



Bodemverdichting in Vlaanderen

Gevolgen van bodemverdichting op het watertransport door een bodem

Frank van der Bolt, Wim Cornelis, Jan de Pue, Rob Hendriks, Jan van den Akker, Harry Massop,
Ingeborg Joris, Jef Dams, Johan Vos



ALTERRA
WAGENINGEN UR

Bodemverdichting in Vlaanderen

Gevolgen van bodemverdichting op het watertransport door een bodem

Frank van der Bolt¹, Wim Cornelis², Jan de Pue², Rob Hendriks¹, Jan van den Akker¹, Harry Massop¹,
Ingeborg Joris³, Jef Dams³, Johan Vos³

1 Alterra Wageningen UR

2 Universiteit Gent

3 Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek (VITO)

Dit onderzoek is uitgevoerd door Alterra Wageningen UR, Universiteit Gent en de Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek (VITO) in opdracht van en gefinancierd door het Vlaams Departement Leefmilieu, Natuur en Energie in het kader van het programma Toegepast Wetenschappelijk Onderzoek Leefmilieu (TWOL) (projectnummer 5240727-01).

Alterra Wageningen UR

Wageningen, juli 2016

Alterra-rapport 2725

ISSN 1566-7197

Bolt, Frank van der, Wim Cornelis, Jan de Pue, Rob Hendriks, Jan van den Akker, Harry Massop, Ingeborg Joris, Jef Dams, Johan Vos, 2016. *Bodemverdichting in Vlaanderen; Gevolgen van bodemverdichting op het watertransport door een bodem*. Wageningen, Alterra Wageningen UR (University & Research centre), Alterra-rapport 2725. 144 blz.; 61 fig.; 21 tab.; 82 ref.

De gevolgen van bodemverdichting op het watertransport door een bodem zijn verkend. Een bodemfysische database is gecreëerd door naast historische metingen nieuwe metingen te verzamelen op verdichte percelen. Dat is gebeurd door op 26 percelen op 2 plekken op 3 diepten ongestoorde monsters te nemen en de bodemfysische eigenschappen te bepalen. Op 6 percelen zijn continue hydrologische metingen verricht van bodemvocht op 3 diepten en grondwaterstanden. De laatste metingen zijn gebruikt om te toetsen of het model SWAP met de gemeten bodemfysische eigenschappen in staat is het watertransport in het perceel te beschrijven. Met SWAP zijn voor 5 Vlaamse stroomgebiedjes de effecten van bodemverdichting verkend voor klimaatscenario's door de verdichte en niet-verdichte toestand te vergelijken. De met de pedotransferfuncties en nieuwe data berekende effecten van verdere verdichting op de waterhuishouding blijken globaal gezien beperkt te zijn. Dit neemt niet weg dat de lokale effecten mogelijk aanzienlijk kunnen zijn, gelet op de grote variatie in bodemverdichting die binnen de percelen werd opgemeten. De verschillen tussen de verdichte en niet-verdichte situatie in stroomgebieden zijn beperkt. Klimaatscenario's leiden op verdichte bodems tot meer oppervlakkige afstroming en meer droogtegevoeligheid.

Trefwoorden: Bodemverdichting, Vlaanderen, bodemfysica, bodems, hydrologie, SWAP, model, scenariostudie

Dit rapport is gratis te downloaden van <http://dx.doi.org/10.18174/387766> of op www.wageningenUR.nl/alterra (ga naar 'Alterra-rapporten' in de grijze balk onderaan). Alterra Wageningen UR verstrekt *geen* gedrukte exemplaren van rapporten.

© 2016 Alterra (instituut binnen de rechtspersoon Stichting Dienst Landbouwkundig Onderzoek), Postbus 47, 6700 AA Wageningen, T 0317 48 07 00, E info.alterra@wur.nl, www.wageningenUR.nl/alterra. Alterra is onderdeel van Wageningen UR (University & Research centre).

- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking van deze uitgave is toegestaan mits met duidelijke bronvermelding.
- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking is niet toegestaan voor commerciële doeleinden en/of geldelijk gewin.
- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking is niet toegestaan voor die gedeelten van deze uitgave waarvan duidelijk is dat de auteursrechten liggen bij derden en/of zijn voorbehouden.

Alterra aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Alterra-rapport 2725 | ISSN 1566-7197

Foto omslag: Niet bekend

Inhoud

	Woord vooraf	5
	Samenvatting	7
1	Inleiding	13
	1.1 Doelstelling	13
	1.2 Werkwijze	13
	1.3 Uitgangspunten	14
	1.4 Producten	14
	1.5 Leeswijzer	15
2	Historische basisdata en de database	16
3	Meetplan en perceelkeuze	17
	3.1 Uitgangspunten	17
	3.2 Strata	19
	3.3 Herhalingen	20
	3.4 Perceelkeuze	22
4	Metten van fysische en hydraulische bodemkenmerken	25
	4.1 Finale selectie van de percelen	25
	4.2 Indringingsweerstand	26
	4.3 Continu monitoren van het bodemvochtgehalte en de grondwaterstand op zes percelen	27
	4.4 Monsternamen	28
	4.5 Bepaling van de fysische en hydraulische eigenschappen	28
	4.5.1 Verzadigde doorlatendheid	28
	4.5.2 Waterretentie- en doorlatendheidscurves	30
	4.5.3 Bulkdichtheid en poriënvolume	34
	4.5.4 Textuur en koolstofgehalte	35
	4.6 Indicatoren voor fysische bodemkwaliteit en drempelwaarden gerelateerd aan bodemverdichting	35
	4.6.1 Indringingsweerstand	35
	4.6.2 Bulkdichtheid	35
	4.6.3 Luchtcapaciteit	36
	4.6.4 Verzadigde doorlatendheid	36
	4.6.5 Macroporiënvolume	36
5	Resultaten van bepaling fysische en hydraulische bodemkenmerken	37
	5.1 Fysische en hydraulische bodemkenmerken van representatieve percelen in Vlaanderen	37
	5.2 Steekproef naar bodemverdichting in Vlaanderen op basis van bodemkwaliteitsindicatoren	37
	5.2.1 Textuur en organisch-koolstofgehalte	39
	5.2.2 Indringingsweerstand	39
	5.2.3 Bulkdichtheid	41
	5.2.4 Luchtcapaciteit	42
	5.2.5 Verzadigde doorlatendheid	43
	5.2.6 Macroporiënvolume	45

5.3	Overzicht van bodemkwaliteitsindicatoren per perceel	46
5.3.1	Middendeel van de percelen	46
5.3.2	Kopakker van de percelen	48
5.4	Effect van bodemverdichting op hydraulische eigenschappen	49
5.4.1	Effect op waterretentiecurve	49
5.4.2	Effect op doorlatendheidscurve	51
5.5	Principale Componenten Analyse en Lineaire Discriminanten Analyse	52
6	Vochtgehalten en grondwaterstanden in zes percelen	55
6.1	Toetsing van de textuur	55
6.2	Vochtgehalte en grondwaterstand	56
6.3	De percelen	57
6.3.1	Perceel Z	57
6.3.2	Perceel S	59
6.3.3	Perceel P	61
6.3.4	Perceel L	63
6.3.5	Perceel A	65
6.3.6	Perceel E	67
7	Modellering watertransport in verdichte bodems	69
7.1	Nieuwe pedotransferfuncties	69
7.2	Simuleren effecten bodemverdichting	72
7.2.1	Werkwijze	72
7.2.2	Resultaten	76
7.2.3	Discussie en conclusies	90
7.3	Effecten van ruimtelijke scenario's	92
7.3.1	Vlaanderen-model	92
7.3.2	Selectie studiegebieden	94
7.3.3	Klimaatscenario's	95
7.3.4	Berekeningen	100
7.3.5	Resultaten	100
7.3.6	Conclusies	106
8	Conclusies	107
	Literatuur	110
	Bijlage 1 Metingen Deinze	114
	Bijlage 2 Parameters Deinze	118
	Bijlage 3 Gevoeligheid Deinze	122
	Bijlage 4 Kaarten waterbalansen ruimtelijke verdichtingsscenario's	126

Woord vooraf

In Vlaanderen komen in bodems onder landbouwgebruik steeds vaker verdichte lagen voor op een diepte waar ze niet door de gebruikelijke bodembewerkingstechnieken kunnen worden opgebroken. Visuele waarnemingen wijzen in de richting dat sterk verdichte bodemlagen het watertransport door de bodem belemmeren. Er zijn echter weinig tot geen kwantitatieve gegevens beschikbaar.

Indien de waterinfiltratie in landbouwbodems belemmerd wordt door de verdichte bodemlagen, moet hier bij de aanpak van wateroverlast rekening mee worden gehouden, zeker gezien de oppervlakte die dergelijke gronden beslaan. Bodemverdichting geeft ook problemen voor de landbouuitbating. Zeker met het oog op klimaatadaptatie is een optimaal benutten van het vocht bergend en vocht leverend vermogen van de bodem essentieel.

Om deze redenen heeft het Vlaams Departement Leefmilieu, Natuur en Energie in het kader van het programma Toegepast Wetenschappelijk Onderzoek Leefmilieu (TWOL) opdracht gegeven voor deze studie, met het doel na te gaan wat de gevolgen zijn van bodemverdichting op het watertransport door een bodem.

Deze uitdagende opdracht is gerealiseerd door een consortium gevormd door Wageningen Universiteit & Research Centre (Alterra), Universiteit Gent en de Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek (VITO). Dit rapport beschrijft de bevindingen.

Samenvatting

De gevolgen van bodemverdichting op het watertransport door een bodem zijn verkend door gecombineerd te meten en te modelleren volgens de volgende stappen:

- Verzamelen van een groot aantal bodemonsters en in-situ metingen in percelen met verdichte ondergronden.
- Uitvoeren van lab-experimenten die zowel de pF-curve als ook de K(h)-relaties geven.
- Selecteren van indicatoren en drempelwaarden voor verdichting.
- Opstellen van pedotransferfuncties.
- Simuleren van het watertransport in verdichte bodems voor zes percelen met het agro-hydrologische model SWAP en toetsen van de resultaten aan continue bodemvochtmetingen voor zes percelen.
- Ruimtelijk modelleren van de effecten van bodemverdichting voor vijf stroomgebieden met het bestaande Vlaanderen-model.

Metten: de metingen

Op 26 percelen in Vlaanderen zijn op 2 locaties (kopakker en midden perceel) op 3 diepten in de bovengrond (globaal 0-30 cm -mv), de verdichte ondergrond (globaal 30-60 cm -mv) en de ondergrond (globaal > 60 cm -mv) monsters verzameld. De percelen zijn op basis van de Hydride-gevoeligheidskaart voor bodemverdichting in Vlaanderen verdeeld over zes strata op basis van textuur en risicoklassen voor verdichting: klei, leem, zandleem, lichte zandleem, lemig zand en zand. Het bleek niet mogelijk de metingen op dezelfde percelen als in het verleden te bemonsteren.

Per perceel zijn 60 penetrometermetingen uitgevoerd om te bepalen of de percelen verdicht zijn en op 3 plekken in het perceel is het vochtgehalte bepaald. Op de kopakker en in het midden van ieder perceel zijn op 3 diepten 6 ongestoorde ringmonsters genomen (in totaal 36 monsters per perceel). Er werden in totaal 1560 metingen van de indringingsweerstand gedaan en er zijn 936 ongestoorde stalen genomen. Van elk ringmonster is de verzadigde doorlatendheid bepaald, van één monster uit iedere serie van 6 zijn simultaan de waterretentie- en doorlatendheidscurve gemeten met de verdampingsmethode. Ook zijn de bulkdichtheid, het poriënvolume, de textuur en het gehalte organisch koolstof bepaald voor de ringmonsters. De resultaten en algemene informatie zoals risicoklasse, teelt- en bodembewerkingshistoriek, administratieve gegevens, foto's van de bodemprofielen en de algemene toestand van het veld tijdens monsternamen per perceel, zijn in tabelvorm weergegeven in de Annex bij dit rapport. De resultaten zijn structureel toegankelijk via een database.

Op de middendelen van 6 percelen met een range aan eigenschappen zijn aanvullend de bodemvochtgehalten op 3 diepten en de grondwaterstand continu gemeten met intervallen van één uur om modelberekeningen voor deze percelen te kunnen toetsen.

Omdat het niet volstaat op basis van één enkele indicator een onderbouwde uitspraak te doen over de toestand van bodemverdichting, is in deze studie een combinatie van indicatoren gebruikt:

- Indringingsweerstand (grenswaarde 3 MPa),
- Bulkdichtheid (grenswaarden $1,75 - 0,009$ kg m⁻³ voor klei > 17,5% en $1,60$ kg m⁻³ voor klei ≤ 17,5%),
- Luchtcapaciteit (grenswaarde $0,10$ m³ m⁻³),
- Verzadigde doorlatendheid (grenswaarde 10 cm d⁻¹),
- Macroporiënvolume (grenswaarde $0,04$ m³ m⁻³).

Metten: de resultaten

De textuur en organische koolstofgehalten van de monsters hebben een grote spreiding, zodat de dataset representatief wordt geacht voor een groot deel van de Vlaamse bodems.

Globaal gezien kon op basis van een aantal geselecteerde bodemkwaliteitsindicatoren die typisch in een context van bodemverdichting worden aangewend, worden vastgesteld dat de in deze studie bemonsterde percelen onderhevig waren aan bodemverdichting. De geselecteerde bodemkwaliteitsindicatoren waren de indringingsweerstand, de bulkdichtheid, de luchtcapaciteit, de verzadigde doorlatendheid (geometrisch gemiddelde en minimale waarde) en het macroporiënvolume. Vooral de indringingsweerstand was voor alle percelen op verschillende plaatsen vanaf de verdichte ondergrond te hoog ($> 3 \text{ MPa}$), waardoor wortelgroei belemmerd kan worden. De luchtcapaciteit was op de meeste percelen te laag ($< 0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), zeker vanaf de verdichte ondergrond, waardoor een goede luchthuishouding daar in het gedrang kan komen, zeker onder natte omstandigheden. Het gunstigst waren de zandbodems, al was ook hier de luchtcapaciteit in de verdichte ondergrond in een paar gevallen te laag.

De bulkdichtheid, een directe maat voor bodemverdichting, was op verschillende percelen hoger dan of leunde aan bij de drempelwaarde voor bodemverdichting, al was dit voor een aanzienlijk deel van de percelen niet het geval. Verder onderzoek zou kunnen uitwijzen of de drempelwaarden voor bulkdichtheid niet aan herziening toe zijn. Bepaalde studies hanteren immers lagere drempelwaarden dan de in deze studie gehanteerde 'Europese normen'. Het macroporiënvolume lag op ruim de helft van de percelen onder de grenswaarde ($< 0,04 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). Op de zandbodems bleef deze indicator echter zelfs in de verdichte ondergrond boven de grenswaarde. Te verwachten valt dat een snelle *drainage* van overtollig water in vele bodems belemmerd wordt. Op vele percelen, en vooral deze waar het macroporiënvolume gunstig was, was in de meeste gevallen de gemiddelde verzadigde doorlatendheid niet belemmerend ($> 10 \text{ cm d}^{-1}$). In de verdichte en diepere ondergrond was de *gemiddelde* verzadigde doorlatendheid vaak gunstig, en dit o.w.v. grote doorgaande macroporiën. De *minimale* verzadigde doorlatendheid was echter op bijna alle percelen te laag in de verdichte ondergrond. Lokaal kan de infiltratiecapaciteit dus sterk belemmerd worden. Bovendien moet hieraan worden toegevoegd dat de metingen betrekking hebben op bodemstalen genomen vanaf een diepte van 15 cm. Dit betekent dat gunstige waarden met betrekking tot drainage niet noodzakelijk betekenen dat de *infiltratie* aan het bodemoppervlak gunstig is. Daar kan immers een verslachte of korstlaag de infiltratiecapaciteit van de bodem aanzienlijk reduceren, waardoor toch plasvorming kan ontstaan. Globaal gezien kan worden gesteld dat de zandbodems, ondanks hun hoge indringingsweerstand, het minst onderhevig zijn aan de (gevolgen van) bodemverdichting.

Vergelijking van de resultaten gemeten ter hoogte van de kopakker met deze gemeten in de middendelen laten toe het effect van bodemverdichting op de bodemkwaliteit, en op de waterretentie- en doorlatendheidscurves beter in te schatten. De hypothese was immers dat bodemverdichting er meer uitgesproken is. Ook kan de op de kopakker gemeten bodemkwaliteit een indicatie zijn voor de toekomstige bodemgesteldheid van het perceel, mocht bodemverdichting zich blijven voortzetten t.g.v. intensievere berijding. De resultaten tonen bodemverdichting en dus achteruitgang van de bodemkwaliteit van de kopakkers aan. Wel waren de verschillen in bodemkwaliteit tussen kopakker en middendeel sterker uitgesproken in de diepere ondergrond dan in de verdichte ondergrond. Een uitzondering hierop vormt de indringingsweerstand die op alle percelen ook in de verdichte ondergrond groter was ter hoogte van de kopakkers.

Wat de waterretentie- en doorlatendheidscurves betreft, toonde de studie aan dat op de onderzochte percelen de effecten van mogelijke verdichting vooral een impact hebben in het natte traject, nabij verzadiging. Zeker vanaf veldcapaciteit konden geen uitgesproken trends worden waargenomen wanneer kopakkers met middendelen werden vergeleken.

De meeste variatie in de dataset blijkt te worden verklaard door de textuur en niet door bodemverdichting, en meer door de bodemlaag dan door de plaats op het perceel (kopakker of midden). Voor de diepere ondergrond kan géén onderscheid worden gemaakt tussen kopakker en midden van het perceel, voor de bovengrond en de verdichte ondergrond kan dat wel.

Modelleren: pedotransferfuncties

Nieuwe pedotransferfuncties voor de waterretentie- en doorlatendheidscurve die de actuele bodemtoestand in Vlaanderen weerspiegelen zijn, met de gemeten eigenschappen als mogelijk verklarende parameters, opgesteld met de k-dichtste buren-methode (k-NN). De voorspelling van de

punten op de vochtretentiecurve en doorlaatbaarheidcurve bij bodemvochtspanningen in een range tussen pF -1 en pF 5, geschat op basis van textuur en OM, is gevalideerd. Aan de geschatte punten van de waterretentie- en de doorlatendheidscurve is het Mualem-Van Genuchten-model gefit voor gebruik in het Vlaanderen-model.

Door de bulkdichtheid toe te voegen aan de pedotransferfunctie kan (binnen het geldigheidsdomein) het effect van verdergaande verdichting worden gesimuleerd. De pedotransferfuncties blijken voor zowel de waterretentie- als de doorlatendheidscurve in het 'natte' traject (tussen pF 0 en 2) responsief op bulkdichtheid.

De via de k-NN-methode opgestelde pedotransferfuncties gaven zeer bevredigende resultaten en scoorden beter dan functies vermeld in de literatuur, zelfs wanneer enkel textuur en organisch-koolstofgehalte werden meegenomen. Wordt bulkdichtheid toegevoegd als predictor-variabele, dan nam de voorspellingsfout af, vooral in het 'nattere' traject van de waterretentie- en doorlatendheidscurves.

Modelleren: watertransport voor 6 percelen

Voor de zes percelen met continue bodemvocht- en grondwaterstandsmetingen zijn perceel-specifieke SWAP-modellen opgezet waarin de lokale veldomstandigheden zo goed mogelijk zijn nagebootst door naast de perceel-specifieke bodemfysische eigenschappen ook de lokale karakteristieken van de bodem en het gewas in het model te verwerken. Ook is gebruikgemaakt van lokale neerslagdata als bovenrand en van de gemeten grondwaterstanden als onderrand. De eerste rekenresultaten zijn gebruikt om de modellen, met name de gewasfactor, te kalibreren. De gewassen gras, mais en aardappelen zijn met het gewasgroeimodel WOFOST doorgerekend, de overige gewassen met het eenvoudig gewasgroeimodel van SWAP. Na de kalibratie zijn modelexperimenten uitgevoerd om de robuustheid van de pedotransferfuncties en de gevoeligheid van parameters te verkennen. Daartoe is gerekend met de door de pedotransferfuncties afgeleide tabellen, de hieraan gefitte Mualem-Van Genuchten-functies en de laatste in combinatie met een vaste grondwaterstand conform het Vlaanderen-model voor deze bodems. Uiteindelijk zijn de rekenresultaten getoetst door de berekeningen te vergelijken met de op drie diepten gemeten vochtgehalten.

De simulaties met SWAP van het vochtgehalte op drie diepten gaan goed voor de velden op klei (E), leem (A) en zandleem (L), vrij goed voor het perceel met licht zandleem (P) en minder goed op de velden met zand (Z) en lemig zand (S). Verschillen tussen gemeten en gesimuleerde vochtgehalten kunnen vaak (deels) worden verklaard uit de verschillen tussen het vochtgehalte bij verzadiging op basis van metingen aan de bodemmonsters en het maximale in het perceel gemeten vochtgehalte bij verzadiging.

Wanneer het maximale gemeten veldvochtgehalte groter is dan de verzadigde doorlatendheid gebruikt in het model, kan een structurele onderschatting van het vochtgehalte door het model (deels) worden verklaard uit een mismatch tussen vochtgehaltemeetpunt in het perceel en het bodemmonster genomen op een nabije plek op dezelfde diepte. Wanneer het maximale gemeten veldvochtgehalte kleiner is dan de verzadigde doorlatendheid gebruikt in het model, dan is er, alleen als ook de grondwaterstand hoger is geweest dan de betreffende meetdiepte, sprake van een mismatch. De mismatch tussen het maximale vochtgehalte in het veld en dat gemeten aan bodemmonsters en gebruikt in het model kan het gevolg zijn van heterogeniteit in het perceel of omdat de bodemvochtsensoren moeten worden gekalibreerd. Kalibratie van de recent uit perceel Zevegem opgegraven bodemvochtsensoren toont aan dat kalibratie van de sensoren en correctie van de metingen noodzakelijk zijn. Omdat de vochtmetingen niet bedoeld zijn voor een strikte kalibratie/validatie van de modelresultaten maar zijn opgezet als een indicatieve toets om te zien of het model in staat is de dynamiek en orde grootte van de gemeten vochtgehalten en daarmee de stroming door de bodem te simuleren, is een correctie achteraf niet per se nodig.

Het vervangen van de gedetailleerde (op metingen aan bodemmonsters gefitte relaties) tabellen voor waterretentie en hydraulische geleidbaarheid door (op dezelfde metingen gefitte) parameters van Mualem-VanGenuchten-relaties, geeft over het algemeen relatief kleine, acceptabele verschillen in

gesimuleerde vochtgehalten. Vaak resulteren de Mualem-VanGenuchten-relaties in een lichte onderschatting van de met de tabellen gesimuleerde vochtgehalten.

Simulaties met een vaste grondwaterstand van 2 m beneden maaiveld, geven sterk wisselende effecten op de simulaties van de vochtgehalten. Hierbij speelt de grootte van het verschil tussen de opgelegde gemeten grondwaterstanden en de vaste grondwaterstand van 2 m beneden maaiveld een belangrijke rol. Als dit verschil groot is, zijn de effecten groter. Maar ook het bodemmateriaal is van belang, waarschijnlijk in termen van capillaire geleidbaarheid: hoe groter dit is, hoe geringer de effecten op de simulaties van de vochtgehalten.

De toetsing aan de op drie diepten in het veld gemeten vochtgehalten laten zien dat het fysisch transportmodel SWAP bij gebruik van goede data in staat is gemeten vochtgehalten en dus ook het transport van water door de bodem te simuleren. SWAP kan worden gebruikt om met de database van hydraulische karakteristieken van bodems van verschillende textuur en in niet-verdichte en verdichte staat, de effecten van verdichte bodems te voorspellen. De gesimuleerde vochtgehalten en daarmee de stroming door de bodem worden in belangrijke mate bepaald door de als onderrand opgelegde grondwaterstand. Complementair is ook de capillaire geleidbaarheid van de bodem van belang.

Modelleren: Ruimtelijke scenario's

Het effect van bodemverdichting is voor vijf stroomgebieden verkend in combinatie met vier klimaatscenario's:

1. referentiescenario: 'niet-verdichte' situatie bij huidig klimaat;
2. referentie-klimaatscenario: 'niet-verdichte' situatie bij (een range van) klimaatscenario's;
3. verdicht scenario: 'verdichte' situatie bij huidig klimaat;
4. verdicht-klimaatscenario: 'verdichte' situatie bij (een range van) klimaatscenario's.

De stroomgebieden zijn geselecteerd als bestaand Vlaams waterlichaam met een oppervlakte landbouw van minstens 65%, naar voldoende aanwezigheid van bodems gevoelig voor verdichting en naar een variatie in grondwaterdiepte over de vijf gebieden.

De range van klimaatscenario's bestaat uit vier klimaatscenario's die het domein omspannen en een indicatie geven van de onzekerheid van de klimaatscenario's. De potentiële maandelijkse verdamping in de zomer stijgt sterk voor het 'high winter' scenario en stijgt matig voor het 'mean' scenario. Voor alle andere scenario's is er geen of slechts een beperkte stijging van de potentiële verdamping. De neerslag tijdens de zomer vertoont voor het 'high summer' scenario een sterke stijging. Voor het 'high winter' scenario is de stijging van de totale maandelijkse neerslag in de winter beperkter. De 'high winter' en 'low' scenario's voorspellen een daling van de neerslag in de zomer. Het 'mean' scenario verschilt voor de totale maandelijkse neerslag slecht weinig van het referentiescenario.

De bodemtype-grondwaterdiepte-combinaties uit het bestaande Vlaanderen-model met een resolutie van 50 x 50 m zijn gebruikt om de niet-verdichte situatie weer te geven. De aan de resultaten van de pedotransferfuncties gefitte Mualem-Van Genuchten-functies zijn gebruikt om de verdichte situatie te beschrijven. Aangezien tijdvariabele grondwaterstanden niet op regionale schaal beschikbaar zijn, hebben de SWAP-kolommen als onderste randvoorwaarden een vaste grondwaterstand gelijk aan de gemiddeld hoogste grondwaterdiepte ingedeeld in vier klassen: < 1 m-mv, 1-2 m-mv, 2-3 m-mv en > 3 m-mv, waarbij de optie vrije drainage wordt gebruikt voor de laatste klasse. Het Vlaanderen-model kan op dit moment alleen met neerslag per dag uit de voeten, en daarom is met een aanvullende berekening de gevoeligheid verkend voor deze randvoorwaarde. In de scenario's wordt geen rekening gehouden met mogelijke veranderingen in wortelgroei, waterstressrespons van de vegetatie of andere teelten. Voor de vijf studiegebieden zijn simulaties uitgevoerd voor een periode van elf jaar voor verdichte en niet-verdichte bodems bij huidig klimaat en onder drie klimaatscenario's. Deze berekeningen gebruiken dagwaarden voor neerslag en potentiële evapotranspiratie als randvoorwaarde.

Onder de verschillende klimaatscenario's is de berekende transpiratie altijd hoger dan bij ongewijzigd klimaat. Bij verdichting neemt de transpiratie bij ongewijzigd klimaat af (in met name de westelijke stroomgebieden). Onder de klimaatscenario's is er een gewijzigde respons bij verdichting: de toename

in transpiratie ligt lager in de verdichte situatie vergeleken met de niet-verdichte situatie. De berekende waterstress is onder alle klimaatscenario's hoger dan bij ongewijzigd klimaat. Bij verdichting is er een kleine verhoging van de waterstress bij huidig klimaat, maar de waterstress neemt meer toe onder de klimaatscenario's bij verdichting dan in de niet-verdichte situatie. Onder de klimaatscenario's is er minder afname in grondwatervoeding bij verdichting vergeleken met de niet-verdichte situatie. De berekende effecten op oppervlakkig afstroming zijn beperkt, waarschijnlijk mede door gebruik van de dagelijkse neerslag. Simulaties met uurlijkse neerslag voor één stroomgebied bevestigen dit.

Het effect van verdichting op de waterhuishouding is op basis van de resultaten van de regionale simulaties beperkt. Bij scenario's van klimaatverandering is de reactie echter verschillend bij niet-verdichte en verdichte bodems en zijn de verdichte bodems droogtegevoeliger (relatief lagere transpiratie en meer toename in waterstress).

