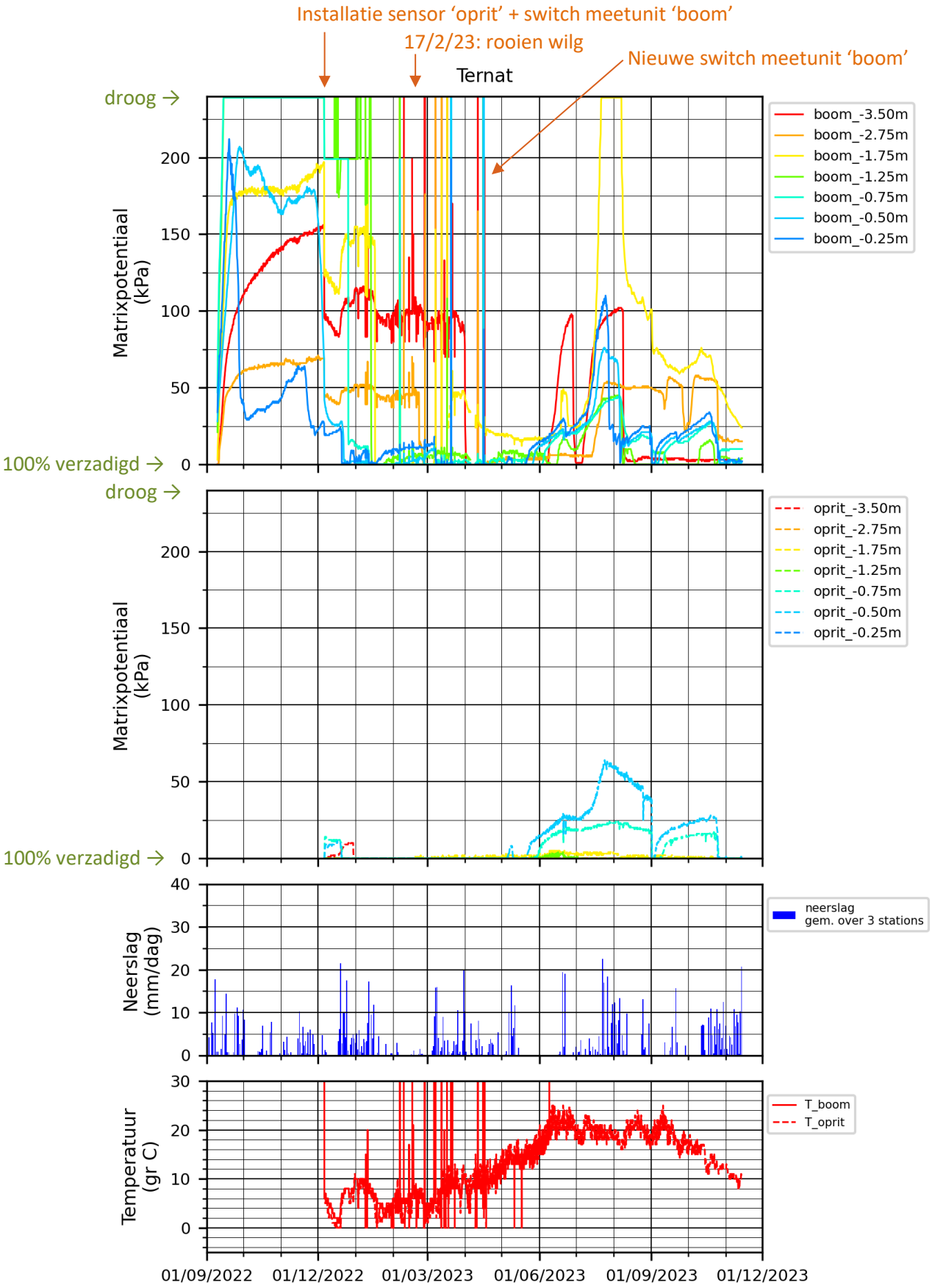


b.

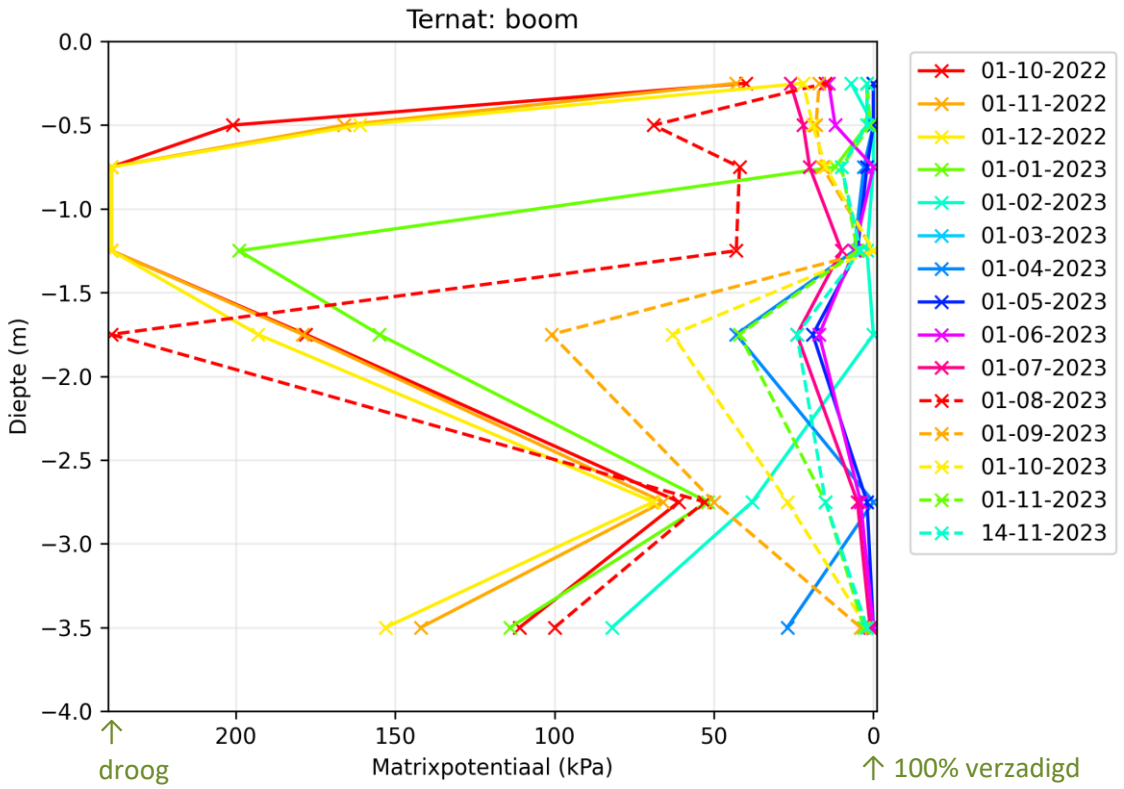
Figuur 35. Ter illustratie, resultaten van de krimp-/zwelproeven uitgevoerd op de sites van Ternat (staalnummer 2 (B1) uit Tabel 12) en Lubbeek (proeven en figuren: Afdeling Geotechniek, dep. MOW). (a) Krimpvervorming in functie van de tijd. (b) Volumetrische rek in functie van het gravimetrisch watergehalte.



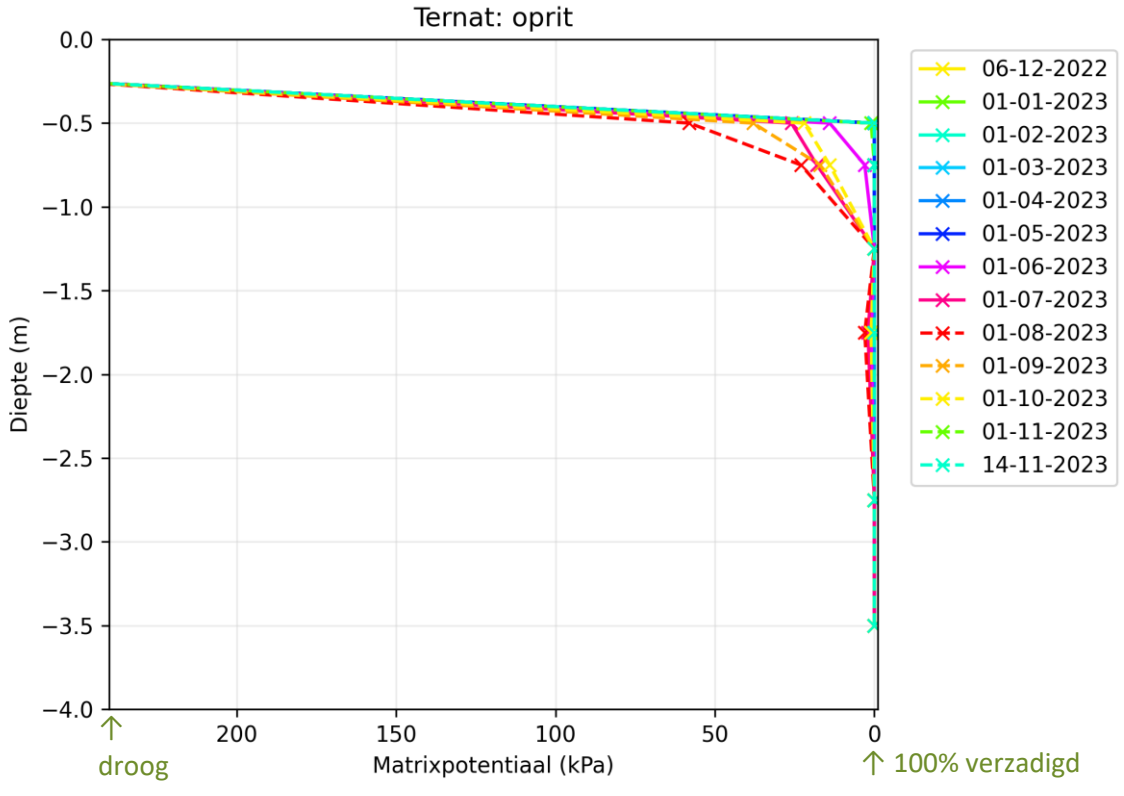
Figuur 36. Overzicht van watergehalte bepaald op de ongeroerde en geroerde grondmonsters in functie van de diepte voor de 3 boringen (Ternat). Boring B1 is uitgevoerd op 25/08/2022, boring B2 op 26/08/2022 en handboring B3 op 06/09/2022.



Figuur 37. (boven) Opgemeten matrixpotentiaal door de Watermark-sensoren op 2 locaties bij de case in Ternat (boom (ZO) en oprit (NW)). De locatie en diepte van de sensoren t.o.v. het maaiveld zijn weergegeven in de legende. Een matrixpotentiaal (of zuigspanning) gelijk aan 0 wijst op een volledig verzadigde grond. (onder) Inschatting van de dagelijkse neerslaghoeveelheid op basis van de metingen van 3 weerstations in de omgeving (bron: waterinfo.be) en temperatuur ter hoogte van de bovenste Watermark-sensoren.



a.



b.

Figuur 38. Diepteprofiel van de opgemeten matrixpotentiaal (of zuigspanning) doorheen de tijd op 2 locaties bij de case in Ternat (boom (ZO) en oprit (NW)). Een matrixpotentiaal (of zuigspanning) gelijk aan 0 wijst op een volledig verzadigde grond. (a) In de buurt van een wilg (die in februari 2023 werd gerooid), waar de opgetreden zettingen het grootst waren (ZO). (b) Aan de andere kant van het huis (NW), waar de zettingen beperkt bleven.

5.2.2 Case 2: Lubbeek

De tweede case bevindt zich in Lubbeek. De woning onderging de voorbije jaren een sterke differentiële zetting van 7cm aan de zuidwestelijke zijde van de woning t.o.v. de noordoostelijke zijde (zie Figuur 39). De woning werd gebouwd in 1993 en is gefundeerd op een strookfundering die is aangezet op vorstvrije diepte (exacte diepte onduidelijk). In 2006 werd aan de zuidwestelijke zijde een bovenbouw in houtskelet gerealiseerd aan zuidwestelijke zijde van de woning. Aan de oostelijke zijde is een gedeelte van het zijgebouw onderkelderd. Op deze site werden door Afdeling Geotechniek (departement MOW) 2 boringen uitgevoerd, alsook 2 sonderingen. Buildwise installeerde in de buurt van boring B1 (zijde bomen) en boring B2 (zijde garage) 2 sets Watermark-sensoren. De laboproeven op de grondmonsters werden uitgevoerd door Afdeling Geotechniek, met uitzondering van de kleimineralogie en de CEC-waarden die door Qmineral bepaald werden in opdracht van VPO. De grondmonsters worden na het project bewaard in de Geotheek van departement Omgeving.

Figuur 39. Situering van case 2 (Lubbeek): de ligging van de woning, de boringen, de Watermark-sensoren en de hoogstammige bomen aan de zijkant van de woning. De 2 sonderingen zijn uitgevoerd in de buurt van de boringen. De richting van de optredende differentiële zetting is aangegeven in het rood.

De resultaten van de sonderingen zijn weergegeven in Figuur 40. De sonderingen zijn uitgevoerd in de buurt van de boringen. Sondering S1 toont in de bovenste 3m hogere conusweerstanden dan sondering S2. Mogelijk wordt deze reductie in conusweerstand veroorzaakt door het hogere watergehalte in deze zone (zie verder) en/of de uitgraving (en heraanvulling) voor de realisatie van de onderkeldering en/of het verwijderen van een mazouttank in deze zone. Tabellen 15, 16, 17 en 18 geven een overzicht van de monsters en hun (lithologische) beschrijving, de resultaten van de onderkenningsproeven, de kleimineralogie en CEC-waarde en de watergehaltes van de grondmonsters. De plasticiteitsindex is in beide boringen bovenin het hoogste (31-39) en neemt af met de diepte (tot een waarde van ongeveer 15 in beide boringen). Dit weerspiegelt zich ook in de resultaten van de krimp-/zwelproeven die een beperkte krimp-/zwelgevoeligheid tonen (zie Figuur 35 voor een detailresultaat van deze proeven). De opgemeten CEC-waarden van de bulkstalen zijn

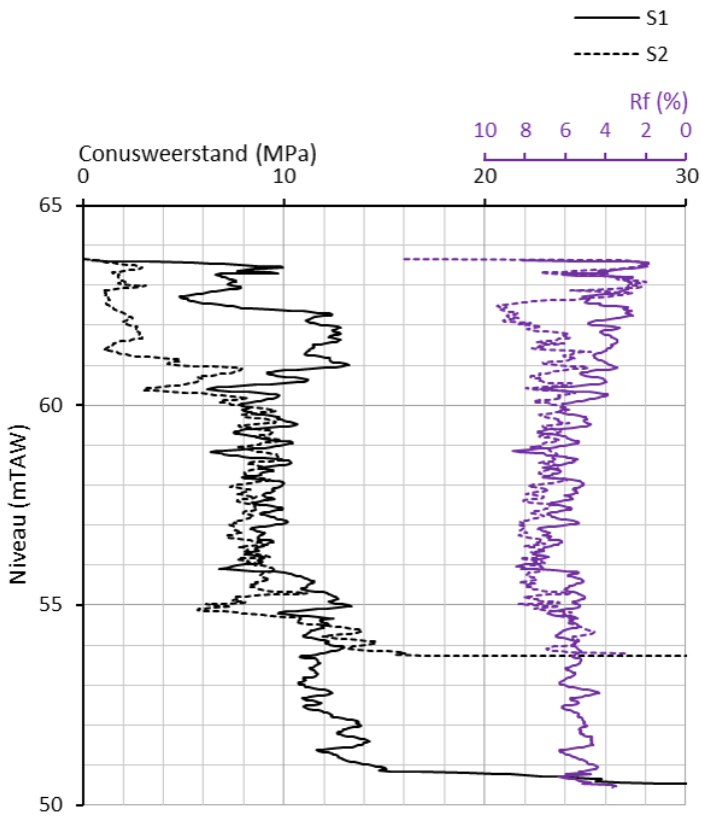
eerder aan de lage kant (rond 11 meq/100g). De kleifractie van de stalen wordt gekenmerkt door de aanwezigheid van glauconiet-smectiet. Door het percentage smectiet+illiet-smectiet+glauconiet-smectiet in de kleimineralogie te vermenigvuldigen met het % kleifractie voor dat staal, wordt het percentage hiervan in de bulkmineralogie geschat. Deze waarden liggen aanzienlijk hoger (dubbel zo hoog) dan de gemeten CEC-waarden van de bulkstalen

De 2 boringen en alle uitgevoerde proeven brachten geen grote verschillen in grondgesteldheid aan het licht tussen beide zijden van de woning. Op basis van de opgemeten waarden voor plasticiteitsindex, vloeigrens en kleifractie blijkt dat de ondergrond laag tot licht gevoelig is voor krimp-/zwelfenomenen bij veranderend vochtgehalte (zie classificatiesystemen in Tabellen 6 en 7: vooral indicatie voor krimp-zwelgevoeligheid op basis van vloeigrens, beperkt op basis van plasticiteitsindex, niet op basis van kleifractie). Dit blijkt vooral uit de waarden voor de vloeigrens. De diepteprofielen van de watergehaltes bepaald op de verschillende ongeroerde en geroerde monsters zijn voor de 2 boringen weergegeven in Figuur 41. Het watergehalte in boring B1 is systematisch lager dan in boring B2 (ongeveer 10% lager, dit verschil neemt af met de diepte en lijkt verwaarloosbaar vanaf 3.5 à 4.0m). Dit beeld wordt bevestigd door de Watermark-sensoren. Figuur 42 toont de tijdsevolutie van de matrixpotentiaal op verschillende dieptes en aan beide zijden van de woning. In deze figuur is ook een inschatting van de dagelijkse neerslaghoeveelheid opgenomen op basis van de meetgegevens van 3 meetstations in de buurt (meetreeksen van waterinfo.be) en de temperatuur opgemeten ter hoogte van de bovenste Watermark-sensoren. In Figuur 43 worden maandelijkse diepteprofielen getoond van de matrixpotentiaal voor beide meetlocaties. Net als voor de case in Ternat tonen de labometingen van de watergehaltes en de Watermark-metingen dat er een groot verschil is in watergehalte van de ondergrond tussen beide zijden van de woning. In de zomer- en herfstperiode neemt het watergehalte aan de zuidwestelijke kant van de woning (dit is de kant van de hoogstammige bomenrij) geleidelijk aan af, terwijl aan de noordoostelijke zijde van de woning amper seizoensgebonden variaties gedetecteerd worden. Verder valt het op dat het watergehalte vrij snel lijkt te reageren op dagen met grote neerslag, waarbij het watergehalte snel toeneemt (en de matrixpotentiaal afneemt). Deze observaties verklaren wellicht mee de geobserveerde differentiële zettingen aan de woning van 7cm. De opgetreden zettingen kunnen opnieuw nagerekend worden op basis van de meetresultaten. Op basis van volgende inputparameters:

- een laagdikte van 2.9m (van 0.6m onder maaiveld tot 3.5m diepte, dit is de zone waarover een verlaagd watergehalte wordt geobserveerd, zie Figuur 41),
- een verschil in watergehalte van ongeveer 8% over deze zone (zie metingen watergehalte grondmonsters: Figuur 41 en Tabel 18),
- een 3D krimpcoëfficiënt (ΔV/Vi)/w% van 0.2 (zie Tabel 16, de 3D krimpcoëfficiënt moet gedeeld worden door 3 om enkel het effect in verticale richting te bekomen),

wordt een zetting berekend van ongeveer 1.5cm. Deze waarde is aanzienlijk kleiner dan de geobserveerde zettingen. Mogelijke verklaringen voor deze onderschatting zijn:

- Een (differentiële) horizontale krimp van de ondergrond ter hoogte van de funderingen waardoor de uiteindelijke optredende verticale zettingen verder vergroten.
- In realiteit (licht) afwijkende (of met de diepte variërende) watergehaltes en/of krimp-/zwelcoëfficiënten dan deze gehanteerd voor de berekening. Er is bv. meer onderzoek nodig om de representativiteit van de uitgevoerde krimp-/zwelproeven voor het in-situ gedrag van de ondergrond (invloed van bv. bovenbelasting, zijwaartse druk, ...) na te gaan.



Figuur 40. Resultaten (conusweerstand en wrijvingsgetal, Rf) van de 2 sonderingen uitgevoerd te Lubbeek door Afdeling Geotechniek (dep. MOW). De sonderingen zijn uitgevoerd in de directe nabijheid van de boringen.

Tabel 15. Overzicht van de grondmonsters ontnomen op de site van Lubbeek, inclusief diepte en (lithologische) codering van de grondsoort van het grondmonster.

Staalnummer (en boring)	Diepte (m)	Beschrijving	Lithologie
1 (B1)	0.75	geroerd	zandh. klei
2 (B1)	1.75	Formatie van Diest	glauconieth. zand
3 (B1)	2.75	Formatie van Diest	glauconieth. zand
4 (B1)	3.75	Formatie van Diest	zandh. klei
5 (B1)	4.75	Formatie van Diest	zandh. klei
6 (B2)	0.75	Formatie van Diest	zandh. klei
7 (B2)	1.75	Formatie van Diest	glauconieth. zand
8 (B2)	2.75	Formatie van Diest	glauconieth. zand
9 (B2)	3.75	Formatie van Diest	-
10 (B2)	4.75	Formatie van Diest	zandh. klei

Tabel 16. Resultaten van de onderkenningsproeven en krimp-/zwelproeven voor de site van Lubbeek.