Synthese: effect van bodemverdichting op het watertransport in de bodem

Globaal gezien kon op basis van de geselecteerde bodemkwaliteitsindicatoren worden vastgesteld dat de in deze studie bemonsterde percelen onderhevig waren aan bodemverdichting. Opvallend is dat de verzadigde doorlatendheid van de verdichte ondergrond relatief goed is als gevolg van de aanwezigheid van macroporiën. De op basis van de metingen afgeleide pedotransferfuncties laten in het bereik van pF 0 tot 2 effecten van verdichting zien in de waterretentie- en doorlatendheidscurve. Deze veranderingen resulteren globaal gezien in beperkte gesimuleerde effecten in de waterhuishouding. Dit neemt niet weg dat de lokale effecten mogelijk aanzienlijk kunnen zijn, gelet op de grote variatie in bodemverdichting die binnen de percelen werd opgemeten. De verschillen tussen de verdichte en niet-verdichte situatie in stroomgebieden zijn beperkt. Bij klimaatverandering nemen de gesimuleerde effecten van verdichting toe: klimaatscenario's leiden op verdichte bodems tot meer oppervlakkige afstroming en meer droogtegevoeligheid dan op niet-verdichte bodems.

De effecten van slemp en structuurbederf in de bouwvoor binnen een groeiseizoen zijn in deze studie niet onderzocht. Nu de effecten van bodemverdichting op het watertransport in de bodem globaal gezien beperkt lijken te zijn, wordt geadviseerd te verkennen of slemp dan wel structuurbederf in de bouwvoor de visueel waarneembare plasvorming kan veroorzaken.

1 Inleiding

Uit onderzoeken blijkt dat machinale bewerking van landbouwbodems in Vlaanderen en Nederland leidt tot bodemverdichting, ook tot onder de ploegdiepte. Kwantitatieve gegevens ontbreken echter.

Een verdichte bodemlaag gaat in principe gepaard met een verlaagde waterdoorlatendheid en kan een barrière vormen voor de groei van wortels. Waarnemingen wijzen er sterk op dat bodemverdichting het watertransport belemmert. Bodemverdichting resulteert in een aantal risico's:

1. Verdichte landbouwbodems kunnen ertoe leiden dat hevige neerslag niet snel doordringt in de bodem en daarbij leidt tot (meer) oppervlakkige afstroming en plasvorming. Om wateroverlast te voorkomen, is het belangrijk dat regenwater zo veel mogelijk infiltreert daar waar het valt. Als bodemverdichting infiltratie belemmert, nemen risico's voor overstroming toe, zeker gelet op het areaal van landbouwbodems.
2. Bodemverdichting vergroot het risico op beperking van gewasopbrengsten. Enerzijds omdat tijdens de meer frequente waterstagnatie de aeratie van de wortelzone beperkt wordt en de akkers zijn dan niet berijdbaar om te oogsten. Anderzijds omdat door de verdichte ploegzool de bewortelingsdiepte afneemt en het gewas droogtegevoelig wordt, en omdat de capillaire nalevering kan afnemen en zo de bouwvoor sneller uitdroogt in droge perioden.
3. Klimaatverandering zal leiden tot een toename van weersextremen; meer en vaker hevige neerslag en vaker zeer droge perioden. Een goede bodemstructuur is des te belangrijker om in de landbouw en het waterbeheer goed te kunnen anticiperen op klimaatverandering.

Deze problematiek is recentelijk in Vlaanderen in een TWOL-studie verkend. Een groot deel van het Vlaamse landbouwareaal is risicovol voor bodemverdichting, ook bij gebruik van standaard oogstmachines en onder normale vochtomstandigheden. Omdat er nauwelijks kwantitatieve gegevens zijn over de effecten van bodemverdichting op de vochthuishouding van de bodem, geven de resultaten van de TWOL-studie aanleiding voor dit onderzoek. Daarom heeft het Vlaams Gewest, vertegenwoordigd door de Vlaamse Regering, voor wie optreedt de Vlaamse minister bevoegd voor Leefmilieu, Natuur en Cultuur, een opdracht uitgeschreven voor onderzoek om de gevolgen van bodemverdichting op het watertransport door een bodem te kwantificeren.

1.1 Doelstelling

De doelstelling van het onderzoek is, conform het bestek: "na te gaan wat de gevolgen zijn van bodemverdichting op het watertransport door een bodem."

1.2 Werkwijze

Omdat bestaande bodemfysische data niet toepasbaar zijn voor verdichte bodems, is het – om de gevolgen van bodemverdichting op het watertransport door de bodem te kunnen verkennen – noodzakelijk om de volgende stappen te doorlopen:

1. Verzamelen van historische basisdata.
2. Meetplan en perceelkeuze t.b.v. het verzamelen van bodemfysische data:
 - a. Veldmetingen op de geselecteerde percelen: gericht een aantal landbouwkundig gebruikte percelen selecteren om in situ de indringingsweerstand en het bodemvocht te meten en om bodemmonsters van verdichte ondergronden te nemen;
 - b. Onderzoek van de bodemmonsters in het laboratorium: voor verdichte bodems worden de waterretentiecurve (pF-curve) en doorlatendheidscurves (K(h) inclusief de verzadigde doorlatendheid K_s) experimenteel bepaald;

-
- c. Deze pF-curve en k(h)-relaties worden gebundeld in een bodemfysische basisdataset die representatief is voor Vlaanderen. Deze data worden samen met de gemeten indringingsweerstand aangewend om aan bodemverdichting gerelateerde bodemkwaliteit te inventariseren.
 3. Modelleren watertransport in verdichte bodems:
 - a. Met deze dataset worden vervolgens bodemfysische relaties voor verdichte bodems afgeleid. De robuustheid van deze relaties wordt getoetst door deze toe te passen in het agro-hydrologische model SWAP. De SWAP-resultaten worden voor enkele intensief in situ bemeten bodemprofielen getoetst aan de bodemvochtmetingen op deze percelen.
 - b. Kwantificeren van effecten van bodemverdichting met SWAP door de impact van verschillende gradaties van bodemverdichting voor (extreem) natte en droge perioden te verkennen.
 - c. Verkennen van de gevolgen in Vlaanderen door de effecten van verdichting met SWAP te kwantificeren voor vijf stroomgebieden met het bestaande Vlaanderen-model gemaakt door VITO.

1.3 Uitgangspunten

Voor deze studie is gebruikgemaakt van de volgende bestaande gegevensbestanden:

Aardewerk:

- database gekarteerde bodemprofielen: textuur, organische stof en x- en y-coördinaten;
- meeste profielen zijn tussen 1990 en 1976 verzameld;
- beperkingen: bevat geen metingen bulkdichtheid en ook geen bepalingen (verzadigde) doorlatendheid en pF-curve.

Aardewerk (laatste, herwerkte versie):

- uitbreiding aardewerk, dus ook recentere boringen.

Hydraulische database: circa 70 bodemprofielen België daterend van voor het jaar 2001:

- circa 30 bodemprofielen UGent en 40 KULeuven, waarvan ca. de helft Ksat en K-h bevatten: voornamelijk akker-weiland en bos; deze zijn opgenomen in Europese databank (EU-HYDI).

VITO: Vlaanderen dekkende SWAP-modellering voor 1400 bodemprofielen geënt op:

- oude database Aardewerk
- pedotransferfuncties van Wösten toegepast voor h- θ en h-k relaties.

1.4 Producten

Het eindresultaat van het onderzoek is een rapport met een beschrijving van de gemeten bodemkwaliteitsindicatoren, de modellering van verdichte profielen, de resultaten van de verificatie aan veldmetingen en de resultaten van de modelscenario's (voor vijf stroomgebieden) voor de voor verdichting gevoelige Vlaamse landbouwbodems.

Overige resultaten zijn:

- Een database met gemeten fysische bodemkenmerken;
- SWAP-modellen van de gemeten bodemprofielen;
- Ruimtelijke kwantificering, met een scenario voor de niet-verdichte situatie als referentie.

1.5 Leeswijzer

De hoofdstukken volgen de werkwijze. Eerst worden de historische data beschreven (hoofdstuk 2), daarna worden in hoofdstuk 3 het meetplan en de perceelkeuze uitgelegd. In hoofdstuk 4 wordt vervolgens beschreven welke veldmetingen zijn uitgevoerd waarna in hoofdstuk 5 de resultaten van de analyses in het laboratorium beschrijft. In hoofdstuk 6 worden de 6 percelen met continue hydrologische-bodemfysische metingen beschreven. Het afleiden van de pedotransferfuncties, het gebruik van SWAP om de effecten van bodemverdichting te kwantificeren en om een indicatie van de gevolgen voor Vlaanderen te geven, staan in hoofdstuk 7. Afgesloten wordt met de conclusies in hoofdstuk 8.

2 Historische basisdata en de database

De historische data van Vlaanderen zijn recentelijk verzameld en beschreven voor het EU-programma EU-HYDI (Cornelis, 2013) dat in het kader van de goed doordachte Europese databehoefte en datastandaarden de hydraulische eigenschappen van Europese bodems verzamelt. Naast bulkdichtheid, waterretentiecurves (en in mindere mate doorlatendheid), textuur, en C-gehalte, zijn o.a. ID, coördinaten, landgebruik en -bedekking, moedermateriaal, diepte van monstername en horizont, bodemserie en tijdstip van monstername ingegeven. De meeste historische data voldeden aan de gestelde kwaliteitseisen en zijn met standaard-meetmethodes gemeten. Vier profielen werden in eerste instantie niet weerhouden, omdat de coördinaten ontbraken.

Verondersteld wordt dat de bestaande (historische) gegevens verzameld voor 2001 een representatieve afspiegeling vormen voor Vlaanderen in een minder verdichte situatie, omdat in deze periode de landbouwvoertuigen minder zwaar waren. De historische data fungeren als referentie om het voorkomen van verdichting aan te tonen en helpen te specificeren welke strata op welke locaties aanvullend bemonsterd gaan worden.

Na aftrek van de vier bovenvermelde bodemprofielen waren er in de EU-HYDI databank voor België nog 66 historische waterretentie- en doorlatendheidscurves beschikbaar van voor 2001. De coördinaten van de percelen waar indertijd is gemeten zijn bekend, zodat het in principe mogelijk was om op min of meer dezelfde locatie nieuwe stalen te nemen. In hoofdstuk 3 (sectie 3.4) wordt verder ingegaan op de criteria die leiden tot de uiteindelijke selectie van de percelen waarvoor historische data voorhanden waren.

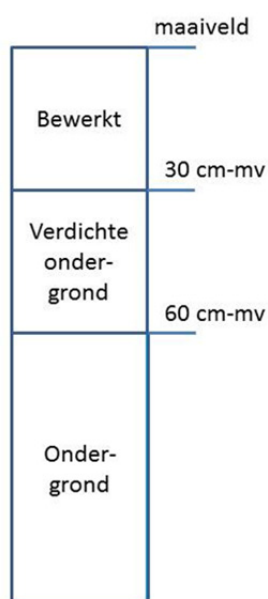
3 Meetplan en perceelkeuze

Het verzamelen van nieuwe data in deze studie is specifiek gericht op het verzamelen van informatie in verdichte situaties, dat wil zeggen informatie boven, in en onder de verdichte laag. Omdat deze data een beeld moeten geven van het effect van bodemverdichting voor heel Vlaanderen, is het gewenst dat deze aanvullende dataset representatief is voor bodems in Vlaanderen die gevoelig zijn voor verdichting. Dit vereist gerichte selectie van percelen en meetlocaties.

3.1 Uitgangspunten

Om zowel de spreiding in de 'eigenschappenruimte' als de representativiteit voor Vlaanderen te bevorderen, wordt de volgende werkwijze voor het opstellen van het meetplan en de locatiekeuze gehanteerd:

1. **Bodem.** De bovenste bodemlaag wordt (voor zover geen permanent grasland) regelmatig bewerkt waardoor bodemverdichting wordt opgeheven. Van de Vreken *et al.* (2009) beschrijven dat op leem- en kleigronden doorgaans tot ca. 25 cm wordt geploegd en dat men op zandgrond dikwijls dieper ploegt dan 30 cm. De bodemlaag meteen onder deze bewerkte laag is het meest verdicht, omdat de invloed van de belasting vanaf het maaiveld hier groot is en niet door bodembewerking wordt opgeheven. Dieper dan 60 cm is de invloed van de belasting vanaf het maaiveld beperkt, uitgezonderd zeer grote belastingen. Voor deze studie wordt als denkmodel het volgende, in drie lagen geschematiseerd bodemprofiel gehanteerd (Figuur 3.1):



Figuur 3.1 Schematisering van een verdicht bodemprofiel.

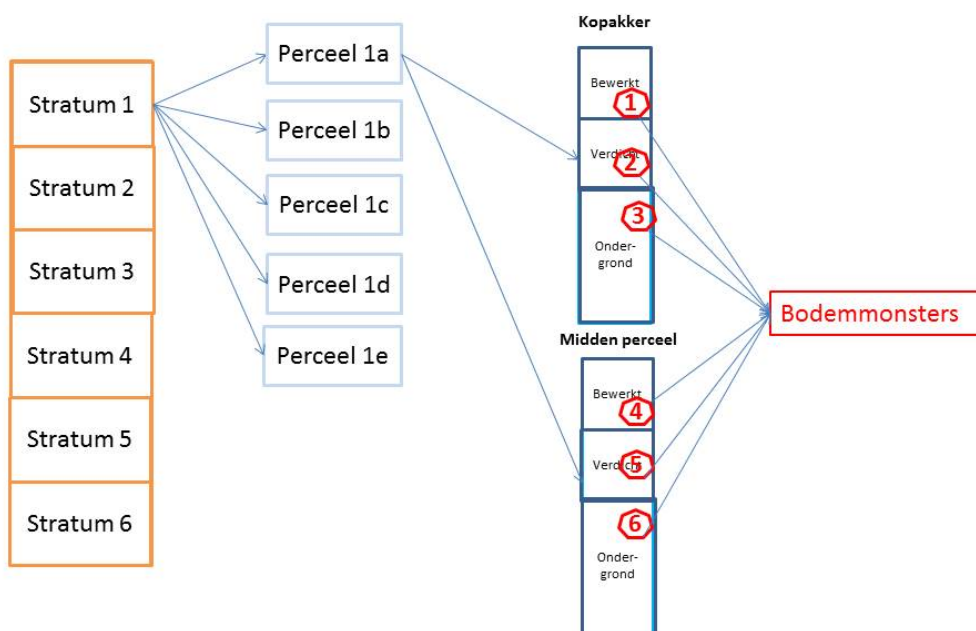
De opdeling van het bodemprofiel in drie zones (bouwvoor/wortelzone i.e. de bovengrond, de verdichte ondergrond incl. ploegzool, en de diepere niet-verdichte ondergrond) vormt het uitgangspunt voor de bemonstering: per locatie worden in deze drie bodemlagen monsters verzameld waarbij de tweede laag altijd duidelijk onder de bewerkingdiepte begint.

2. **Monsternamelocaties en percelen.** Om de variatie in verdichting binnen percelen te verkennen, worden op één perceel twee meetlocaties geselecteerd: de kopakker (vaker bereden en daardoor zwaarder belast) en het midden van het perceel. Dat betekent dat in Vlaanderen 30 te bemonsteren percelen worden geselecteerd. Bij voorkeur wordt gebruikgemaakt van dezelfde percelen waar de historische metingen zijn uitgevoerd (zodat de verandering in dichtheid door vergelijken van de historische en de huidige data zo zuiver mogelijk kan worden aangetoond). Percelen die niet langer als representatief worden beoordeeld (bijvoorbeeld door woelen), worden, voor zover dit te achterhalen valt, uitgesloten.
3. **Strata.** Om een representatief beeld voor Vlaanderen te krijgen, worden de locaties verdeeld over strata (bodemtypen met achterliggende profielopbouw en textuurklassen). Deze worden gedefinieerd op basis van de digitale bodemkaart 1:20.000 van België, het bestand 'Aardewerk' en/of de gevoeligheids- en risicokaarten uit Van De Vreken *et al.* (2009). Op basis van de arealen die de onderscheiden strata in Vlaanderen beslaan, worden de representatiefste strata geselecteerd die bemonsterd zullen worden.
4. **Herhalingen.** Het aantal onderscheiden strata en het aantal te bemonsteren percelen bepalen het aantal herhalingen i.e. het aantal monsternamelocaties per stratum. Bij bijvoorbeeld onderscheiden van zes strata kunnen vijf percelen (i.e. 10 locaties) per stratum worden bemonsterd. Herhalingen geven een indruk van de variatie binnen de strata, i.e. hoe groter het aantal herhalingen, hoe beter de spreiding kan worden gekwantificeerd. Schematisch is de opzet voor de bemonstering in Figuur 3.2 weergegeven.

De herhalingen worden zowel binnen de percelen als (op meer percelen) binnen de strata verzameld. In het eerste geval wordt inzicht verkregen in de spreiding in eigenschappen binnen het perceel, in het tweede geval in de variatie binnen het stratum in Vlaanderen.

5. Op één bemonsterd perceel in elk van de onderscheiden strata worden **aanvullende waarnemingen** verricht waaraan de watertransportmodellen kunnen worden getoetst.

De wijze waarop de strata zijn onderscheiden en de wijze waarop de percelen zijn geselecteerd, worden in de volgende paragrafen beschreven.



Figuur 3.2 Overzicht meetplan: strata, percelen, meetlocaties en bodemmonsters.

3.2 Strata

Het onderzoeksgebied Vlaanderen is onderscheiden in zes strata. Voor deze opsplitsing is gebruikgemaakt van de volgende gegevensbronnen:

- Digitale bodemkaart van Vlaanderen schaal 1: 20 000 (Van Ranst en Sys, 2000).
- Hybride-gevoeligheidskaart voor bodemverdichting in Vlaanderen (Van De Vreken *et al.* 2009).

De bovenste bewerkte laag is in bouwland voortdurend aan verandering onderhevig doordat deze jaarlijks wordt losgemaakt. Voor grasland is dit een sterk bewortelde laag met een actief bodemleven dat de bodemstructuur herstelt. Omdat het project is gericht op het kwantificeren van de effecten van verdichting van de ondergrond, is de indeling in strata gebaseerd op relevante eigenschappen van de verdichte laag tussen 30-60 cm-mv.

Voor het bepalen van de eigenschappen op het niveau van de “verdichte bodemlaag” kan worden gekeken naar de textuur van deze laag. De bodemkaart van Vlaanderen 1:20.000 geeft op basis van boringen per bodemserie o.a. de grondsoort (moedermateriaal en textuur). Van De Vreken *et al.* (2009) hebben door combinatie van Aardewerk (database met boorbeschrijvingen) en de bodemkaart de textuur (volgens de textuurdriehoek van het Centrum voor Bodemkartering) op 41 cm-mv vastgesteld. De textuurdriehoek onderscheidt zeven textuurklassen. De arealen in Vlaanderen voor de textuurklassen op een diepte van 41 cm-mv staan in Tabel 3.1, het voorkomen van deze klassen in Vlaanderen staat in Figuur 3.3. Aan 5.7% van het areaal is geen textuurcode toegekend. De arealen klei, E, (en met name zware klei, U) in Vlaanderen zijn gering.

Tabel 3.1

Textuurklassen op 41 cm-maaiveld (de klasse G met een zeer klein areaal is niet meegenomen).

Textuurcode	Textuurklasse	Oppervlak ha	Oppervlak %
A	leem	185681	19.6
E	klei	37877	4.0
L	zandleem	201703	21.3
P	lichte zandleem	95272	10.1
S	lemig zand	157808	16.7
U	zware klei	12602	1.3
Z	zand	200569	21.2
Geen code		54010	5.7
Totaal		945521	99.9

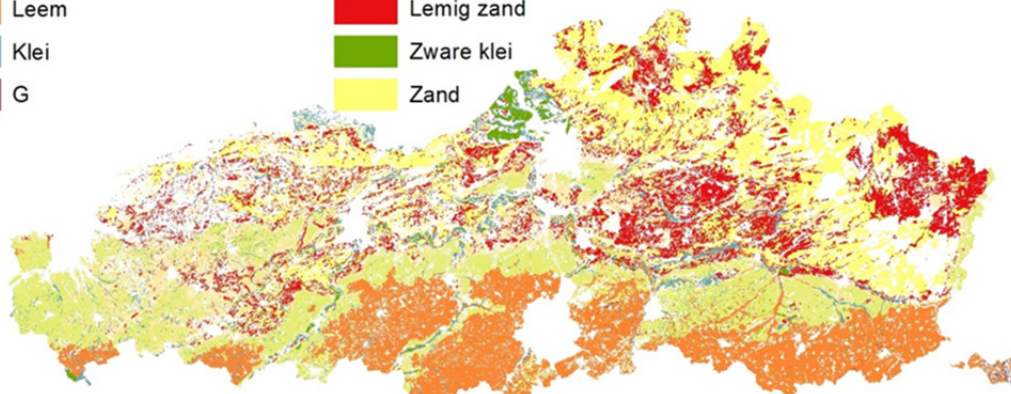
Legenda

hybride-gevoeligheidskaart

TEXTUUR

- Leem
- Klei
- G

- Zandleem
- Lichte Zandleem
- Lemig zand
- Zware klei
- Zand



Figuur 3.3 Ruimtelijke verdeling grondsoorten (textuurklassen).

De strata worden gevormd door de textuurklassen van de verdichte laag. Omwille van de beperking in het aantal te nemen monsters en derhalve ook in het aantal strata, is besloten de textuurklasse U, zware klei, niet mee te nemen vanwege het geringe areaal. Daardoor kunnen in de resterende zes strata (leem A, klei E, zandleem L, lichte zandleem P, lemig zand S en zand Z) gemiddeld vijf percelen per stratum worden geselecteerd.

3.3 Herhalingen

De keuze voor zes strata resulteert, gegeven de 30 te bemonsteren percelen, in gemiddeld vijf herhalingen per stratum. Omdat de strata uitsluitend op textuur zijn onderscheiden, wordt géén rekening gehouden met het bodemgebruik (grasland of bouwland) of verschillen in gevoeligheid voor verdichting binnen de textuurklassen.

Om ook deze extra verklarende gegevens in de analyse te kunnen betrekken, zijn de zes strata onderverdeeld in sub-strata met behulp van de precompressie-klassen van de hybride-gevoeligheidskaart van Van De Vreken *et al.* (2009).

De hybride-gevoeligheidskaart (Van De Vreken *et al.* 2009) is afgeleid op basis van de digitale versie van de bodemkaart van Vlaanderen en de Aardewerk-databank met gegevens van meer dan 13 000 bodemprofielen en 70 000 horizonten. Beide bestanden zijn gekoppeld en voor elke bodemkaartenheid is de meest waarschijnlijke horizont geselecteerd waarin het 41 cm-dieptevlak is gelegen. Voor dit niveau van 41 cm-mv is de precompressiestresswaarde (PCS) bepaald voor twee pF-waarden, nl. bij pF2,5 en pF1,8. De PCS-waarden zijn m.b.v. de classificatietabel volgens Horn *et al.* (2005) geassocieerd met zes gevoeligheids- en risicoklassen. Om verschillen in vochttoestand van de bodemkaartenheden in rekening te brengen bij de inschatting van de gevoeligheid voor bodemverdichting, is op basis van een beslissingsregel een 'hybride-kaart' gemaakt, waarbij een kaartenheid ofwel de PCS-waarde bij pF 2.5 krijgt, ofwel de PCS-waarde bij pF 1.8. De keuze is gebaseerd op de ingeschatte diepte van de grondwaterstand in het voorjaar en is afgeleid uit de diepte van voorkomen van roestverschijnselen, zoals vastgelegd in de drainageklasse op de bodemkaart 1:20.000 van Vlaanderen. Per bodemvlak is dus bepaald welke van de twee gevoeligheidskaarten van toepassing is.

De resulterende oppervlakteverdeling staat in Tabel 3.2. Uit Tabel 3.2 blijkt dat er voor enkele bodemkaartenheden negatieve PCS-waarden worden berekend. Omdat de PCS-waarde per definitie positief dient te zijn, zijn deze negatieve waarden verworpen.

Tabel 3.2

Oppervlakte-aandeel van de PCS-klassen bij de hybride-gevoeligheidskaart.

PCS-klasse	Minimale PCS kPa	Gemiddelde PCS kPa	Maximale PCS kPa	Areaal ha	Areaal %
	-193	-34	0	66870	7.1%
6 Extreem hoog	1	20	30	64690	6.8%
5 Zeer hoog	30	45	59	168691	17.8%
4 Hoog	60	71	90	195351	20.6%
3 Matig	90	105	120	334349	35.3%
2 Laag	120	136	150	91432	9.7%
1 Zeer laag	151	360	517	25161	2.7%
Totaal				946544	100.0%

Omdat bij de huidige landbouwvoertuigen een druk van 120 kPa vrijwel altijd zal worden overschreden, zal ook in PCS-klasse 2 en zelfs 1 bodemverdichting optreden. De zes PCS-klassen zijn

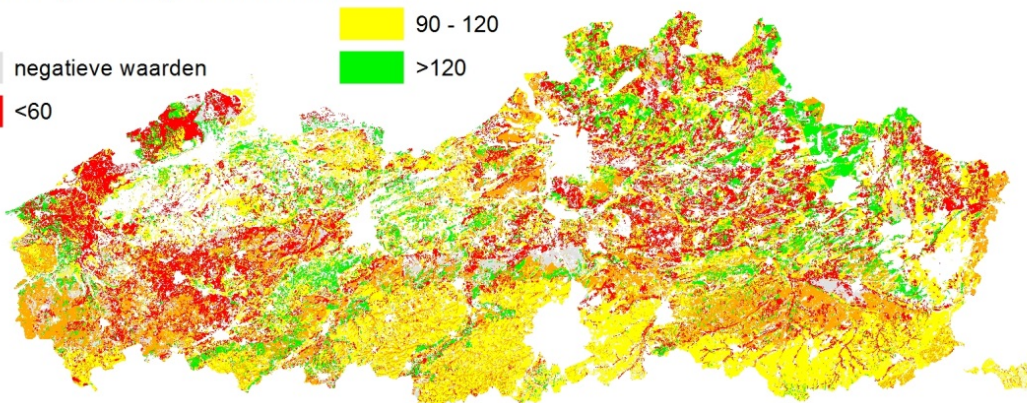
daarom voor deze studie geaggregeerd naar vier risicoklassen (Tabel 3.3) om sub-strata te onderscheiden. Figuur 3.4 laat zien waar de vier risicoklassen in Vlaanderen voorkomen.

Tabel 3.3

Risicoklassen op basis van de PCS-klassen van Van De Vreken et al. 1990.

PCS-klasse	risicoklasse	begrenzing (kPa)
1 en 2	Zeer hoog	1-60
3	Hoog	61-90
4	Matig	91-120
5 en 6	Laag	>120

Legenda



Figuur 3.4 Classificatie risicoklassen na indikking PCS-waarden tot vier klassen.

De oppervlakteaandelen van de sub-strata zijn bepaald voor de strata (textuur van de "verdichte bodemlaag") en de vier risicoklassen. De klasse 0 met PCS < 0 kPa (7% van het oppervlak van Vlaanderen) is niet meegenomen bij de oppervlakteverdeling. Door de textuurklassen "+", "blank = geen waarde", G (incidenteel voorkomend) en "U" (zware klei, deze heeft een zeer klein areaal in Vlaanderen) niet mee te nemen, resteren 6 strata en 24 sub-strata (Tabel 3.4).

Tabel 3.4

Oppervlakte-aandeel bij combinaties van textuur- en PCS-klassen op basis van de hybride-gevoeligheidskaart.