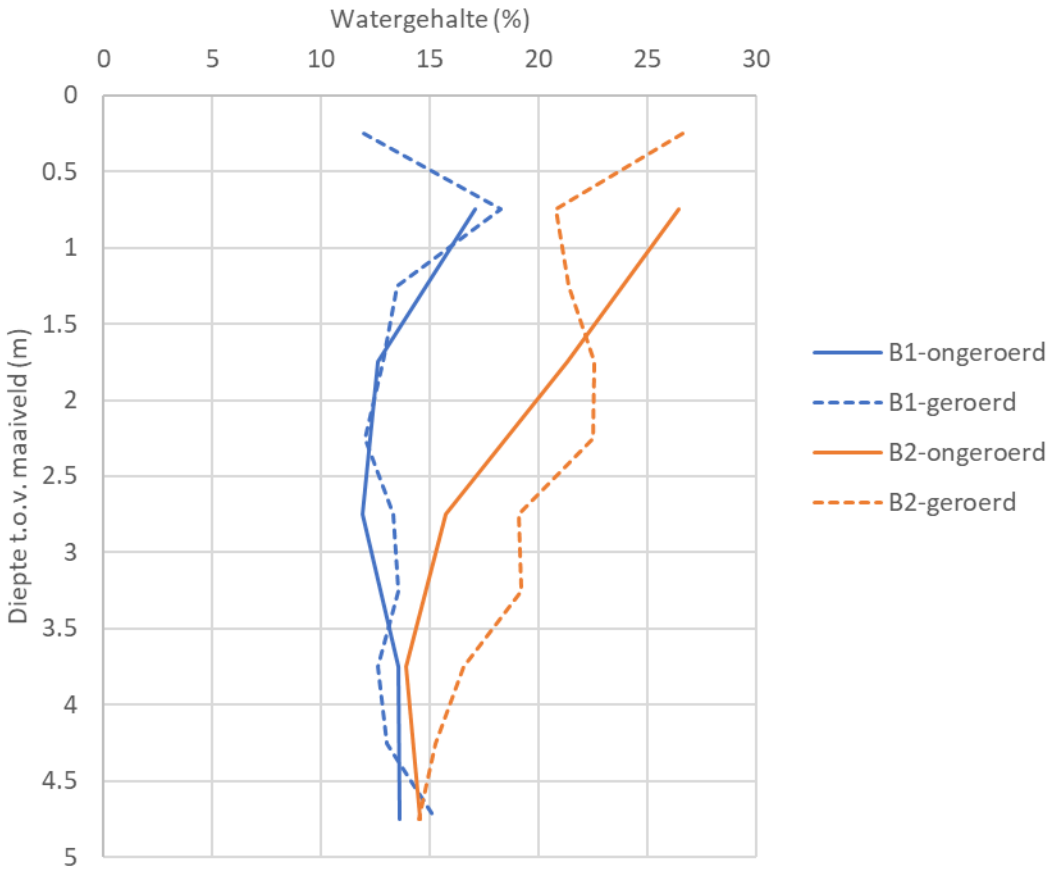
Staalnummer (en boring)	Diepte (m)	Fractie <2µm	Fractie <63µm	Vloei-grens	Uitrol-grens	PI	3D krimp (ΔV/Vi)/w%)	1D zwel (ΔV/Vi)/w%)
1 (B1)	0.75	27.0	74.0	60	21	39	-	0.29
2 (B1)	1.75	29.4	30.2	44	18	26	0.23	0.51
3 (B1)	2.75	27.3	33.5	37	18	19	-	0.24
4 (B1)	3.75	21.0	24.0	33	17	15	0.20	0.00
5 (B1)	4.75	25.0	32.0	35	17	17	0.18	0.04
6 (B2)	0.75	29.0	57.0	52	20	31	-	0.00
7 (B2)	1.75	21.0	21.0	37	17	20	0.27	0.00
8 (B2)	2.75	20.2	20.2	36	17	19	0.19	0.00
9 (B2)	3.75	19.0	22.0	30	17	14	0.43	0.00
10 (B2)	4.75	17.0	22.0	33	16	17	0.34	0.00

Tabel 17. Kleimineralogie via XRD en bulk-CEC (door spectrophotometrische analyse van Co-Hexamine-Trichloride uitwisseling) bepaald op de monsters van de site in Lubbeek. Het percentage smectiet in de bulkmineralogie werd geschat o.b.v. de kleimineralogie door vermenigvuldiging met het % kleifractie.

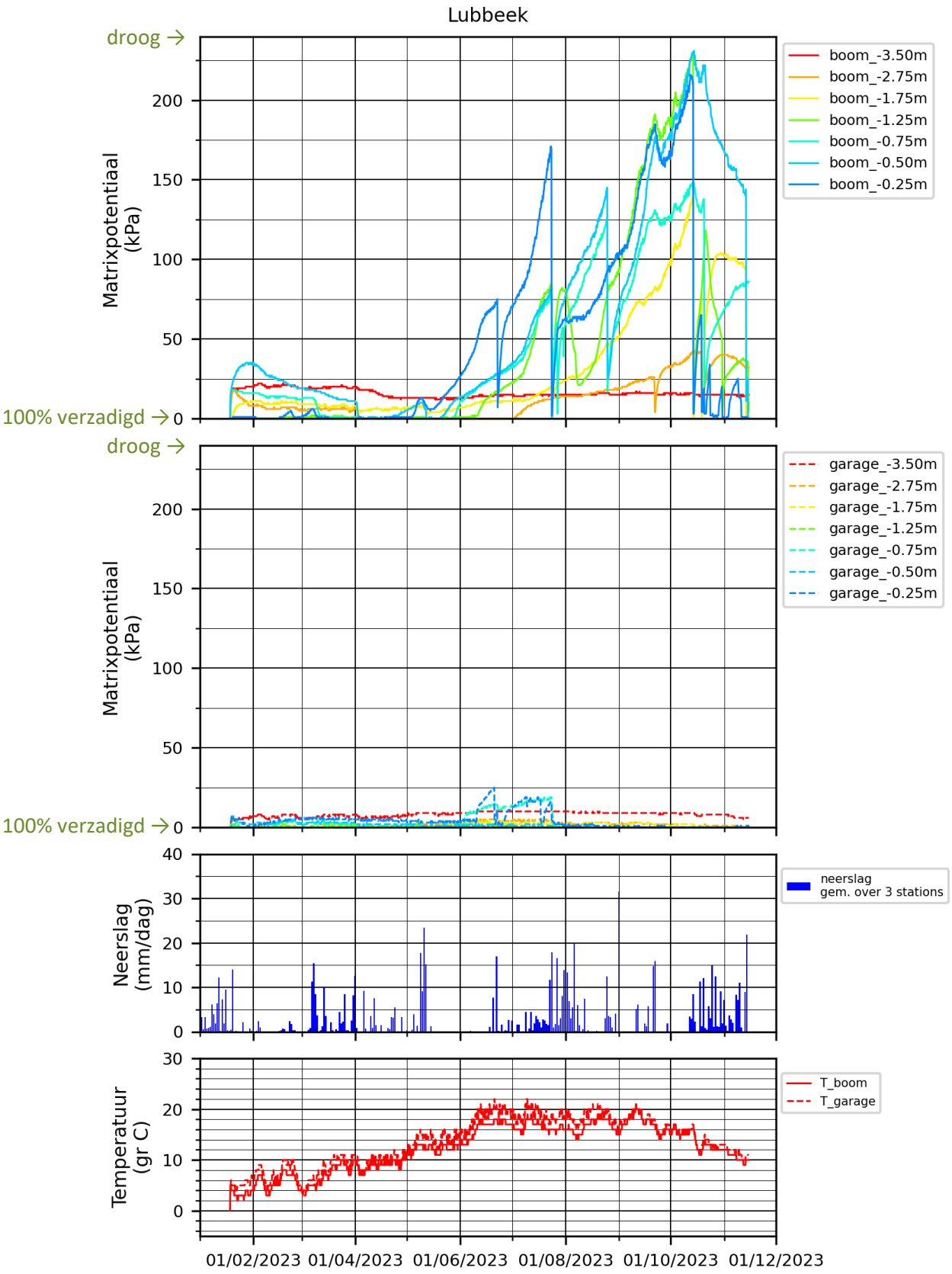
Staalnummer (en boring)	Diepte (m)	%Sm	%Sm-Ill	%Ill	%Kaol	%Chl	%Gl-Sm	CEC (meq/ 100g)	%Sm (~bulk)	%Sm +Ill-Sm +Gl-Sm (~bulk)
1 (B1)	0.75	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2 (B1)	1.75	0.1	0.1	0.1	1.2	0.1	98.8	10.7	0.0	29.1
3 (B1)	2.75	0.1	0.1	0.1	2.1	0.1	97.9	10.9	0.0	26.8
4 (B1)	3.75	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5 (B1)	4.75	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6 (B2)	0.75	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7 (B2)	1.75	0.1	0.1	0.1	1.3	0.1	98.7	11.3	0.0	20.8
8 (B2)	2.75	0.1	0.1	0.1	0.6	0.1	99.4	10.2	0.0	20.1
9 (B2)	3.75	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10 (B2)	4.75	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabel 18. Watergehalte, poriënvolume, verzadigingsgraad en natte en droge volumemassa bepaald op de ongeroerde en geroerde grondmonsters te Lubbeek. Boring B1 is uitgevoerd op 08/09/2022 en 09/09/2022, boring B2 tussen 09/09/2022 en 12/09/2022.

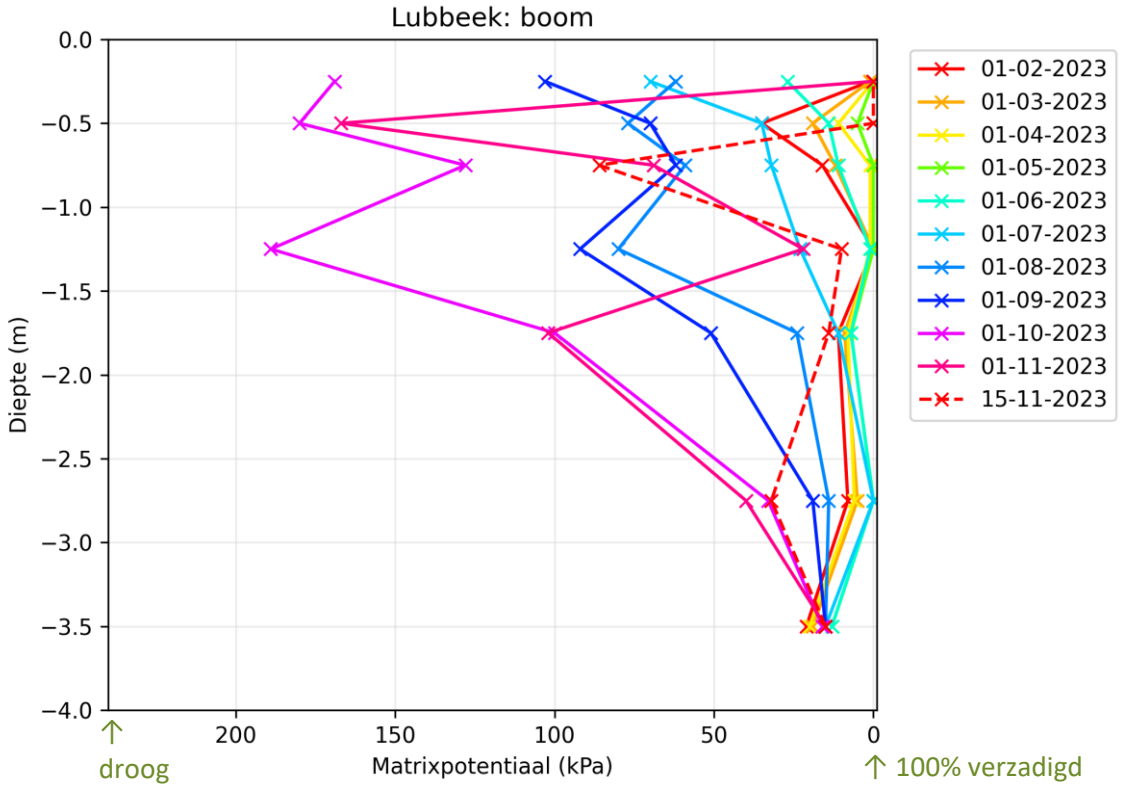
	Boring	Diepte (m)	Water-gehalte (%)	Porien-volume (%)	Water-gehalte bij verzadiging (%)	Verzadigings-graad (%)	Volume-massa nat (t/m³)	Volume-massa droog (t/m³)
ongeroerd	B1	0.75	17.06	40.4	25.6	66.7	1.849	1.579
	B1	1.75	12.61	29.4	15.7	80.3	2.107	1.871
	B1	2.75	11.90	29.4	15.7	75.9	2.095	1.872
	B1	3.75	13.55	34.1	19.6	69.3	1.982	1.745
	B1	4.75	13.63	29.4	15.7	86.8	2.127	1.872
	B2	0.75	26.42	41.1	26.4	100.2	1.972	1.56
	B2	1.75	21.32	37.2	22.4	95.2	2.018	1.663
	B2	2.75	15.73	34.2	19.6	80.3	2.019	1.745
	B2	3.75	13.89	39.9	25.0	55.4	1.814	1.593
	B2	4.75	14.56	30.3	16.4	88.6	2.115	1.846
geroerd	B1	0.25	11.97					
	B1	0.75	18.29					
	B1	1.25	13.51					
	B1	1.75	12.87					
	B1	2.25	12.00					
	B1	2.75	13.34					
	B1	3.25	13.53					
	B1	3.75	12.63					
	B1	4.25	13.01					
	B1	4.75	15.28					
	B2	0.25	26.65					
	B2	0.75	20.82					
	B2	1.25	21.40					
	B2	1.75	22.56					
	B2	2.25	22.48					
	B2	2.75	19.10					
	B2	3.25	19.19					
	B2	3.75	16.56					
	B2	4.25	15.26					
	B2	4.75	14.50					



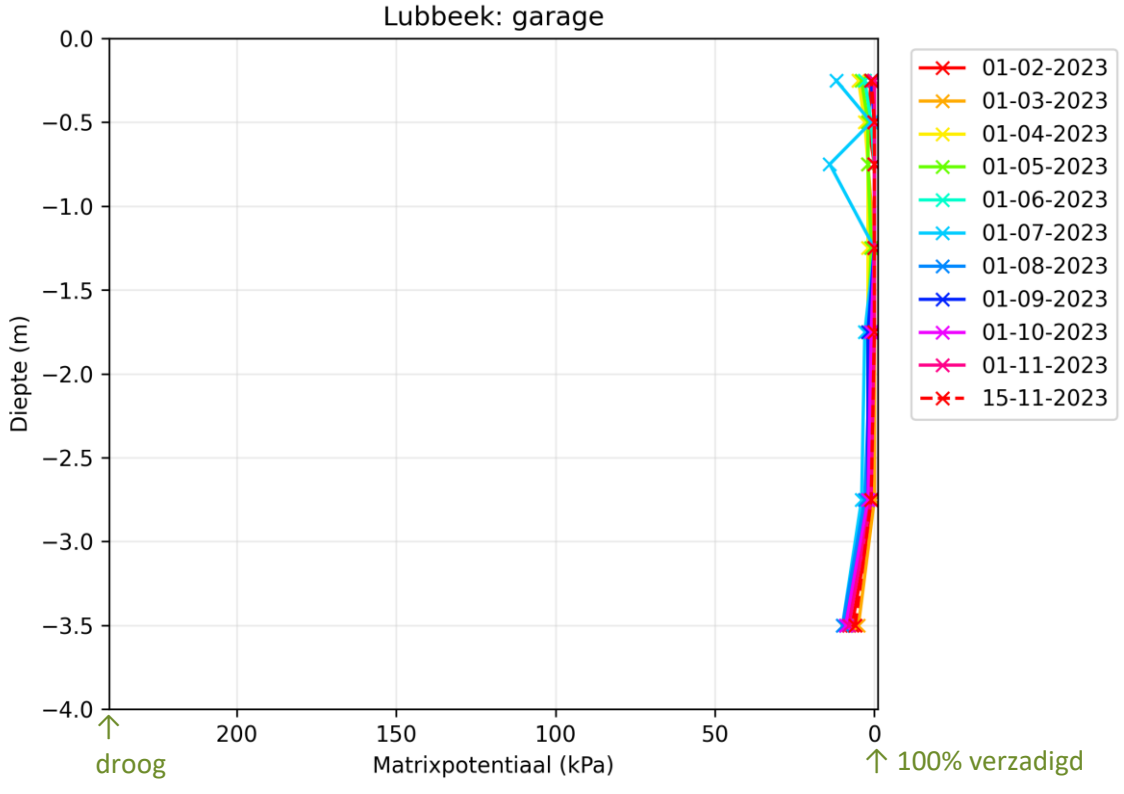
Figuur 41. Overzicht van watergehalte bepaald op de ongeroerde en geroerde grondmonsters in functie van de diepte voor de 3 boringen (Lubbeek). Boring B1 is uitgevoerd op 08/09/2022 en 09/09/2022, boring B2 tussen 09/09/2022 en 12/09/2022.



Figuur 42. (boven) Opgemeten matrixpotentiaal door de Watermark-sensoren op 2 locaties (boom (ZW) en garage (NO)) bij de case in Lubbeek. De locatie en diepte van de sensoren t.o.v. het maaiveld zijn weergegeven in de legende. Een matrixpotentiaal (of zuigspanning) gelijk aan 0 wijst op een volledig verzadigde grond. (onder) Inschatting van de dagelijkse neerslaghoeveelheid op basis van de metingen van 3 weerstations in de omgeving (bron: waterinfo.be). en temperatuur ter hoogte van de bovenste Watermark-sensoren.



a.



b.

Figuur 43. Diepteprofiel van de opgemeten matrixpotentiaal (of zuigspanning) doorheen de tijd op 2 locaties bij de case in Lubbeek (boom (ZW) en garage (NO)). Een matrixpotentiaal (of zuigspanning) gelijk aan 0 wijst op een volledig verzadigde grond. (a) In de buurt van een bomenrij (ZW), waar de opgetreden zettingen het grootst waren. (b) Aan de andere kant van het huis (NO), waar geen zettingen optraden.

5.3 CONCLUSIES OP BASIS VAN DE CASES

Terwijl de krimp-/zwelgevoeligheid van de ondergrond voor de eerste case in Ternat zeer duidelijk volgt uit het grondonderzoek (plasticiteitsindex, vloeigrens, kleigehalte), is dit voor de case in Lubbeek minder uitgesproken. Mogelijk geven deze parameters de krimp-/zwelgevoeligheid van de ondergrond minder goed weer voor glauconiethoudende zanden of dienen er aangepaste classificatiesystemen te worden toegepast voor dergelijke grondsoorten. Om hier een beter inzicht in te verkrijgen is echter meer uitgebreid terrein- en labo-onderzoek vereist. Uit de krimp-/zwelproeven volgt wel dat de ondergrond op beide locaties gevoelig is voor krimp-/zwelfenomenen bij veranderend vochtgehalte, al is deze gevoeligheid in Lubbeek aanzienlijk lager dan in Ternat. Voor beide cases levert de berekende krimp/zwel op basis van de resultaten van de krimp-/zwelproeven een vrij sterke onderschatting van de werkelijk opgetreden differentiële zettingen. Het is duidelijk dat er meer onderzoek nodig is om na te gaan in hoeverre deze proefmethodes representatief zijn voor het in-situ krimp-/zwelgedrag van de ondergrond (bv. invloed van bovenbelasting, zijwaartse druk) en deze proefmethodes eventueel verder op punt te stellen.

Voor beide cases werd er een zeer groot verschil in waterverzadiging van de ondiepe ondergrond opgemeten tussen beide zijden van de woningen (watergehalte bepaald op ongeroerde en geroerde grondmonsters en Watermark-metingen). Dit illustreert de invloed die hoge bomen en struiken kunnen hebben op het watergehalte van de ondergrond, tot meer dan 2m diepte. In Lubbeek lijkt deze invloed op een diepte van 3.5m onder het maaiveld grotendeels uitgewerkt. In Ternat reikt de invloed op basis van de metingen tot dieper dan 3.5m. Deze cases tonen verder dat de bepaling van het watergehalte van geroerde monsters, wat in de praktijk vrij eenvoudig te realiseren is, nuttige informatie kan opleveren om de lokale problematiek beter in kaart te brengen. Continue monitoring van het watergehalte (bv. met Watermark-metingen) leveren dan weer een verhoogd inzicht in de seizoensgebonden evolutie van het watergehalte in de ondergrond.

Beide cases illustreren dat het optreden van schade ten gevolge van krimp-/zwelfenomenen van de ondergrond door veranderend vochtgehalte vaak te wijten is aan een combinatie van factoren die aanleiding geven tot differentiële zettingen van de ondergrond onder de funderingsaanzet, zoals de aanwezigheid van krimp-/zwelgevoelige lagen, de aanwezigheid van hoge bomen of struiken, het type fundering en de diepte van de funderingsaanzet.