Textuur-/risicoklasse	<60 kPa	60-90kPa	90-120kPa	>120kPa	Totaal
A leem	1.6%	4.3%	15.1%	0.1%	21.1%
E klei	0.5%	1.0%	2.2%	0.6%	4.3%
L zandleem	2.5%	12.0%	1.8%	2.7%	18.9%
P lichte zandleem	8.1%	0.2%	0.7%	0.1%	9.2%
S lemig zand	5.4%	2.0%	6.5%	2.7%	16.6%
U zware klei	0.3%	0.5%	0.7%		1.4%
Z zand	5.0%	2.2%	9.3%	6.2%	22.8%
Totaal	22.9%	21.6%	34.9%	12.4%	92.8%

3.4 Perceelkeuze

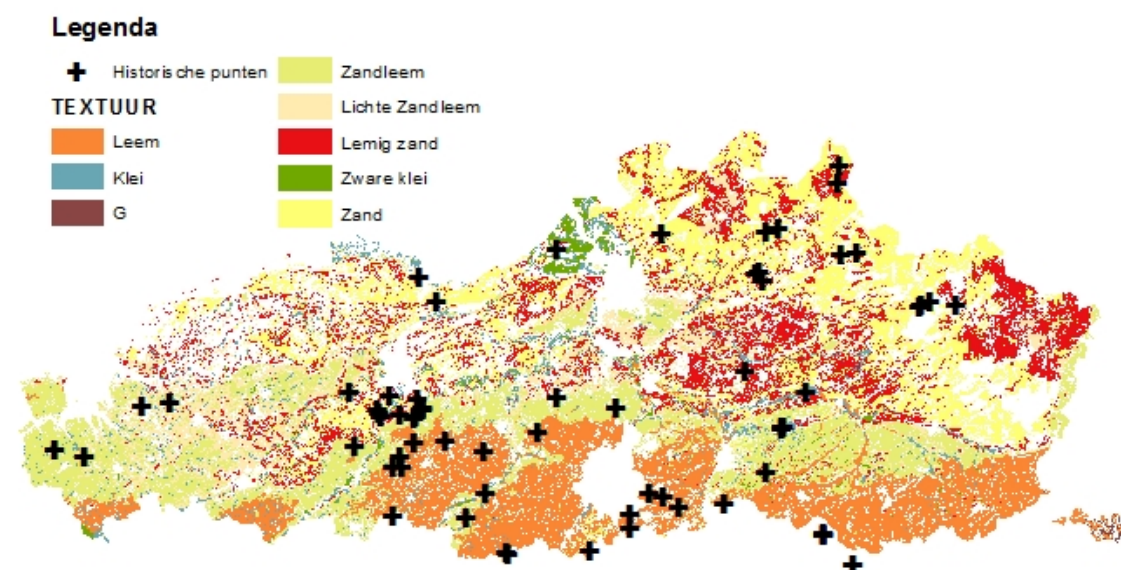
Voor de perceelkeuze zijn de zes strata (leem, klei, zandleem, lichte zandleem, lemig zand en zand) leidend en werd, indien mogelijk, aangesloten bij locaties waarvoor historische informatie beschikbaar is. Hiervoor was een bestand met 120 in België gelegen locaties met historische data beschikbaar (Cornelis, 2013). Dit bestand bevat 66 punten, bemonsterd tot en met 2000 die zijn voorzien van Lambert-coördinaten, vier locaties zonder coördinaten en 50 locaties bemonsterd na 2000 met WGS84-coördinaten. Verondersteld werd dat de historische gegevens verzameld tot en met 2000 voor Vlaanderen een representatieve afspiegeling vormen van een minder tot niet-verdichte situatie.

De historische meetlocaties tot en met 2000 werden vervolgens gecombineerd met de (sub-)strata. Dit resulteerde in 54 punten over de periode 1982-2000 in Vlaanderen binnen de voor deze studie onderscheiden strata in de databank opgenomen (70 historische meetlocaties waarvan voor 16 locaties geen textuurklasse werd toegekend in de studie van Van De Vreken *et al.*, 2009 en dus geen PCS-waarde, en/of de coördinaten ontbreken). Hiervan werden nog eens vijf punten niet aan een risicoklasse toegekend en één punt lag in de niet meegenomen klasse G met een zeer klein areaal waardoor er 49 punten resteerden met een combinatie van stratum en risicoklasse. In Tabel 3.5 zijn de punten die voldoen aan de criteria weergegeven. Opvallend is dat geen historische metingen voor de klasse P (lichte zandleem) beschikbaar waren. De geografische ligging van deze meetpunten staat in Figuur 3.5.

Tabel 3.5

Historische meetpunten tot en met 2000 in de (sub-)strata.

Textuur-/risicoklasse	Niet toegekend	<60	60-90	90-120	>120	Totaal
A leem				13	1	14
E klei	1	1		4	1	7
L zandleem	4	2	7			13
P lichte zandleem						0
S lemig zand			1	4	1	6
U zware klei			1	1		2
Z zand		2	1	3	6	12
Totaal	5	5	10	25	9	54



Figuur 3.5 Locatie meetpunten met historische data bemonsterd tot en met 2000.

De bedoeling was om bij de selectie van percelen in eerste instantie gebruik te maken van locaties waarvoor historische gegevens beschikbaar zijn met de idee dat daarmee de verandering in bodemfysische eigenschappen binnen de textuurklassen zo zuiver mogelijk kan worden aangetoond. De historische meetlocaties werden dan waar nodig (bijv. in de textuurklasse P, lichte zandleem) aangevuld met nieuwe meetlocaties om een zo goed mogelijke dekking van de strata i.e. textuurklassen te bereiken. Er kunnen meerdere percelen per stratum worden bemonsterd. Het ligt voor de hand bij de selectie van de percelen per stratum rekening te houden met de verschillende risicoklassen per textuurklasse. In totaal waren 54 historische meetlocaties met een textuurklasse beschikbaar, waarvan aan 49 ook een PCS-klasse was toegekend. Niet voor alle (sub-)strata waren historische meetlocaties beschikbaar. Voor die (sub-)strata waarvoor geen historische metingen beschikbaar waren, kon geen verdichting worden aangetoond. Omdat deze sub-strata ook kleine oppervlaktes beslaan in Vlaanderen werden deze niet bemonsterd (Tabel 3.6, rood). Pragmatisch gezien kregen ook sub-strata met areaal-bijdragen < 1% en één historisch meetpunt lage prioriteit (Tabel 3.6, violet). Sub-strata met één historisch meetpunt en areaalbijdragen >1% krijgen hogere prioriteit (Tabel 3.6, lichtgroen) en de textuur-PCS-klassen met meer meetpunten en grotere areaalbijdragen kregen de hoogste prioriteit (Tabel 3.6, donkergroen). Lastig zijn de klassen zonder historische meetpunten met substantiële areaalbijdragen (Tabel 3.6, lichtblauw), daar werd aanvullend bemonsterd. Het aantal geselecteerde historische meetlocaties bepaalt het aantal locaties dat voor deze sub-strata kon worden bemonsterd. Gegeven de grootte van de arealen zijn meerdere waarnemingen per substratum voor deze groep te verdedigen om inzicht te krijgen in de bodemfysische eigenschappen anno nu om de effecten op de waterhuishouding te kwantificeren.

Werden enkel percelen onder akkerbouw en tijdelijk grasland weerhouden (42 van de 66 profielen), dan werd het aantal potentiële profielen tot 33 gereduceerd. Omdat gestreefd werd naar vijf strata per textuurklasse met een zo evenwichtig mogelijke verdeling tussen de risicoklassen, kwamen uiteindelijk nog slechts 10 percelen in aanmerking.

Tabel 3.6

Prioritair te selecteren monsternamelocaties op basis van oppervlakteaandeel en aantal historische meetpunten voor combinaties van textuur- en PCS-klassen op basis van de hybride-gevoeligheidskaart. Prioritair bemonsteren van donkergroen, lichtgroen, lichtblauw, violet naar rood (niet bemonsteren).

Textuur-/risicoklasse	<60 kPa	60-90kPa	90-120kPa	>120kPa	Totaal
A leem	1.6% 0	4.3% 0	15.1% 13	0.1% 1	21.1% 14
E klei	0.5% 1	1.0% 0	2.2% 4	0.6% 1	4.3% 6
L zandleem	2.5% 2	12.0% 7	1.8% 0	2.7% 0	18.9% 9
P lichte zandleem	8.1% 0	0.2% 0	0.7% 0	0.1% 0	9.2% 0
S lemig zand	5.4% 0	2.0% 1	6.5% 4	2.7% 1	16.6% 6
U zware klei	0.3% 0	0.5% 1	0.7% 1		1.5% 2
Z zand	5.0% 2	2.2% 1	9.3% 3	6.2% 6	22.8% 12
Totaal	22.9% 5	21.6% 10	34.9% 25	12.4% 9	92.8% 49

Het bodemgebruik (akkerbouw of tijdelijk grasland) werd niet expliciet als selectie criterium gebruikt, omdat in de ondergrond de textuur bepalender is voor de doorlatendheid dan het bodemgebruik. Omdat de historische database vooral monsters voor bouwland bevat, werd waar mogelijk opnieuw onder bouwland bemonsterd. Dat werd echter niet als harde eis gehanteerd; waar dat zo uitkwam, werd onder grasland bemonsterd. In de ondergrond zijn bij grasland en akkerbouw het verschil in structuur en de mate van verdichting wel te zien, maar het verschil zal niet groot zijn doordat gras niet zo diep wortelt en omdat de wiellasten op grasland tegenwoordig ook zeer groot zijn. De structuur van de ondergrond zal bij grasland iets beter zijn dan bij akkerbouw en grasland is in het algemeen wat minder verdicht dan bouwland. Ook de doorlatendheid van de ondergrond zal bij grasland iets hoger zijn dan bij akkerbouwland. Het bij de selectie gericht onderscheiden van de landgebruiken grasland en akkerbouw leidt tot een forse uitbreiding van het benodigde aantal monsters en is binnen het project niet mogelijk.

De definitieve selectie van de percelen gebeurde op basis van de medewerking van hun gebruikers of eigenaren, het feit of ze nog steeds onder akkerbouw of tijdelijk grasland lagen en via on-site penetrometerwaarnemingen. Bij dit laatste werden vooral de spreiding in de verdichting en het verschil tussen kopakker en middendeel van het perceel vastgesteld. De ernst van de verdichting werd gerelateerd aan de internationaal erkende drempelwaarde voor de penetratieweerstand van 2 - 3 MPa (Van den Akker, 2006; Huber *et al.*, 2008; Jones *et al.*, 2008). Het doel van deze exercitie was om duidelijk niet-representatieve percelen uit te sluiten.

Doel was om een representatief perceel te bemonsteren. De algemene historie en situatie van de percelen werden in de mate van het mogelijke vastgelegd, maar niet in detail, en kunnen worden gebruikt bij de analyse van de resultaten. Mocht uit het gesprek met de eigenaar blijken dat er bijzondere zaken met het perceel zijn (woelen, aanvullingen, egaliseren, zware berijdingen met diepe spoorvorming etc.), dan werd een ander perceel gekozen. Dit heeft zich echter niet voorgedaan.

4 Meten van fysische en hydraulische bodemkenmerken

Uit eerdere studies in Vlaanderen (o.a. Van De Vreken *et al.*, 2009) is gebleken dat bodems onder landbouwgebruik steeds vaker verdichte lagen vertonen tot op diepten waar ze niet meer m.b.v. courante bodembewerkingstechnieken kunnen worden gebroken. In deze studie werden op de geselecteerde landbouwpercelen diverse fysische en hydraulische bodemkenmerken bepaald, waarbij het doel in eerste instantie tweeledig was:

1. het opstellen van een dataset ten behoeve van het simuleren van waterbeweging in bodems met verdichte lagen op de meetlocaties zelf;
2. het opstellen van een dataset om nieuwe pedotransferfuncties geldig voor verdichte bodems op te stellen voor simulaties los van de specifieke locaties.

De dataset werd ten slotte ook aangewend om:

3. steekproefsgewijs bodemverdichting op representatieve landbouwpercelen over de diverse hoofdbodemtextuurklassen en risicoklassen voor bodemverdichting heen te inventariseren.

De gemeten bodemkenmerken waren bodemtextuur (gehalte aan klei, leem, zand), het organisch koolstofgehalte, de indringingsweerstand op het veld, de bulkdichtheid, de verzadigde doorlatendheid en de waterretentie- en doorlatendheidscurve. Voor de steekproef werden naast de eerder vermelde indringingsweerstand, bulkdichtheid en verzadigde doorlatendheid, nog twee in het kader van bodemverdichting relevante bodemkwaliteitsindicatoren gehanteerd die op basis van de verzamelde dataset konden worden afgeleid, met name de luchtcapaciteit en het macroporiënvolume.

Verder werd, om het effect van verdichting op waterbeweging te kunnen inschatten en ter ondersteuning van het simuleren van de waterbeweging, op zes percelen het bodemvochtgehalte op drie diepten en de grondwaterstand gedurende ruim een jaar opgevolgd.

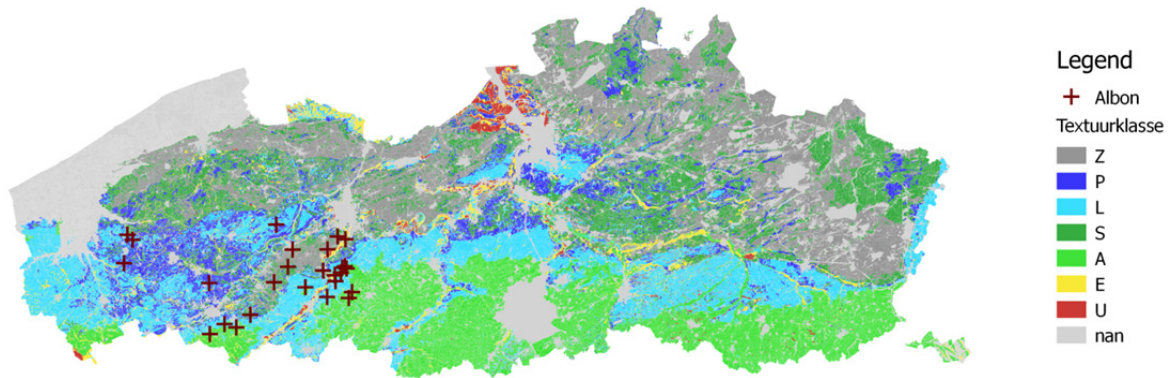
4.1 Finale selectie van de percelen

Op basis van het in hoofdstuk 3 besproken meetplan werd gezocht naar percelen die in aanmerking konden komen voor de metingen en monsternamen. Eerder dan de geografische spreiding gold als criterium spreiding in textuur en gevoeligheid voor bodemverdichting. Met profielopbouw wordt rekening gehouden bij de simulering met rekenmodellen.

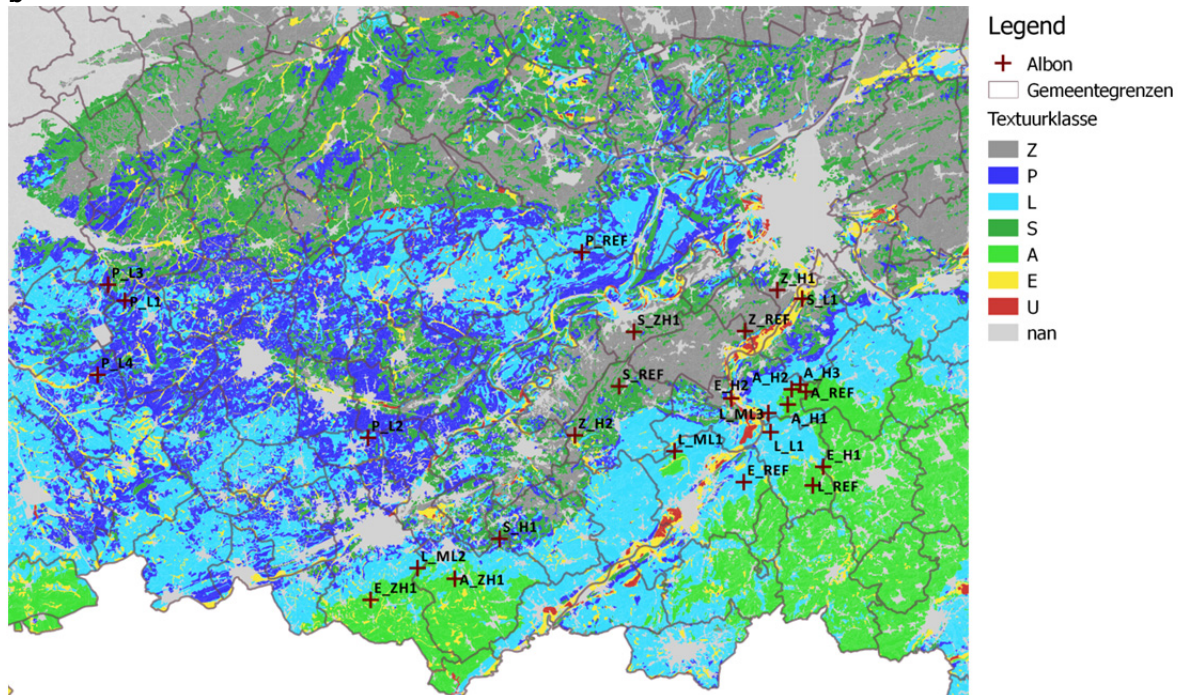
Van de tien weerhouden percelen uit de historische dataset, kwamen er finaal slechts vijf in aanmerking. De andere zijn ondertussen verkaveld of er werd geen medewerking verleend door de gebruiker of eigenaar. Dit aantal is te beperkt om sluitende conclusies te trekken omtrent de evolutie van bodemverdichting. De historische data op deze percelen werden dan ook niet verder meegenomen in de studie.

Uiteindelijk werden van de oorspronkelijk 30 voorziene percelen, 26 percelen effectief bemonsterd. De percelen bevinden zich hoofdzakelijk in de provincie Oost-Vlaanderen en het oosten van de provincie West-Vlaanderen, zoals weergegeven in Figuur 4.1.

a



b



Figuur 4.1 Bodemtextuurkaart van Vlaanderen met aanduiding van bemonsteringslocaties (+) (a) en detailkaart met indicatie van de codes per perceel (b). De letters A, E, L, P, S, U en Z verwijzen naar de hoofdtextuurklasse van de Belgische textuurdriehoek. Op de locaties met code *_REF werd ook het bodemvochtgehalte op drie diepten en de grondwaterstand opgevolgd.

4.2 Indringingsweerstand

Om zo veel mogelijk niet-representatieve percelen bij de monsternamen uit te sluiten, i.e. percelen waar geen noemenswaardige bodemverdichting optreedt, werd de indringingsweerstand in situ opgemeten. Als drempelwaarde voor de indringingsweerstand werd de internationaal erkende waarde van 2 MPa genomen (Van den Akker, 2006).

De metingen gaven de indringingsweerstand met de diepte en lieten dus een meer gerichte monsternamen met de diepte toe, waarbij voor zowel kopakker als middendeel monsters werden genomen in de bouwvoor, het meest verdichte deel van de verdichte ondergrond en de ondergrond (zie ook Figuur 3.1). Om de variatie van de indringingsweerstand binnen een perceel in te schatten, werden de metingen uitgevoerd op zestig punten langs een transect van kopakker tot kopakker. Indien een verband kan worden gevonden tussen de (relatief gemakkelijk te bepalen) indringingsweerstand en de (arbeidsintensieve en tijdrovende) bulkdichtheid, kan de uitgebreide dataset met waarden van de indringingsweerstand in de toekomst worden aangewend om simulaties

van de waterbeweging uit te voeren die rekening houden met de variatie aan bodemverdichting binnen een perceel. Dit valt echter buiten het bestek van deze opdracht.

De metingen werden volgens de langste as van het perceel uitgevoerd op 15 meetplaatsen met vaste afstand. Per meetplaats werden de metingen in vier herhalingen dwars op het transect met tussenafstand van 0,5 m (dus over een breedte van 1,5 m) uitgevoerd (dus 60 meetpunten in totaal). Er werd naar gestreefd om zowel in als tussen de rijen te meten. Er werd gebruikgemaakt van een penetrologger, i.e. een elektronische penetrometer met ingebouwde datalogger (06.15.SA, Eijkelkamp Agrisearch Equipment, Nederland) die toeliet tot op 80 cm diepte te meten. De conus had een tophoek van 60° en een basisoppervlak van 1 cm², waardoor de metingen kunnen worden vergeleken met de gehanteerde kritische waarden die enkel gelden voor deze dimensies en vorm van de conus.

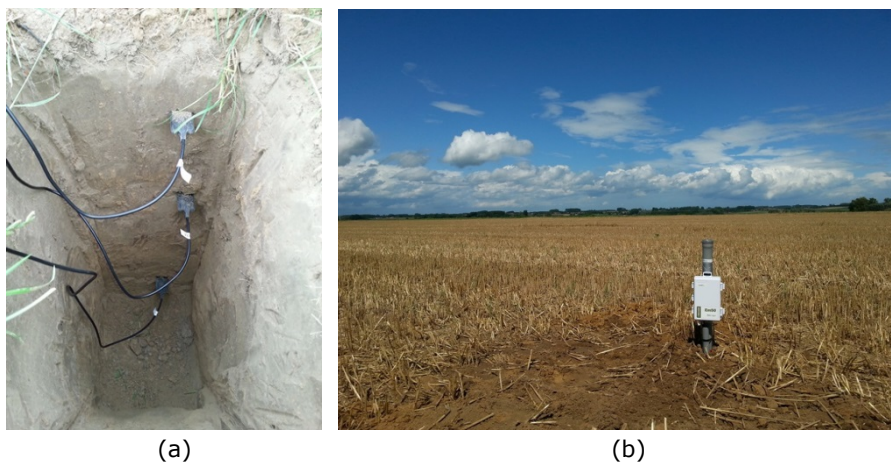
Per perceel werden met een gutsboor drie monsters genomen over een diepte van 70 cm ter bepaling van het gravimetrisch vochtgehalte. Dit gebeurde op meetplaats 3, 8 en 13 (overeenkomend met meetpunt x = 10, 30 en 50).

4.3 Continu monitoren van het bodemvochtgehalte en de grondwaterstand op zes percelen

Op de middendelen van zes percelen werden de bodemvochtgehalten op drie diepten en de grondwaterstand uurlijks opgevolgd. Het bodemvochtgehalte werd gemeten met EC-5 capacitantiesensoren verbonden met EC50-loggers (Decagon, USA). Ze werden via een profielput horizontaal geplaatst (Figuur 4.2).

De grondwaterstand werd opgevolgd met DIVER-sensoren (Eijkelkamp Agrisearch Equipment, Nederland) die werden opgehangen op 2 m diepte in 2,1 m-diepe peilbuizen met 0,3-m lange filter. Na correctie voor luchtdruk gemeten met een baro-DIVER, werd de druk van de waterkolom boven de DIVER bepaald, waaruit de grondwaterstand kon worden afgeleid.

De metingen zijn gestart in augustus 2014 en lopen minimaal door tot najaar 2015. Op één perceel moest de meting worden gestopt, op de overige vijf percelen wordt geprobeerd de meetreeks langer te laten voortduren.



Figuur 4.2 Plaatsing Decagon 10HS-capacitantiesensoren (perceel P) (a) en EC50-loggers (perceel L) (b).

4.4 Monstername

Per perceel werden op twee meetplaatsen ongestoorde ringmonsters genomen (met volume van 250 cm^3 , 5 cm hoogte en 8 cm doormeter), i.e. ter hoogte van de kopakker en het midden van het perceel. Hoewel een kopakker niet representatief is voor een volledig veld, laat het opnemen van kopakkers in de dataset wel toe om het effect van bodemverdichting op de bodemkwaliteit beter in te schatten, gezien verwacht mag worden dat de bodemverdichting er meer uitgesproken is. Bovendien kan de op de kopakker gemeten bodemkwaliteit een indicatie zijn voor de toekomstige bodemgesteldheid van het perceel indien bodemverdichting zich zou blijven voortzetten t.g.v. intensievere berijding.

Per meetplaats werden de ringen in zesvoud op drie diepten gestoken, met name in de bouwvoor, de verdichte ondergrond en de diepere ondergrond (zie hoofdstuk 3). Per perceel werden dus $2 \times 3 \times 6 = 36$ ringmonsters genomen. De ringen werden verticaal genomen via trapsgewijze profielputten m.b.v. een slagkop om zo verstoring tijdens monstername zo veel mogelijk te beperken. Het voordeel van deze werkwijze t.o.v. het gebruik van steekboren is een beter inschatten van de diepte en dikte van de verdichte lagen, en een rechtlijnige bemonstering. Er werd van iedere profielput een foto genomen.

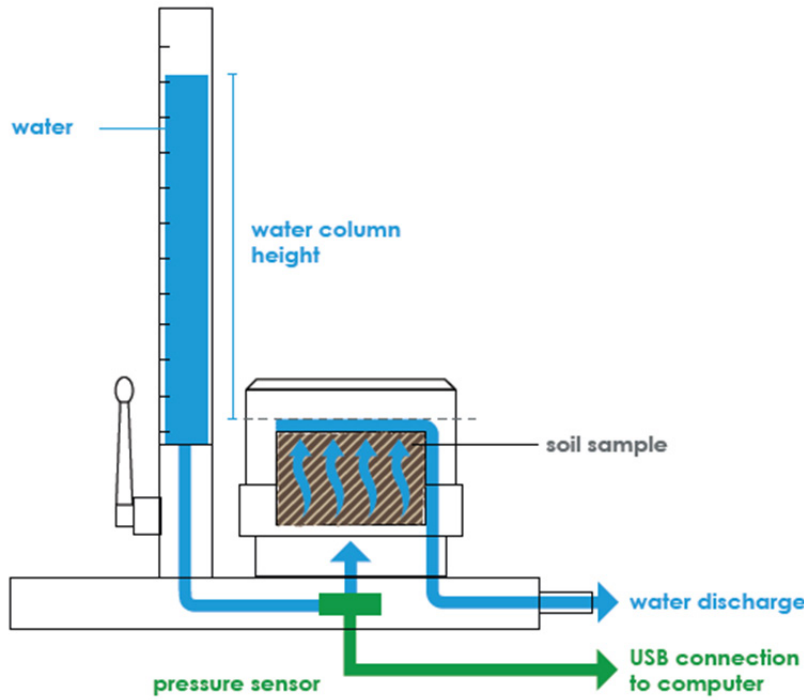
4.5 Bepaling van de fysische en hydraulische eigenschappen

4.5.1 Verzadigde doorlatendheid

Op elk ringmonster (dus in zes herhalingen) werd de (verticale) verzadigde doorlatendheid K_s (hydraulische geleidbaarheid) bepaald via de vallende waterhoogtemethode m.b.v. de KSAT-permeameter (UMS, Duitsland; Figuur 4.3). De bodemmonsters werden voorafgaand aan de meting geleidelijk verzadigd in een waterbak met ontlucht kraantjeswater. Via een waterkolom en een buis werd eveneens ontlucht kraantjeswater opwaarts doorheen de bodemmonsters gestuurd. Het zakken van het waterniveau in de waterkolom werd dan in heel korte intervallen gemeten m.b.v. van een druksensor verbonden met een pc (Figuur 4.4). Het gebruik van kraantjeswater wordt standaard aangeraden (zie ook DIN 19693-9, 1998, DIN 18130-1, 1998) gezien het een zekere, maar lage concentratie aan zouten bevat en zo het mogelijke effect van ontzouten op bodemstructuur (dispersie van kleideeltjes) wordt vermeden. Traditioneel wordt de vallende waterhoogtemethode enkel gebruikt voor monsters met lage doorlatendheid en worden dan hoge hydrostatische drukken aangewend (lange drukkolom). Omdat in de KSAT-opstelling gewerkt wordt met een uiterst nauwkeurige druksensor (nauwkeurigheid van 0,01 hPa), kan de methode voor elk monster en op een geautomatiseerde wijze worden gebruikt.



Figuur 4.3 Opstelling ter bepaling van de verzadigde doorlatendheid met het KSAT-toestel (©UGent).



Figuur 4.4 Schematische voorstelling van het KSAT-toestel (bron: KSAT manual, UMS GmbH Munich, Duitsland, 2013).

Het meten van de daling van de waterhoogte in de waterkolom laat toe om de waterflux J_w te meten:

$$J_w = \frac{Q}{A_{monster}} = \frac{A_{waterkolom}}{A_{monster}} \frac{\Delta H}{\Delta t} \quad (4.1)$$

met Q het debiet doorheen het bodemmonster, $A_{waterkolom}$ en $A_{monster}$ het oppervlak van respectievelijk de waterkolom en het monster, H de waterhoogte in de waterkolom en t de tijd vanaf de start van de meting.

Volgens de wet van Darcy wordt anderzijds de waterflux J_w geschreven als:

$$J_w = -K_s \frac{H}{L} \quad (4.2)$$

met K_s de verzadigde doorlatendheid en L de lengte van het ringmonster.