Zeker in gebieden waar mogelijk krimp-/zwelgevoelige lagen voorkomen (bv. op basis van de gevoeligheidskaart die ontwikkeld werd binnen deze studie of op basis van ervaringen/schadegevallen in de omgeving) is het noodzakelijk voorafgaand aan een bouwproject of in het geval van optredende schade de ondergrond in meer detail te bestuderen om gepaste maatregelen te kunnen treffen. De bepaling van de Atterbergse grenzen en kleifractie op grondmonsters is hierbij zeker nuttig en kan op basis van de classificatiesystemen in Tabellen 6 en 7 een idee geven van de krimp-/zwelgevoeligheid. Voor de case in Lubbeek blijkt op basis van deze classificatiesystemen echter geen hoog krimp-/zwelpotentieel.

6 OPMAAK SYNTHETISCHE GEVOELIGHEIDSKAART

6.1 METHODOLOGIE

6.1.1 Basismethodologie

Voor de opmaak van de gevoeligheidskaart vormt het geologisch 3D model van Vlaanderen (G3Dv3) het startpunt. Uitgangspunten hierbij zijn de volgende:

- Enkel lagen die voorkomen tot 5m onder het maaiveld worden beschouwd.
- Een aantal G3Dv3-lagen worden verder verfijnd op basis van het H3Dv2-model (Deckers et al., 2019), wat een beter ruimtelijk onderscheid mogelijk maakt voor deze lagen (zie Tabel 19).
- Aan elke G3Dv3- (en H3Dv2-)laag zal er een gevoeligheidsscore toegekend worden.
    - 1: zeer laag
    - 2: laag
    - 3: matig
    - 4: hoog
    - 5: zeer hoog
- De toekenning van de gevoeligheidsscores per laag zal via een specifieke, geautomatiseerde procedure verlopen (zie verder) en zal gebeuren op basis van de beschikbare data en informatie voor elke laag. Eventuele informatie op basis van de inventaris met schadegevallen wordt niet mee in rekening gebracht in deze procedure. Deze inventaris wordt enkel gebruikt om het resulterende eindproduct af te toetsen.
- Voor elke rastercel wordt de hoogst voorkomende gevoeligheidsscore weerhouden om tot het eindresultaat te komen.

Tabel 19. Overzicht van de G3Dv3-lagen waarvoor een verfijning op basis van het H3Dv2-model werd toegepast om een betere ruimtelijk onderscheid mogelijk te maken.

G3Dv3-code	G3Dv3-benaming	Corresponderende H3Dv2-lagen
g_010103Q_GtDi_GtTi_GtOg	Fm Gent Ld Dilsen, Tisselt en Opgrimbie	A0151, A0152, A0161, A0162, A0163, A0164, A0165
g_010201Q_VlCa_VlDu	Fm Vlaanderen Ld Calais en Dunkerque	A0131, A0132, A0133
g_0105Q_Lk_Ln_Zd	Fm Lanklaar, Lanaken en Zutendaal	A0181, A0182, A0183, A0184, A0185, A0186
g_020302NE_KzBr	Fm Kiezeloöliet Ld Brunssum	A0233, A0234, A0235, A0236, A0237

De toekenning van de gevoeligheidsscore per G3Dv3-laag verloopt in verschillende stappen:

- Een eerste rudimentaire indeling van de G3Dv3-lagen gebeurt volgens de Inspire-lithologie en voor de H3Dv2-lagen op basis van HCOVv2-eigenschappentabel. De gedetailleerde indeling per gevoeligheidscategorie is opgenomen in Tabel 20. Op die manier wordt aan elke G3Dv3-laag een startcategorie toegekend tussen 1 en 4.
- In een tweede stap wordt de startcategorie bijgestuurd o.b.v. de lithologie gehanteerd voor de opmaak van Themaloket Plastische gronden (beschikbaar op de DOV-toelichtingspagina over Plastische Gronden: link):

    - Indien ‘leem’, ‘silt’ of ‘klei-silt’, dan wordt de startcategorie gecorrigeerd naar 3
    - Indien ‘klei’, dan wordt de startcategorie gecorrigeerd naar 4
- Een verdere bijsturing vindt vervolgens plaats op basis van de combinatie van de beschikbare literatuurdata en data van DOV-grondmonsters met laboproeven (zie datafiches per G3Dv3-laag, paragraaf 3.2.4 en Bijlage B):
    - De gevoeligheidscategorie wordt eerst bepaald op basis van de beschikbare waarden voor plasticiteitsindex (cat_pi) en kleifractie (cat_%klei) afzonderlijk, uitgaande van de q_3-/75%-kwantielwaarde van de dataset en op voorwaarde dat er minimaal 3 monsters beschikbaar zijn.
    - Indien er meer dan 10% hoge outliers zijn én indien de categorie o.b.v. de mediaan van de hoge outliers groter is dan de categorie toegekend op basis van de q_3-waarde van de dataset, wordt de categorie (cat_pi of cat_%klei) met 1 categorie verhoogd.
    - De gehanteerde grenzen komen overeen met de voorgestelde grenzen door BRE (1993), zie Tabel 6 in paragraaf 3.1.2.3 en Tabel 21.

      Merk op dat deze grenzen in principe gelden voor de gemodificeerde plasticiteitsindex (plasticiteitsindex vermenigvuldigd met de korrelfractie kleiner dan 425µm). Toepassing ervan op de plasticiteitsindex is een conservatieve benadering, aangezien de plasticiteitsindex steeds groter is dan of gelijk aan de gemodificeerde plasticiteitsindex.

      Deze grenzen worden ook toegepast op het percentage kleifractie. Dit is een conservatieve benadering aangezien de kleifractie slechts kan gehanteerd worden als een ruwe inschatting van de plasticiteitsindex (minimumwaarde) en het krimp-/zwelpotentieel (zie paragraaf 3.2.4 en Figuur 23). De voorgestelde grenzen voor het bepalen van het krimp-/zwelpotentieel op basis van percentage kleifractie zijn een stuk optimistischer (zie Tabel 7), al lijkt het op basis van de relatie tussen kleifractie en plasticiteitsindex (Figuur 23) en de grenzen o.b.v. plasticiteitsindex (Tabel 21) goed hier ietwat voorzichtiger in te zijn.
    - Op basis van de hieruit resulterende cat_pi en cat_%klei wordt de startcategorie uit stap 2 geverifieerd en mogelijk bijgestuurd:
        A. In de eerste plaats wordt getracht dit te doen op basis van cat_pi (indien beschikbaar), zoniet op basis van cat_%klei (indien beschikbaar). Indien geen van beide beschikbaar zijn met voldoende proefresultaten, dan wordt de startcategorie uit stap 2 behouden.
        B. Indien cat_pi en cat_%klei beide beschikbaar zijn, wordt een bijkomend toetsing uitgevoerd. Als cat_%klei > cat_pi én op voorwaarde dat het aantal monsters met kleifractie groter is dan het aantal monsters met plasticiteitsindex, dan wordt cat_pi met 1 categorie verhoogd.

           Merk op dat als cat_%klei < cat_pi, er dan geen bijsturing wordt gedaan. Cat_pi blijft in dat geval behouden. Er wordt immers van uitgegaan dat cat_%klei een minimummaat is voor de plasticiteitsindex (zie hiervoor en paragraaf 3.2.4, Figuur 23). D.w.z. dat cat_pi verlagen op basis van cat_%klei moeilijk te verantwoorden is.
        C. Ten slotte wordt de startcategorie (volgend uit stap 2) bijgestuurd op basis van cat_pi of cat_%klei indien cat_pi niet beschikbaar is:
            - cat_enhanced = startcategorie + 1

              indien cat_pi/cat_klei > startcategorie (max. 4)
            - cat_enhanced = startcategorie – 1

              indien cat_pi/cat_klei < startcategorie (min. 1)

- Ten slotte wordt een laatste verfijning uitgevoerd van “cat_enhanced” (volgend uit stap 3) op basis van het smectietgehalte.
    - Hiervoor wordt er gebruik gemaakt van de eerst beschikbare data met volgende prioriteit:
        A. %Smectiet in de bulkmineralogie (**%Sm. + %Sm.-Ill.**)
        B. %Smectiet in de bulkmineralogie op basis van de kleimineralogie: **(%Sm. + %Sm.-Ill. + %Sm.-Gl.) * q3_kleifractie_dataset / 100**
        Hierbij is q3_kleifractie_dataset de q3-/75%-kwantielwaarde van de kleifractie voor de gehele beschikbare dataset.
        C. CEC van de bulkmineralogie
        Merk op dat voor de CEC-waarde dezelfde grenzen worden toegepast als voor het %smectiet. De correlatie tussen beide parameters werd besproken in paragraaf 3.2.4 (Figuren 20 tot 22).
    - Opnieuw wordt er gebruik gemaakt van de q3-/75%-kwantielwaarde en wordt er enkel rekening gehouden met de data indien er min. 3 monsters met resultaten beschikbaar zijn.
    - Toegepaste verfijning op “cat_enhanced” resulterend uit stap 3:
        A. Indien %Smectiet > 35%:
        Categorie wordt met 1 verhoogd, met een minimum gelijk aan 4
        B. Indien 25% < %Smectiet < 35%
        Categorie wordt met 1 verhoogd, met een minimum gelijk aan 3

De gevoeligheidscategorie voor alle relevante G3Dv3-lagen en H3Dv2-lagen wordt samengevat in Tabel 22. De ‘tussencategorie’ na elk van de 4 stappen uit bovenstaande categorie wordt eveneens weergegeven.

6.1.2 Kanttekeningen bij de basismethodologie

Enkele belangrijke kanttekeningen die bij deze methodologie moeten geplaatst worden en waarvoor in de toekomst bij een eventuele herziening van de methodologie meer rekening mee kan worden gehouden:

- Binnen dit project wordt er grotendeels abstractie gemaakt van het verschil in proefmethodes ter bepaling van bv. de korrelverdeling, (klei)mineralogie, CEC, ... Verschillende proefprocedures, operatoren, enz. kunnen een belangrijke invloed hebben op de proefresultaten.
- Er wordt veelal gebruik gemaakt van de 75%-kwantielwaarde van de beschikbare data. Dit is een eerder conservatieve benadering van de problematiek, waarvoor bewust werd gekozen.
- Er worden een aantal aannames gemaakt om de beschikbare data zo veel mogelijk te exploiteren. Deze aannames werden zo goed als mogelijk onderbouwd en werden zo gemaakt dat ze eerder een conservatieve inschatting opleveren (voor details wordt verwezen naar de bovenstaande uiteenzetting van de basismethodologie):
    - Om het krimp-/zwelpotentieel te bepalen op basis van de kleifractie werden dezelfde grenzen gebruikt als voor de plasticiteitsindex.
    - Beoordeling van het krimp-/zwelpotentieel op basis van het smectietgehalte in de bulkmineralogie gebeurde op basis van de som van het %smectiet en het %smectiet-illiet. Om ook de data van de kleimineralogie te kunnen exploiteren, werd deze omgerekend naar bulkmineralogie op basis van de kleifractie. Indien geen informatie van bulkmineralogie of kleimineralogie beschikbaar is, wordt er gebruik

gemaakt van de CEC-waarden (indien beschikbaar). Hiervoor worden dezelfde grenzen toegepast als voor het smectietgehalte in de bulkmineralogie.

Tabel 20. Overzicht van de indeling van lithologieeën per gevoeligheidscategorie voor bepaling van de startcategorie voor elke G3Dv3-laag. Lithologieën op basis van de Inspire-lithologie (voor de G3Dv3-lagen) en op basis van de HCOVv2-eigenschappentabel (voor de H3Dv2-lagen).

Gevoeligheids-categorie (startcategorie)	Lithologische beschrijvingen	Opmerkingen
1	'sand', 'sand, gravel, peat', 'gravel', 'sand, gravel', 'sand, peat', 'carbonate rich mudstone, sand', 'carbonate rich mudstone', 'chalk', 'chalk, carbonate rich mudstone, sand', 'sandstone', 'mudstone, siltstone', 'sandstone, mudstone, limestone', 'sandstone, coal, mudstone, conglomerate', 'mudstone, sandstone, coal, limestone', 'limestone', 'sandstone, quartzite, mudstone, shale, schist', 'zand (veen)', 'zand', 'zand (leem, klei, veen)', 'zand-grind (klei, veen)', 'zand (klei, veen en glimmers)'	H3Dv2-lagen H3Dv2-lagen
2	'sand, silt', 'sand, clay, peat', 'sand, clay', 'sand, clay, silt', 'sand, peat, sandstone', 'sand, clay, gravel', 'sand, clay, sandstone', 'sand, clay, silt, sandstone', 'sandstone, clay, evaporite, carbonate rich mudstone', 'zand (leem, veen, klei)'	H3Dv2-lagen
3	'clay, sand, gravel', 'clay, sand', 'clay, sand, peat', 'clay, sand, sandstone', 'clay, peat, sand', 'silt, clay', 'silt', 'carbonate rich mudstone, clay', 'klei-leem (zand, veen)', 'veen-klei', 'klei-leem (zand, grind, veen)'	H3Dv2-lagen H3Dv2-lagen
4	'clay', 'clay, silt', 'clay, silt, sand', 'clay, peat', 'klei (veen)', 'klei en veen (zand, veen en glimmers)', 'klei en veen (zand en glimmers)'	H3Dv2-lagen H3Dv2-lagen
5	/	

Tabel 21. Gevoeligheidscategorieën in functie van de plasticiteitsindex en kleifractie (gebaseerd op de grenzen voorgesteld voor de plasticiteitsindex door BRE (1993) en NHBC (2023)). Merk op dat deze grenzen in principe gelden voor de gemodificeerde plasticiteitsindex. Toepassing ervan op de plasticiteitsindex is een conservatieve benadering.

Plasticiteitsindex/ Kleifractie (%)	Krimp-/zwelpotentieel (BRE, 1993; NHBC, 2023)	Gevoeligheidscategorie
>60	Zeer hoog	4
40-60	Hoog	3
20-40	Matig	2
<20	Laag	1

Tabel 22 (deel 1). Overzicht van de gevoeligheidscategorie voor alle relevante G3Dv3-lagen en H3Dv2-lagen. De categorie na elke stap uit de toegepaste methodologie is weergegeven.

G3Dv3-laag of H3Dv2-laag	Startcat. (stap 1)	Cat. Loket PG	Cat. na stap 2	Cat_enh. na stap 3	Cat_enh. na stap 4
g_A_b	cat0		cat0	cat1	cat1
g_010101Q_GtAb_b	cat1		cat1	cat1	cat1
g_010102Q_GtDp_b	cat1		cat1	cat1	cat1
g_010202Q_VlDh_b	cat1	cat3	cat3	cat2	cat2
g_0103Q_Ab_Sk_b	cat1	cat3	cat3	cat3	cat3
g_0104Q_Ve_Gm_b	cat3	cat3	cat3	cat2	cat2
g_010601Q_StLo_b	cat1		cat1	cat1	cat1
g_010602Q_StHa_b	cat1		cat1	cat1	cat1
g_010603Q_StBo_b	cat1		cat1	cat1	cat1
g_0107Q_Rb_Kh_Mb_Mx_Ag_Ow_El_Ot_Hz_b	cat3	cat3	cat3	cat2	cat2
g_0108Q_We_b	cat3	cat3	cat3	cat2	cat2
g_0109Q_My_b	cat2		cat2	cat1	cat1
g_0201NE_Me_b	cat2		cat2	cat1	cat1
g_0202NE_Ml_b	cat1		cat1	cat1	cat1
g_020301NE_KzX_b	cat2		cat2	cat1	cat1
g_020303NE_KzWb_b	cat1		cat1	cat1	cat1
g_020401NE_LiX_Pd_b	cat2		cat2	cat2	cat2
g_020402NE_LiZa_LiMe_b	cat2		cat2	cat2	cat2
g_020403NE_LiKr_b	cat2		cat2	cat1	cat1
g_020404NE_LiOo_LiLu_b	cat2		cat2	cat1	cat1
g_0205NE_Kd_Kl_b	cat2		cat2	cat1	cat1
g_0206NE_Di_b	cat1		cat1	cat1	cat1
g_0207NE_Di_Bb_b	cat1		cat1	cat1	cat1
g_020801NE_BbGe_b	cat2		cat2	cat1	cat1
g_020802NE_BbHo_b	cat1		cat1	cat1	cat1
g_020901NE_BcAn_BcZo_BcKi_Vo_b	cat1		cat1	cat1	cat1
g_020902NE_BcEd_b	cat1		cat1	cat1	cat1
g_030101PA_VoSo_b	cat2		cat2	cat2	cat2
g_030102PA_VoVe_b	cat4	cat3	cat3	cat3	cat3
g_030103PA_VoVo_b	cat2		cat2	cat1	cat1
g_0302PA_Eg_b	cat2		cat2	cat2	cat2
g_030301PA_BmBt_b	cat4	cat3	cat3	cat4	cat4
g_030302PA_BmPu_b	cat4	cat3	cat3	cat4	cat4
g_030303PA_BmTe_b	cat4	cat3	cat3	cat3	cat3
g_030304PA_BmBw_b	cat4	cat3	cat3	cat3	cat3
g_030401PA_BiKe_b	cat2		cat2	cat1	cat1
g_030402PA_BiKs_b	cat4	cat3	cat3	cat3	cat3
g_030403PA_BiBe_b	cat1		cat1	cat1	cat1
g_030501PA_BoKe_b	cat1		cat1	cat1	cat1
g_030502PA_BoOb_b	cat1		cat1	cat1	cat1
g_030503PA_BoHe_BoBt_b	cat3	cat3	cat3	cat4	cat4
g_030601PA_ZzRu_b	cat1		cat1	cat2	cat2
g_030602PA_ZzWa_b	cat3	cat3	cat3	cat2	cat2
g_030603PA_ZzBa_b	cat2		cat2	cat2	cat2
g_030701PA_ShNe_b	cat1		cat1	cat1	cat1
g_030702PA_ShGr_b	cat2		cat2	cat1	cat1
g_030801PA_MaOd_b	cat4	cat3	cat3	cat4	cat5
g_030802PA_MaBu_b	cat1		cat1	cat2	cat2
g_030803PA_MaZo_b	cat4	cat3	cat3	cat2	cat4
g_030804PA_MaOn_b	cat1		cat1	cat2	cat2
g_030805PA_MaUr_b	cat4	cat3	cat3	cat4	cat4
g_030806PA_MaAs_b	cat4	cat3	cat3	cat3	cat3
g_030807PA_MaWe_b	cat1		cat1	cat2	cat2
g_0309PA_Ld_b	cat1		cat1	cat1	cat1
g_0310PA_Br_b	cat1		cat1	cat1	cat1

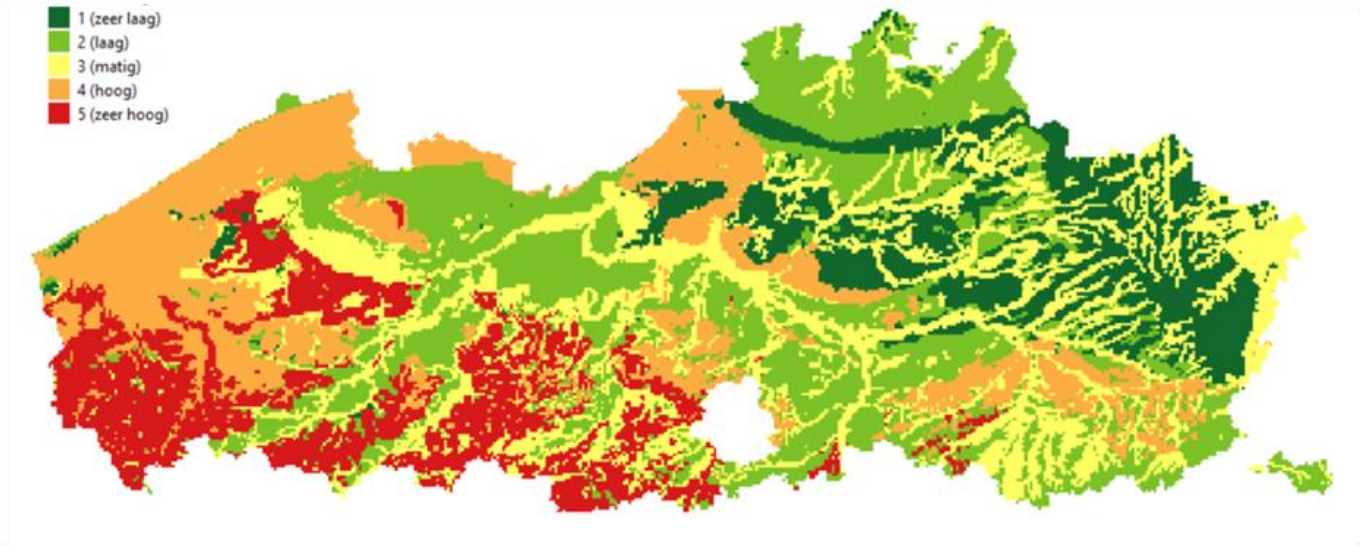
Tabel 22 (deel 2). Overzicht van de gevoeligheidscategorie voor alle relevante G3Dv3-lagen en H3Dv2-lagen. De categorie na elke stap uit de toegepaste methodologie is weergegeven.

G3Dv3-laag of H3Dv2-laag	Startcat. (stap 1)	Cat. Loket PG	Cat. na stap 2	Cat_enh. na stap 3	Cat_enh. na stap 4
g_031101PA_AaOe_b	cat1		cat1	cat2	cat2
g_031102PA_AaBe_b	cat3		cat3	cat2	cat2
g_031201PA_GeAb_GeVl_b	cat2		cat2	cat3	cat3
g_031202PA_GePi_b	cat4	cat3	cat3	cat4	cat5
g_031203PA_GeMe_b	cat4	cat3	cat3	cat4	cat4
g_031301PA_HyEg_GeKw_b	cat2		cat2	cat3	cat3
g_031401PA_TtEk_b	cat2	cat3	cat3	cat2	cat4
g_031402PA_TtKo_HyMo_b	cat2	cat3	cat3	cat3	cat4
g_0315PA_Mp_b	cat2		cat2	cat3	cat3
g_031601PA_KoAa_b	cat4	cat3	cat3	cat4	cat5
g_031602PA_KoRo_b	cat3	cat3	cat3	cat4	cat5
g_031603PA_KoOr_b	cat4	cat3	cat3	cat4	cat5
g_031604PA_KoMh_KoZo_b	cat3	cat3	cat3	cat3	cat3
g_031701PA_TiKn_b	cat1		cat1	cat1	cat1
g_031702PA_TiLo_TiDo_b	cat1		cat1	cat1	cat1
g_031801PA_HnGr_b	cat1		cat1	cat1	cat1
g_031802PA_HnCh_HnLi_HnHa_b	cat3		cat3	cat3	cat3
g_031803PA_HnWa_b	cat4	cat3	cat3	cat3	cat3
g_031804PA_HnBe_b	cat4	cat3	cat3	cat3	cat3
g_031901PA_HsMa_b	cat3		cat3	cat3	cat3
g_031902PA_HsGe_b	cat1		cat1	cat1	cat1
g_031903PA_HsOr_b	cat1		cat1	cat1	cat1
g_032001PA_OpEi_b	cat1		cat1	cat1	cat1
g_032002PA_OpOp_b	cat4	cat3	cat3	cat3	cat3
g_0321PA_Ho_b	cat1		cat1	cat1	cat1
g_0401KR_Ma_Ku_b	cat1		cat1	cat1	cat1
g_0402KR_Ne_Do_Gu_Va_Be_Vg_Es_Ms_b	cat1		cat1	cat1	cat1
g_0403KR_Ak_b	cat1		cat1	cat1	cat1
g_05JU_Aa_Sl_b	cat1		cat1	cat1	cat1
g_06TR_Ke_Mu_Ro_Bu_07PE_He_b	cat2		cat2	cat2	cat2
g_0801CA_We_b	cat1		cat1	cat1	cat1
g_0802CA_Na_b	cat1		cat1	cat1	cat1
g_0803CA_Di_b	cat1		cat1	cat1	cat1
g_09DE_b	cat1		cat1	cat1	cat1
g_10SI_11OR_12CM_t	cat1		cat1	cat1	cat1
A0151	cat1				cat1
A0152	cat2				cat2
A0161	cat1				cat1
A0162	cat3				cat3
A0163	cat1				cat1
A0164	cat3				cat3
A0165	cat1				cat1
A0131	cat4				cat4
A0132	cat1				cat1
A0133	cat3				cat3
A0181	cat1				cat1
A0182	cat3				cat3
A0183	cat1				cat1
A0184	cat3				cat3
A0185	cat1				cat1
A0186	cat1				cat1
A0233	cat4				cat4
A0234	cat1				cat1
A0235	cat4				cat4
A0236	cat1				cat1
A0237	cat4				cat4

6.1.3 Herwerking van de basiskaart voor publicatie

De basiskaart werd opgemaakt volgens bovenstaande methode opgemaakt op een schaal van 100 bij 100 meter. Om te fijnschalige interpretatie van de kaart te vermijden, werd de resolutie van de kaart vervolgens verlaagd naar een raster van 500 bij 500 meter. Hierbij werd telkens de hoogste gevoeligheidscategorie weerhouden.

Na het uitvoeren van de uitmiddeling werd ook het Brussels Hoofdstedelijk Gewest uitgeknipt uit de kaart. Het resultaat is onderstaande kaartweergave van de gevoeligheidskaart.



Figuur 44. Gevoeligheidskaart Vlaanderen op resolutie 500 x 500 meter.

6.2 TOELICHTING BIJ DE SYNTHETISCHE GEVOELIGHEIDSKAART

6.2.1 Gebruik van de synthetische gevoeligheidskaart

Bij het gebruik van de gevoeligheidskaart moet men zich goed bewust zijn van de mogelijkheden en beperkingen van de kaart. De kaart maakt een inschatting van de gevoeligheid van de ondergrond tot 5m diepte voor krimp-/zwelfenomenen bij veranderend vochtgehalte. De 3D modellen waarop deze kaart gebaseerd is, geven een verkennende indicatie van welke geologische lagen men op een bepaalde locatie kan verwachten. De gevoeligheidskaart die hiervan afgeleid is, ondersteund door terreindata, literatuur, grondmonsters en laboproeven, geeft een, op dit moment, beste indicatie van de gemodelleerde gevoeligheid. Toch is het op een locatie die als weinig gevoelig wordt aangeduid, om verschillende redenen mogelijk dat er toch krimp-/zwelgevoelige lagen voorkomen. Of omgekeerd, locaties aangeduid als krimp-/zwelgevoelig kunnen in realiteit niet onderhevig zijn aan deze problematiek. Om dit goed te begrijpen is het belangrijk te weten dat de kaart is opgesteld op basis van:

1. Het geologisch model van Vlaanderen (G3Dv3 verfijnd met enkele lagen uit het hydrogeologisch model van Vlaanderen, H3Dv2). Een geologisch model is een modellering van de laagopbouw van de ondergrond en zal nooit een exacte weerspiegeling van de werkelijkheid zijn. De laagscheidingen van een geologisch model worden opgesteld op basis van puntdata (uit boringen, sonderingen, enz.) en geologische concepten die als input dienen voor een gebiedsdekkende kartering. De foutenmarge is afhankelijk van de

beschikbare puntdata (hoeveelheid en betrouwbaarheid ervan) en varieert dus ook ruimtelijk. Zo is het perfect mogelijk dat in realiteit lokaal een geologische laag voorkomt, terwijl dit niet zo in het geologisch model vervat zit. Ook het omgekeerde is uiteraard van toepassing. Verder kunnen laagdiktes uit het model afwijken van de werkelijkheid.
De resolutie van de gepubliceerde kaart bedraagt 500x500m. De basisversie van de gevoeligheidskaart werd opgemaakt op basis van het 100x100m raster van het G3Dv3-model en werd vervolgens verlaagd tot een 500x500m raster, waarbij telkens de hoogst voorkomende gevoeligheidscategorie werd weerhouden.

2. Een zo goed mogelijke inschatting van de krimp-/zwelgevoeligheid bij veranderend vochtgehalte van de geologische lagen van het geologisch model door de toekenning van een gevoeligheidscategorie per laag. Dit gebeurde op basis van de beschikbare informatie en een zo goed mogelijk onderbouwde methodologie. Voor een aantal lagen is er weinig of geen informatie beschikbaar, waardoor de toegekende gevoeligheidscategorie mogelijk minder nauwkeurig is. Geologische lagen zijn ook vaak heterogeen van aard, waardoor ze lokaal meer of minder gevoelig kunnen zijn voor krimp-/zwelfenomenen bij veranderend vochtgehalte.

De kaart geeft enkel informatie over de waarschijnlijkheid op het voorkomen van krimp-/zwelgevoelige gronden in de bovenste 5m van de ondergrond en bevat geen informatie over amplitudes, laagdiktes, tijd, exacte diepte, enz. Het voorkomen van krimp-/zwelgevoelige lagen hoeft ook niet noodzakelijk tot krimp-/zwelproblematiek te leiden.
In de eerste plaats is er een verandering van het vochtgehalte in de ondergrond nodig om de volumeverandering te induceren. Een verandering van het vochtgehalte van de ondergrond kan veroorzaakt worden door tal van factoren zoals natuurlijke seizoensgebonden variaties, langdurige periodes van droogte of neerslag, een wijziging in de verharding, de aanwezigheid van grote struiken of bomen, het aanplanten of rooien van grote struiken of bomen, het doorgedreven snoeien van grote struiken of bomen, (natuurlijke of geïnduceerde) grondwaterverlagingen in de omgeving, lekkende waterleidingen of rioleringen, ...
Daarnaast spelen nog andere factoren een rol of de volumeverandering al dan niet tot schade leidt, zoals het type fundering, de aanzetdiepte van de fundering, een combinatie van funderingstypes en/of aanzetdieptes en de stijfheid van de structuur, ...

De kaart is dus louter een verkennend instrument en kan bijvoorbeeld aangewend worden om te wijzen op de mogelijke aanwezigheid van krimp-/zwelgevoelige gronden bij de aankoop of het bezit van een woning, gebouw of perceel (bv. via de woningpas) of bij het verstrekken van een bouwvergunning. De kaart vervangt in geen enkel geval specifiek terreinonderzoek (visueel, buurtonderzoek, ...) of grondonderzoek (sonderingen, boringen, ...) voor een specifieke case op een welbepaalde locatie. Dergelijk onderzoek blijft noodzakelijk om de juiste conclusies te kunnen trekken en de meest optimale, gerichte beslissingen/maatregelen te kunnen treffen.
Merk hierbij op dat het krimp-/zwelgedrag vooralsnog moeilijk of niet kan worden afgeleid uit sonderingswaarden. Handboringen kunnen tot enkele meters diep aanwijzing geven of er zich ondiep klei- of leemhoudende grond bevindt. De monsters uit handboringen kunnen echter niet gebruikt worden om gestandaardiseerde laboproeven op uit te voeren. Dat kan wel op meer kwalitatieve grondmonsters. Sonderingen kunnen wel wijzen op de aanwezigheid van bv. klei of leem in de ondergrond. Het wordt bovendien aangeraden steeds elektrische sonderingen (CPTE) uit te laten voeren in plaats van de goedkopere, vaak toegepaste mechanische sonderingen die minder nauwkeurige informatie opleveren.

De kaart bevat geen informatie over zettingen ten gevolge van het voorkomen van niet-plastische, maar wel sterk samendrukbare lagen (bv. veen).

6.2.2 Minimumeisen voor terreinonderzoek op basis van de gevoeligheidskaart

Gezien de onzekerheid die bestaat op de uiteindelijke gevoeligheidskaart (zoals besproken in voorgaande paragraaf), wordt er voor gekozen geen harde minimumeisen voor grondonderzoek op te leggen per gevoeligheidscategorie. Wel kunnen enkele algemene richtlijnen meegegeven worden als leidraad. Er zijn mogelijk krimp-/zwelgevoelige lagen aanwezig in de ondergrond als een of meerdere van volgende voorwaarden zijn voldaan:

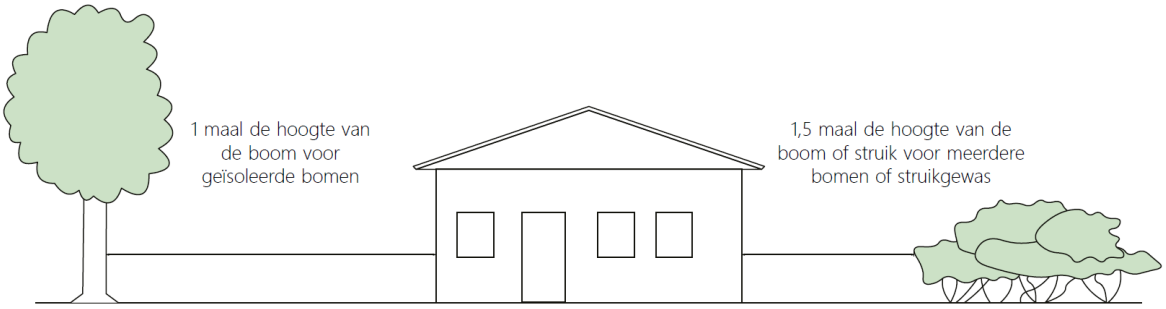
- de kaart wijst op een zekere gevoeligheid (categorie 3 of hoger) op de locatie in kwestie en/of in de buurt ervan,
- in de buurt komt er schade voor aan woningen die kan herleid worden tot deze problematiek (ongeacht de gevoeligheidscategorie aangegeven door de kaart),
- boormonsters en/of sonderingen wijzen op de aanwezigheid van klei- of leemhoudende lagen ter hoogte van of onder het beoogde aanzetpeil van de fundering (ongeacht de gevoeligheidscategorie aangegeven door de kaart).

Indien een of meerdere van bovenstaande voorwaarden vervuld zijn, is extra waakzaamheid geboden bij het plannen van nieuwbouw- of verbouwingswerken en is het raadzaam onderstaande adviezen in acht te nemen. Ook bij het onderzoeken van optredende schade (scheuren in gevel of binnenmuren groter dan 3mm of scheuren kleiner dan 3mm die niet stabiel zijn, d.w.z. die een evolutie vertonen in de tijd) zijn onderstaande adviezen relevant (Lassoie, 2022):

- Beoordeel de lokale situatie en de aanwezigheid van mogelijk risico verhogende factoren zoals de aanwezigheid van (hoge) bomen en beplanting, (tijdelijke) naburige grondwateronttrekkingen of bemalingen in de omgeving, lekkende riolering of drainage, verandering van waterdoorlaatbaarheid van het oppervlak rond het gebouw, enz.
- Vraag het advies van een geotechnisch deskundige met kennis van zaken. Een lijst met geregistreerde geotechnische deskundigen kan geraadpleegd worden op https://www.geo-registered.be/nl/registraties/.
- Laat boringen uitvoeren met extractie van grondmonsters waarvan op zijn minst de plasticiteitsindex en de korrelgrootteverdeling worden bepaald. De meest directe informatie verkrijgt men door de uitvoering van zwel-/krimpproeven. Hierbij moet echter opgemerkt worden dat er momenteel weinig consensus bestaat over de gestandaardiseerde uitvoering van zwel-/krimpproeven. Bovendien kent de technische uitvoering ervan enkele uitdagingen (ongeroerde monstername, meetnauwkeurigheid van de zwel/krimp, enz.), wat toepassing ervan niet evident maakt.
- Om een beter inzicht te krijgen in de lokale problematiek kan het ook nuttig zijn om het watergehalte van de ondergrond op verschillende dieptes rond het gebouw te bepalen. Dit kan gebeuren op geroerde of ongeroerde grondmonsters. Een continue monitoring van het watergehalte gedurende minimaal 1 jaar biedt meer gedetailleerde inzichten, omdat zo ook seizoensgebonden effecten kunnen geïdentificeerd worden.
- Bij de aanplanting en het onderhoud (insnoeien) van (nieuwe, hoge) vegetatie (bomen en planten) moet men voldoende afstand voorzien tussen de vegetatie en het gebouw (zie Figuur 45).
- Zorg voor een voldoende diepe funderingsaanzet met een uniforme diepte voor het hele gebouw. Indien mogelijk onder de krimp-/zwelgevoelige lagen of op een diepte waar geen verandering in vochtgehalte meer wordt verwacht. In principe is het watergehalte van de grond vanaf een diepte van 1.5m constant doorheen het jaar. Door bv. de aanwezigheid van

bomen of struiken, de aanwezigheid van een geventileerde kruipruimte zonder bescherming van de grond, ... kan de seizoensgebonden invloed dieper reiken.
Tabel 23 geeft een overzicht van de te treffen maatregelen bij funderingen op plastische gronden (Van der Auwera et al., 2021).

Voor de inschatting van de krimp-/zwelgevoeligheid op basis van plasticiteitsindex en/of kleifractie kan een beroep gedaan worden op de classificatiesystemen uit Tabellen 6 en 7. Voor de opmaak van de gevoeligheidskaart werd uitgegaan van de classificatiesystemen volgens BRE (1993) en NHBC (2023), weliswaar niet toegepast op de gemodificeerde plasticiteitsindex maar op de plasticiteitsindex (wat een eerder conservatieve benadering is).



Figuur 45. Te voorziene minimale afstand tussen vegetatie en het gebouw, indien plastische gronden voorkomen.

Tabel 23. Overzicht van de te treffen maatregelen bij funderingen op plastische gronden (Van der Auwera et al., 2021).

Aan te houden aanzetdieptes	
Bij afwezigheid van vegetatie	Minimale aanzetdiepte: 1.5m (*)
Binnen de invloedzone van vegetatie	- Minimale aanzetdiepte: 3.0m (*) - Bij twijfel: put- of paalfunderingen
Na het wegnemen van vegetatie	- Aanzetniveau onder de invloedzone van het gewijzigde watergehalte - Wachttijd inlassen - Bij twijfel: put- of paalfunderingen
In geval van schade bij bestaande gebouwen	

Schade ten gevolge van de natuurlijke variatie van het watergehalte	- Verdiepen van de fundering door middel van:
	  - ondermetselen
	  - onderschoeien
	  - micropalen
	  - injecties
	- Aanbrengen van een horizontaal waterdicht scherm over de omtrek van het gebouw
	- Herbevochtiging door het injecteren van water met korte filterelementen

Schade door vegetatie	- Verdiepen van de fundering d.m.v. micropalen of *jet grouting* - Aanbrengen van een verticaal wortelscherm - Regelmatig insnoeien van de vegetatie - Rooien van de vegetatie (alleen bij beperkte zettingen of schade)
Preventieve maatregelen bij bestaande in plastische gronden gefundeerde gebouwen	
Bij aanwezigheid van vegetatie	- Insnoeien van de vegetatie binnen de invloedzone indien er zich een droge zomer aankondigt - Zodra de eerste schadeverschijnselen optreden: drastisch insnoeien of rooien van de vegetatie - Verticaal wortelscherm
Invloed van seizoenschommelingen	- Horizontaal scherm aan de omtrek van het gebouw - Zodra de eerste schadeverschijnselen optreden: herbevochtiging door het injecteren van water met korte filterelementen
(*) Deze waarden houden geen rekening met de toekomstige effecten van de klimaatverandering.	

6.3 TOETSING KAART AAN INVENTARIS SCHADEGEVALLEN

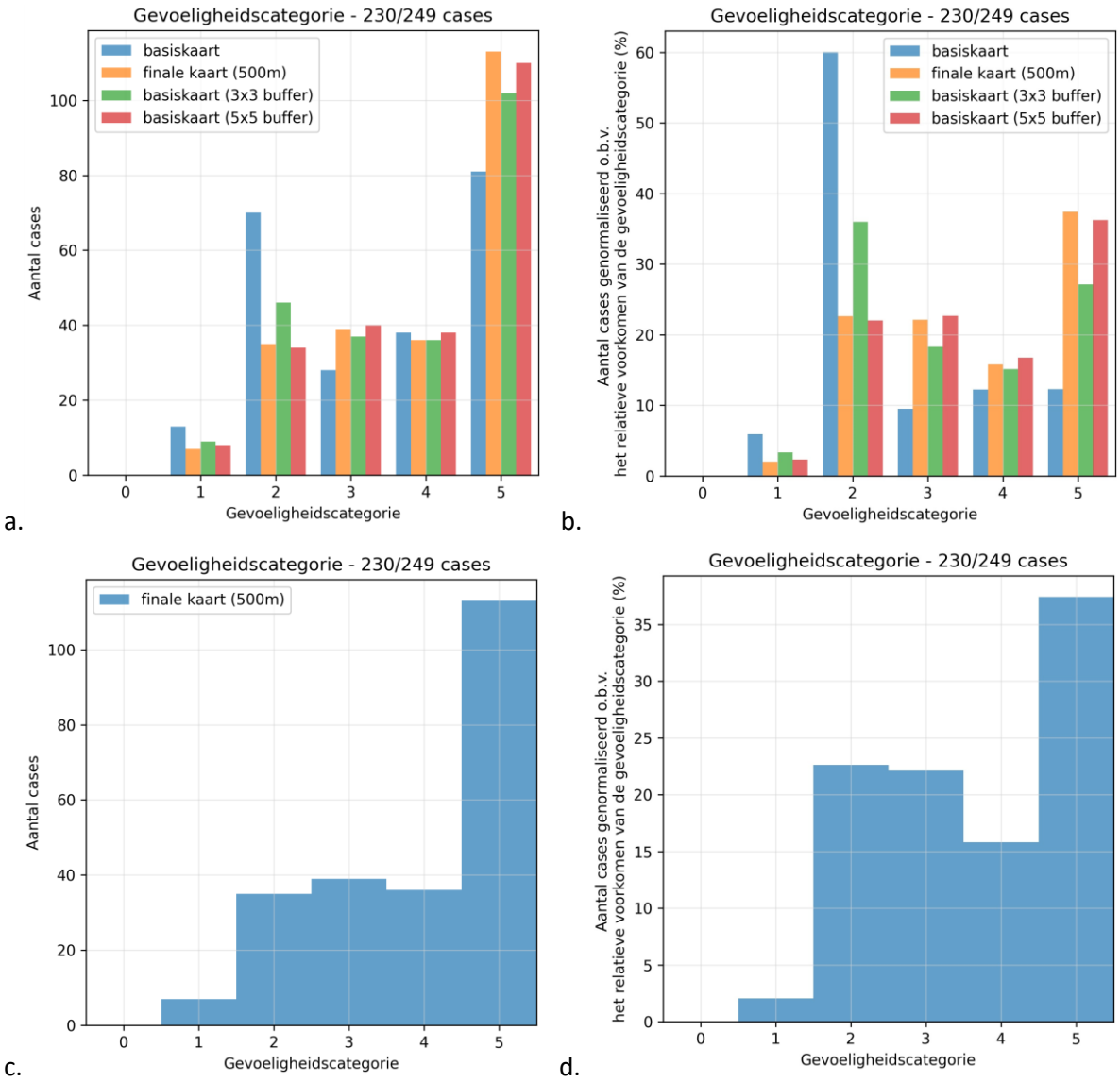
Zoals aangegeven werd voor de opmaak van de gevoeligheidskaart geen rekening gehouden met de inventaris van cases/schadegevallen. Door deze benadering kan de inventaris perfect gebruikt worden (in principe zonder bias) om de uiteindelijke gevoeligheidskaart aan te toetsen.