Gelijkstelling van vergelijking (4.1) en (4.2) levert na integratie volgende vergelijking op:

$$\ln H(t) - \ln H_0 = -K_s \frac{A_{monster}}{A_{waterkolom}} \frac{1}{L} t \quad (4.3)$$

Er volgt dan dat:

$$H(t) = H_0 \exp\left(-K_s \frac{A_{monster}}{A_{waterkolom}} \frac{1}{L} t\right) \quad (4.4)$$

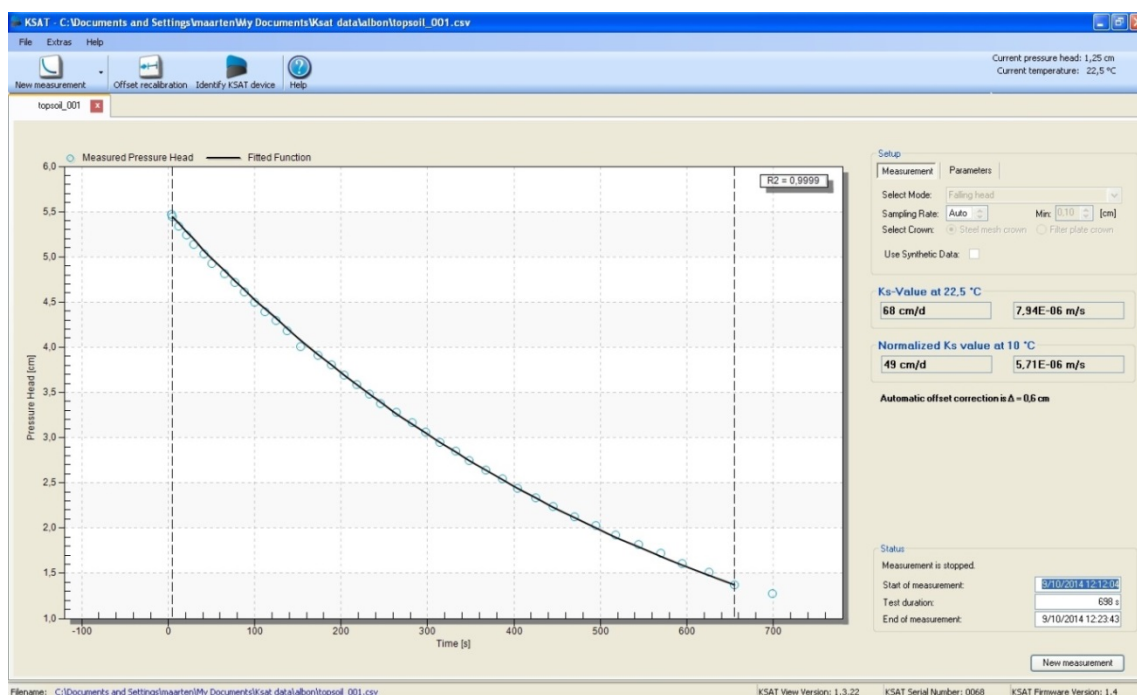
of eenvoudigweg:

$$H(t) = a \exp(-bt) \quad (4.5)$$

Wordt nu een exponentiële functie gefit aan de waargenomen tijdsreeks, dan wordt hieruit de coëfficiënt b bekomen, en K_s wordt dan berekend als:

$$K_s = \frac{A_{waterkolom}}{A_{monster}} L b \quad (4.6)$$

Een temperatuursensor (nauwkeurigheid van 0,2 °C) mat de actuele temperatuur van het water en de berekende K_s werd omgezet naar een waarde bij 20 °C (waardoor de gewijzigde viscositeit van het water in rekening werd gebracht). Een voorbeeld van een meting met fitting van de exponentiële curve m.b.v. het softwarepakket KSAT VIEW wordt gegeven in Figuur 4.5.

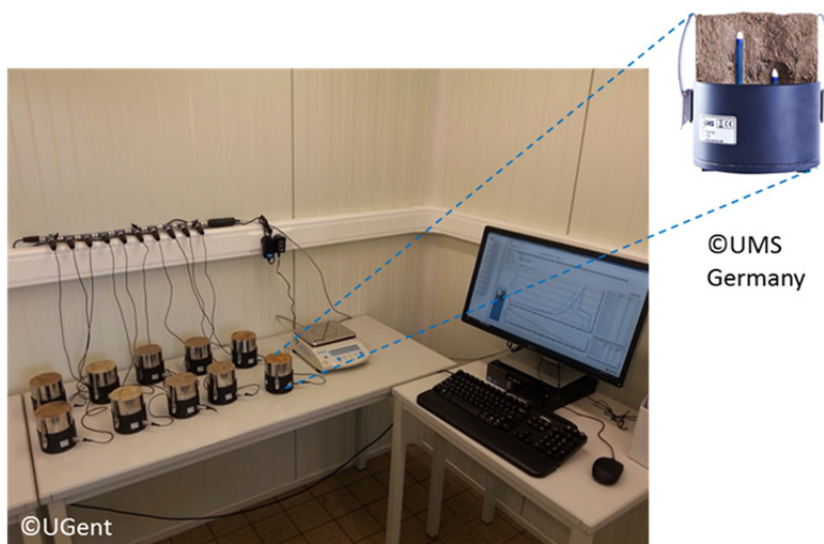


Figuur 4.5 Voorbeeld (screen shot) van een meting met fitting van de exponentiële curve m.b.v. het softwarepakket KSAT VIEW.

4.5.2 Waterretentie- en doorlatendheidscurves

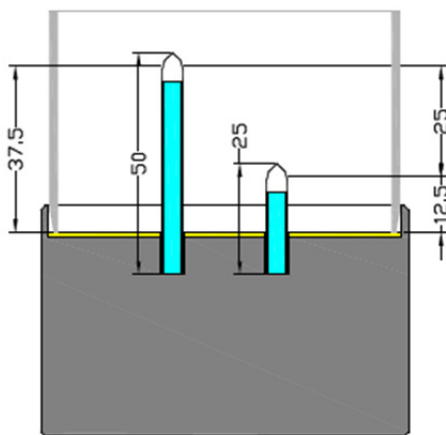
Na bepaling van K_s werden twee van de zes ringmonsters weerhouden ter bepaling van de *waterretentie-* en *doorlatendheidscurve*. Daarvan werd één monster effectief onderworpen aan een meting, terwijl het tweede werd bewaard als reserve of voor een latere meting. Beide curves werden simultaan opgesteld m.b.v. de verdampingsmethode, oorspronkelijk ontwikkeld door Wind (1968), maar later aangepast door verschillende onderzoekers (o.a. Schindler en Müller, 2006; Peters en Durner, 2008a; Schindler *et al.*, 2010). Hiervoor werd het HYPROP®-systeem (UMS GmbH Munich, Duitsland) gebruikt. Aan UGent bestaat deze uit tien meeteenheden en één balans (Figuur 4.6).

In het kader van deze studie werd specifiek geopteerd voor de verdampingsmethode in plaats van de klassieke methode met zandbak en drukkettels (waarover UGent trouwens ook beschikt), omdat ze toelaat de waterretentie- en doorlatendheidscurve gelijktijdig te meten op hetzelfde monster. Het daadwerkelijk meten van de doorlatendheidscurve i.p.v. ze af te leiden uit de waterretentiecurve in combinatie met de verzadigde hydraulische geleidbaarheid (zoals vaak wordt gedaan), is in deze studie immers wenselijk gezien de doorlatendheidscurve niet enkel door de poriëngrootteverdeling (afgeleid van de waterretentiecurve) en verzadigde hydraulische geleidbaarheid wordt bepaald, maar ook door de poriënconnectiviteit en tortuositeit. Het zijn net deze parameters die door bodemverdichting kunnen worden beïnvloed.



Figuur 4.6 Opstelling ter bepaling van de waterretentie- en doorlatendheidscurve met het HYPROP-toestel (©UGent).

In een recente vergelijking tussen verschillende meetmethodes ter bepaling van de waterretentiecurve vonden Schelle *et al.* (2013) geen noemenswaardige verschillen in retentiedata tussen de verdampingsmethode en de zandbakmethode (in het eerder 'natte' tot 'intermediair' traject van de waterretentiecurve). In het eerder 'droge' traject nabij verwelkingspunt gaf de verdampingsmethode analoge resultaten als de zgn. dauwpuntmethode (met een WP4C PotentiaMeter®), terwijl de drukketels leiden tot een kleine overschatting. Dit laatste is een gekend fenomeen en vindt o.a. zijn oorzaak in het niet volledig bereiken van een hydraulisch evenwicht bij een druk van 15000 hPa (Gee *et al.*, 2002), een verlies aan contact vooral bij kleiige bodems (Bittelli & Flury, 2009) en dispersie van colloïden, waardoor de poriën van de drukplaat wat kunnen verstopen (Creswell *et al.*, 2008).



Figuur 4.7 Schematische voorstelling van het een HYPROP-eenheid met twee tensiometers (afmetingen zijn in mm) (bron: HYPROP manual, UMS GmbH Munich, Duitsland, 2013).

Per ringmonster werden twee tensiometers verticaal aangebracht op twee verschillende diepten, waarvan het middelpunt tussen de twee tensiometercups overeenkomt met het midden van de ring (Figuur 4.7). Daarna werden de monsters verzadigd, onderaan afgesloten en op een automatische balans geplaatst. Verdamping trad op via het open bovineinde van het monster. Zowel de vochtspanning als de massa van het monster (waaruit het vochtgehalte en de waterflux werd afgeleid, zie verder) werd op een geautomatiseerde manier begroot, respectievelijk met tensiometers met druksensoren en balansen verbonden met een pc. De analyse van de data was gebaseerd op de

veronderstelling dat zowel vochtspanning als vochtgehalte lineair verdeeld is binnen een ringmonster, en dat vochtspanning en gewicht van een monster lineair veranderen tussen twee meettijdstippen.

Op frequente tijdstippen t^i werden de vochtspanningen h_1^i en h_2^i (in hPa) op beide diepten z_1 en z_2 opgemeten, alsook het gewicht W^i van het bodemonster (in g). Het tijdstip van de druk- en gewichtsmetingen valt niet noodzakelijk samen. De meting liep totdat de luchtintreewaarde van een van de tensiometers werd bereikt, die voor de gebruikte tensiometers ~ 8800 hPa bedraagt. Schindler *et al.* (2010) toonden aan dat op die manier het meetbereik van de verdampingsmethode gevoelig kan worden uitgebreid t.o.v. gangbare verdampingsmethodes. Figuur 4.8 illustreert het verloop van de vochtspanning in beide tensiometers en het gewicht van het bodemonster met de tijd. Uit het gewicht werd zowel het vochtgehalte (na bepaling van het ovendroog gewicht bij 105°C na het beëindigen van de meting) als de waterflux berekend. Deze laatste wordt gegeven door:

$$J_w^i = \frac{Q}{A_{\text{monster}}} = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta V^i}{\Delta t^i A_{\text{monster}}} \right) \quad (4.7)$$

met ΔV^i het waterverlies (in cm^3) bepaald door het gewichtsverlies en Δt^i het tijdsinterval tussen twee metingen.

De hydraulische geleidbaarheid werd bepaald uit de Darcy-Buckingham-vergelijking:

$$K^i(\bar{h}^i) = - \frac{J_w^i}{\Delta h^i / \Delta z + 1} \quad (4.8)$$

met $\bar{h}^i = \frac{1}{4}(h_1^{i-1} + h_2^{i-1} + h_1^i + h_2^i)$ de gemiddelde vochtspanning tussen twee metingen en de twee tensiometers, K^i de corresponderende hydraulische geleidbaarheid, $\Delta h^i = \frac{1}{2}[(h_2^{i-1} - h_1^{i-1}) + (h_2^i - h_1^i)]$ het gemiddelde verschil in vochtspanning tussen de twee tensiometers, en $\Delta z = z_2 - z_1$ de afstand tussen de twee tensiometers (in cm).

De gewichtscurves (W vs. t) en vochtspanningscurves (h vs. t) werden geïnterpoleerd m.b.v. hermitiaanse splines (Peters & Durner, 2008b) (Figuur 4.8). Zo worden quasi-continue functies verkregen (Figuur 4.9) waaraan modellen voor de waterretentie- en doorlatendheidscurves werden gefit. De $\theta(h)$ - en $K(h)$ -modellen werden simultaan gefit aan de meetpunten. Dit is essentieel gezien verschillende modelparameters (bv. α en n voor het Mualem-van Genuchten-model; Mualem, 1976; van Genuchten, 1980) de vorm van beide curves bepalen. De volgende doelfunctie werd toegepast (Peters & Durner, 2015):

$$\Phi(b) = w_\theta \sum_{i=1}^r w_{\theta,i} [\bar{\theta}_i - \hat{\theta}_i(b)]^2 + w_K \sum_{i=1}^k w_{K,i} [K_i - \hat{K}_i(b)]^2 \quad (4.9)$$

met k en r het aantal meetpunten van de waterretentie- en doorlatendheidscurve, w_θ en w_K de gewichten die aan beide curves werden gegeven, $w_{\theta,i}$ en $w_{K,i}$ de gewichten die aan de individuele punten werden gegeven, $\bar{\theta}_i$, $\hat{\theta}_i(b)$, K_i en $\hat{K}_i(b)$ zijn de gemeten en voorspelde waarden, en b is de parametervector. De parameters werden geschat met een 'shuffled complex evolution' (SCE)-algoritme (Duan *et al.*, 1992), wat een globale-parameterschattingsalgoritme is, in tegenstelling tot bv. het populaire algoritme van Levenberg-Marquardt (Marquardt, 1963), dat een lokale-parameterschattingsalgoritme is. Bij het laatste algoritme is de kans op lokale minima groter en is het finale resultaat dus in grotere mate afhankelijk van een initiële schatting van de modelparameters.

Om zo veel mogelijk flexibiliteit in de gemeten curves te behouden, werd het recent ontwikkelde Peters-Durner-Iden (PDI) model – eerst gepubliceerd door Peters (2013) en verbeterd door Iden en Durner (2014) en Peters (2014) – gebruikt. Voor de waterretentiecurve wordt een bimodaal model gebruikt op basis van de van Genuchten-vergelijking:

$$\theta(h) = (\theta_s - \theta_r) S^{cap} + \theta_r S^{ad} \quad (4.10)$$

$$S^{cap}(h) = w_1 \left[\frac{1}{1 + (\alpha_1 h)^{n_1}} \right]^{1 - \frac{1}{n_1}} + (1 - w_1) \left[\frac{1}{1 + (\alpha_2 h)^{n_2}} \right]^{1 - \frac{1}{n_2}} \quad (4.11)$$

$$S^{ad}(x) = 1 + \frac{1}{x_a - x_0} \left\{ x - x_a + b \ln \left[1 + \exp \left(\frac{x_a - x}{b} \right) \right] \right\} \quad (4.12)$$

$$b = 0.1 + \frac{0.2}{n_1^2} \left\{ 1 - \exp \left(- \left(\frac{\theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^2 \right) \right\} \quad (4.13)$$

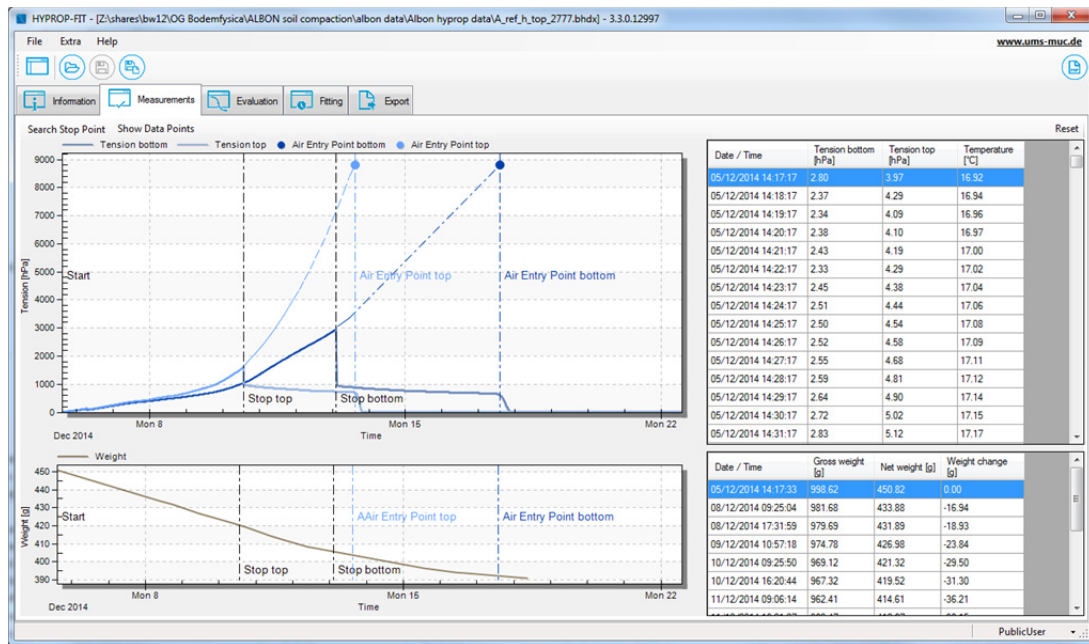
Hierin is θ_s het verzadigde vochtgehalte en θ_r het residueel vochtgehalte. S^{cap} is de capillaire verzadiging van de bodem en S^{ad} de adsorptieve verzadiging. Dit model is bimodaal, met een gewicht w_1 dat wordt toegekend aan een van beide modaliteiten. Verder gebruikt dit model de gebruikelijke vormparameters n_1 , n_2 , α_1 en α_2 . x is $\log_{10}(-h)$ (=pF). Dit model heeft een bodemvochtgehalte 0 bij ovendroogtheid (x_0), in dit geval gedefinieerd als pF = 6.8. x_a is de vochtspanning bij luchtintrede.

Het corresponderende conductiviteitsmodel ziet er als volgt uit:

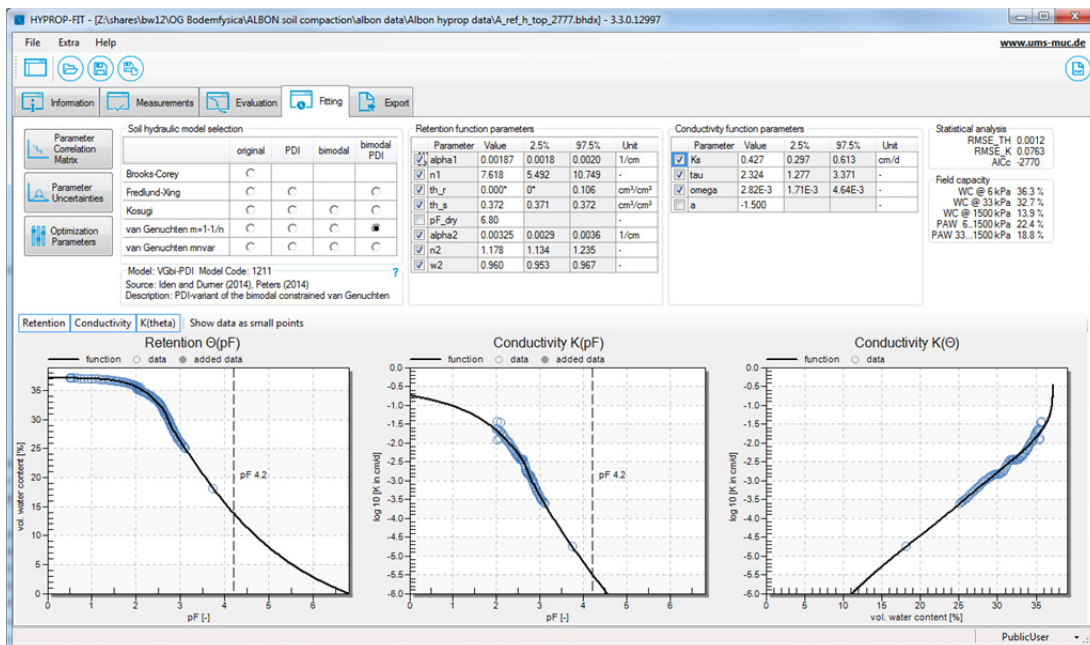
$$K = K_s \left[(1 - \omega) K_{rel}^{cap}(S^{cap}) + \omega K_{rel}^{film}(S^{ad}) \right] \quad (4.14)$$

$$K_{rel}^{cap}(S^{cap}) = (S^{cap})^\tau \left[\frac{\int_0^{S^{cap}} \frac{1}{h} dS^{cap}}{\int_0^1 \frac{1}{h} dS^{cap}} \right]^2 \quad (4.15)$$

$$K_{rel}^{film} = \left(\frac{h_0}{h_a} \right)^{a(1-S^{ad})} \quad (4.16)$$



Figuur 4.8 Voorbeeld (screenshot) van een meting met HYPROP-FIT software. De bovenste curve is de vochtspanningscurve (h vs. t) en de onderste de gewichtcurve (W vs. t).



Figuur 4.9 Voorbeeld (screenshot) van een waterretentiecurve (links) en doorlatendheidscurve ($K(h)$ midden en $K(\theta)$ rechts) (open cirkels) samengesteld op basis van de hermitiaanse splines. De zwarte vette lijnen geven de gefitte curves weer met het PDI-model (vgl. 4.10-4.16).

De relatieve conductiviteit heeft ook hier twee componenten: de capillaire doorlatendheid K_{rel}^{cap} en de filmdoorlatendheid K_{rel}^{film} , waarbij aan elk van beide een gewicht wordt toegekend met parameter ω . Deze wordt geschaald met de verzadigde doorlatendheid K_s . De capillaire doorlatendheid is afhankelijk van capillaire verzadiging S^{cap} , met een extra vormparameter τ . Filmdoorlatendheid K_{rel}^{film} is gerelateerd aan de adsorptieve verzadiging S^{ad} . Ook hier is er een extra parameter a , die vastgelegd werd op 1.5 bij de fitting-procedure.

Op basis hiervan werden θ en K berekend bij verschillende vooropgestelde vochtspanningen. Deze meetpunten werden gebruikt om zgn. punt-pedottransferfuncties op te stellen (zie hoofdstuk 7). In vergelijking met parametrische pedottransferfuncties zouden ze performanter zijn (Vereecken *et al.*, 2010) en bovendien beperken ze zich niet tot een a priori gekozen waterretentie- en doorlatendheidsfunctie (zoals Mualem-van Genuchten).

4.5.3 Bulkdichtheid en poriënvolume

De bulkdichtheid werd bepaald op dezelfde ongestoorde ringmonsters die werden aangewend ter bepaling van de verzadigde doorlatendheid, gebruikmakend van de methode van Grossman en Reinsch (2002). Bulkdichtheid werd berekend als de ovendroge massa (105 °C) van een staal over haar bulkvolume.

Uit de bulkdichtheid BD (in $Mg\ m^{-3}$) werd het poriënvolume ϕ (porositeit) (in $m^3\ m^{-3}$) afgeleid:

$$\phi = 1 - \frac{BD}{DD} \quad (4.17)$$

met DD de deeltjesdichtheid (in $Mg\ m^{-3}$). Deze werd berekend op basis van de deeltjesdichtheid van kwarts (2,65 $Mg\ m^{-3}$), rekening houdend met het gehalte aan organisch materiaal OM (in $kg\ kg^{-1}$) (waarvoor een dichtheid van 1,4 $Mg\ m^{-3}$ werd aangenomen) volgens (Jury en Horton, 2004):

$$DD = 2,65(1 - OM) + 1,4OM \quad (4.18)$$

4.5.4 Textuur en koolstofgehalte

Op elke meetlocatie en diepte werd een gestoord bodemstaal genomen ter bepaling van de bodemtextuur en koolstofgehalte. Bodemtextuur (gehalte aan klei, leem, zand in kg kg⁻¹) werd bepaald m.b.v. van de zeef-pipet-methode (De Leenheer, 1959), na vernietiging van kalk en organisch materiaal. Het koolstofgehalte werd gemeten volgens de methode van Walkley en Black (1934).

4.6 Indicatoren voor fysieke bodemkwaliteit en drempelwaarden gerelateerd aan bodemverdichting

In het kader van deze studie werd een aantal aan bodemverdichting gerelateerde fysieke bodemkwaliteitsindicatoren geselecteerd. Ervaring leert dat het niet volstaat één enkele indicator te bepalen om een onderbouwde uitspraak te doen over de toestand van bodemverdichting, maar dat een combinatie van indicatoren noodzakelijk is. Dergelijke indicatoren moeten toelaten om de risico's van bodemverdichting op zowel opbrengstderving als milieuschade in te schatten. Ze dienen zich te richten op landbouwproductiviteit, biodiversiteit, bodemerosie, afstroming en uitloging van nutriënten en agrochemicaliën, droogte en overstromingsgevaar. Ze zijn dan ook een maat voor mechanische weerstand t.a.v. beworteling enerzijds en de lucht- en waterhuishouding anderzijds. Dit is o.i. de eerste studie die op dergelijke schaal de verdichtingstoestand in Vlaanderen bestudeert.

4.6.1 Indringingsweerstand

De indringingsweerstand (mechanische weerstand, penetratieweerstand) is de meest gebruikte grootheid om bodemsterkte in te schatten en kan worden gelinkt aan de weerstand die wortels moeten overwinnen om doorheen de bodem te groeien (Lipiec en Hatano, 2003). Het is ook een indirecte maat voor bodemstructuur. De indringingsweerstand is wel afhankelijk van het bodemvochtgehalte en dient best te worden bepaald nabij zogenaamde veldcapaciteit. Een te hoge indringingsweerstand resulteert in oppervlakkige wortelgroei, waardoor de opname van water en voedingsstoffen belemmerd wordt. Als grenswaarde voor de indringingsweerstand I_w worden in de literatuur verschillende waarden vermeld (startend vanaf 2 MPa, Huber *et al.*, 2008), waarbij **$I_w \leq 3$ MPa** de meest gehanteerde is (Håkansson en Lipiec, 2000). Ten Cate *et al.* (1995) vermelden als kritische grens voor beworteling een indringingsweerstand van 2,5 tot 3,0 MPa en voor zandgronden zelfs 3 tot 5 MPa indien er een stelsel van voldoende grote poriën aanwezig is. Bovendien is de kritische grens gewasafhankelijk. In deze studie werd verder als compromis een grenswaarde van 3 MPa gehanteerd, wat iets strenger is dan de waarde van 2 MPa toegepast bij de selectie van de percelen.

4.6.2 Bulkdichtheid

De bulkdichtheid (schijnbare dichtheid, schijnbaar soortelijk gewicht, droog volumegewicht) is een directe maat voor bodemverdichting. Het is de droge massa (bij 105 °C) per bulkvolume. In het Envasso-project rond bodemkwaliteitsindicatoren (Huber *et al.*, 2008) werden voor bodemverdichting de volgende grenswaarden voor bulkdichtheid voorgesteld:

$$\begin{array}{ll} BD \leq 1,75 - 0,009 \text{ klei } Mg \text{ m}^{-3} & \text{voor klei} > 17,5\%, \\ BD \leq 1,60 \text{ Mg m}^{-3} & \text{voor klei} \leq 17,5\%. \end{array}$$

Een bulkdichtheid van 1,6 Mg m⁻³ komt overeen met een poriënvolume van 0,40 m³ m⁻³. Kleibodems hebben van nature hogere poriënvolumes en dus lagere bulkdichtheden, vandaar de correctie.

4.6.3 Luchtcapaciteit

De luchtcapaciteit is het luchtgevulde-poriëngehalte bij een bepaalde vochttoestand. Het is het poriënvolume min het volumetrisch vochtgehalte bij een bepaalde bodemvochtspanning. Hiervoor wordt doorgaans uitgegaan van nattere omstandigheden, zoals in het voorjaar of najaar, typisch overeenkomend met vochtspanningen tussen -50 en -100 hPa (resp. pF 1,7 en 2,0). In theorie is het poriënvolume gelijk aan het volumetrisch vochtgehalte bij verzadiging. Deze laatste wordt dan ook vaak gebruikt i.p.v. het poriënvolume bij de bepaling van de luchtcapaciteit. Gelet op de mogelijkheid van luchtinsluiting bij het verzadigen van een bodemonmonster werd in deze studie gebruikgemaakt van het poriënvolume (zie ook Huber *et al.*, 2008). Als grenswaarde voor luchtcapaciteit LC wordt algemeen **LC $\geq 0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$** aangenomen (Reynolds *et al.*, 2009; Huber *et al.*, 2008). Lagere waarden kunnen leiden tot een zuurstoftekort waardoor het gewas beschadiging oploopt en opbrengsten dalen (Reynolds *et al.*, 2009). In o.a. het Envasso-project rond bodemkwaliteitsindicatoren (Huber *et al.*, 2008) werd een vochtspanning van -50 hPa vooropgesteld voor de berekening van de grenswaarde. Deze waarde werd ook in deze studie aangewend.