Figuren 46a en c tonen aan de hand van 2 histogrammen de verdeling van het aantal schadegevallen per gevoeligheidscategorie. In Figuur 46a worden de schadegevallen niet alleen getoetst aan de basiskaart (100x100m raster) en de herwerkte (finale) versie (500x500m raster), maar ook aan 2 bijkomende kaarten. Deze 2 bijkomende kaarten werden opgesteld op basis van de basiskaart waarbij een buffering van 3x3 en 5x5 rastercellen werd toegepast en voor elke rastercel de hoogste categorie binnen de buffer werd weerhouden (bij dit principe blijft de originele rasterresolutie behouden in tegenstelling tot de herwerkte (finale) versie met een 500x500m). Dit principe wordt grafisch verduidelijkt in Figuur 47. In Figuur 46c wordt enkel het histogram op basis van de herwerkte (finale) versie van de gevoeligheidskaart getoond. De cijferwaarden bij deze grafieken (aantal schadegevallen en procentueel) zijn opgenomen in Tabel 24. Merk op dat er voor 29 van de 249

geïnventariseerde schadegevallen geen locatie kon worden bepaald nauwkeuriger dan de gemeente. Deze schadegevallen worden in deze analyse niet in rekening gebracht.
In Figuren 46b en d wordt dezelfde data getoond als in Figuren 46a en c, maar genormaliseerd op basis van het relatieve voorkomen van de gevoeligheidscategorieën in heel Vlaanderen (zie Tabel 26 voor de cijferwaarden voor de beschouwde kaartlagen). Deze benadering houdt meer rekening met het relatieve voorkomen van elke gevoeligheidscategorie. De cijferwaarden bij deze figuren zijn opgenomen in Tabel 25.

De toetsing op basis van de finale kaart (500x500m raster) toont dat 49% van de geïnventariseerde schadegevallen met locatiegegevens binnen gevoeligheidscategorie 5 valt (37% indien genormaliseerd voor het relatieve voorkomen van de gevoeligheidscategorieën). Daarenboven ligt 82% van de schadegevallen (75% indien genormaliseerd) in een gevoeligheidscategorie van 3 of hoger. Slechts 3% van de schadegevallen (2% indien genormaliseerd) situeert zich binnen een zone met gevoeligheidscategorie 1.

De resultaten op basis van de andere kaartversies zijn gelijkaardig. Op basis van de basiskaart vallen er relatief veel schadegevallen binnen gevoeligheidscategorie 2 (30% of 60% indien genormaliseerd voor het relatieve voorkomen van de gevoeligheidscategorieën). Dit wijst erop dat het toch wel nuttig is een zekere buffering in te bouwen op de gepubliceerde kaart en voor de toetsing met schadegevallen (hetzij door de kaartresolutie te verlagen naar een 500x500m raster zoals voor de finale kaartversie werd toegepast, hetzij door een 3x3 of 5x5 buffer toe te passen). Op die manier worden onzekerheden op de finale kaart enigszins opgevangen, maar worden ook onzekerheden op de precieze locatie van de schadegevallen gecounterd (bv. voor de schadegevallen waar enkel de straatnaam voor gekend is).



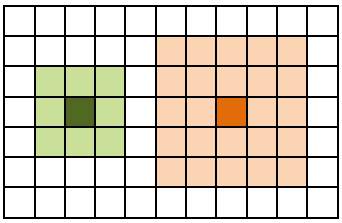
Figuur 46. Toetsing van de gevoeligheidskaart aan de inventaris met cases aan de hand van histogrammen. (a) Voor de basiskaart met 100x100m raster en de herwerkte (finale) kaart met 500x500m raster en voor kaarten opgemaakt met buffers van 3x3 en 5x5 rastercellen toegepast op de 100x100m rasterkaart (zie Figuur 47 voor toelichting bij deze buffers). (c) Enkel voor de herwerkte (finale) kaart met 500x500m raster. (b) en (d) Idem aan respectievelijk (a) en (c), waarbij de aantallen werden genormaliseerd op basis van het relatieve voorkomen van de gevoeligheidscategorie over heel Vlaanderen (zie Tabel 26 voor de waarden van het relatieve voorkomen van elke gevoeligheidscategorie).

Tabel 24. Cijferwaarden bij de histogrammen uit Figuren 46a en c (aantal cases per gevoeligheidscategorie en percentage ten opzichte van het totaal aantal cases waarvoor de gevoeligheidscategorie kon worden bepaald, d.w.z. waarvoor (x,y)-coördinaten beschikbaar zijn).

	Cat. 1	Cat. 2	Cat. 3	Cat. 4	Cat. 5
Basiskaart	13 (6%)	70 (30%)	28 (12%)	38 (17%)	81 (35%)
Finale kaart (500x500m)	7 (3%)	35 (15%)	39 (17%)	36 (16%)	113 (49%)
Basiskaart (3x3 buffer)	9 (4%)	46 (20%)	37 (16%)	36 (16%)	102 (44%)
Basiskaart (5x5 buffer)	8 (3%)	34 (15%)	40 (17%)	38 (17%)	110 (48%)

Tabel 25. Cijferwaarden bij de histogrammen uit Figuren 46b en d (aantal cases per gevoeligheidscategorie genormaliseerd op basis van het relatieve voorkomen van elke gevoeligheidscategorie over heel Vlaanderen).

	Cat. 1	Cat. 2	Cat. 3	Cat. 4	Cat. 5
Basiskaart	5.9%	60.0%	9.5%	12.3%	12.3%
Finale kaart (500x500m)	2.0%	22.6%	22.1%	15.8%	37.4%
Basiskaart (3x3 buffer)	3.3%	36.0%	18.4%	15.1%	27.1%
Basiskaart (5x5 buffer)	2.3%	22.0%	22.7%	16.7%	36.2%



Figuur 47. Illustratie van de toepassing van de 3x3 en 5x5 buffers op de gevoeligheidskaart. Voor elke cel wordt de hoogste categorie weerhouden binnen de buffer. De originele kaartresolutie (100x100m) blijft bewaard.

Tabel 26. Relatieve voorkomen van elke gevoeligheidscategorie binnen Vlaanderen voor de verschillende kaartversies.

	Cat. 1	Cat. 2	Cat. 3	Cat. 4	Cat. 5
Basiskaart	21.4%	40.3%	16.0%	15.2%	7.1%
Finale kaart (500m)	12.8%	28.4%	24.9%	19.3%	14.5%
Basiskaart (3x3 buffer)	15.9%	33.5%	21.3%	18.0%	11.4%
Basiskaart (5x5 buffer)	12.8%	28.5%	24.9%	19.3%	14.5%

7 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

7.1 ALGEMENE CONCLUSIES

De resulterende gevoeligheidskaart brengt de gevoeligheid van de Vlaamse ondergrond tot 5m diepte voor krimp-/zwelfenomenen bij veranderend vochtgehalte in beeld. De kaart werd opgesteld op basis van een uitgebreid dataonderzoek, gebaseerd op wetenschappelijke literatuur en DOV, waarbij data werd verzameld over de geologische lagen in de Vlaamse ondergrond voor zo veel mogelijk relevante parameters (zie Hoofdstuk 3 "Literatuur- en dataonderzoek"). Aan elke laag voorkomend in het (hydro)geologisch 3D-model van Vlaanderen (G3Dv3-H3Dv2) werd een gevoeligheidscategorie toegekend op basis van alle beschikbare gegevens per laag (paragraaf 6.1.1 "Basismethodologie"). De uiteindelijke gevoeligheidskaart toont de hoogst voorkomende gevoeligheidscategorie in de bovenste 5m onder het maaiveld. Deze kaart werd gepubliceerd als een rasterkaart met een celgrootte van 500x500m. Voor de eerste maal werd een inventaris opgesteld van schade aan woningen, potentieel gelinkt aan krimp-/zwel gedrag van de ondiepe ondergrond in Vlaanderen. De gevoeligheidskaart werd getoetst aan deze inventaris met schadegevallen (in het totaal 230 potentiële schadegevallen waarvoor de locatie minimaal op straatniveau gekend is). 82% van deze schadegevallen liggen in een gevoeligheidscategorie van 3 (gemiddeld) of hoger. 49% ligt in de hoogste gevoeligheidscategorie 5 (zeer hoog).

Om tot dit eindproduct te kunnen komen werden meerdere aannames gemaakt, die zo goed mogelijk gedocumenteerd en onderbouwd werden (zie paragraaf 6.1.2 "Kanttekeningen bij de basismethodologie"). Gezien de onzekerheid die onvermijdelijk met dergelijke kaarten gepaard gaat, moet de gebruiker zich bewust zijn van de manier waarop de kaart werd opgesteld en van de mogelijkheden en beperkingen van de kaart. Dit werd uitvoerig besproken in paragraaf 6.2 "Toelichting bij de synthetische gevoeligheidskaart". Enerzijds worden er belangrijke richtlijnen gegeven voor het gebruik van de kaart (paragraaf 6.2.1), anderzijds werd er een voorstel gedaan voor de minimumeisen voor terreinonderzoek op basis van de gevoeligheidskaart (paragraaf 6.2.2).

De kaart dient dus als verkennend instrument te worden gebruikt. Ze geeft enkel een inschatting van de potentiële krimp-/zwelgevoeligheid van de ondergrond. Om de specifieke grondcondities op perceelniveau te kennen is er steeds specifiek grondonderzoek vereist. Deze kaart moet als een basiskaart gezien worden die naarmate er meer relevante data over de Vlaamse ondergrond wordt verworven en het inzicht in de problematiek verder vergroot, kan worden bijgestuurd en verbeterd.

In het kader van deze studie werden ook een aantal cases, waar grote differentiële zettingen aan de woning zijn opgetreden, van naderbij bestudeerd (paragraaf 5). Laboproeven op grondmonsters van de sites wezen op een zekere krimp-/zwelgevoeligheid van de ondergrond. In situ monitoring met van het watergehalte in de ondergrond rond de woningen met Watermark-sensoren en bepaling van het watergehalte van grondmonsters toonden de grote invloed van hoge aanplantingen (in dit geval hoogstammige bomen) op het vochtgehalte van de ondergrond tot verschillende meters diep. De aanwezigheid van deze aanplantingen aan één zijde van de woningen in combinatie met de aanwezigheid van krimp-/zwelgevoelige lagen in de ondergrond (en het type en de aanzetdiepte van de funderingen) zijn wellicht de oorzaak van de differentiële zettingen die zijn opgetreden bij deze schadegevallen.

7.2 AANBEVELINGEN VOOR ONDERZOEK EN BELEID

7.2.1 Onderzoeksaanbevelingen

Toekomstig onderzoek kan zich op verschillende aspecten toespitsen:

- Het is enorm belangrijk meer relevante data te verzamelen voor alle geologische lagen voorkomend in de Vlaamse ondergrond. Aangezien krimp-/zwelproeven de meest rechtstreekse informatie geven over het krimp-/zwelpotentieel, is het noodzakelijk dergelijke proeven couranter uit te voeren volgens een gestandaardiseerde proefmethode. Daarbij is het ook belangrijk na te gaan of de uitgevoerde proeven representatief zijn voor het in-situ gedrag van de ondergrond (invloed van bv. bovenbelasting, zijwaartse druk, ...).
- Daarnaast moeten voor de Vlaamse ondergrond ook zo veel mogelijk parameters zoals bulk- en kleimineralogie, korrelgrootteverdeling, Atterbergse grenzen, CEC, ... beter in kaart gebracht worden. Enkel op die manier kan er een beter inzicht worden verworven in de link tussen het krimp-/zwelgedrag en deze parameters. Dat zou op termijn dan weer toelaten op een meer betrouwbare manier het krimp-/zwelpotentieel in te schatten op basis van meer klassieke proefparameters (plasticiteitsindex, korrelverdeling, mogelijk conusweerstand in combinatie met lokale wrijving, ...). Indien meer data beschikbaar zijn, kan de hier ontwikkelde methodiek voor de klassenbepaling van de verschillende geologische lagen opnieuw doorlopen worden, en de gevoeligheidskaart bijgestuurd worden.
- Als er een grotere, gebiedsdekkende dataverzameling voor handen is, wordt het ook realistischer binnen de meest gedetailleerde laagniveaus van de (hydro)geologische modellen een verdere ruimtelijke onderverdeling te maken (bv. voor zones waar een geologische laag een andere samenstelling heeft, die meer/minder gevoelig is). Op die manier kan de nauwkeurigheid van de gevoeligheidskaart verder verhoogd worden.
- Momenteel werd er veelal abstractie gemaakt van de proefprocedure die werd gehanteerd om grondparameters te bepalen. In toekomstig onderzoek zou hier meer aandacht aan kunnen worden besteed, zodat parameters beter een op een te vergelijken zijn. Het is echter niet altijd eenvoudig te achterhalen welke proefmethode werd gebruikt.
- In deze studie werd bij classificatie meestal gebruik gemaakt van de 75%-kwantielwaarde van een dataset, soms nog verder bijgestuurd op basis van outliers. Deze benadering kan in de toekomst geverifieerd worden.
- De behandeling van smectietgehalte in bulk- en kleimineralogie verdient eveneens verder onderzoek. In deze studie werd de som gemaakt van %smectiet en %smectiet-illiet in de bulkmineralogie om een inschatting te maken van het krimp-/zwelpotentieel. Het kan verder onderzocht worden of aan het %smectiet-illiet een lager gewicht moet worden toegekend dan voor %smectiet. Om ook de gegevens van de kleimineralogie te kunnen exploiteren, werden deze omgerekend naar bulkmineralogie op basis van de kleifractie. Ook deze conversie kan nog verder onderzocht worden.
- De grenzen gebruikt voor de classificatie zijn veelal gebaseerd op internationale literatuurwaarden (plasticiteitsindex, korrelgrootteverdeling) en onderbouwde aannames (smectietgehalte, CEC). Als er een meer uitgebreide dataset beschikbaar is voor de Vlaamse ondergrond, kan bekeken worden of bijsturing van deze classificatiesystemen noodzakelijk is.
- De toetsing van de inventaris met schadegevallen aan de geologische kaart en kaarten van geomorfologische parameters zoals TPI, helling, DEV, ... lijkt er op te wijzen dat er een zekere link is tussen beiden. Binnen deze studie werd slechts een eerste, rudimentaire analyse uitgevoerd en konden op dit vlak geen duidelijke conclusies getrokken worden. Bijkomend

onderzoek kan hier mogelijk meer inzichten opleveren, die dan weer in nieuwe (risico)kaarten kunnen worden verwerkt.

- Uit de cases (paragraaf 5) blijkt dat de invloed van (hoge) aanplantingen op het vochtgehalte van de ondergrond zeer groot kan zijn. Ook dit aspect kan in meer detail bestudeerd worden in de toekomst. Wat is de rol van grote aanplantingen in deze problematiek (invloed op vochtgehalte, invloed op krimp-/zwelgedrag, ...)?
- De ruimtelijke analyse van bodembewegingen (INSAR) lijkt heel wat potentieel te hebben, al waren de resultaten van de analyses die in het kader van dit project gebeurden niet zo duidelijk. Toch wordt er geloofd dat in de toekomst dergelijke technologie heel wat lokale en gebiedsdekkende informatie kan opleveren in het kader van deze problematiek.
- Als de inventaris met potentiële schadegevallen verder kan uitgebreid worden, kan deze ook verder geëxploiteerd worden om de gevoeligheidskaart te verfijnen of als input voor een gevaren- of risicokaart.

7.2.2 Beleidsaanbevelingen

Naar aanleiding van deze studie kunnen eveneens een aantal beleidsaanbevelingen geformuleerd worden:

- Als er meer data beschikbaar zijn (krimp-/zwelproeven, bulk- en kleimineralogie, korrelgrootteverdeling, Atterbergse grenzen, CEC, ...), kan de hier ontwikkelde methodiek voor de klassenbepaling van de verschillende geologische lagen opnieuw doorlopen worden, en de gevoeligheidskaart bijgestuurd worden.
- Het is noodzakelijk tot een gestandaardiseerde proefmethode voor krimp-/zwelproeven te komen (labo- en veldproeven), met aandacht voor de technische haalbaarheid van de proef.
- Het is belangrijk dat er verder wordt ingezet op het inventariseren van alle potentiële schadegevallen en op het onderzoeken en/of documenteren van de oorzaak van de schade per case. Het “Registratiepunt Droogteschade aan woning” van het Departement Omgeving dient daarom actief te blijven. Dit levert een schat aan informatie om zones met hogere schadedensiteit te lokaliseren en het inzicht in de problematiek te vergroten. Wanneer dergelijke gegevens gebiedsdekkend beschikbaar zijn, kunnen ze ook aangewend worden om als input te dienen voor de opmaak van gevoeligheidskaarten, gevarenkaarten en/of risicokaarten.
- Gelijkaardig aan bv. de informatieplicht voor overstromingsgevoeligheid kan het nuttig zijn de koper (bouwgrond of gebouw) of huurder te informeren over de krimp-/zwelgevoeligheid van de ondergrond. Ook bij plan- en vergunningsaanvragen (nieuwbouw, renovatie) is dit uitermate relevant. Daarbij kan er verwezen worden naar de minimumeisen voor terreinonderzoek uit paragraaf 6.2.2. Voor bestaande woningen kunnen deze gegevens informatief worden opgenomen in de woningpas (https://woningpas.vlaanderen.be/).
- Aansluitend bij de vorige aanbeveling moet ook overwogen worden om de inventaris met potentiële schadegevallen consulteerbaar te maken voor lokale omgevingsambtenaren, zodat burgers kunnen geïnformeerd worden over schadegevallen in de buurt.
- Het belang van data is al verschillende keren aangehaald. Data is niet alleen noodzakelijk om de problematiek globaal in kaart te brengen (grondonderzoek, laboproeven, maar ook inventarisatie van potentiële schadegevallen). Ook op lokale schaal kan data een belangrijke rol spelen om de problematiek beter te begrijpen, gerichte voorzorgs- of remediëringsmaatregelen te treffen, enz. Het maximaal vrij ter beschikking stellen (via DOV) van data rond stabiliteitsonderzoeken (boor-, sondeer- en labogegevens) zou dus een grote meerwaarde hebben. Dergelijke data kan dan ook via de woningpas worden ontsloten, wat

een onmiddellijk inzicht in de lokale ondergrond geeft op basis van eerder uitgevoerd grondonderzoek.

- Om de kwaliteit van de aangeleverde data verder te verhogen, kan men bekijken om naast de lithologische boorbeschrijving die momenteel al verplicht wordt aangeleverd door de boorfirma, ook een geologische interpretatie door een expert-geoloog te vragen. Daarbij is het uiteraard belangrijk dat de kwaliteit van deze interpretatie kan gegarandeerd worden.

7.3 STAP NAAR GEVARENKAARTEN EN RISICOKAARTEN

De **gevoeligheidskaart** geeft aan de hand van een gevoeligheidscategorie de waarschijnlijkheid van het voorkomen van krimp-/zwelgevoelige grond op een bepaalde locatie. Om de stap te zetten richting een gevarenkaart en/of risicokaart is het in de eerste plaats belangrijk de definitie van dergelijke kaarten scherp te stellen. Op basis van Hervás en Bobrowsky (2009) en Wubalem (2021) kan gesteld worden dat:

- Een **gevarenkaart** wijst op de waarschijnlijkheid van het voorkomen van plastische gronden op een bepaalde locatie met een specifieke magnitude (grootte van de krimp/zwel) gedurende een referentieperiode.
- Een **risicokaart** wijst dan weer op de verwachte verliezen of schade ten gevolge van zwel-/krimp van de ondergrond en is het product van een combinatie van gevoeligheid, gevaar en bedreigde elementen.

Om te komen tot een **gevarenkaart** lijkt het in de eerste plaats logisch de dikte (en de diepte) van de lagen in de ondiepe ondergrond (momenteel bovenste 5m) in rekening te brengen, samen met hun gevoeligheid (bv. volumeverandering i.f.v. het watergehalte). Op die manier kan een inschatting worden gemaakt van de grootte van de te verwachte zetting/stijging ten gevolge van het krimpen/zwellen van de ondergrond. Enkele kanttekeningen die hierbij moeten geplaatst worden en de opmaak van dergelijke kaart mogelijk bemoeilijken:

- Momenteel is er te weinig data beschikbaar. De volumeverandering i.f.v. het watergehalte is bijvoorbeeld amper gekend voor de Vlaamse ondergrond.
- De in rekening te brengen laagdiepte(s) – en dikte(s) zijn afhankelijk van de aanzetdiepte van de fundering. Men kan ofwel kaarten maken voor verschillende aanzetdieptes of eenvoudigweg abstractie maken van de aanzetdiepte.
- Een bijkomende parameter die wellicht ook nuttig is om mee te nemen in dergelijke kaartopmaak is de evolutie van het watergehalte in de ondiepe ondergrond (bv. ten gevolge van klimaatverandering, zowel seizoensgebonden als over lange termijn).
- Hoewel het momenteel nog aan voldoende inzichten ontbreekt, is het mogelijk ook relevant geomorfologische parameters zoals TPI, DEV, helling, ... in rekening te brengen.
- De in Frankrijk opgestelde 'blootstellingskaart' (zie paragraaf 3.1.3.1) werd opgemaakt op basis van een zogenaamde 'gevoeligheidskaart' (waarin o.a. de dikte en continuïteit van de lagen al vervat zit) gecombineerd met de schadegevalfrequentie (# schadegevallen per vierkante kilometer verstedelijkt gebied). Er kan over gediscussieerd worden of dergelijke kaart kan worden bestempeld als gevarenkaart, dan wel als risicokaart. Het is in elk geval wel een interessante denkpiste om ook toe te passen op Vlaanderen, op voorwaarde dat de inventaris fors kan worden uitgebreid voor heel Vlaanderen.