4.6.4 Verzadigde doorlatendheid

De verzadigde doorlatendheid (verzadigde hydraulische geleidbaarheid/conductiviteit, permeabiliteit) is enerzijds een maat voor het gemak waarmee water de bodem binnendringt, zich in de bodem verplaatst en eruit draineert (Reynolds *et al.*, 2008). Anderzijds is het een indirecte indicator voor de bodemstructuur (Pulido Moncada *et al.*, 2014), gezien haar waarde in sterke mate wordt bepaald door het volume macroporiën, de connectiviteit tussen de poriën en de tortuositeit (mate van kronkeling) van de water- (en lucht)wegen. Bodemverdichting in de boven- en ondergrond reduceert het volume macroporiën en de verbondenheid tussen de poriën, en verhoogt de tortuositeit. Dit kan resulteren in een verlaging van de infiltratiecapaciteit, die wordt bepaald door de doorlatendheid van de bovengrond, maar ook door deze van de onderliggende lagen in de ondergrond (Hillel, 1998). Hierdoor zal bij hevige neerslag meer water stagneren of oppervlakkig afstromen, waardoor de kans op bodemerosie en overstromingen toeneemt. Een lagere infiltratiecapaciteit doet daarenboven ook de kans op verdroging toenemen. Anderzijds wordt de doorstroom- en drainagecapaciteit van de bodem beperkt waardoor ze (typisch in het voor- en najaar) langer nat blijven.

O.a. Lebert *et al.* (2003) en Reynolds *et al.* (2008) stelden voor de verzadigde doorlatendheid K_s een grenswaarde voor van **$K_s \geq 10 \text{ cm d}^{-1}$** , waaronder gewassen schade kunnen oplopen t.g.v. gebrekkige verluchting en zuurstoftekort, de berijdbaarheid van de bodem beperkt is en oppervlakkige afstroming en bodemerosie verhoogd optreden. Ook het Envasso-project stelde deze waarde voorop (Huber *et al.*, 2008). Gezien K_s standaard wordt uitgedrukt bij 20 °C, werden in deze studie de met KSAT bepaalde K_s genormeerd naar 20 °C.

4.6.5 Macroporiënvolume

Naast bovenstaande bodemkwaliteitsindicatoren die in het Envasso-project werden vooropgesteld als minimaal te bepalen voor het inschatten van het effect van bodemverdichting op bodemkwaliteit, wordt vaak ook nog het macroporiënvolume vermeld (Reynolds *et al.*, 2009).

Het macroporiënvolume geeft het volume aan grote (macro)poriën t.o.v. het bulkvolume van de bodem weer en wordt gedefinieerd als het poriënvolume min het volumetrisch vochtgehalte bij een bepaalde bodemvochtspanning. Als vochtspanning wordt tegenwoordig vooral een waarde van -10 hPa genomen (Jarvis, 2007; Reynolds *et al.*, 2008), wat via de capillariteitsvergelijking overeenkomt met een equivalente poriëndiameter van 0,3 mm. Net zoals bij luchtcapaciteit werd in deze studie het poriënvolume gebruikt en niet het volumetrisch vochtgehalte bij verzadiging. Reynolds *et al.* (2009) stelden een grenswaarde **macPOR $\geq 0,04 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$** voor als criterium waarbij snelle drainage van overtollig water en wortelgroei worden belemmerd.

5 Resultaten van bepaling fysische en hydraulische bodemkenmerken

5.1 Fysische en hydraulische bodemkenmerken van representatieve percelen in Vlaanderen

De gehalten aan klei, leem, zand, het organisch-koolstofgehalte, de bulkdichtheid, de verzadigde doorlatendheid, de luchtcapaciteit en het macroporiënvolume zijn per perceel in tabelvorm weergegeven in de Annex bij dit rapport. Verder bevat de annex de profielen van de indringingsweerstand en de waterretentie-, luchtgehalte- en doorlatendheidscurves per perceel. Ook zijn telkens waar mogelijk algemene info zoals risicoklasse volgens de studie van Van De Vreken *et al.* (2009), teelt- en bodembewerkingshistoriek en administratieve gegevens opgenomen en worden ter indicatie foto's van de bodemprofielen en de algemene toestand van het veld tijdens monsternamen getoond.

De resultaten worden hier niet per perceel besproken. In paragraaf 5.2 worden de data aangewend om de huidige verdichtingstoestand en de eraan gekoppelde bodemkwaliteit in Vlaanderen steekproefsgewijs in te schatten. Een overzicht van de resultaten per perceel wordt in paragraaf 5.3 gegeven, terwijl in paragraaf 5.4 wordt nagegaan in welke mate bodemverdichting een effect kan hebben op hydraulische bodemkenmerken. In paragraaf 5.5 wordt de dataset verder geanalyseerd via een Principale Componenten Analyse en een Lineaire Discriminanten Analyse.

5.2 Steekproef naar bodemverdichting in Vlaanderen op basis van bodemkwaliteitsindicatoren

De resultaten worden getoond als spreidingsdiagrammen waarbij voor de drie bemeeten diepten de indicatoren voor fysische bodemkwaliteit van het middendeel worden uitgezet t.o.v. deze van de kopakker. In de spreidingsdiagrammen worden de waarden opgedeeld volgens hoofdtextuurklasse van de diepte waarvoor de waarden gelden. Dergelijke weergave laat toe het effect van bodemverdichting binnen een eenheid met relatief gelijke inherente bodemkenmerken (textuur) beter in te schatten.

De getoonde waarden voor de verzadigde doorlatendheid zijn geometrische gemiddeldes van doorgaans zes herhalingen. Omdat de verzadigde doorlatendheid typisch een lognormale verdeling vertoont, is het gebruikelijk het geometrisch gemiddelde te hanteren (Reynolds *et al.*, 2000; Verbist *et al.*, 2013). In een beperkt aantal gevallen was het aantal herhalingen kleiner (zie tabellen in annex) o.w.v. uitbijters, die veel te hoge waarden gaven buiten de detectielimiet van de meetapparatuur. Dit kon te wijten zijn aan preferentiële stroming in grote macroporiën. Bovendien is in zeer grote poriën het Reynoldsgetal groter dan 1 en is de wet van Darcy niet meer geldig (Jarvis, 2007).

De weergegeven indringingsweerstand zijn de gemiddeldes van vier metingen ter hoogte van de kopakker en van 4 x 13 metingen voor het middendeel (t.t.z. de rest van het perceel). Hierbij werden per perceel de met de diepte continu gemeten meetwaarden geaggregeerd tot drie lagen, met name de bovengrond, verdichte ondergrond en ondergrond. De dikte van elke laag werd numeriek berekend op basis van de sterkste toename (grens tussen bovengrond/laag 1 en verdichte ondergrond/laag 2) en sterkste afname (grens tussen verdichte ondergrond/laag 2 en ondergrond/laag 3) van de continu gemeten indringingsweerstand. Als indringingsweerstand van de bovengrond (laag 1) en ondergrond (laag 3) werd dan het gemiddelde over de volledige dikte beschouwd. Wat de verdichte ondergrond (laag 2) betreft, werd de hoogste meetwaarde genomen. Dit wordt verduidelijkt in Figuur 5.1. Hetzelfde algoritme werd later toegepast in de simulaties van de waterstroming om de dikte van iedere laag te helpen definiëren. Ook tijdens de monsternamen werd deze regel zo veel mogelijk gevolgd. De metingen van het vochtgehalte toonden verder aan dat het verschil in vochttoestand

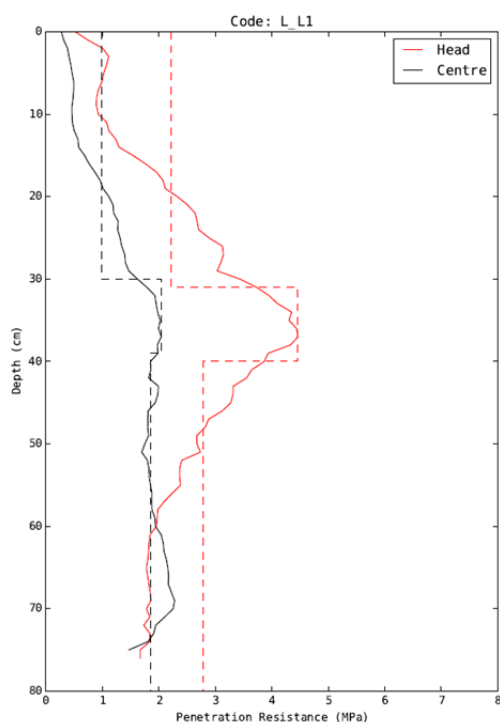
tussen kopakker en middendeel globaal gezien miniem was, wat toelaat de indringingsweerstand op beide meetlocaties onderling te vergelijken.

De bulkdichtheidwaarden zijn voor 43% van de dataset gemiddeldes van vijf of meer herhalingen. Voor de rest van de dataset zijn de waarden grotendeels afkomstig van een enkele meting.

De waarden van de andere indicatoren alsook de textuurwaarden zijn afkomstig van metingen in enkelvoud uitgevoerd. Dit laat niet toe om na te gaan of er binnen een perceel al dan niet significante verschillen zijn tussen kopakker en middendeel. In deze studie werd bewust voor deze benadering gekozen, waarbij individuele percelen binnen een bepaalde texturele eenheid als 'herhalingen' kunnen worden beschouwd en dit vooral ten behoeve van het simuleren van waterbeweging in bodems met verdichte lagen en het opstellen van nieuwe pedotransferfuncties (zie doelstelling 1 en 2 van het opstellen van de dataset; hoofdstuk 4).

Zoals eerder aangegeven, kan de bodemkwaliteit ter hoogte van de kopakker een indicatie zijn voor de potentiële achteruitgang van de bodemkwaliteit over gans het perceel bij verdere bodemverdichting door intensievere berijding in de toekomst. Op dit ogenblik zijn de kopakkers immers al onderhevig aan intensievere berijding in vergelijking met de rest van het perceel. Zeker bij bodems met een relatief laag kleigehalte waar natuurlijke structuurherstellende mechanismen als zwel-krimp of vries-dooi afwezig zijn, is het gevaar voor een cumulatief effect het grootst (Van den Akker en De Groot, 2008). Van den Akker en De Groot (2008) verwijzen verder naar een studie van Schwark en Isensee (2004) waaruit bleek dat het poriënvolume en de bulkdichtheid gemeten in de ondergrond van een kopakker op 40 cm diepte in 1986 overeenkwam met deze gemeten in het middendeel in 2003. De kopakker vertoonde in 2003 nog sterkere verdichting.

Merk op dat de texturele eenheden niet noodzakelijk samenvallen met de strata zoals vermeld in hoofdstuk 3. Daar werden strata immers gedefinieerd op basis van de textuurklasse van de ondergrond. Wanneer deze verschilt van die van de bovengrond, dan valt deze niet samen met een stratum.

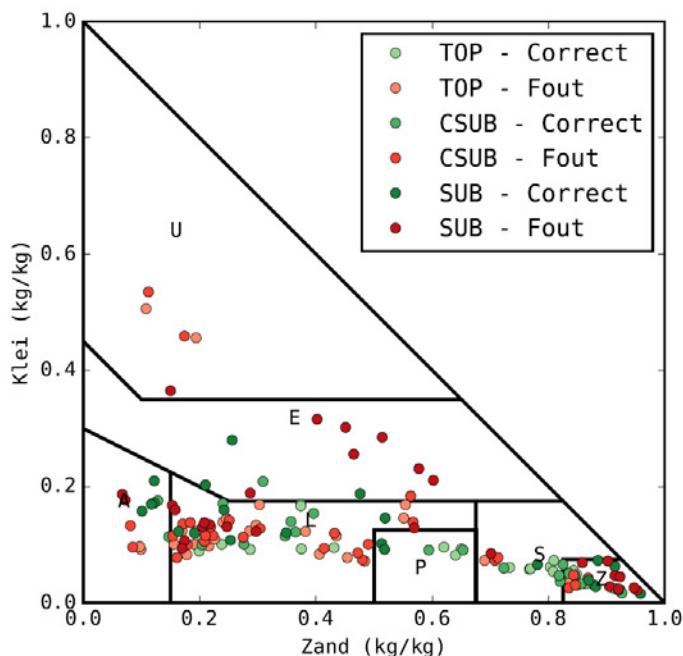


Figuur 5.1 Voorbeeld van de methode gebruikt voor de opdeling van het bodemprofiel in drie lagen op basis van de indringingsweerstand met de diepte. De indringingsweerstandswaarde voor de kopakker is het gemiddelde van vier metingen, die voor het middendeel van 4 x 13 metingen. In dit voorbeeld bevindt de bovengrond (laag 1) van de kopakker zich tussen 0 en 31 cm diepte, de verdichte ondergrond (laag 2) tussen 31 en 40 cm diepte, en de ondergrond start vanaf 40 cm.

5.2.1 Textuur en organisch-koolstofgehalte

In deze studie werd ernaar gestreefd de meetlocaties gelijkmatig over de zes meest voorkomende hoofdtextuurklassen te spreiden, waarbij dan per klasse vijf percelen werden gekozen (zie hoofdstuk 3). Daarbij werd gekeken naar de textuurklasse op 41 cm-mv en werd gebruikgemaakt van de Aardewerk-bodemdatabank en de Belgische bodemkaart (zoals in de bodemverdichtingsstudie van Van De Vreken *et al.*, 2009). Uit Figuur 5.2 blijkt dat de werkelijke textuurklasse in vele gevallen niet overeenkwam met de vooropgestelde. Dit is echter weinig relevant voor deze studie, waar een brede spreiding aan klei-, leem- en zandgehalte veel belangrijker is dan de textuurklasse op zich.

De textuur en het organisch-koolstofgehalte van kopakker en middendeel gemeten in de drie bodemlagen zijn weergegeven in respectievelijk Figuur 5.3 en Figuur 5.4. De figuren geven een beeld van de spreiding in beide bodemeigenschappen en laten toe mogelijke verschillen tussen kopakker en middendeel in te schatten per perceel. Het kleigehalte van de geselecteerde percelen varieerde van 1,6 tot 53,5%, het leemgehalte van 2,3 tot 81,9% en het zandgehalte van 6,7 tot 95,8%. De textuurverschillen tussen kopakker en middendeel waren minimaal in de bovengrond en verdichte ondergrond, maar konden op een aantal percelen, zeker wat klei- en leemgehalte betreft, aanzienlijk verschillen.



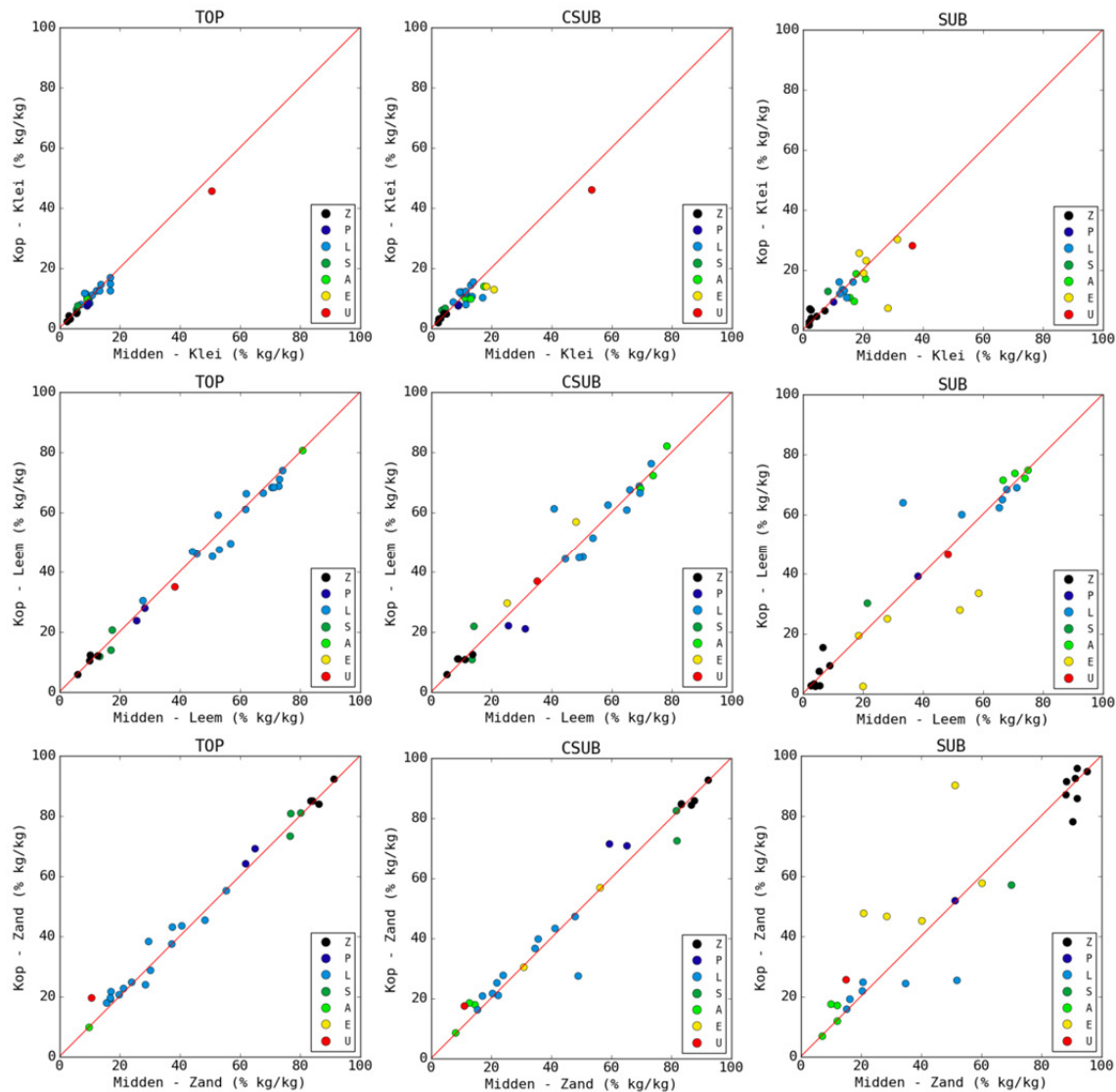
Figuur 5.2 Textuurdriehoek volgens de Belgische bodemclassificatie met de textuur van elk van de 156 meetpunten (26 percelen, twee meetlocaties, drie diepten, i.e., bovengrond TOP, verdichte ondergrond CSUB en diepere ondergrond SUB). Rood wijst op een discrepantie tussen de werkelijke textuurklasse en deze vooropgesteld op basis van de Aardewerk-bodemdatabank en de Belgische bodemkaart.

Het organisch-koolstofgehalte varieerde tussen 0,57 en 2,37% in de bovengrond, tussen 0,22 en 2,17% in de verdichte ondergrond en tussen 0,04 en 2,34% in de diepere ondergrond. Zoals te verwachten was, daalde het koolstofgehalte aanzienlijk met de diepte, zeker naar de diepere ondergrond toe. Verschillen tussen middendeel en kopakker konden relatief gezien vrij groot zijn.

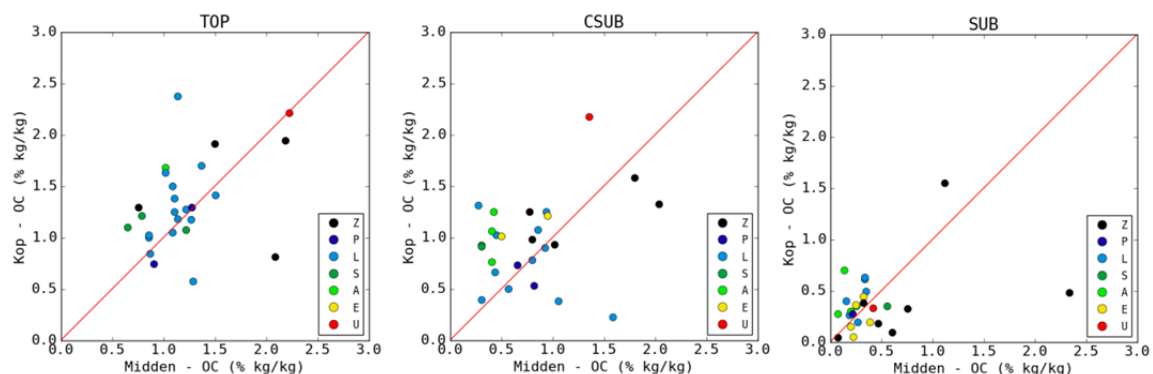
5.2.2 Indringingsweerstand

De indringingsweerstand van kopakker en middendeel gemeten in de drie bodemlagen is weergegeven in Figuur 5.5. Op bijna alle percelen was de indringingsweerstand ter hoogte van de kopakker groter tot veel groter in vergelijking met de rest van het perceel. Dit kan de aanname dat de kopakker

sterker verdicht is dan de rest van het perceel bevestigen. Deze trend was echter het minst uitgesproken in de diepere ondergrond, waar in sommige gevallen het middendeel een grotere weerstand vertoonde dan de kopakker. Let wel dat er tijdens de meting verschillen in vochtgehalte konden zijn tussen kopakker en middendeel, al waren deze globaal gezien beperkt (zie Annex).

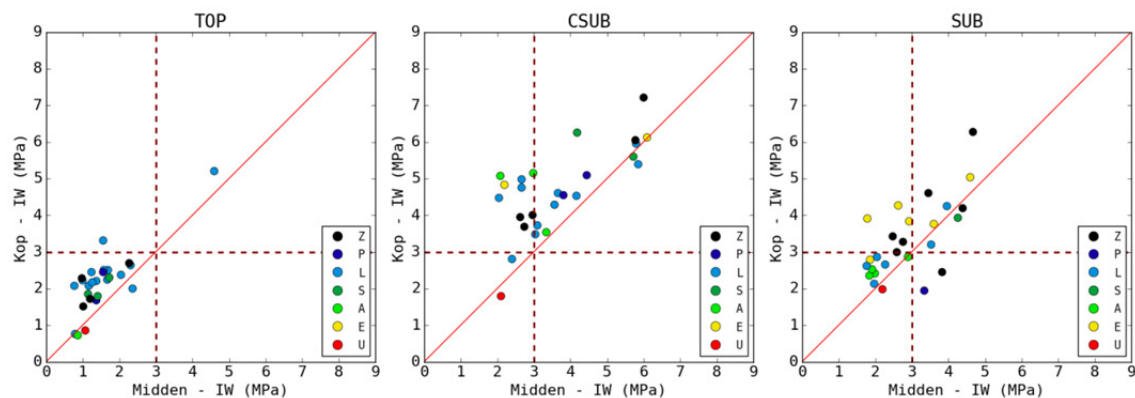


Figuur 5.3 Klei-, leem- en zandgehalte van het middendeel uitgezet t.o.v. deze van de kopakker voor de drie bodemlagen (bovengrond, verdichte ondergrond en ondergrond) met weergave van de hoofdtextuurklasse van de betreffende bodemlaag. De meetwaarden zijn afkomstig van 26 percelen.



Figuur 5.4 Organisch-koolstofgehalte OC van het middendeel uitgezet t.o.v. deze van de kopakker voor de drie bodemlagen (bovengrond, verdichte ondergrond en ondergrond) met weergave van de hoofdtextuurklasse van de betreffende bodemlaag. De meetwaarden zijn afkomstig van 26 percelen.

De indringingsweerstand van de bovengrond was doorgaans vrij beperkt en niet tot weinig belemmerend voor wortelgroei. In de verdichte ondergrond daarentegen werd – met uitzondering van één perceel met zware klei (U) en één perceel met zandleem (L) in de verdichte ondergrond – de grenswaarde van 3 MPa ter hoogte van de kopakker op alle percelen overschreden. In het middendeel (of eigenlijk de rest van het perceel) was de gemiddelde indringingsweerstand van de verdichte ondergrond op ongeveer 1/3 van de percelen lager dan de drempelwaarde. Uit de Annex blijkt echter wel dat de indringingsweerstand onderhevig was aan zeer grote ruimtelijke variabiliteit en dat in de verdichte ondergrond van bijna alle percelen de grenswaarde lokaal toch overschreden werd. Globaal gezien lijken de leembodems (A) en de zware klei (U) de minste indringingsweerstand te vertonen. Dit valt ten dele ook te verklaren door het inherent hoger vochtgehalte van deze bodems tijdens de metingen, die voor alle percelen plaatsvonden op het ogenblik dat de vochttoestand van de bodems nabij veldcapaciteit lag. De waterretentiecurves tonen immers aan dat de A- en U-bodems nabij veldcapaciteit de hoogste vochtgehalten vertonen.



Figuur 5.5 Indringingsweerstand IW van het middendeel uitgezet t.o.v. deze van de kopakker voor elk van de drie bodemlagen (bovengrond TOP, verdichte ondergrond CSUB en ondergrond SUB) met weergave van de hoofdtextuurklasse van de betreffende bodemlaag. De stippellijn geeft de grenswaarde van 3 MPa weer. De meetwaarden zijn afkomstig van 26 percelen.

In een studie van Van den Akker en De Groot (2008) op acht percelen in Nederland werden gelijkaardige waarden aangetroffen, met globaal hogere waarden op de kopakkers en waarden die globaal hoger zijn dan 3 MPa. Eén perceel met gemiddeld 13% klei (lutum) en 30% leem (silt) vertoonde in die studie een indringingsweerstand lager dan 3 MPa, terwijl twee percelen waarden vertoonden hoger dan 5 MPa, en drie percelen waarden nabij 3 MPa.

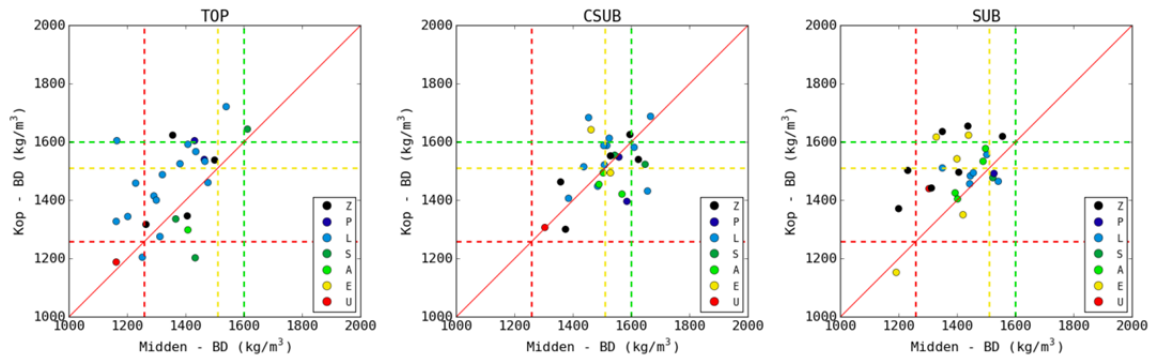
5.2.3 Bulkdichtheid

De bulkdichtheid van kopakker en middendeel gemeten in de drie bodemlagen is weergegeven in Figuur 5.6. De bulkdichtheid was op de meeste percelen ter hoogte van de kopakker hoger dan in het middendeel. Dit was het meest uitgesproken in de diepere ondergrond en de bovengrond. De bulkdichtheden lijken dus ten dele de indringingsweerstand te bevestigen. Wel valt op te merken dat de indringingsweerstandswaarden van het middendeel het gemiddelde is van een groter gebied dan dat bemonsterd voor de bepaling van de bulkdichtheid. In de verdichte ondergrond was de trend niet eenduidig. Ondanks de hogere indringingsweerstand opgemeten in de verdichte ondergrond van de kopakkers, was de bulkdichtheid in ongeveer de helft van de percelen hoger ter hoogte van het middendeel. Dit wijst erop dat in de verdichte ondergrond andere factoren een grotere rol speelden dan de verdichting zelf, gezien deze laatste zich in deze laag al substantieel manifesteerde op zowel kopakker als middendeel.