Voor de verdere stap naar een **risicokaart** moeten volgens de definitie bovenop de gevarenkaart ook de "bedreigde elementen" in rekening gebracht worden. Een mogelijke benaderingswijze is het gebouwenpatrimonium te inventariseren voor elke gedefinieerde zone van de gevarenkaart. Daarvoor moet dan het percentage worden ingeschat dat effectief risico loopt om op termijn schade

op te lopen. Dit kan gebeuren op basis van historiek, funderingswijze, bouwjaar, enz. met de effecten van klimaatverandering op het watergehalte in de ondiepe ondergrond in het achterhoofd. Dergelijke kaart kan nuttig zijn als instrument om het beleid te sturen omdat het een idee geeft van de potentiële (economische) schade. Voor de bouwsector hebben dergelijke kaarten minder zin omdat het voor aannemers, studiebureaus, architecten, maar ook opdrachtgevers veel nuttiger is de juiste instrumenten en richtlijnen te hebben om gebouwen en funderingen correct te ontwerpen, rekening houdende met de lokale (ondergrond)condities.

REFERENTIES

AASHTO T 258-81, 2018. Standard Method of Test for Determining Expansive Soils, standard by American Association of State and Highway Transportation Officials.

Adriaens, R., 2015. Neogene and Quaternary clay minerals in the southern North Sea. Ph.D. Thesis, KU Leuven, Leuven, 272 p.

Adriaens, R., Vandenberghe, N., Elsen, J., 2017. Sedimentary petrology of Ieper Group and Rupel Group Clays. KU Leuven, projectrapport in opdracht van ONDRAF/NIRAS.

Adriaens, R., Vandenberghe, N., 2019. Sedimentary petrology of Ieper Group clays. KU Leuven, projectrapport in opdracht van ONDRAF/NIRAS.

Adriaens, R., Vandenberghe, N., 2020. Quantitative clay mineralogy as a tool for lithostratigraphy of Neogene Formations in Belgium: a reconnaissance study. Geologica Belgica, Volume 23 (2020), number 3-4 - The Neogene stratigraphy of northern Belgium, 365-378, doi.org/10.20341/gb.2020.018.

Asuri, S., Keshavamurthy, P., 2016. Expansive soil characterisation: an appraisal. Indian National Academy of Engineering, 1:29-33, doi.org/10.1007/s41403-016-0001-9.

Braekman, B., 2020. Invloed van verwering op de mineralogische en chemische samenstelling van de kleigrondstof gebruikt in de keramische industrie in Vlaanderen. M.Sc. Thesis, UGent, Gent, 184 p.

BRE, 1993. Low-rise buildings on shrinkable clay soils: BRE Digest, Vols. 240, 241 & 242, CRC, London.

Chen, F.H., 1988. Foundations on Expansive Soils, Elsevier, Amsterdam.

Cornelis, W.M., Corluy, J., Medina, H., Diaz, J., Hartmann, R., Van Meirvenne, M., Ruiz, M.E., 2006. Measuring and modelling the soil shrinkage characteristic curve. Geoderma, 137: 1–2, blz. 179-191, ISSN 0016-7061, doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.08.022.

Deckers J., De Koninck R., Bos, S., Broothaers, M., Dirix, K., Hambsch, L., Lagrou, D., Lanckacker T., Matthijs, J., Rombaut, B., Van Baelen, K. en Van Haren, T., 2019. Geologisch (G3Dv3) en hydrogeologisch (H3D) 3D-lagenmodel van Vlaanderen. Studie uitgevoerd in opdracht van: Vlaams Planbureau voor Omgeving (Departement Omgeving) en Vlaamse Milieumaatschappij 2018/RMA/R/1569, 286p. + bijlagen, https://archief.onderzoek.omgeving.vlaanderen.be/Onderzoek-1999911.

De Reu, J., Bourgeois, J., Bats, M., Zwertvaegher, A., Gelorini, V., De Smedt, P., Chu, W., Antrop, M., De Maeyer, P., Finke, P., Van Meirvenne, M., Verniers, J., Crombé, P., 2013. Application of the topographic position index to heterogeneous landscapes. Geomorphology, Volume 186, 2013, blz. 39-49, https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.12.015.

De Vos, L., 2023. Gevorderdencursus grondmechanica: Monitoring. Presentatie in het kader van de gevorderdencursus grondmechanica georganiseerd door ie-net (11/10/2023).

Frederickx, L., Honty, M., de Craen, M., Dohrmann, R., Elsen, J., 2018. Relating the Cation Exchange Properties of the Boom Clay (Belgium) to Mineralogy and Pore-Water Chemistry. Clays Clay Miner. 66, 449–465 (2018). https://doi.org/10.1346/CCMN.2018.064111

Frederickx, L., 2019. An advanced mineralogical study of the clay mineral fractions in the Boom clay. Ph.D. Thesis, KU Leuven, Leuven, 254 p.

Giannakogiorgos, A., McDermott, C., Sullivan, D., Parodi, F., 2020. Shallow replacement of expansive or swelling soils. NZ Geomechanics News, Issue 100, December 2020. Geraadpleegd op 30/10/2023: https://www.nzgs.org/libraries/shallow-replacement-of-expansive-or-swelling-soils/.

Grossman, R.B., Brasher, B.R., Franzmeier, D.P., Walker, J.L., 1968. Linear extensibility as calculated from natural-clod bulk density measurements. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 32, 570–573.

Gullentops, F., Wouters, L. (Ed.), 1996. Delfstoffen in Vlaanderen. Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap. Afdeling Natuurlijke Rijkdommen en Energie: Brussel. ISBN 90-75463-09-X. VIII, 198 p.

Henriet, G., 1998. Rapport d'essais 254/78-98 : Forage Doel 1. Université Catholique de Louvain, Laboratoire du Génie Civil. In opdracht van ONDRAF en NIRAS (ref. 803995), 171 p.

Henry, E.F., Dragoo, M.C., 1965. Guide to use of the FHA and PVC meter, including results of nationwide soil tests and correlation with climatic factors. Fed. Housing Admin. FHA No. 595, 32 p.

Hervás, J., Bobrowsky, P., 2009. Mapping: Inventories, Susceptibility, Hazard and Risk. In: Sassa, K., Canuti, P. (eds) Landslides – Disaster Risk Reduction. Springer, Berlin, Heidelberg. doi.org/10.1007/978-3-540-69970-5_19.

Holtz, W.G., Gibbs, H.J., 1956. Engineering properties of expansive clays. Trans ASCE 121:641–663.

Honty, M., 2010. CEC of the Boom Clay: a review. External Report of the Belgian Nuclear Research Centre, Mol, Belgium: SCK·CEN_ER_134, 26 p.

IS, 1970. IS:1498 (reaffirmed 1987), Indian standard classification and identification of soils for general engineering purposes. BIS, New Delhi.

I.N.I.S.Ma., 1998. Rapport d'essai 74.252 : Forage Doel 1. In opdracht van ONDRAF (ref. 802569), 64 p.

Jones, L., Banks, V., Jefferson, I., 2020. Chapter 8 Swelling and shrinking soils, Geological Hazards in the UK: Their Occurrence, Monitoring and Mitigation – Engineering Group Working Party Report. Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications, 29, 223-242, eds. D. P. Giles, J. S. Griffiths, doi.org/10.1144/EGSP29.8.

Lassoie, L., 2022. Beoordeling van de stabiliteit van de bestaande ruwbouw. Buildwise artikel 2022-01.07, https://www.buildwise.be/nl/publicaties/buildwise-artikels/2022-01.07/.

Mohammad, W., 2009. The NIRAS-ONDRAF Kallo 1 & 2 boreholes. The Ypresian cored section: 254–410 m depth. Laboratory of Applied Geology & Mineralogy of KU Leuven, Leuven, 120p.

NHBC, 2023. NHBC Standards. 1 January 2023. https://nhbc-standards.co.uk/4-foundations/4-2-building-near-trees/4-2-4-the-effects-of-trees-on-shrinkable-soils/.

NZS, 2011. New Zealand Standard NZS 3604:2011, Timber-framed buildings.

Ottenburgs, R., Vandenberghe, N., Viaene, W., Decleer, J., 1983. Geologische, mineralogische, chemische en fysische karakterisering van de Belgische kleigrondstoffen, Deel 1, Professional Paper nr. 198, 1983/3, BGD, Ministerie van Economische Zaken.

Rijk, R., 2021. Invloed van verwering op chemische en mineralogische samenstelling van kleien gebruikt in de keramische industrie van België. B.Sc. Thesis, UGent, Gent, 24 p.

Saeys, R., Verheyen, A., Vandenberghe, N., 2004. A rapid clay-mineral change in the earliest Priabonian of the North Sea Basin? Netherlands Journal of Geosciences / Geologie en Mijnbouw, 83(3): 179-185, doi.org/10.1017/S0016774600020242.

Sau Valenzuela, N., 2021. THM coupled behaviour of a deep poorly indurated argillaceous formation. PhD Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 335 p.

Seed, H.B., Woodward, R.J., Lundgren R., 1962. Prediction of swelling potential for compacted clays. J. Soil Mech. Found. Division, ASCE, 88(SM3):53–87.

Snethan D.R., Johnson L.D., Patrick D.M., 1977. An evaluation of expedient of methodology for identification of potentially expansive soils. In: Soils and Pavements Lab, US Army Eng. Water Way Exp. Station, Vicksburg, MS, Report No. FHWARE-77-94, NTIS PB-289-164.

Soil Conservation Service, 1971. Guide for Interpreting Engineering Uses of Soils. [Washington]: U.S. Dept. of Agriculture, Soil Conservation Service.

Tomboy, O, Whenham, V., De Vos, M., Charlier, R., Maertens, J., Verbrugge, J.-C., 2008. Shear strength of unsaturated soil and its influence on slope stability. Proc. of the 1st European Conference on Unsaturated Soils, E-UNSAT 2008, 2-4 July 2008, Durham, Verenigd Koninkrijk, p. 459-464.

Van Den Eeckhaut, M., Poesen, J., 2009. Uitbreiding (fase 3) van de gevoeligheidskaart voor grondverschuivingen in Vlaanderen. Rapport i.o.v. van Vlaamse Overheid, Departement Leefmilieu, Natuur en Energie, Afdeling Land en Bodembescherming, Ondergrond, Natuurlijke Rijkdommen, 169 p.

Van der Auwera, A., Huybrechts, N., Maertens, J., 2021. Scheurvorming in gebouwen door het krimpen of zwellen van plastische gronden. Buildwise-dossier 2021/5.10, 13 p., https://www.buildwise.be/nl/publicaties/buildwise-artikels/2018-03.02/.

Whenham, V., Ganne, P., De Vos, M., 2010. Schijnbare cohesie van onverzadigde gronden. Buildwise-Dossier, 2010, nr. 2, katern 4, 7 p, https://www.buildwise.be/nl/publicaties/buildwise-artikels/2010-02.04/

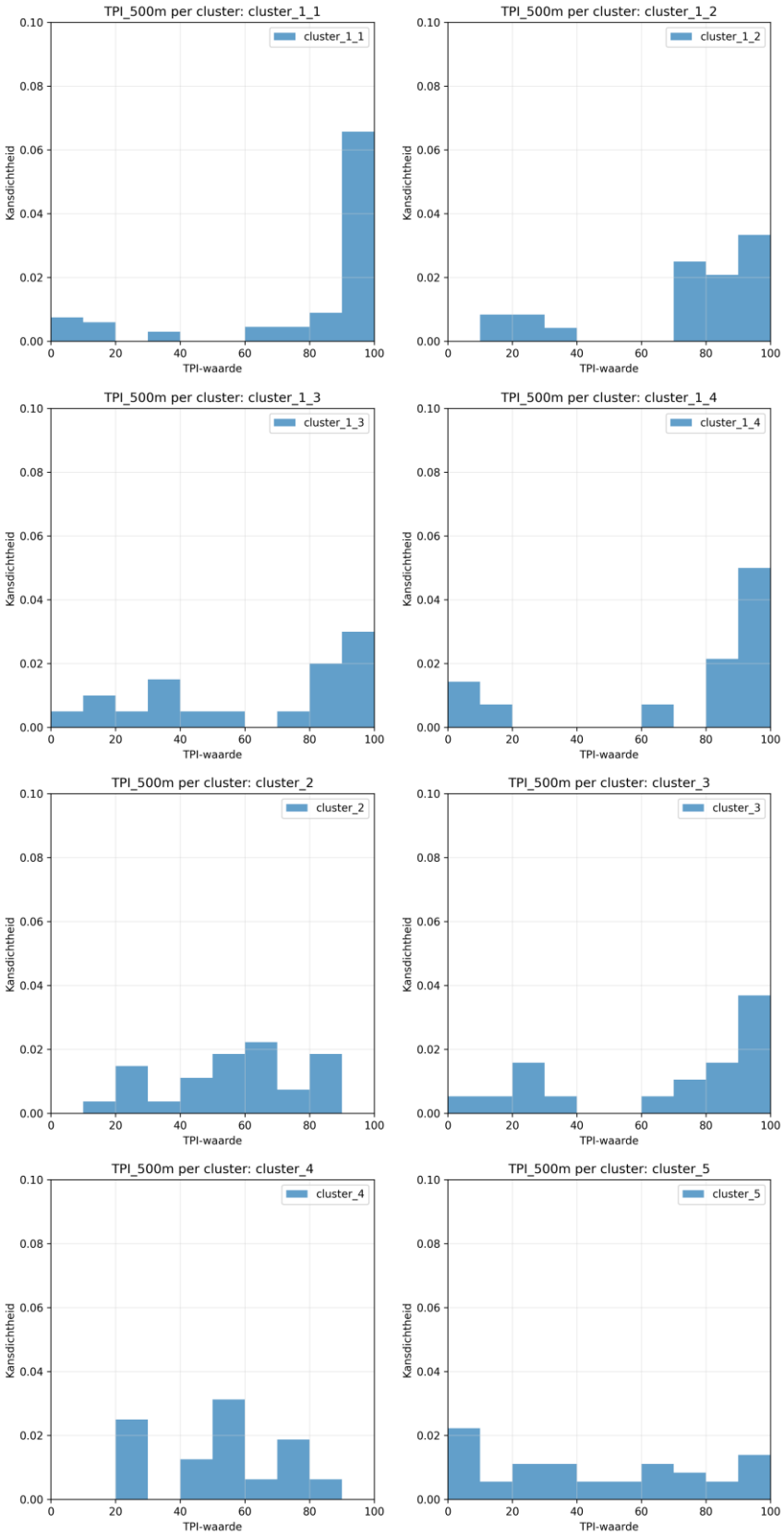
Wubalem, A., 2022. Landslide Inventory, Susceptibility, Hazard and Risk Mapping. IntechOpen. doi.org/10.5772/intechopen.100504.

Zeelmaekers, E., 2011. Computerized qualitative and quantitative clay mineralogy. Introduction and application to known geological cases. PhD Thesis, K.U. Leuven, Belgium, 397 p.

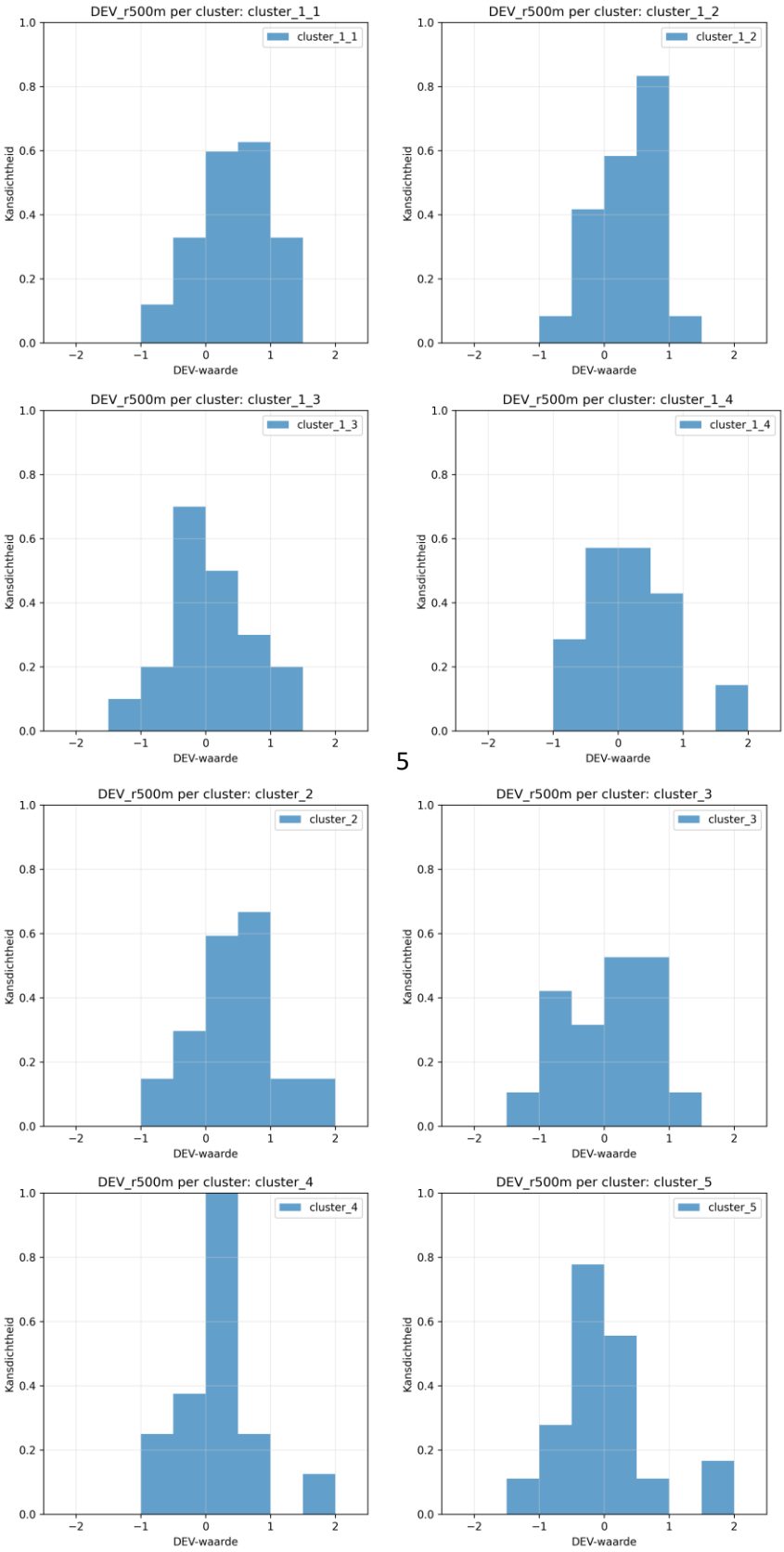
Zeelmaekers, E., Honty, M., Derkowski, A., Środoń, J., De Craen, M., Vandenberghe, N., Adriaens, R., Ufer, K., and Wouters, L., 2015. Qualitative and quantitative mineralogical composition of the Rupelian Boom Clay in Belgium: Clay Minerals, v. 50, no. 2, p. 249-272.

BIJLAGEN

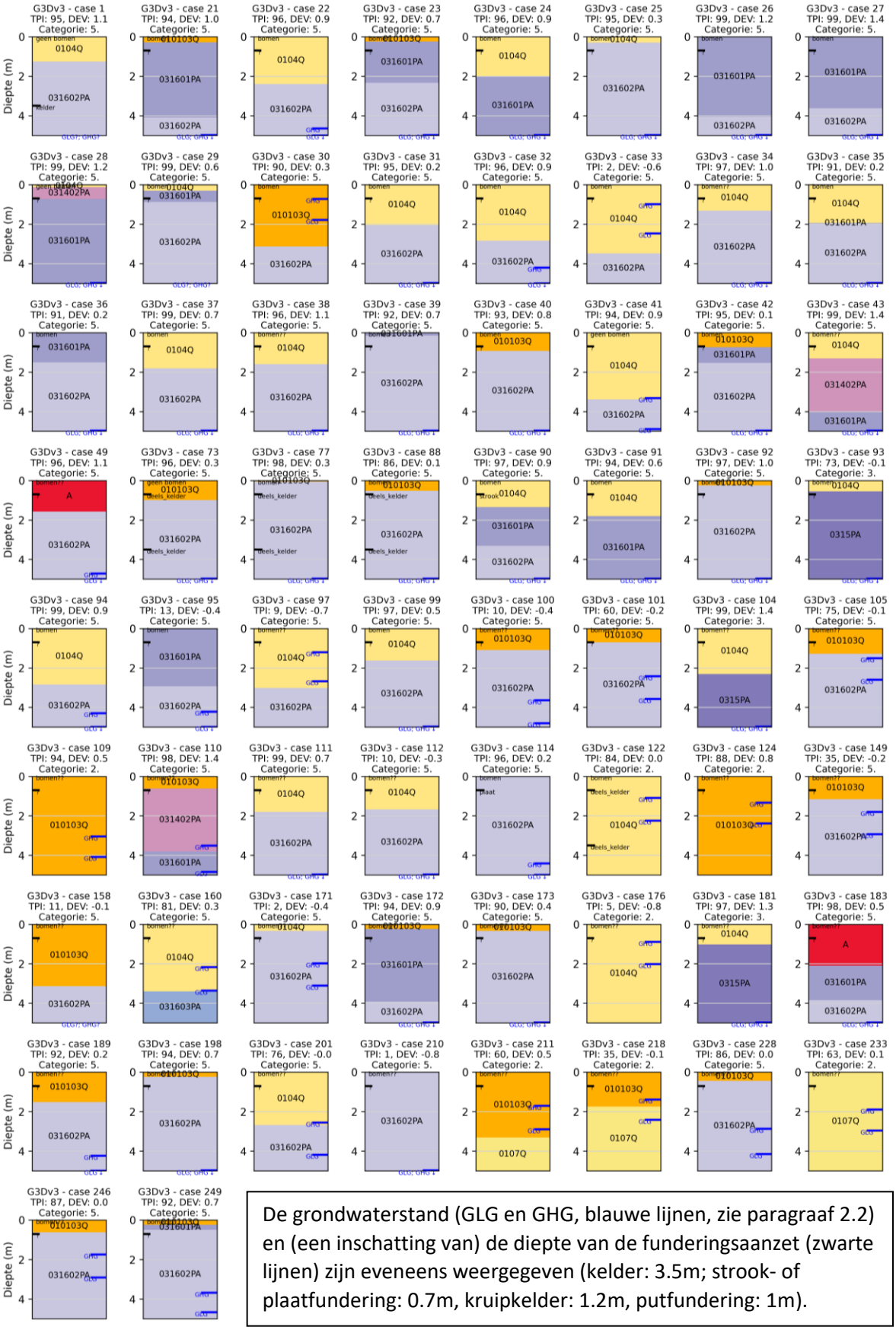
BIJLAGE A. ANALYSE OP BASIS VAN TOPOGRAFIE EN GEOLOGISCHE LAAGOPBOUW



Figuur 48. Histogrammen van de TPI-waarden (berekend voor een straal van 500m) van de cases uit de inventaris per cluster.

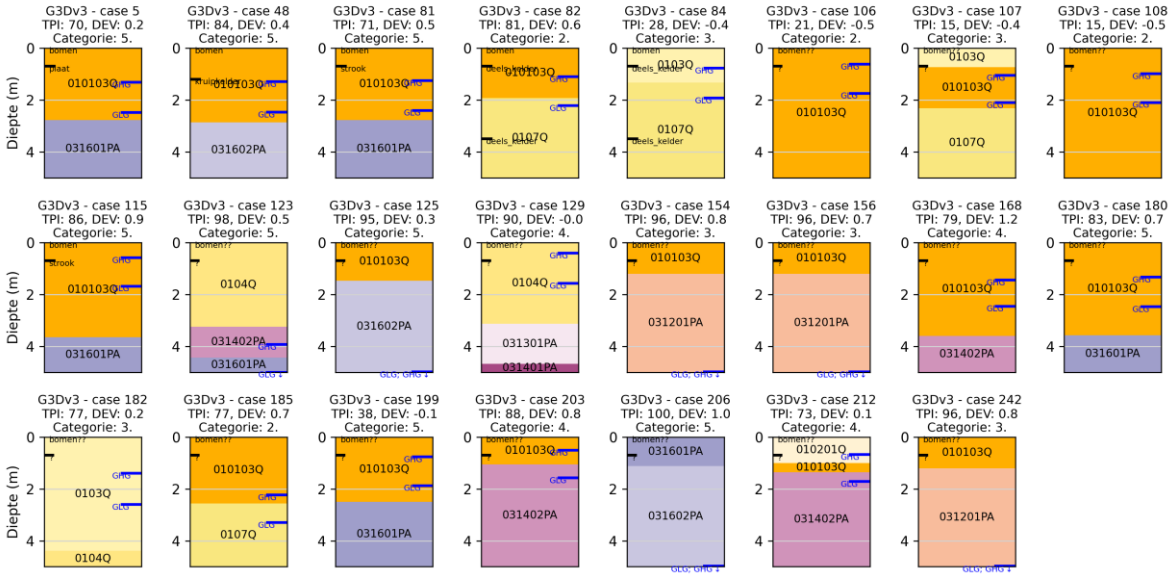


Figuur 49. Histogrammen van de DEV-waarden (berekend voor een straal van 500m) van de cases uit de inventaris per cluster.

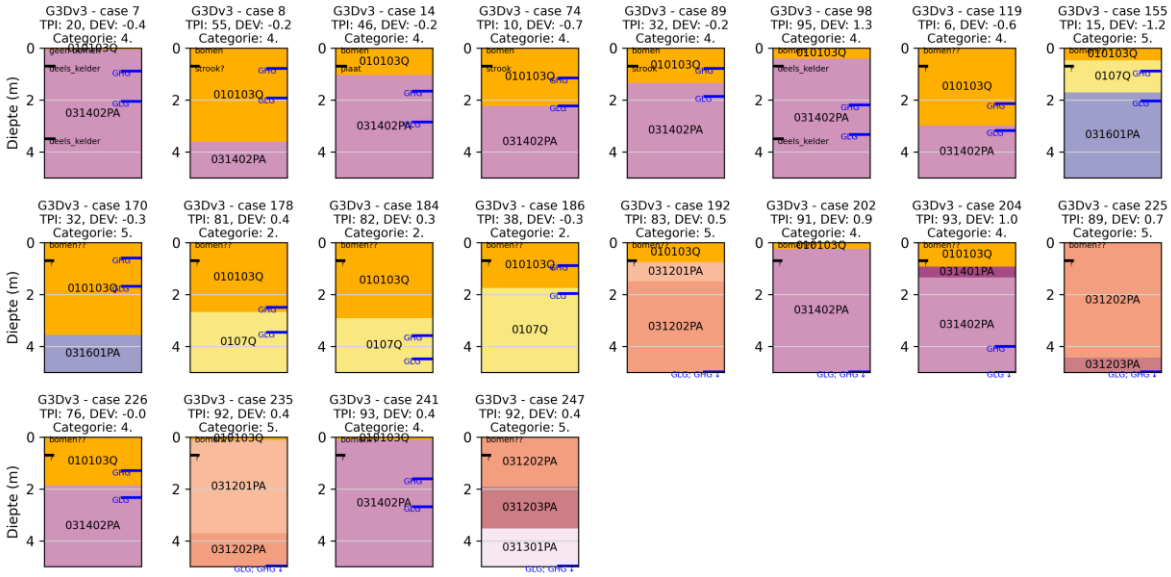


De grondwaterstand (GLG en GHG, blauwe lijnen, zie paragraaf 2.2) en (een inschatting van) de diepte van de funderingsaanzet (zwarte lijnen) zijn eveneens weergegeven (kelder: 3.5m; strook- of plaatfundering: 0.7m, kruipkelder: 1.2m, putfundering: 1m).

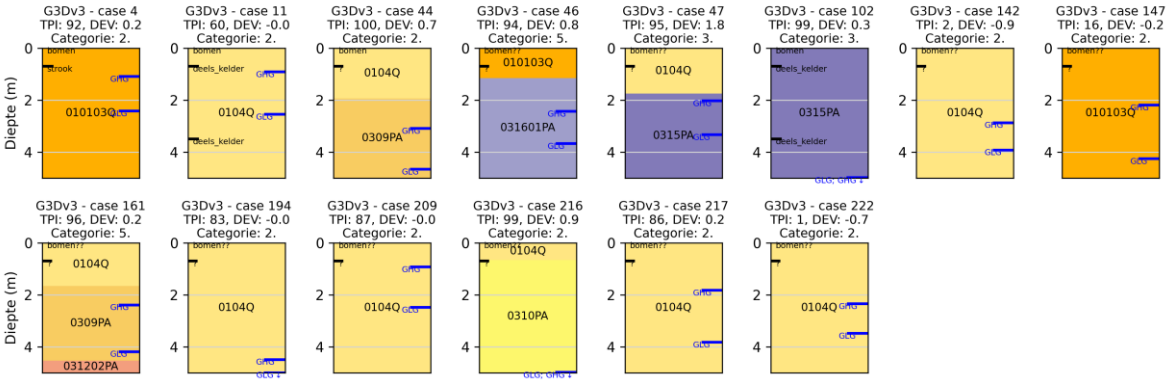
Figuur 50. Overzicht van de geologische laagopbouw van de bovenste 5m voor de schadegevallen in cluster 1_1. Vermelde TPI- en DEV-waarden zijn bepaald voor een straal van 500m.



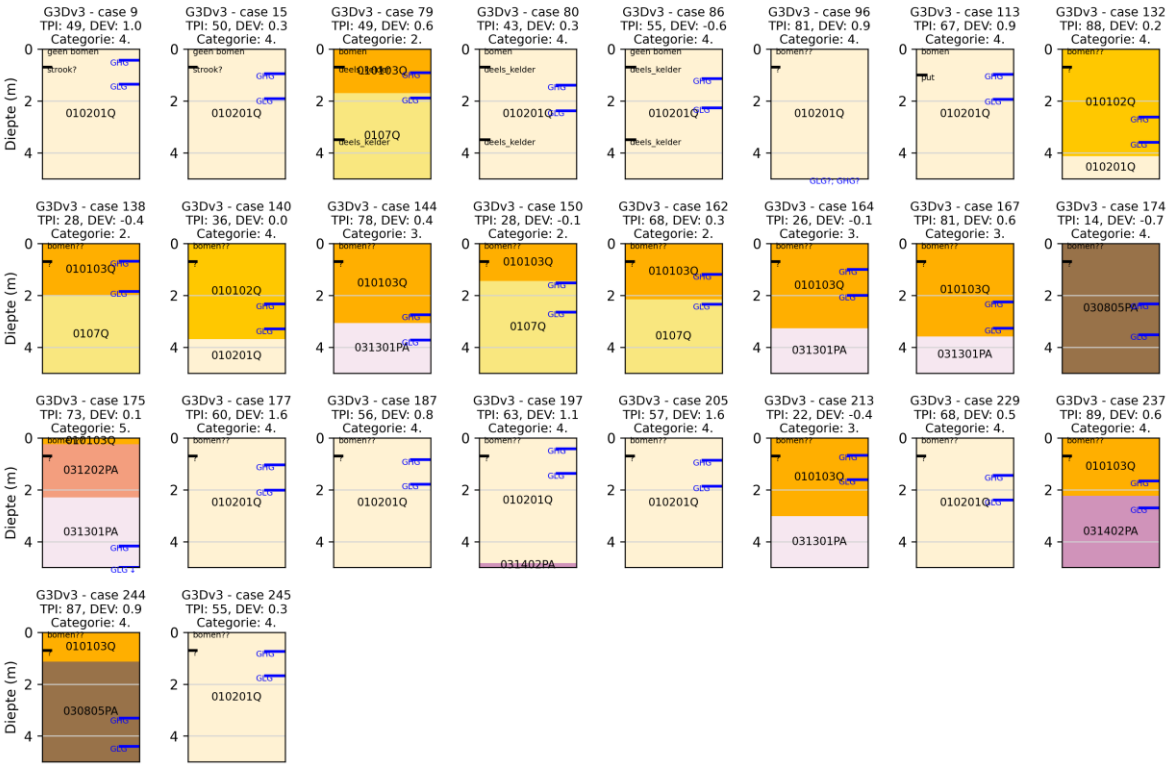
Figuur 51. Overzicht van de geologische laagopbouw van de bovenste 5m voor de schadegevallen in cluster 1_2. Vermelde TPI- en DEV-waarden zijn bepaald voor een straal van 500m. De grondwaterstand (GLG en GHG, blauwe lijnen, zie paragraaf 2.2) en (een inschatting van) de diepte van de funderingsaanzet (zwarte lijnen) zijn eveneens weergegeven (kelder: 3.5m; strook- of plaatfundering: 0.7m, kruipkelder: 1.2m, putfundering: 1m).



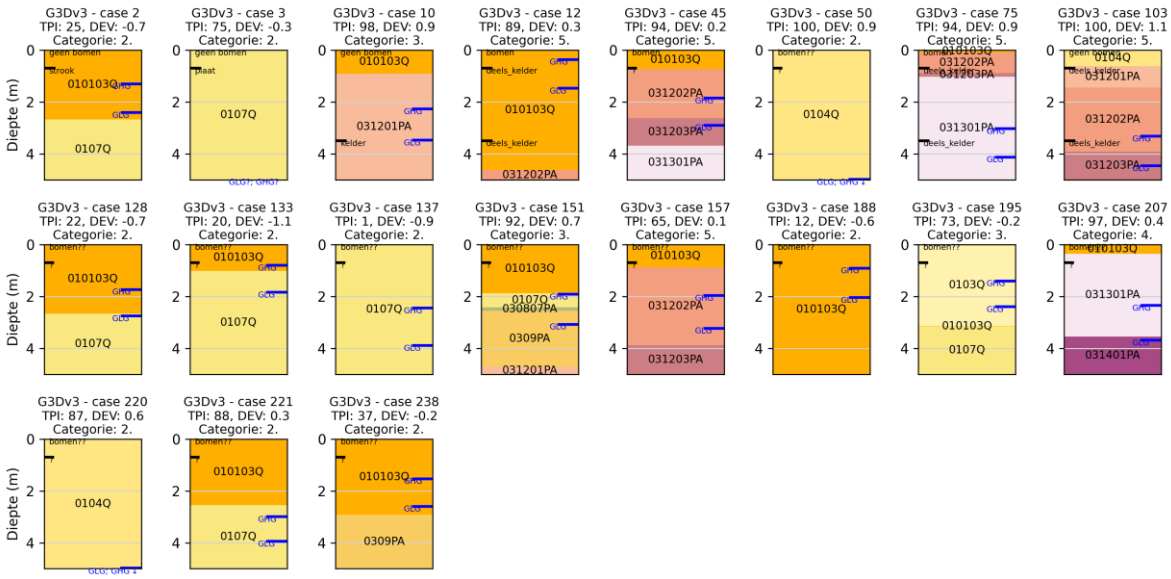
Figuur 52. Overzicht van de geologische laagopbouw van de bovenste 5m voor de schadegevallen in cluster 1_3 . Vermelde TPI- en DEV-waarden zijn bepaald voor een straal van 500m. De grondwaterstand (GLG en GHG, blauwe lijnen, zie paragraaf 2.2) en (een inschatting van) de diepte van de funderingsaanzet (zwarte lijnen) zijn eveneens weergegeven (kelder: 3.5m; strook- of plaatfundering: 0.7m, kruipkelder: 1.2m, putfundering: 1m).



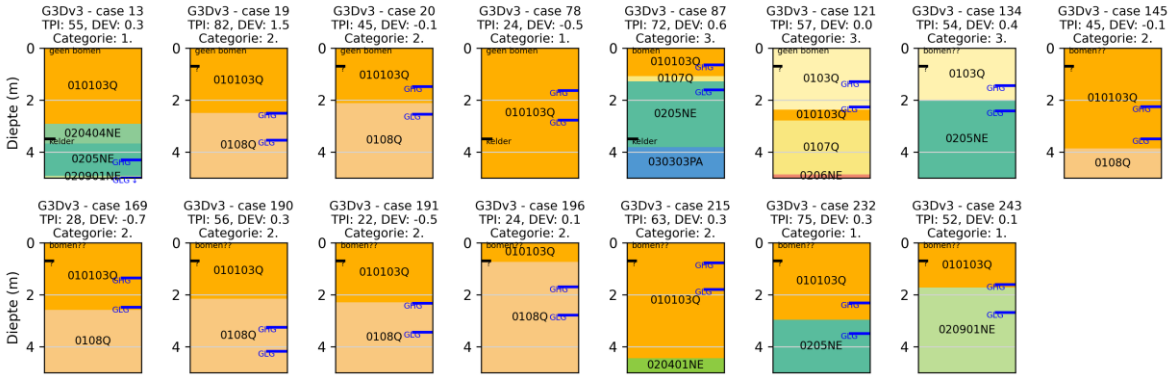
Figuur 53. Overzicht van de geologische laagopbouw van de bovenste 5m voor de schadegevallen in cluster 1_4 . Vermelde TPI- en DEV-waarden zijn bepaald voor een straal van 500m. De grondwaterstand (GLG en GHG, blauwe lijnen, zie paragraaf 2.2) en (een inschatting van) de diepte van de funderingsaanzet (zwarte lijnen) zijn eveneens weergegeven (kelder: 3.5m; strook- of plaatfundering: 0.7m, kruipkelder: 1.2m, putfundering: 1m).



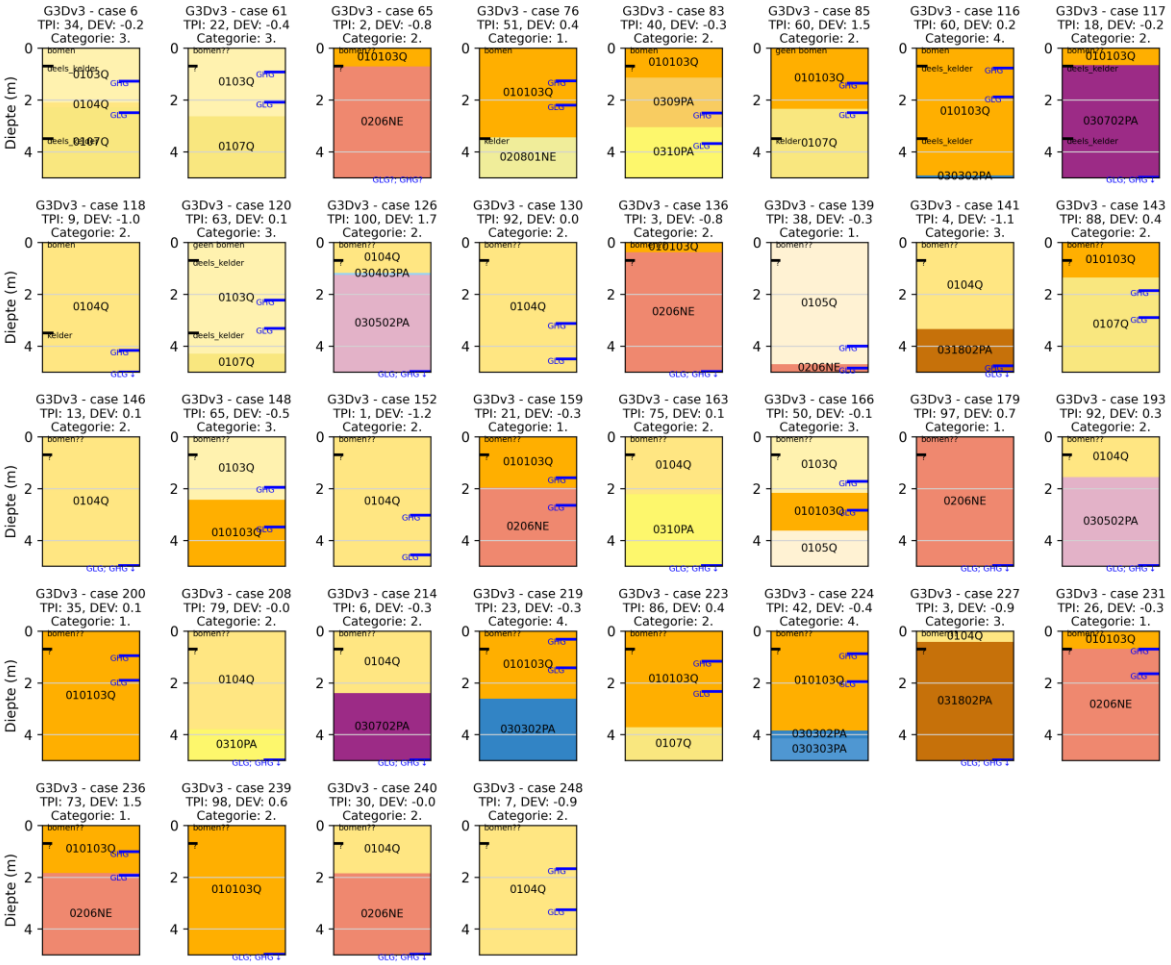
Figuur 54. Overzicht van de geologische laagopbouw van de bovenste 5m voor de schadegevallen in cluster 2 . Vermelde TPI- en DEV-waarden zijn bepaald voor een straal van 500m. De grondwaterstand (GLG en GHG, blauwe lijnen, zie paragraaf 2.2) en (een inschatting van) de diepte van de funderingsaanzet (zwarte lijnen) zijn eveneens weergegeven (kelder: 3.5m; strook- of plaatfundering: 0.7m, kruipkelder: 1.2m, putfundering: 1m).