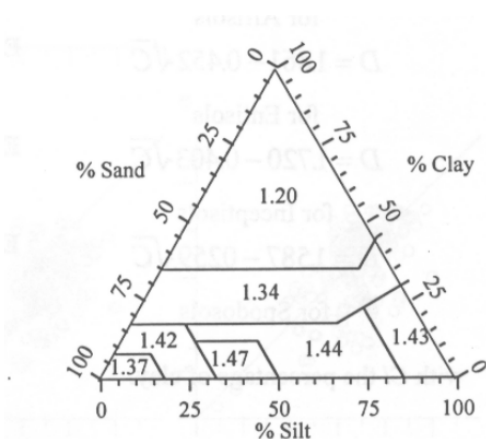
Worden de gemeten waarden vergeleken met de grenswaarden, dan blijkt dat de bovengrond voor een beperkt aantal percelen een te hoge bulkdichtheid vertoonde. In de verdichte ondergrond daarentegen toonden verschillende percelen waarden hoger dan de grenswaarde, in beperkte mate

ook op de middendelen. In de diepere ondergrond werd enkel ter hoogte van de kopakker de grenswaarde overschreden, met uitzondering van de zware klei (U).

De in deze studie in de verdichte ondergrond opgemeten bulkdichtheden zijn vergelijkbaar met deze die een aantal jaren geleden in Vlaanderen werden opgemeten door Van De Vreken *et al.* (2009). Gelijkaardige resultaten werden gevonden in de studie van Van den Akker en De Groot (2008) op acht percelen in Nederland. Worden de waarden van de bovengrond vergeleken met de gemiddelde bulkdichtheden per textuurklasse *in de bovengrond* opgemeten door Van Hove en daterend van voor 1969, dan blijken die globaal ook van dezelfde grootteorde te zijn (zie Figuur 5.7), op een aantal uitschieters na.



Figuur 5.6 Bulkdichtheid BD van het middendeel uitgezet t.o.v. deze van de kopakker voor elk van de drie bodemlagen (bovengrond TOP, verdichte ondergrond CSUB en ondergrond SUB) met weergave van de hoofdtextuurklasse van de betreffende bodemlaag. De stippellijn geeft de grenswaarde weer afhankelijk van kleigehalte (rode lijn geldig voor U, gele lijn voor E en groen voor de resterende textuurklassen die een kleigehalte lager dan 17,5% hebben). De meetwaarden zijn afkomstig van 26 percelen.

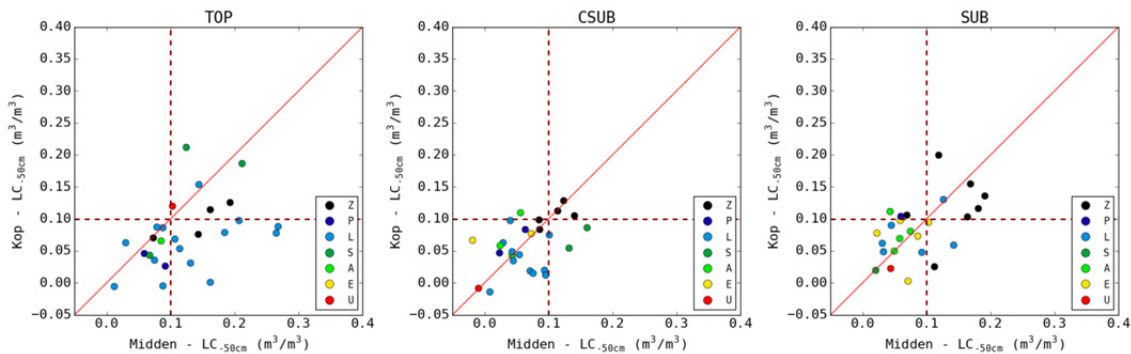


Figuur 5.7 Gemiddelde bulkdichtheid (in Mg m^{-3}) in de bovengrond per textuurklasse volgens Van Hove (1969) (bron: Boucneau *et al.*, 1998).

5.2.4 Luchtcapaciteit

De luchtcapaciteit van kopakker en middendeel gemeten in de drie bodemlagen is weergegeven in Figuur 5.8. Opmerkelijk is dat er, in tegenstelling tot de indringingsweerstand en de bulkdichtheid, een minder duidelijke trend waarneembaar is wanneer de waarden voor het middendeel worden vergeleken met die van de kopakker. Op het merendeel van de percelen was de luchtcapaciteit het grootst op de middendelen, al waren er verschillende percelen waar dit niet zo was en de luchtcapaciteit groter was op de kopakker. Dit wijst op verschillen in bodemvervorming en de daarmee

gepaard gaande wijziging in poriëngrootteverdeling. Het effect van bodemverdichting op de luchtcapaciteit was dus minder eenduidig. Uiteraard konden ook verschillen in inherente bodemeigenschappen tussen middendeel en kopakker resulteren in een verschillende poriëngrootteverdeling (en dus een verschillend volume water dat bij een bepaalde vochtspanning, in casu -50 hPa, wordt vastgehouden), los van de mate van bodemverdichting.

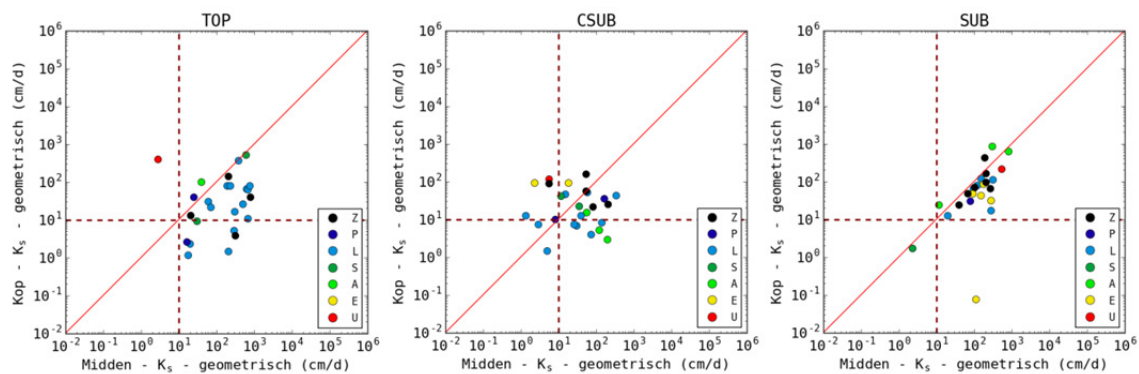


Figuur 5.8 Luchtcapaciteit LC (bepaald bij -50 cm drukhoogte) van het middendeel uitgezet t.o.v. deze van de kopakker voor elk van de drie bodemlagen (bovengrond TOP, verdichte ondergrond CSUB en ondergrond SUB) met weergave van de hoofdtextuurklasse van de betreffende bodemlaag. De stippellijn geeft de grenswaarde weer van $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. De meetwaarden zijn afkomstig van 26 percelen.

Figuur 5.8 geeft duidelijk aan dat op de meeste percelen, en dan vooral in de verdichte en diepere ondergrond, de luchtcapaciteit onder de grenswaarde lag. Daardoor kan er, zeker onder relatief natte omstandigheden (vochtspanning hoger dan -50 hPa), zuurstoftekort optreden en dus opbrengstverlies. Een aantal percelen met een eerder zandige textuur (Z, S, L) lijkt hierop een uitzondering. In een gelijkaardige studie op acht percelen in Nederland vonden Van den Akker en De Groot (2008) in de verdichte ondergrond van middendeel en kopakker een luchtcapaciteit onder de grenswaarde, met uitzondering van de zandbodems die waarden vertoonden nabij de grenswaarde. De luchtcapaciteit ter hoogte van de kopakker was in hun studie niet altijd aanzienlijk lager dan op de middendelen en soms zelfs hoger of gelijk.

5.2.5 Verzadigde doorlatendheid

Het geometrisch gemiddelde van de gemeten verzadigde doorlatendheid K_s van kopakker en middendeel gemeten in de drie bodemlagen is weergegeven in Figuur 5.9. De waarden gemeten op de kopakkers waren zeker in de bovengrond en de ondergrond doorgaans lager dan deze gemeten op de middendelen. Dit wijst ook hier op een potentiële achteruitgang van de bodemkwaliteit bij toenemende verdichting. In de verdichte ondergrond waren er echter verschillende percelen waar dit niet het geval was. In de verdichte ondergrond (en in mindere mate in de diepere ondergrond) werden vaak grote doorgaande macroporiën aangetroffen (zie Figuur 5.10), waardoor ook de variabiliteit in verzadigde doorlatendheid in die lagen groter was.



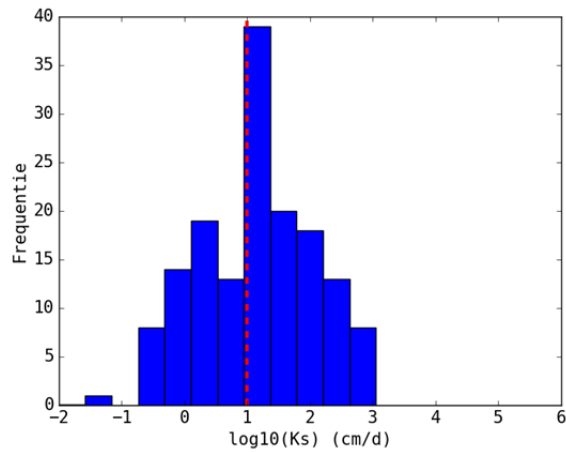
Figuur 5.9 Verzadigde doorlatendheid K_s (genormeerd op 20 °C) van het middendeel uitgezet t.o.v. deze van de kopakker voor elk van de 3 bodemlagen (bovengrond TOP, verdichte ondergrond CSUB en ondergrond SUB) met weergave van de hoofdtextuurklasse van de betreffende bodemlaag. De stippellijn geeft de grenswaarde weer van 10,0 cm d⁻¹. De meetwaarden zijn afkomstig van 26 percelen en geven het geometrisch gemiddelde van meestal 6 herhalingen.



Figuur 5.10 Voorbeeld van een grote doorgaande macroporie aanwezig in de verdichte ondergrond (perceel Ah1 te Gavere), met links een bovenaanzicht en rechts een dwarse doorsnede.

Dit had tot gevolg dat op bepaalde percelen de verzadigde doorlatendheid net hoger was op de kopakker dan in het middendeel. De grote doorgaande macroporiën waren in hoofdzaak continue permanente gangen gecreëerd door anekische (diepgravende) regenwormen of gangen van afgestorven wortels. In de bovengrond waren die in veel mindere mate aanwezig, in hoofdzaak t.g.v. bodembewerking. Ook in de studie van Van den Akker en De Groot (2008) op acht percelen in Nederland was de verzadigde doorlatendheid van de verdichte ondergrond ter hoogte van de kopakker op een aantal (drie) percelen niet lager dan die van het middendeel, en op een nog beperkter aantal (twee) niet lager dan de drempelwaarde. Ook zij stelden één of meerdere doorgaande macroporiën vast en dan vooral wormgangen.

Worden de meetwaarden aan de grenswaarden getoetst, dan blijkt dat in de verdichte ondergrond de *gemiddelde* verzadigde doorlatendheid van ongeveer de helft van de percelen te laag was en leunden daarenboven veel van de gunstige waarden aan bij de grenswaarde. De andere percelen vertoonden een te lage verzadigde doorlatendheid in de verdichte ondergrond. Ook in de bovengrond waren er percelen met een aanvaardbare verzadigde doorlatendheid. In de diepere ondergrond lag de meetwaarde slechts voor één perceel onder de grenswaarde. Deze relatief gunstige waarden waren in zekere mate te wijten aan de grote continue macroporiën, die vooral in de verdichte en diepere ondergrond werden aangetroffen. Toch tonen de resultaten aan dat er op verschillende percelen problemen kunnen rijzen rond berijdbaarheid, oppervlakkige afstroming en bodemerosie.

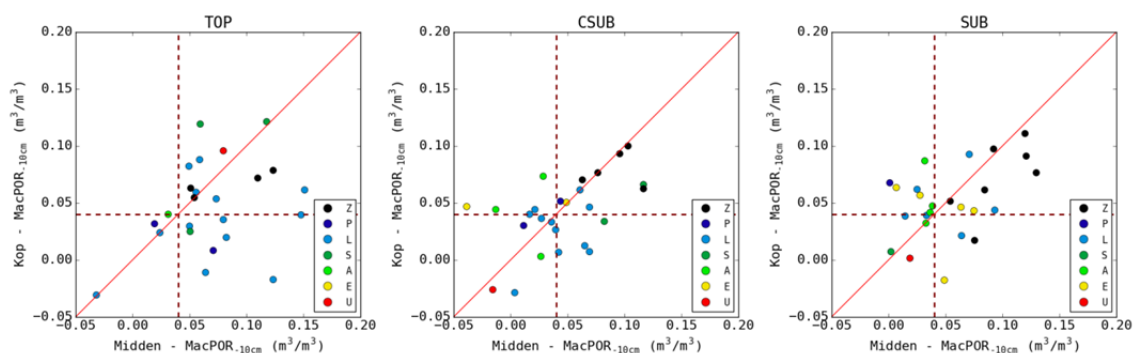


Figuur 5.11 Verdeling van de per bodemlaag gemeten minimale verzadigde doorlatenheden (afkomstig van 156 horizonten).

Gezien de verzadigde doorlatendheid een grote ruimtelijke variabiliteit vertoont en de effecten van bodemverdichting zich vaak ook lokaal uiten, wordt in Figuur 5.11 ook de per bodemlaag gemeten minimale waarde weergegeven. Hier valt 38.4% van de waarden onder de grenswaarde van 10 cm d^{-1} . Dit is een meer realistische schets van de situatie gezien er geen rekening wordt gehouden met niet met bodemverdichting gerelateerde hoge meetwaarden (grootteorde 1000 cm d^{-1}) door artefacten zoals wormgaten, wortelgangen en breuken. In de verdere verwerking werden de meetwaarden groter dan 1000 cm d^{-1} uit de dataset verwijderd.

5.2.6 Macroporiënvolume

Figuur 5.12 geeft het macroporiënvolume bij een drukhoogte van -10 cm ($pF 1$) gemeten op kopakker en middendeel in de drie bodemlagen weer. Een duidelijke trend waarbij kopakker systematisch lagere waarden vertoont dan middendeel is in geen enkele laag zichtbaar. Het macroporiënvolume was t.h.v. de verdichte en diepere ondergrond op meer dan de helft van de percelen te laag. Dit impliceert dat op deze percelen snelle drainage van overtollig water lokaal werd belemmerd. De hoogste waarden werden vooral op de zandige percelen aangetroffen, waardoor de relatief hoge indringingswaarden die daar soms werden aangetroffen, kunnen worden gecompenseerd en dus wortelgroei er in mindere mate wordt belemmerd, zoals Ten Cate *et al.* (1995) suggereerden.



Figuur 5.12 Macroporiënvolume MacPOR (bepaald bij -10 cm drukhoogte) van het middendeel uitgezet t.o.v. deze van de kopakker voor elk van de drie bodemlagen (bovengrond TOP, verdichte ondergrond CSUB en ondergrond SUB) met weergave van de hoofdtextuurklasse van de betreffende bodemlaag. De stippellijn geeft de grenswaarde weer van $0,04 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. De meetwaarden zijn afkomstig van 26 percelen.

5.3 Overzicht van bodemkwaliteitsindicatoren per perceel

5.3.1 Middendeel van de percelen

In Tabel 5.1 wordt per perceel een overzicht gegeven van de waarden van de zes bodemkwaliteitsindicatoren (inclusief de minimale doorlatendheid $K_{s,min}$) gemeten in de verdichte ondergrond ter hoogte van het middendeel. Op twee percelen werd geen enkele indicator overschreden, terwijl vier percelen slechts aan één indicator niet voldeden. Anderzijds waren er vier percelen waar de grenswaarde vijf of zes keer werd overschreden. Op het merendeel van de percelen geven de indicatoren dus aan dat er ook op de middendelen bodemverdichting aanwezig is. Vooral de percelen met zand en lemig zand in de verdichte ondergrond en die op de bodemkaart onder textuurklasse Z en S vallen, bleken de minste bodemverdichting te vertonen; een uitzondering hierop vormt perceel met code Sref dat globaal slecht scoort. De overige textuurklassen scoorden slecht tot zeer slecht, een tweetal uitzonderingen niet te na gesproken (Aref en Lml3). Een verband tussen het risico op bodemverdichting volgens de studie van de Van De Vreken *et al.* (2009) en de werkelijk vastgestelde bodemverdichting lijkt eerder afwezig. Bodems met een laag risico scoorden vaak slecht voor meerdere indicatoren en omgekeerd, bodems met een hoog risico scoorden vaak goed.

De meest overschreden indicatoren waren de indringingsweerstand en de luchtcapaciteit. Dit betekent dat voor deze percelen de doorworteling en een goede luchthuishouding in het gedrang komen. De hoge weerstand en/of lage luchtinhoud in de verdichte ondergrond kan leiden tot oppervlakkige wortelgroei waardoor de opname van water en voedingstoffen belemmerd wordt, terwijl ook zuurstoftekort schade aan het gewas kan berokkenen. Een lage luchtcapaciteit valt niet noodzakelijk samen met een hoge indringingsweerstand. Van de meeste percelen die een aanvaardbare indringingsweerstand vertoonden, was de luchtcapaciteit toch te laag, terwijl omgekeerd percelen met een hoge indringingsweerstand soms toch een voldoende hoge luchtcapaciteit vertoonden (vooral de zandige percelen).

Tabel 5.1

Overzicht van de bodemkwaliteitsindicatorwaarden per perceel gemeten in de verdichte ondergrond van het middendeel, met indicatie van de textuurklasse van het perceel op de bodemkaart en de werkelijke textuurklasse in de verdichte ondergrond (CSUB). De aangewende kleuren geven een indicatie voor de bodemkwaliteit: rood betekent niet gunstig (t.o.v. de drempelwaarde), groen betekent gunstig (meer dan 20% gunstiger t.o.v. de drempelwaarde¹) en de gradatie van lichtrood via geel naar groen betekent 20% of minder gunstiger t.o.v. de drempelwaarde, met lichtrood en lichtgroen respectievelijk het dichtst bij en het verst van de drempelwaarde).

Textuur- klasse bodem- kaart	Code	Textuurklasse CSUB ²	Iw (MPa)	BD (kg/m ³)	Lc (m ³ /m ³)	K _{s,geom} (cm/d)	K _{s,min} (cm/d)	MacPOR (m ³ /m ³)
A	h1	Zandleem	3.0	1609.4	0.093	30.4	0.6	0.065
A	h2	Leem	3.0	1568.1	0.042	200.5	91.6	0.027
A	h3	Zandleem	5.8	1435.9	0.029	26.7	2.2	0.016
A	ref	Zandleem	2.4	1454.0	0.095	142.7	69.4	0.069
A	zh1	Leem	2.1	1503.9	0.056	56.2	24.6	0.029
E	h1	Klei	6.1	1462.8	0.072	18.3	18.0	0.049
E	h2	Zware Klei	2.1	1304.5	0.000	5.6	0.9	0.000
E	ref	Zandleem	3.1	1516.0	0.043	15.2	3.1	0.036
E	zh1	Zandleem	3.6	1507.8	0.070	74.3	11.3	0.042
L	l1	Zandleem	2.0	1506.6	0.054	5.1	0.4	0.039
L	ml1	Zandleem	5.8	1485.0	0.101	59.1	37.1	0.069
L	ml2	Zandleem	2.7	1667.0	0.008	3.0	0.2	0.001
L	ml3	Zandleem	2.7	1384.7	0.075	346.4	113.8	0.061
L	ref	Leem	3.3	1488.4	0.024	121.4	28.0	0.000
P	l1	Lichte Zandleem	4.5	1584.7	0.063	165.4	31.8	0.044
P	l2	Zandleem	3.7	1655.9	0.040	1.4	0.4	0.021
P	l3	Lichte Zandleem	3.8	1558.1	0.023	8.2	5.2	0.011
P	l4	Klei	2.2	1527.9	0.000	2.4	1.0	0.000
P	ref	Zandleem	4.2	1524.3	0.044	40.8	12.7	0.017
S	h1	Lemig Zand	4.2	1646.6	0.160	11.7	1.2	0.116
S	l1	Lemig Zand	5.7	1542.5	0.131	36.2	14.8	0.082
S	ref	Zand	6.0	1624.0	0.084	5.7	1.6	0.077
S	zh1	Zand	2.6	1358.6	0.114	53.7	38.1	0.095
Z	h1	Zand	2.7	1527.6	0.123	83.9	28.5	0.103
Z	h2	Zand	3.0	1375.3	0.140	54.5	39.0	0.117
Z	ref	Zand	5.8	1595.4	0.086	210.4	22.0	0.063

¹ Voor bulkdichtheid werd 20% van 200 kg m⁻³ van de drempelwaarde afgetrokken en voor de indringingsweerstand 20% van 2 MPa. Dus, voor een drempelwaarde van 1600 Mg m⁻³ betekent dit 1560 Mg m⁻³ en voor de indringingsweerstand 2.6 MPa.

² In deze kolom betekent rood dat minimum vijf van de zes bodemkwaliteitsindicatoren zijn overschreden, groen maximum één, en oranje twee tot vier.

De bulkdichtheid, een directe maat voor bodemverdichting, werd op verschillende percelen overschreden of leunde dicht bij de drempelwaarde aan. Het merendeel van de percelen bleek t.h.v. het middendeel echter wel een dichtheid te vertonen die aanvaardbaar lijkt.

Het volume aan macroporiën was bij alle zandige percelen gunstig. Ook bij verschillende andere percelen werd de grenswaarde niet overschreden. Een voldoende hoog macroporiënvolume kan een hoge indringingsweerstand ten dele compenseren naar doorworteling toe, tenzij ook de luchtcapaciteit

ongunstig is. Voor de meeste zandige percelen was dit niet het geval. Anderzijds zorgt een voldoende hoog macroporiënvolume voor een snelle drainage van overtollig water.

Bodems met een relatief hoog macroporiënvolume scoorden doorgaans ook relatief goed op vlak van doorlatendheid. Zeker bij de zandige bodems, met uitzondering van Sref en in mindere mate Sh1, vormde de verzadigde doorlatendheid geen probleem en vormt de verdichte ondergrond geen belemmering voor de infiltratiecapaciteit. Ook op vele andere percelen was de verzadigde doorlatendheid t.h.v. het middendeel gunstig. Dit kan grotendeels worden verklaard door de grote doorgaande macroporiën die in de ondergrond op vele percelen werden vastgesteld. Zelfs de laagste van de zes opgemeten K_s -waarden lag voor ongeveer de helft van de percelen boven de grenswaarde.

5.3.2 Kopakker van de percelen

Uit Tabel 5.2 blijkt dat op alle percelen ter hoogte van de kopakker in de verdichte ondergrond een of meerdere van de beschouwde indicatoren werden overschreden. De bodemverdichting is dus ernstiger dan op de middendelen, zoals ook al in sectie 5.2 kon worden besloten. Met uitzondering van het perceel met zware klei (Eh2) en een perceel met zandleem (Aref) in de verdichte ondergrond, werd de indringingsweerstand overal overschreden. Bijgevolg kunnen er zich op de meeste percelen problemen voordoen met doorworteling, tenzij dit wordt gecompenseerd door een gunstig macroporiënvolume. Dit laatste was het geval op alle zandpercelen (Z) en een aantal andere percelen.

Ook de luchtcapaciteit was op de meeste percelen t.h.v. de kopakker te laag, met uitzondering van vooral de zandbodems (Z). Dit geeft aan dat wanneer percelen evolueren naar een situatie zoals nu in de kopakker, de beworteling problematisch kan worden t.g.v. aeratieproblemen.

De bulkdichtheid was voor het merendeel van de percelen t.h.v. de kopakker vrij gunstig, ondanks de lage indringingsweerstand, luchtcapaciteit, verzadigde doorlatendheid en macroporiënvolume van verschillende bodems.

Vooral op de zandige percelen (Z) was het macroporiënvolume gunstig. Ook op een aantal andere percelen was dit het geval. Op deze percelen werd in de meeste gevallen de gemiddelde verzadigde doorlatendheid niet belemmerend. De minimaal aangetroffen verzadigde doorlatendheid was echter op bijna alle percelen te laag. Lokaal kan de infiltratiecapaciteit dus toch belemmerd worden.

Worden de verschillende bodemkwaliteitsindicatoren beschouwd, dan vertoonden de op de bodemkaart aangeduide A-bodems de slechtste bodemkwaliteit en dus de hoogste mate van bodemverdichting. Zandbodems (Z) vertoonden dan weer globaal gezien de minste mate van bodemverdichting. Gelet op de beperktheid van de dataset is veralgemening evenwel gevaarlijk.

Tabel 5.2

Overzicht van de bodemkwaliteitsindicatorwaarden gemeten in de verdichte ondergrond van de kopakker per perceel, met indicatie van de textuurklasse van het perceel op de bodemkaart en de werkelijke textuurklasse in de verdichte ondergrond (CSUB). De aangewende kleuren geven een indicatie voor de bodemkwaliteit: rood betekent niet gunstig (t.o.v. de drempelwaarde), groen betekent gunstig (meer dan 20% gunstiger t.o.v. de drempelwaarde¹) en de gradatie van lichtrood via geel naar groen betekent 20% of minder gunstiger t.o.v. de drempelwaarde, met lichtrood en lichtgroen respectievelijk het dichtst bij en het verst van de drempelwaarde).

Textuur- klasse bodem- kaart	Code	Textuurklasse CSUB ²	Iw (MPa)	BD (kg/m ³)	Lc (m ³ /m ³)	K _{s,geom} (cm/d)	K _{s,min} (cm/d)	MacPOR (m ³ /m ³)
A	h1	Zandleem	3.5	1582.3	0.020	6.8	2.3	0.013
A	h2	Zandleem	5.1	1422.2	0.043	2.9	1.7	0.003
A	h3	Zandleem	6.0	1514.6	0.063	7.2	0.3	0.040
A	ref	Zandleem	2.8	1683.0	0.012	8.1	0.5	0.007
A	zh1	Zandleem	5.1	1494.3	0.110	14.7	12.2	0.073
E	h1	Zandleem	6.1	1642.5	0.077	92.2	4.3	0.050
E	h2	Zware Klei	1.8	1307.2	0.000	112.9	33.2	0.000
E	ref	Zandleem	3.7	1587.3	0.049	44.7	13.4	0.033
E	zh1	Zandleem	4.3	1520.8	0.019	3.9	1.0	0.007
L	l1	Zandleem	4.5	1587.4	0.044	1.5	1.1	0.026
L	ml1	Zandleem	5.4	1448.4	0.075	51.9	10.5	0.046
L	ml2	Zandleem	5.0	1688.1	0.000	7.1	0.9	0.000
L	ml3	Zandleem	4.7	1406.9	0.015	41.8	9.5	0.010
L	ref	Leem	3.5	1454.7	0.059	5.1	2.2	0.044
P	l1	Lemig Zand	5.1	1396.7	0.083	35.5	15.3	0.052
P	l2	Zandleem	4.6	1432.0	0.098	12.5	10.7	0.044
P	l3	Lemig Zand	4.6	1548.7	0.047	9.9	5.0	0.030
P	l4	Zandleem	4.8	1495.0	0.066	91.3	31.9	0.047
P	ref	Zandleem	4.5	1612.2	0.035	12.6	2.3	0.015
S	h1	Lemig Zand	6.3	1524.0	0.087	40.2	5.3	0.066
S	l1	Lemig Zand	5.6	1553.6	0.055	22.4	18.6	0.033
S	ref	Zand	7.2	1539.2	0.099	88.4	2.7	0.077
S	zh1	Zand	3.9	1463.0	0.113	55.0	25.9	0.093
Z	h1	Zand	3.7	1552.4	0.129	21.1	2.2	0.100
Z	h2	Zand	4.0	1300.7	0.105	158.3	156.6	0.062
Z	ref	Zand	6.1	1626.0	0.083	24.5	14.6	0.070

¹ Voor bulkdichtheid werd 20% van 200 kg m⁻³ van de drempelwaarde afgetrokken en voor de indringingsweerstand 20% van 2 MPa. Dus, voor een drempelwaarde van 1600 Mg m⁻³ betekent dit 1560 Mg m⁻³ en voor de indringingsweerstand 2.6 MPa.

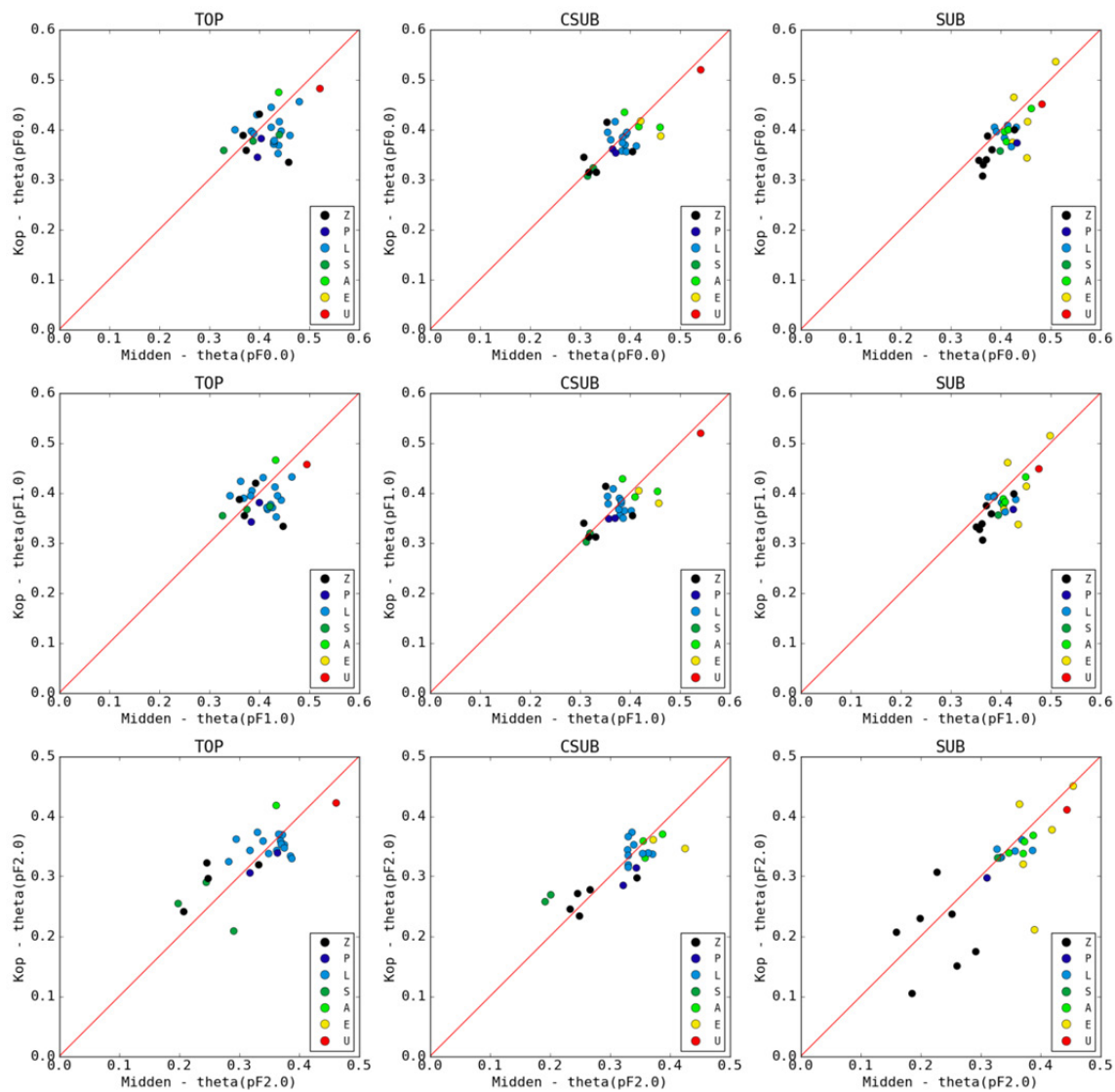
² Rood betekent dat minimum vijf van de zes bodemkwaliteitsindicatoren zijn overschreden, groen maximum één, en oranje twee tot vier.

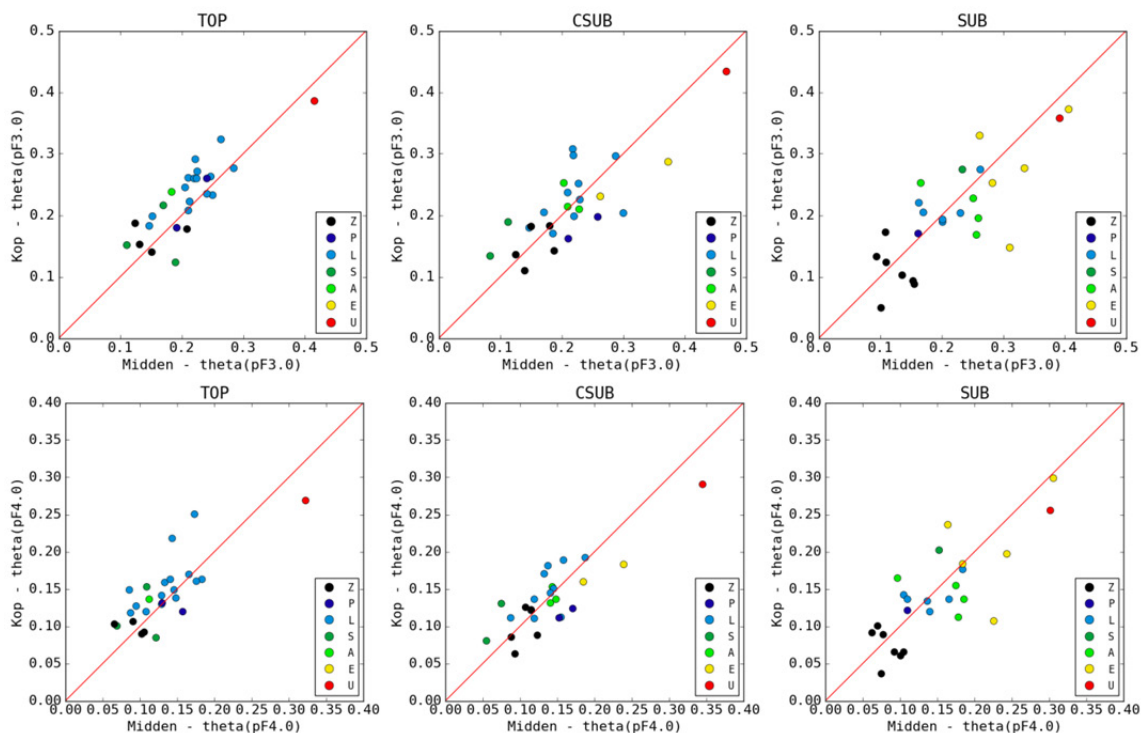
5.4 Effect van bodemverdichting op hydraulische eigenschappen

5.4.1 Effect op waterretentiecurve

Figuur 5.13 geeft de volumetrische vochtgehalten (vochtretentie) weer bij een aantal representatieve bodemvochtspanningen (uitgedrukt als pF-waarde), gemeten op kopakker en middendeel in de drie bodemlagen. De verschillen tussen kopakker en middendeel zijn het meest uitgesproken bij de hogere bodemvochtspanningen (lage pF-waarden, i.e., pF 0 en 1) in de diepere ondergrond. Conform de bulkdichtheid was in die laag de waterretentie in het nattere traject van de waterretentiecurve op de meeste percelen kleiner op de kopakkers dan op de middendelen. In de bovengrond en vooral in de verdichte ondergrond is die trend minder aanwezig. Er waren nauwelijks verschillen tussen pF 0 en pF 1, dus bij vochtspanningen van -1 en -10 hPa, wat aangeeft dat de luchtintreewarde van de

bodemmatrix lager was dan -10 hPa. Dit sluit niet uit dat er al lucht aanwezig was in de allergrootste poriën, i.e. poriën met een diameter groter dan 3 mm (wat volgens de capillariteitswet overeenkomt met een vochtspanning van -1 hPa). Ook bij pF 1,25-1,75 blijft de trend aanwezig (niet getoond in Figuur 5.13). Bij pF 2 is de trend (ook in de verdichte ondergrond) minder duidelijk en bij pF 3 en 4 lijkt ze verdwenen. Dergelijke observaties worden bevestigd door verschillende studies in de literatuur, zowel op basis van labo-experimenten met gecontroleerde verdichting door samendrukken van stalen (Zhang *et al.*, 2006) als van gecontroleerde veldproeven met meerdere passages van landbouwmachines (Glab, 2014). In deze studies op zandig leem- tot leembodems met kleigehalten tussen 10% en 24% werd vastgesteld dat het effect van bodemverdichting op de waterretentiecure het grootst was bij vochtspanningen groter dan ca. -50 hPa (pF kleiner dan 1,7). Het volume macroporiën neemt in dit korte vochtspanningstraject typisch af, ten voordele van een toename in mesoporiën, zij het uitgedijd over een groter vochtspanningstraject (Hillel, 1998). In welke mate deze verschillen de waterhuishouding beïnvloeden, moet blijken uit de modelsimulaties.

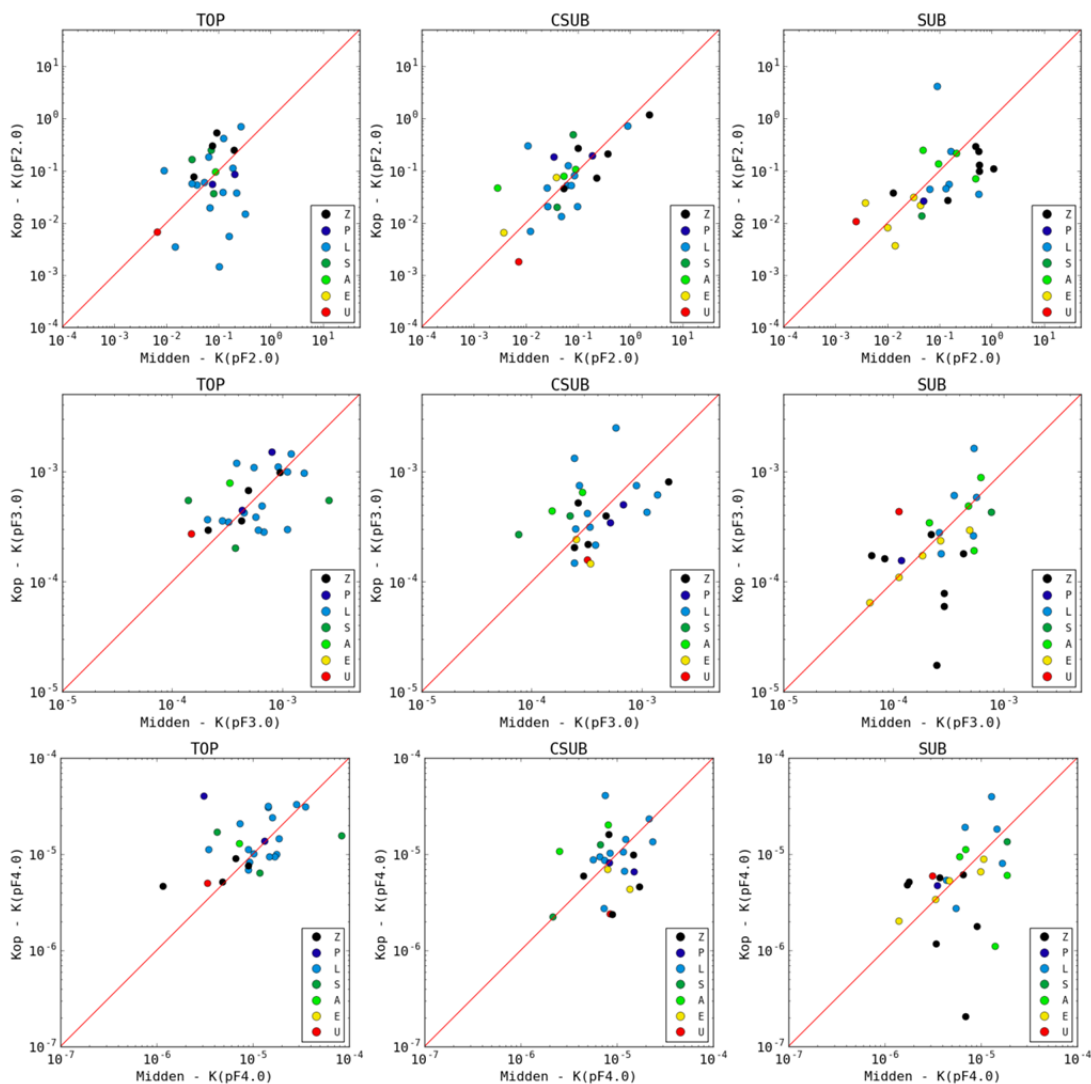




Figuur 5.13 Volumetrische vochtgehalten (waterretentie) bij een aantal representatieve bodemvochtspanningen (uitgedrukt als pF-waarde) van het middendeel uitgezet t.o.v. deze van de kopakker voor elk van de drie bodemlagen (bovengrond, verdichte ondergrond en ondergrond) met weergave van de hoofdtextuurklasse van de betreffende bodemlaag. De meetwaarden zijn afkomstig van 26 percelen.

5.4.2 Effect op doorlatendheidscurve

Figuur 5.14 toont de doorlatendheidscurves bij een aantal representatieve bodemvochtspanningen (uitgedrukt als pF-waarde) gemeten op kopakker en middendeel in de drie bodemlagen. Enkel K -waarden vanaf pF 2 worden getoond, wat min of meer overeenkomt met de hoogste vochtspanning van het meetbereik waarover de laboanalyse met zeer grote precisie werd uitgevoerd. Op die manier wordt vermeden geëxtrapoleerde waarden te hanteren, ook al werden de K -curves gefit samen met de vochtretentiecurves die een meetbereik vertoonden tot pF 0. Terwijl voor de verzadigde doorlatendheid een duidelijke trend aanwezig was, met lagere K_s -waarden op de kopakkers, blijft deze voor de (onverzadigde) doorlatendheid achterwege. Ook Zhang *et al.* (2006) vonden in een van de weinige studies rond het effect van bodemverdichting op de doorlatendheidscurves geen effect binnen hun meetbereik (vanaf een vochtgehalte vanaf ca. de helft van dat bij verzadiging). Hun studie werd uitgevoerd onder labo-omstandigheden, waarbij lemige bodems met kleigehalte tussen 10% en 24% onder externe druk tot 20% werden verdicht.



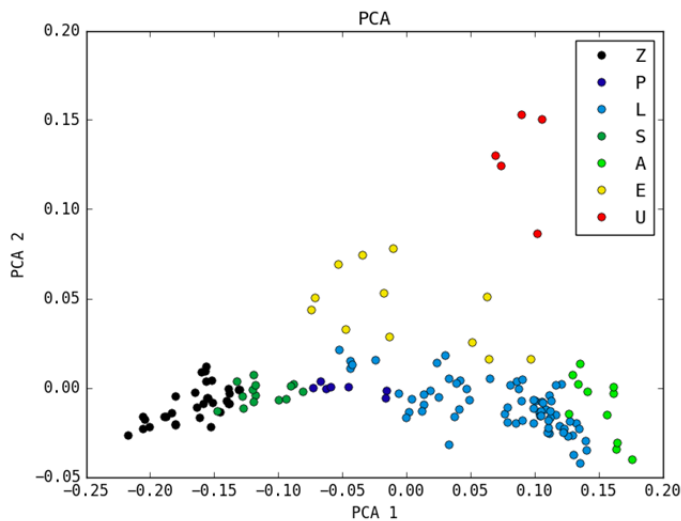
Figuur 5.14 (Onverzadigde) doorlatendheid bij een aantal representatieve bodemvochtspanningen (uitgedrukt als pF-waarde) van het middendeel uitgezet t.o.v. deze van de kopakker voor elk van de drie bodemlagen (bovengrond, verdichte ondergrond en ondergrond) met weergave van de hoofdtextuurklasse van de betreffende bodemlaag. De meetwaarden zijn afkomstig van 26 percelen.

5.5 Principale Componenten Analyse en Lineaire Discriminanten Analyse

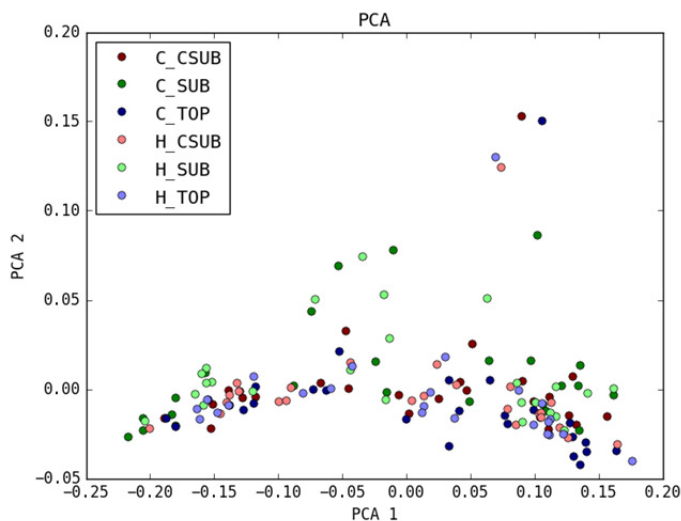
Om verder inzicht in de dataset te bekomen, werd een Principale Componenten Analyse (PCA) en een Lineaire Discriminanten Analyse (LDA) uitgevoerd. In deze analyse werden de volgende data-attributen gebruikt: organisch-koolstofgehalte (% kg kg⁻¹), zand (%kg kg⁻¹), leem (%kg kg⁻¹), klei (%kg kg⁻¹), poriënvolume (m³ m⁻³), luchtcapaciteit (bij -50 cm, m³ m⁻³), macroporiënvolume (bij -10 cm, m³ m⁻³), vochtgehalte bij pF 1,0, 2,0 en 4,2, doorlatendheid bij pF 1,0, 2,0 en 4,2, verzadigde doorlatendheid (geometrisch gemiddelde en minimale waarde, cm d⁻¹), bulkdichtheid (kg m⁻³), indringingsweerstand (MPa) en gravimetrisch vochtgehalte (kg kg⁻¹) bij meting van de indringingsweerstand.

In een PCA identificeert het algoritme die (genormaliseerde) attributen die voor de hoogste variatie in de dataset zorgen. Vervolgens wordt de dataset getransformeerd, zodat de nieuwe dimensies een zo hoog mogelijke variatie verklaren en onafhankelijk zijn van elkaar. Op deze wijze wordt de hoogdimensionele dataset gereduceerd tot minder (in dit geval twee) dimensies. In deze studie verklaren deze twee dimensies (PCA1 en PCA2) respectievelijk 90.6% en 6.7% van de variatie in de

oorspronkelijke dataset. In Figuur 5.15 en 5.16 is het resultaat geplot, en ingekleurd volgens respectievelijk de textuurklasse waartoe de stalen behoren en de locatie van de staalname (bodemlaag, i.e., bovengrond TOP, verdichte ondergrond CSUB en diepere ondergrond SUB, en middendeel C vs. kopakker H). Het valt op dat in de PCA-dimensies de stalen gegroepeerd worden volgens textuurklasse (Figuur 5.15) en niet volgens de locatie van de staalname (Figuur 5.16). De meeste variatie in de dataset wordt dus verklaard door textuur en niet door bodemverdichting.



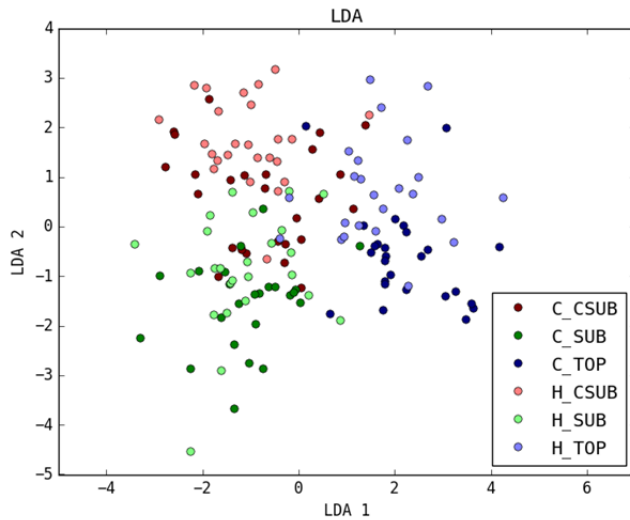
Figuur 5.15 PCA-dimensie 1 en 2, ingekleurd volgens textuurklasse. A is leem, E klei, L zandleem, P licht zandleem, S lemig zand, U zware klei en Z zand (volgens de Belgische textuurdriehoek).



Figuur 5.16 PCA-dimensie 1 en 2, ingekleurd volgens locatie staalname. TOP is bovengrond, CSUB verdichte ondergrond, SUB diepere ondergrond, C middendeel en H kopakker.

Waar PCA de variatie tussen alle punten in de dataset maximaliseert, laat LDA toe de variatie tussen bepaalde klassen te maximaliseren. In tegenstelling tot PCA is dit dus een gesuperviseerde analyse waarbij het algoritme op basis van de dataset én de klassen, klassen tracht te onderscheiden. In deze studie werden de data geclassificeerd op basis van de locatie van de staalname. Het resultaat is geplot in Figuur 5.17. Op basis van de gegeven attributen groepeerde de LDA de verschillende klassen. Het valt op dat de datapunten sterk geclusterd liggen volgens bodemlaag en niet volgens kopakker/middendeel. De drie bodemlagen zorgen voor een grotere variatie in bodemeigenschappen dan de plaats op het perceel. Dit is zeker het geval voor de diepere ondergrond, waar de clusters voor kop- en middenakker overlappen. De bodemeigenschappen in de diepere ondergrond ter hoogte van

kopakker en middendeel zijn dus vrij gelijkaardig. Voor de bovengrond en de verdichte ondergrond kan wel een duidelijker onderscheid tussen kop- en middenakker worden gemaakt. De bodemeigenschappen van beide locaties zijn dus minder verwant met elkaar in de twee bovenste bodemlagen dan in de diepere ondergrond. De verdichte ondergrond ter hoogte van het middendeel toont ook verwantschap met de diepere ondergrond. Dit kan erop wijzen dat de verdichte ondergrond ter hoogte van het middendeel minder verdicht is dan op de kopakker, zodat deze nog gelijkaardige bodemeigenschappen heeft als de diepere ondergrond.



Figuur 5.17 LDA-dimensie 1 en 2, ingekleurd volgens locatie staalname. TOP is bovengrond, CSUB verdichte ondergrond, SUB diepere ondergrond, C middendeel en H kopakker.

6 Vochtgehalten en grondwaterstanden in zes percelen

6.1 Toetsing van de textuur

Voor zes percelen werden gedurende ruim een jaar het vochtgehalte op drie diepten en de grondwaterstand (en grondwatertemperatuur) gemeten in het middendeel. De zes locaties zijn geselecteerd op basis van de textuurklassen op 41 cm-mv, gebruikmakend van de Aardewerk-bodemdatabank en de Belgische bodemkaart (zoals in de bodemverdichtingsstudie van Van De Vreken *et al.*, 2009). Het opzet was de zes voornaamste textuurklassen in de studie op te nemen. Het klei-, leem- en zandgehalte alsook de vooropgestelde en werkelijke textuurklasse worden voor drie diepten (bovengrond TOP, verdichte ondergrond CSUB, ondergrond SUB, zie Figuur 3.1) per perceel in Tabel 6.1 gegeven. De textuurklassen zijn gebaseerd op de textuurdriehoek van het Centrum voor Bodemkartering. Merk op dat textuurwaarden afkomstig zijn van ca. 5-cm hoge monsters die op een bepaalde diepte binnen de aangegeven laag werden genomen, en dus niet noodzakelijk overeenkomen met een gemiddelde waarde over 30 cm.

Er werd gecontroleerd of deze gemeten textuur van de ondergrond overeenkwam met de vooropgestelde textuurklassen op 41 cm-mv. In Tabel 6.1 zijn de groen gemarkeerde gemeten textuurklassen gelijk aan de vooropgestelde textuurklasse en zijn de gemeten textuurklassen die afwijken rood gekleurd (de textuurklasse van de bovengrond werd niet getoetst en is dus niet gekleurd). De overeenkomst tussen de vooropgestelde textuurklasse en de daadwerkelijk toegekende klasse op basis van de metingen blijkt matig te zijn. Alleen voor perceel Z (zand), de diepe ondergrond van perceel P (licht zandleem), het middendeel van perceel A (leem) en de ondiepe ondergrond van de kopakker van perceel S (lemig zand) is er een overeenkomst. De ondiepe ondergrond van het middendeel van perceel S is iets zandiger waardoor het net buiten klasse S (en in klasse Z) valt. De diepere ondergrond heeft een meer uitgesproken zandig karakter. Voor perceel P lijkt de ondiepe ondergrond iets lemiger te zijn, waardoor het net buiten klasse P valt en in L terechtkomt. De ondergrond van perceel L is iets lemiger dan vooropgesteld en valt net binnen klasse A. Perceel E ten slotte heeft een L-textuur in de ondergrond. De textuur werd in deze studie opgemeten op een locatie vlakbij een historisch bodemprofiel uit Aardewerk, waarvan de ondergrond textuurklasse E kreeg toegekend. Bij nader inzien blijkt dit een fout te zijn in Aardewerk, gezien de vermelde textuurwaarden zeer goed overeenkomen met de in deze studie opgemeten waarden.

De discrepantie tussen de waarnemingen en de textuurklassen van Van De Vreken *et al.* (2009) op basis van de bodemkaart en Aardewerk heeft nauwelijks gevolgen voor de studie. Er zijn zes profielen met een range aan eigenschappen waarvoor de plausibiliteit van de berekeningen kan worden getoetst aan metingen. De klasse E komt hierin niet voor, al heeft perceel L wel ca. 18% klei in de diepere ondergrond. De resultaten dienen hiervoor voorzichtig te worden gehanteerd, ook als blijkt dat het model goed in staat is de grondwaterstanden en vochtgehalten voor de zes meetlocaties te beschrijven.

Tabel 6.1

Samenstelling (% kg kg⁻¹) en textuurklasse van de drie bodemlagen van de zes percelen met aanduiding van de diepte waarop de 5-cm hoge monsters werden genomen.

code	laag	diepte	zand	leem	klei	textuur-klasse
Z	TOP	10	84.3	10.1	5.6	Z
	CSUB	30	83.5	11.4	5.1	Z
	SUB	80	88.5	4.2	7.3	Z
S	TOP	15	76.9	17.2	5.9	S
	CSUB	45	86.8	8.9	4.3	Z
	SUB	80	91.4	3.9	4.7	Z
P	TOP	15	48.4	44.3	7.2	L
	CSUB	35	48.0	44.6	7.4	L
	SUB	70	51.3	38.5	10.2	P
L	TOP	15	9.9	80.9	9.2	A
	CSUB	40	8.1	78.5	13.3	A
	SUB	70	7.2	75.1	17.7	A
A	TOP	15	15.6	74.3	10.1	A
	CSUB	40	15.4	73.2	11.5	A
	SUB	75	12.2	70.6	17.2	A
E	TOP	15	24.0	62.0	13.9	L
	CSUB	40	21.9	65.0	13.1	L
	SUB	75	20.8	65.5	13.8	L

Code is de vooropgestelde textuurklasse op basis van Aardewerk. Z is zand, S is lemig zand, P is licht zandleem, L is zandleem, A is leem, E is klei. TOP is bovengrond, CSUB is verdichte ondergrond, SUB is diepere ondergrond (zie Figuur 3.1). In de kolom 'textuurklasse' geeft groen aan dat de gemeten en vooropgestelde textuurklassen gelijk zijn; rood geeft aan dat er een verschil is; zwart dat de textuurklasse niet werd getoetst (bovengronden).

Ook al komen de daadwerkelijke textuurklassen in de ondergrond niet altijd overeen met de vooropgestelde klassen, in het vervolg van dit document blijven we de oorspronkelijk toegekende codes hanteren om conform de opzet van de studie de modelberekeningen ruimtelijk te kunnen positioneren.