Figuur 55. Overzicht van de geologische laagopbouw van de bovenste 5m voor de schadegevallen in cluster 3. Vermelde TPI- en DEV-waarden zijn bepaald voor een straal van 500m. De grondwaterstand (GLG en GHG, blauwe lijnen, zie paragraaf 2.2) en (een inschatting van) de diepte van de funderingsaanzet (zwarte lijnen) zijn eveneens weergegeven (kelder: 3.5m; strook- of plaatfundering: 0.7m, kruipkelder: 1.2m, putfundering: 1m).



Figuur 56. Overzicht van de geologische laagopbouw van de bovenste 5m voor de schadegevallen in cluster 4 . Vermelde TPI- en DEV-waarden zijn bepaald voor een straal van 500m. De grondwaterstand (GLG en GHG, blauwe lijnen, zie paragraaf 2.2) en (een inschatting van) de diepte van de funderingsaanzet (zwarte lijnen) zijn eveneens weergegeven (kelder: 3.5m; strook- of plaatfundering: 0.7m, kruipkelder: 1.2m, putfundering: 1m).



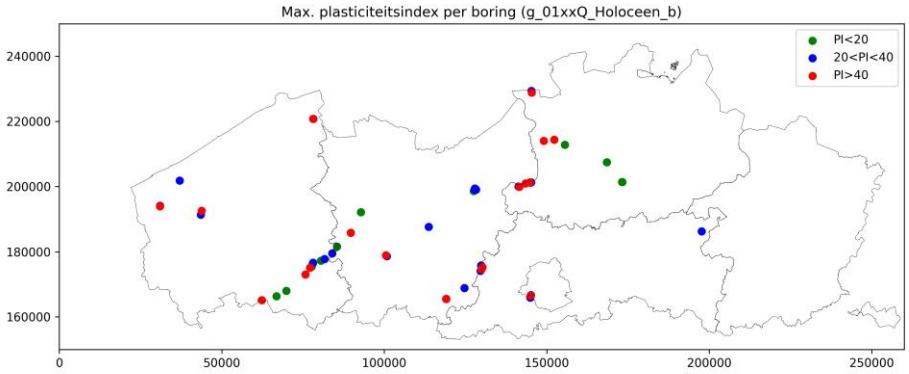
Figuur 57. Overzicht van de geologische laagopbouw van de bovenste 5m voor de schadegevallen in cluster 5 . Vermelde TPI- en DEV-waarden zijn bepaald voor een straal van 500m. De grondwaterstand (GLG en GHG, blauwe lijnen, zie paragraaf 2.2) en (een inschatting van) de diepte van de funderingsaanzet (zwarte lijnen) zijn eveneens weergegeven (kelder: 3.5m; strook- of plaatfundering: 0.7m, kruipkelder: 1.2m, putfundering: 1m).

BIJLAGE B. DATAFICHES PER G3DV3-LAAG

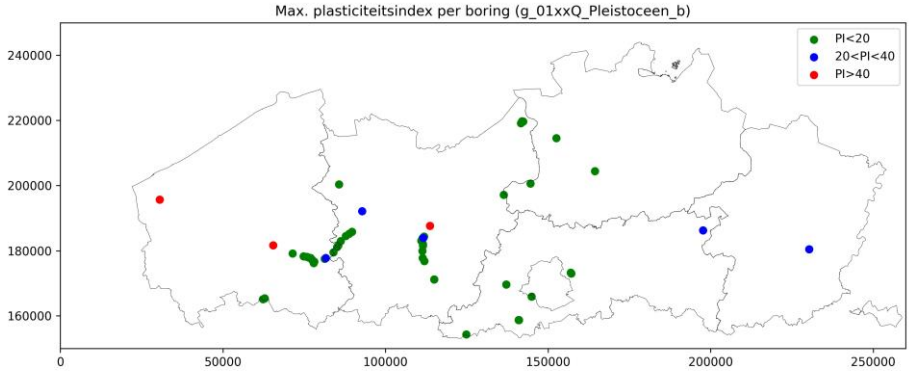
In deze bijlage kunnen de datafiches per G3Dv3-laag worden teruggevonden. Deze datafiches zijn het resultaat van het dataonderzoek op basis van literatuurdata en de DOV-grondmonsters met laboproeven. Dit is dataonderzoek is uitvoerig beschreven in paragraaf 3.2 “Dataonderzoek”.

BIJLAGE C. RUIMTELIJKE VERDELING PLASTICITEITSINDEX GRONDMONSTERS MET LABOPROEVEN QUARTAIR

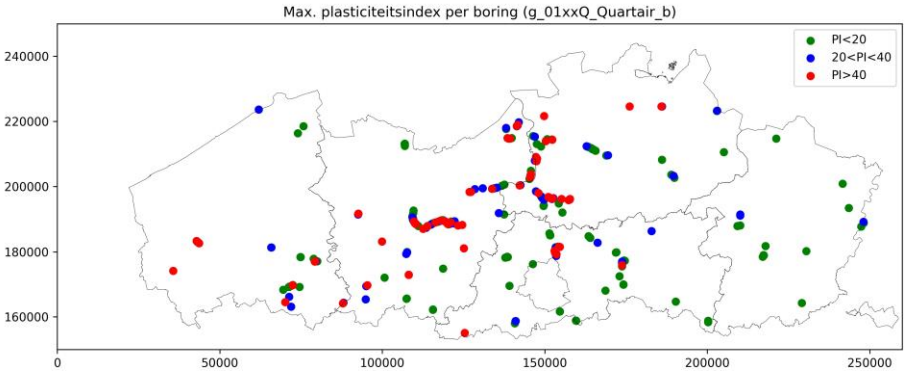
De figuren in deze bijlage tonen de ruimtelijke verdeling van de plasticiteitsindex voor verschillende Quartaire lagen (op basis van de data van DOV-grondmonsters met laboproeven). Merk op dat niet voor elke quartaire G3Dv3-laag data beschikbaar is.



a.



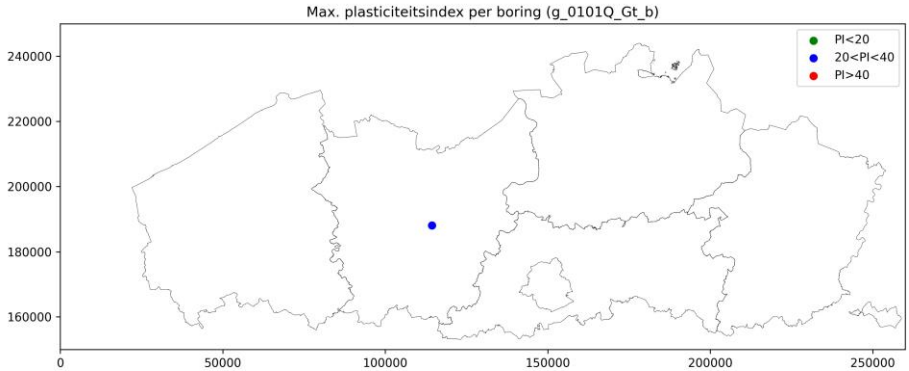
b.



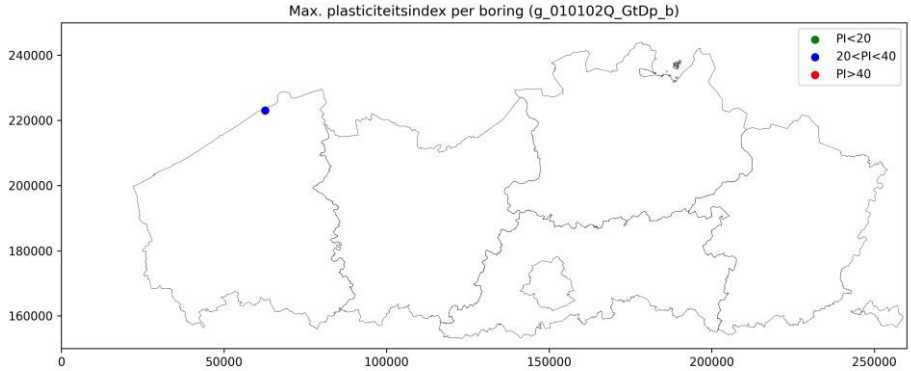
c.

Figuur 58. Ruimtelijke verdeling van de plasticiteitsindex (maximum per boring) op basis van alle DOV-grondmonsters met laboproeven voor grondmonsters die niet aan een specifieke quartaire G3Dv3-laag konden worden toegekend: (a)

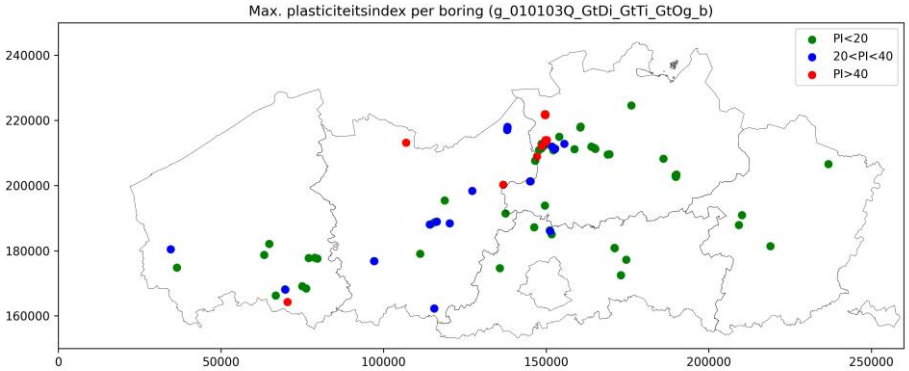
Holocene grondmonsters, (b) Pleistocene grondmonsters, (c) 'Quartaire' grondmonsters, zonder verder mogelijke indeling.



a.

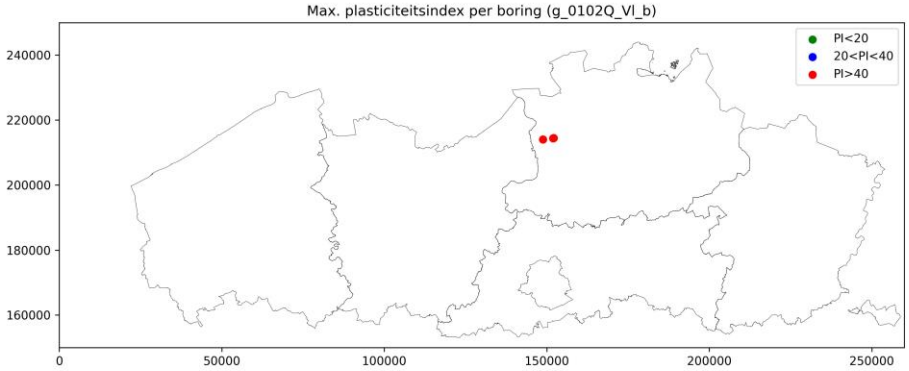


b.

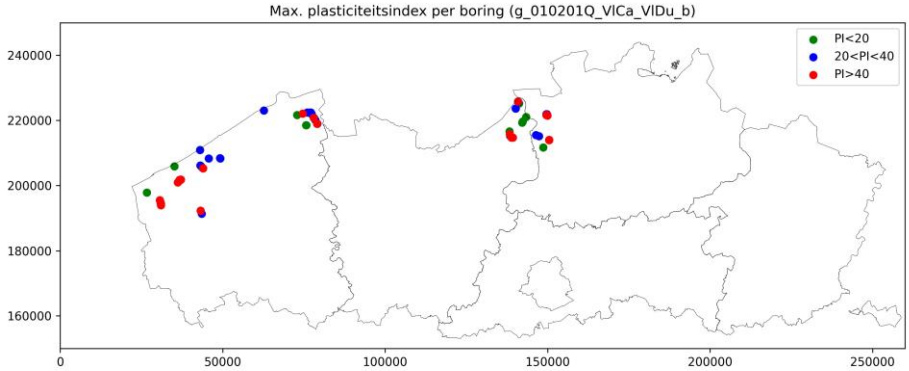


c.

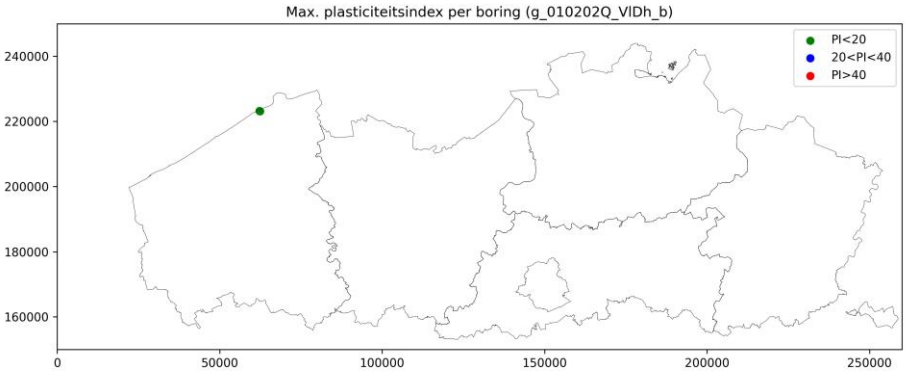
Figuur 59. Ruimtelijke verdeling van de plasticiteitsindex (maximum per boring) op basis van alle DOV-grondmonsters met laboproeven voor grondmonsters voor volgende G3Dv3-lagen: (a) Formatie van Gent (zonder verdere detaillering), (b) Formatie van Gent – Lid van De Panne, (c) Formatie van Gent– Lid van Dilsen, Tisselt en Opgrimbie.



a.

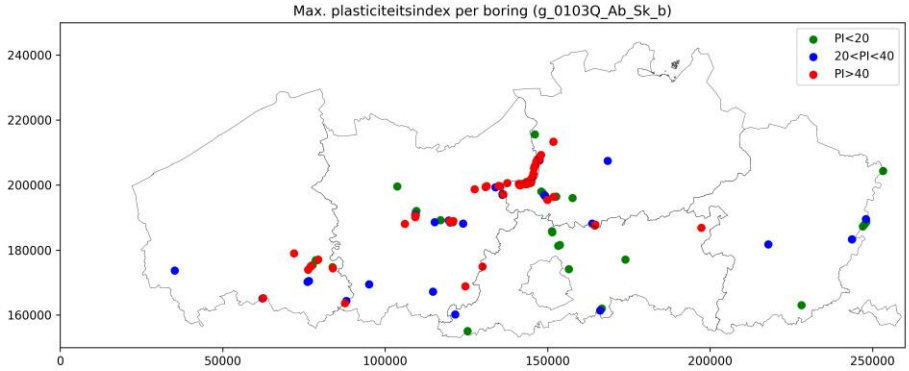


b.

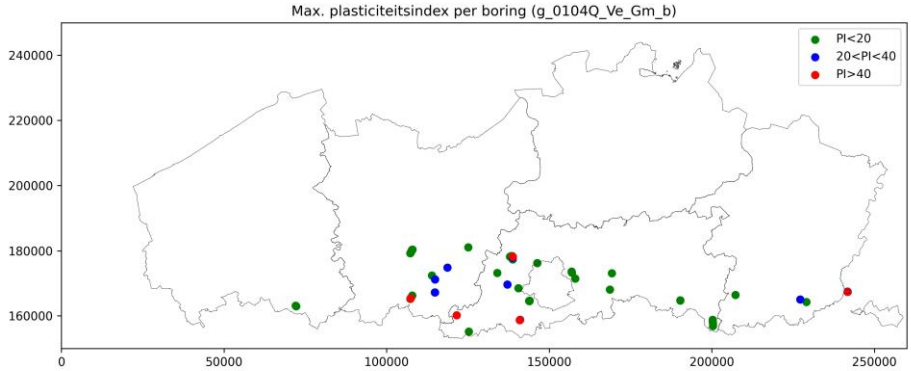


c.

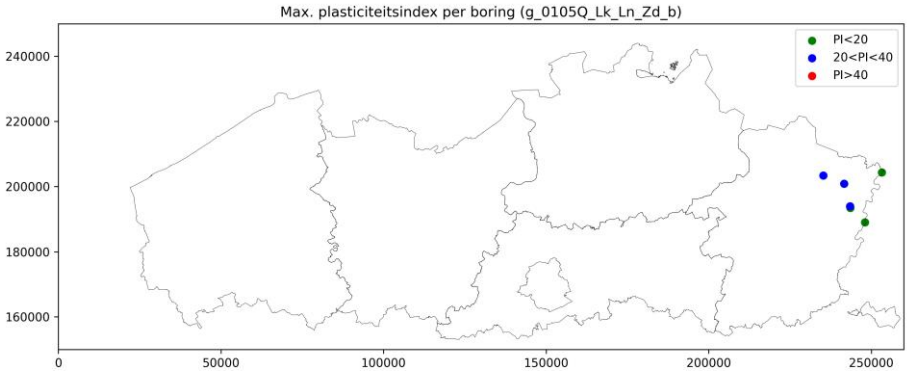
Figuur 60. Ruimtelijke verdeling van de plasticiteitsindex (maximum per boring) op basis van alle DOV-grondmonsters met laboproeven voor grondmonsters voor volgende G3Dv3-lagen: (a) Formatie van Vlaanderen (zonder verdere detaillering), (b) Formatie van Vlaanderen – Lid van Calais en Dunkerque, (c) Formatie van Vlaanderen – Lid van De Haan.



a.

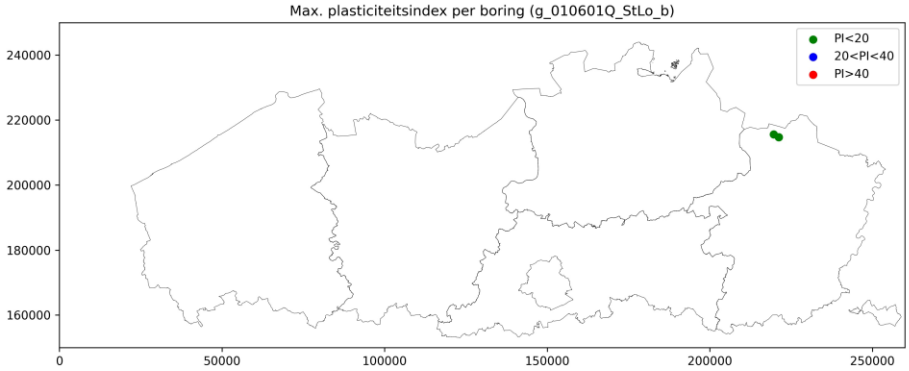


b.



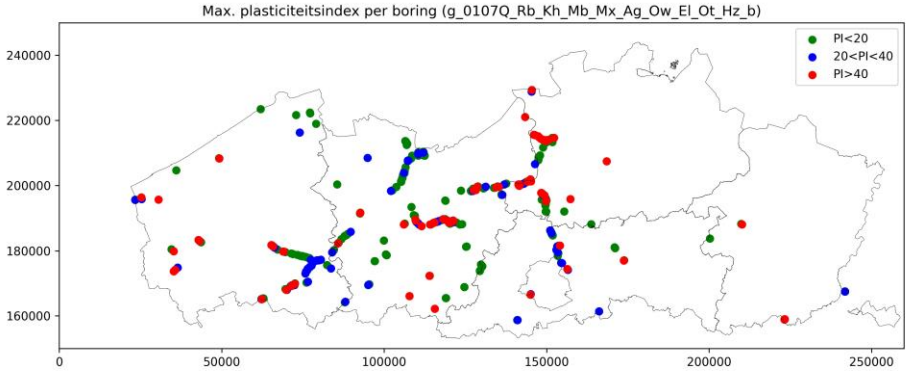
c.

Figuur 61. Ruimtelijke verdeling van de plasticiteitsindex (maximum per boring) op basis van alle DOV-grondmonsters met laboproeven voor grondmonsters voor volgende G3Dv3-lagen: (a) Formatie van Arenberg en Stokkem, (b) Formatie van Veldwezelt en Gembloux, (c) Formatie van Lanklaar, Lanaken en Zutendaal.

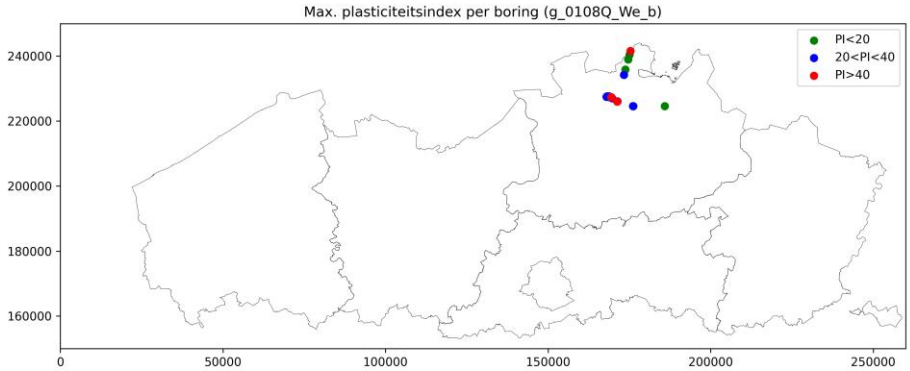


a.

Figuur 62. Ruimtelijke verdeling van de plasticiteitsindex (maximum per boring) op basis van alle DOV-grondmonsters met laboproeven voor grondmonsters voor volgende G3Dv3-laag: (a) Formatie van Sterksel – Lid van Lommel.



a.



b.

Figuur 63. Ruimtelijke verdeling van de plasticiteitsindex (maximum per boring) op basis van alle DOV-grondmonsters met laboproeven voor grondmonsters voor volgende G3Dv3-lagen: (a) Formatie van Rozebeke, Kruishoutem, ..., (b) Formatie van Weelde.