6.2 Vochtgehalte en grondwaterstand

In algemene zin zal bij een homogeen profiel het vochtgehalte (behalve meteen na neerslag) als gevolg van verdamping en uitzakken het laagst zijn voor de ondiepe meting en het hoogst voor de diepe meting. De ondiepste waarnemingen reageren typisch het sterkst op neerslag en de diepe waarnemingen het minst, ook omdat wijzigingen meer zijn uitgesmeerd in de tijd en daardoor moeilijker zichtbaar. In de praktijk zijn profielen echter niet homogeen en verschillen in bulkdichtheid, porositeit, textuur en organisch-koolstofgehalte, die een sterke invloed hebben op de waterretentie en doorlatendheid, maken dat waarnemingen van bodemvocht minder eenduidig te interpreteren zijn.

Figuren 6.1 tot 6.6 geven het verloop van de neerslag, het bodemvochtgehalte (op drie diepten), de grondwaterstand en de grondwatertemperatuur op de zes percelen tussen begin augustus 2014 en voorjaar 2016. De vochtgehalten opgemeten met de 10HS-sensoren werden gecorrigeerd op basis van de kalibratiecurve (hoofdstuk 7). Opvallend is dat op alle percelen (waar de grondwaterstand zich boven 200 cm-mv bevond en dus kon worden opgemeten) de grondwaterstanden vrij gelijkaardige schommelingen vertoonden, los van de diepte van de grondwatertafel.

6.3 De percelen

6.3.1 Perceel Z

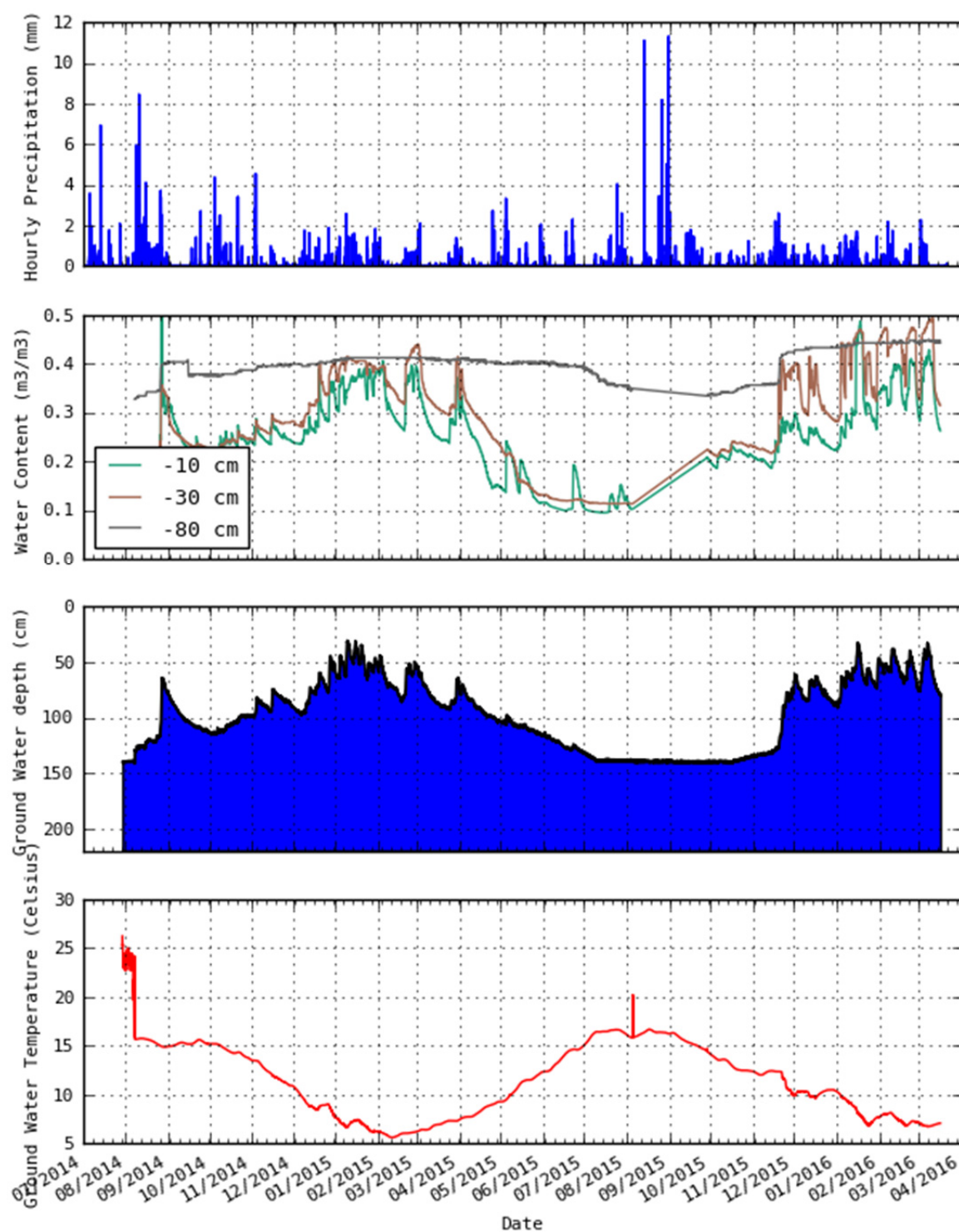
Zoals in Tabel 6.1 aangegeven, had het middendeel van perceel Z een vrij homogeen textuurprofiel met in elke horizont een zandige textuur (Z). Het organisch-koolstofgehalte bedroeg 0,76, 0,78 en 0,08% op 10, 30 en 80 cm-mv diepte. De BD op deze diepten was respectievelijk 1,403, 1,602 en 1,606 Mg m⁻³ (Annex). Dit komt overeen met een poriënvolume van respectievelijk 0,47, 0,39 en 0,39 m³ m⁻³. De BD in de verdichte ondergrond en ondergrond was dus hoger dan de grenswaarde wat op verdichting wijst. Dit wordt bevestigd door de indringingsweerstandprofielen die een gemiddelde Iw van ~6 MPa op 40 cm-mv diepte tonen (en ~4 MPa op 30 cm-mv diepte) (Annex). Ook op 70 cm-mv diepte bedroeg Iw nog steeds >3 MPa, terwijl die op 10 cm diepte ~1 MPa was. Tijdens 2014 en 2015 werd op perceel Z respectievelijk aardappel (*Solanum tuberosum* L.) en mais (*Zea mays* L.) (van eind april tot half oktober) geteeld.

Zoals verwacht, reageerde het vochtgehalte gemeten in de bovengrond (10 cm-mv) heel sterk op de neerslag (Figuur 6.1). Ook in de verdichte ondergrond (30 cm-mv) volgden de schommelingen in vochtgehalte het neerslagpatroon, zij het minder uitgesproken. In de diepere ondergrond (80 cm-mv) bleef het vochtgehalte nagenoeg onveranderd en bleef de bodem quasi verzadigd, met uitzondering van de periode juli-oktober toen de grondwatertafel onder 130 cm was gezakt. In die periode nam het vochtgehalte op 80 cm-mv licht af. Er was dus waarschijnlijk sterke waternalevering tot op minstens 80 cm-mv diepte. Duidelijk is ook de sterke respons van de grondwaterstand op de neerslag, vooral wanneer de grondwatertafel vrij ondiep lag (winter, lente en herfst).

Het veld lag er tot begin april 2015 vrij nat bij, ook in de bovengrond. Vanaf half december 2014 zakte het luchtgehalte (verschil tussen poriënvolume en vochtgehalte) in de bovengrond onder de grenswaarde van 0,1 m³ m⁻³, om pas vanaf begin april 2015 weer groter te worden. In de verdichte ondergrond gebeurde dat iets later. Het luchtgehalte in de diepere ondergrond bleef het hele jaar door onder de grenswaarde. Vanaf mei 2015 zakte het vochtgehalte aanzienlijk in de bovengrond, waardoor daar mogelijk droogtestress optrad.

De hoge vochtgehalten die gedurende een groot deel van het jaar werden waargenomen in de bovengrond en verdichte ondergrond kunnen het gevolg zijn van capillaire nalevering zoals dat ook op grotere diepte wellicht het geval was, en waren waarschijnlijk niet het gevolg van beperkende drainage. Ook in het voorjaar, wanneer verdamping beperkt is, nam het vochtgehalte duidelijk af en zakte het water dus wellicht uit, zelfs in de verdichte ondergrond. Het lijkt dan ook aannemelijk dat bodemverdichting in beperkte mate de waterhuishouding beïnvloedde op dit zandig perceel.

Reference site Z



Figuur 6.1 Verloop van neerslag, bodemvochtgehalte (op drie diepten), grondwaterstand en grondwatertemperatuur met de tijd op perceel Z.

6.3.2 Perceel S

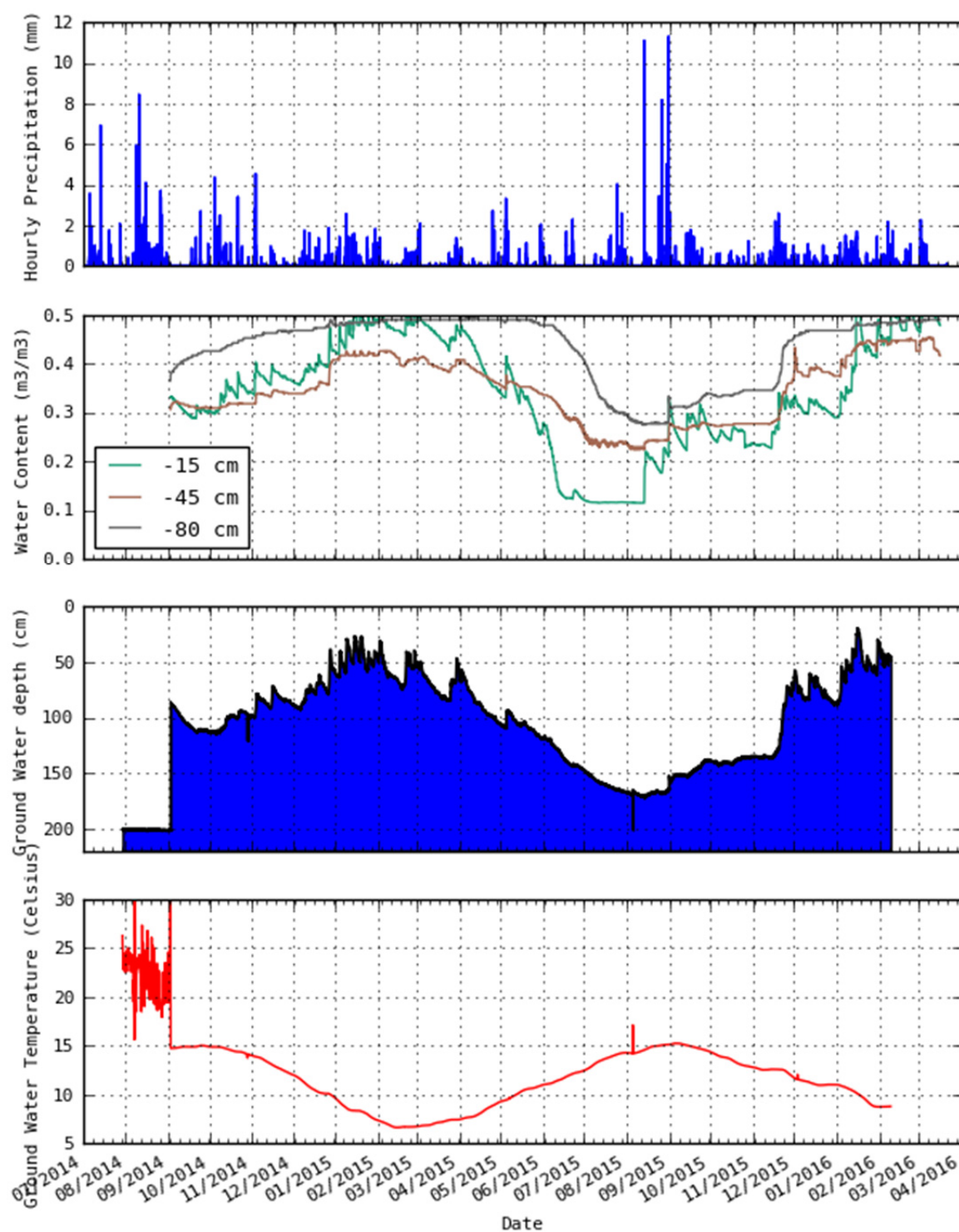
Zoals in Tabel 6.1 aangegeven, had het middendeel van perceel S een lemig-zandige bovengrond (S) en een iets zandiger ondergrond (Z). Het organisch-koolstofgehalte bedroeg 1,22, 0,80 en 0,47% op 15, 45 en 80 cm-mv diepte. De BD op deze diepten was respectievelijk 1,371, 1,631 en 1,442 Mg m⁻³ (Annex). Dit komt overeen met een poriënvolume van respectievelijk 0,48, 0,38 en 0,45 m³ m⁻³. De BD in de verdichte ondergrond was dus hoger dan de grenswaarde, wat op verdichting wijst. In de diepere ondergrond was dit niet meer het geval. Dit wordt bevestigd door de indringingsweerstandprofielen die een gemiddelde Iw van >5 MPa op 40 cm-mv diepte tonen (Annex). Vanaf 70 cm-mv diepte leek Iw onder 3 MPa te zakken. Op 10 cm diepte was Iw ~1,2 MPa. Van eind september 2014 tot juni 2015 werd op perceel Z gerst (*Hordeum vulgare* L.) geteeld.

Zoals verwacht, reageerde het vochtgehalte het sterkst op de neerslag in de bovengrond (10 cm-mv); deze schommelingen waren echter vrij beperkt (Figuur 6.2). Dit is zeker zo in de verdichte ondergrond (45 cm-mv). In de diepere ondergrond (80 cm-mv) bleef het vochtgehalte nagenoeg onveranderd en bleef de bodem quasi verzadigd, met uitzondering van de periode juli-november 2015. Vanaf het ogenblik dat de grondwatertafel onder de 130 cm-mv zakte, nam het vochtgehalte op 80 cm-mv af. Er was dus waarschijnlijk sterke waternalevering tot op minstens 80 cm-mv diepte. Duidelijk is ook de sterke respons van de grondwaterstand op de neerslag, vooral wanneer de grondwatertafel vrij ondiep lag (winter, lente en herfst).

Het veld lag er tot mei vrij nat bij, ook in de bovengrond. Vanaf half december 2014 zakte het luchtgehalte in de bovengrond onder de grenswaarde van 0,1 m³ m⁻³, om pas vanaf half mei 2015 weer groter te worden. In de verdichte ondergrond oversteeg het luchtgehalte zelfs nooit de grenswaarde, met uitzondering van de periode juli-oktober 2015. Dit kan dus wijzen op een blijvend zuurstoftekort in de ondergrond.

De hoge vochtgehalten in de bovengrond en de verdichte ondergrond kunnen het gevolg zijn van capillaire nalevering zoals dat ook op grotere diepte wellicht het geval was. Het uitzakken van water in de verdichte ondergrond verliep op dit perceel relatief traag, wat een gevolg kan zijn van capillaire nalevering, maar ook van minder snelle drainage. Op dit zandig tot lemig-zandig perceel is het minder duidelijk in welke mate bodemverdichting de waterhuishouding beïnvloedde.

Reference site S



Figuur 6.2 Verloop van neerslag, bodemvochtgehalte (op drie diepten), grondwaterstand en grondwatertemperatuur met de tijd op perceel S.

6.3.3 Perceel P

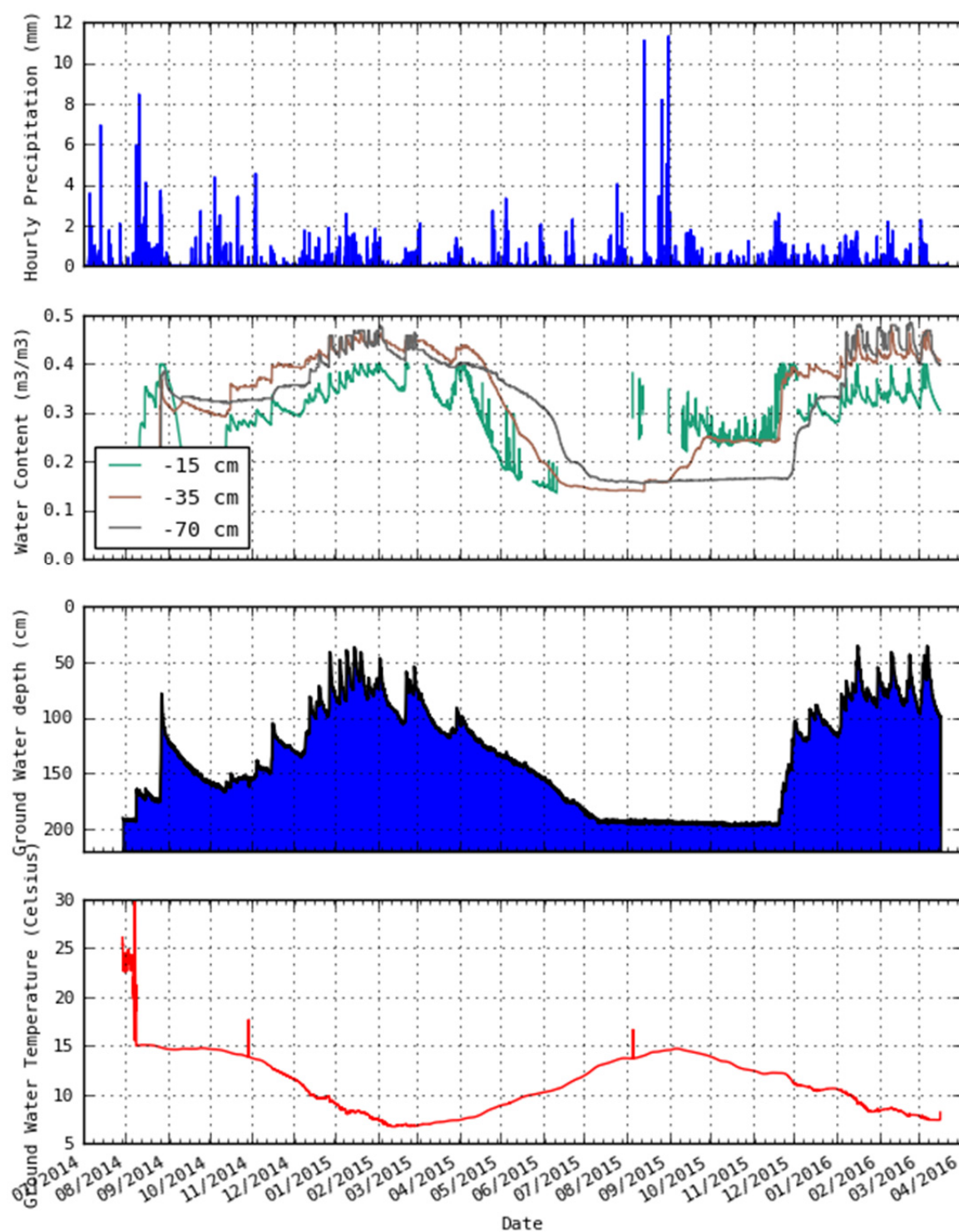
Zoals in Tabel 6.1 aangegeven, had het middendeel van perceel P een zandlemige bovengrond, een verdichte ondergrond (L) en een licht-zandlemige diepere ondergrond (P). Het organisch-koolstofgehalte bedroeg 1,14, 1,06 en 0,22% op 15, 35 en 70 cm-mv diepte. De BD op deze diepten was respectievelijk 1,505, 1,577 en 1,551 Mg m⁻³ (Annex). Dit komt overeen met een poriënvolume van respectievelijk 0,43, 0,40 en 0,41 m³ m⁻³. De BD in de verdichte ondergrond (en in iets mindere mate in de diepere ondergrond) leunde dus dicht aan bij de grenswaarde. Dit wordt bevestigd door de indringingsweerstandprofielen die een gemiddelde Iw van >4 MPa op 35 cm-mv diepte tonen (Annex). Onder de 60 cm-mv diepte bleef Iw nog >3 MPa te bedragen. Op 10 cm diepte was Iw ~1,6 MPa. Tijdens 2014 en 2015 lag perceel P onder gras (dat werd gezaaid in september 2013 en afgereden in juli, augustus, september 2014 en juli, augustus, september 2015).

Zoals verwacht, reageerde het vochtgehalte het sterkst op de neerslag in de bovengrond (10 cm-mv). De schommelingen waren echter vrij beperkt (Figuur 6.3). Dit is zeker zo in de verdichte ondergrond (35 cm-mv). In de diepere ondergrond (70 cm-mv) blijkt het vochtgehalte vanaf begin mei 2015 duidelijk af te nemen. Vanaf dat ogenblik zakte de grondwatertafel onder de 130 cm-mv. Ook hier werd het vochtgehalte in de ondergrond wellicht volledig bepaald door de diepte van de grondwatertafel. Duidelijk is ook de sterke respons van de grondwaterstand op de neerslag, vooral wanneer de grondwatertafel vrij ondiep lag (winter, lente en herfst).

Het veld lag er van half oktober 2014 tot eind april 2015 vrij nat bij, ook in de bovengrond. Vanaf half november 2014 zakte het luchtgehalte in de bovengrond onder de grenswaarde van 0,1 m³ m⁻³, om pas vanaf eind april 2015 weer groter te worden. In de verdichte ondergrond was het luchtgehalte pas vanaf begin mei groter dan de grenswaarde en in de diepere ondergrond was dit vanaf juni.

De hoge vochtgehalten in de bovengrond en de verdichte ondergrond die gedurende een groot deel van het jaar werden waargenomen, kunnen het gevolg zijn van capillaire nalevering, zoals dat ook op grotere diepte wellicht het geval was. Ook valt te zien dat zelfs wanneer de grondwatertafel tot op 100 cm-mv was gezakt (begin mei 2015), de bodem begin april 2015 quasi verzadigd was, ook op 10 cm-mv diepte. Het water zakte wel vrij snel uit. Dergelijke hoge waarden werden niet meer vastgesteld begin mei, na de abnormaal hoge regenval van de eerste decade van 2015 (KMI, 2015), wanneer de grondwatertafel al tot 130 cm-mv was gezakt. Verder daalde in het voorjaar na een regenbui het vochtgehalte in de bovengrond wanneer verdamping beperkt is en zakte het water ook in die periode wellicht uit. Het uitzakken van water in de verdichte ondergrond verliep op dit perceel relatief traag, wat een gevolg kan zijn van capillaire nalevering, maar ook van minder snelle drainage. In de verdichte ondergrond was er wel een duidelijke daling van het vochtgehalte in mei en juni 2015. Op dit zandlemig tot licht-zandlemig perceel is het minder duidelijk in welke mate bodemverdichting de waterhuishouding beïnvloedde.

Reference site P



Figuur 6.3 Verloop van neerslag, bodemvochtgehalte (op drie diepten), grondwaterstand en grondwatertemperatuur met de tijd op perceel P.

6.3.4 Perceel L

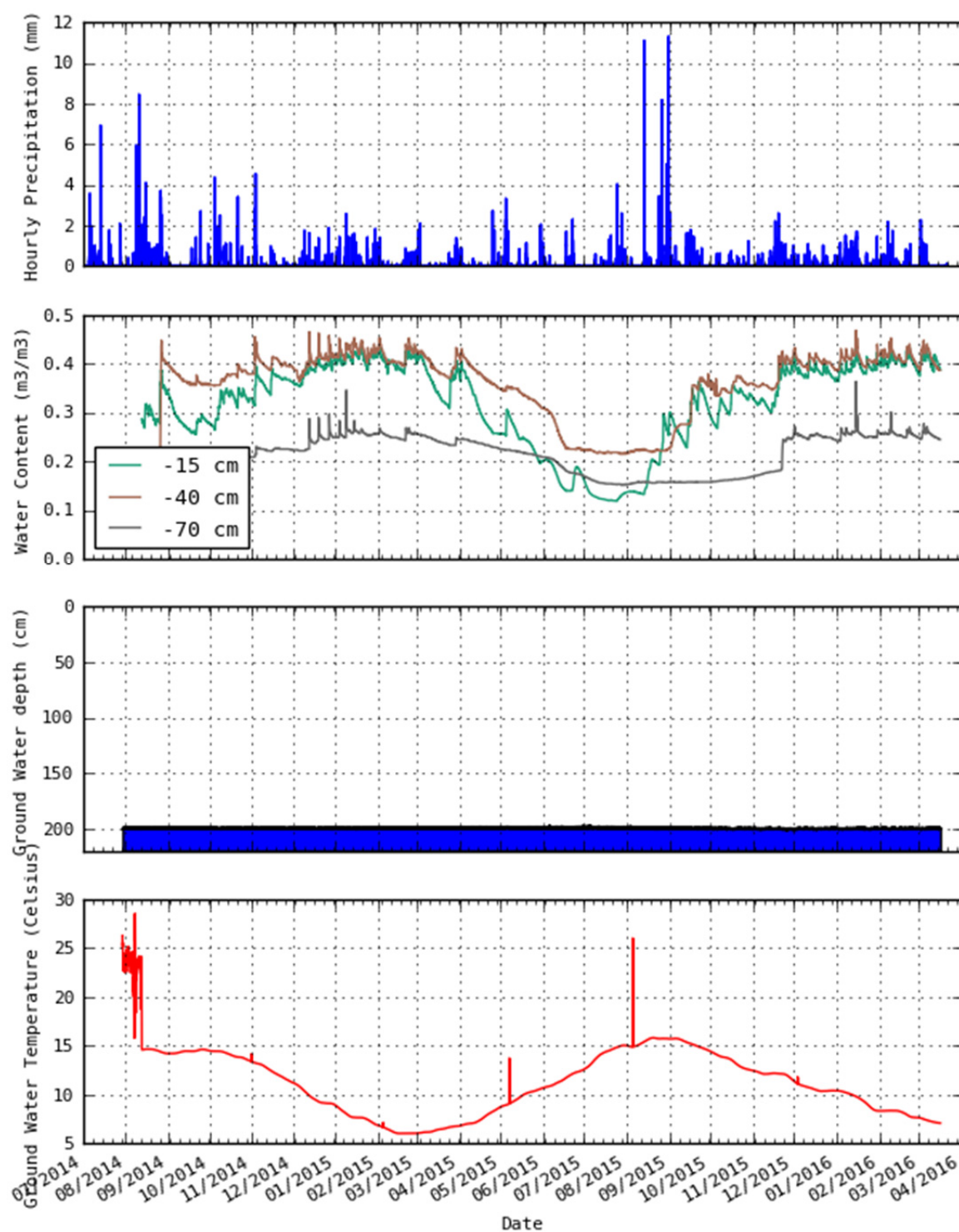
Zoals in Tabel 6.1 aangegeven, had het middendeel van perceel P een vrij homogeen textuurprofiel met in elke horizont een lemige textuur (A), al nam het kleigehalte wel toe met de diepte (9,2, 13,3 en 17,7%, voor respectievelijk bovengrond, verdichte ondergrond en ondergrond). Het organisch-koolstofgehalte bedroeg 1,02, 0,43 en 0,20% op 15, 40 en 70 cm-mv diepte. De BD op deze diepten was respectievelijk 1,377, 1,482 en 1,547 Mg m⁻³ (Annex). Dit komt overeen met een poriënvolume van respectievelijk 0,48, 0,44 en 0,42 m³ m⁻³. De BD in de diepere ondergrond was dus hoger dan in de verdichte ondergrond, wat wordt bevestigd door de indringingsweerstandprofielen die een gemiddelde Iw van ~3,5 MPa op 40 cm-mv diepte tonen en van ~3,8 MPa op 70 cm-lv (Annex). Op 10 cm diepte was Iw <1 MPa. Van oktober 2014 tot juli 2015 werd op perceel L gerst (*Hordeum vulgare* L.) geteeld.

Zoals verwacht, reageerde (Figuur 6.4) het vochtgehalte het sterkst op de neerslag in de bovengrond (10 cm-mv). De schommelingen zijn echter ook waarneembaar in de verdichte ondergrond (40 cm-mv) en zelfs in de diepere ondergrond (70 cm-mv). Gezien de grondwatertafel gedurende de hele meetperiode onder de 200 cm-mv bleef, was het effect van capillaire nalevering op de waargenomen vochtgehalten in dit perceel beperkt tot onbestaande. Vanaf april 2015 begon het vochtgehalte af te nemen in zowel de bovengrond als de verdichte ondergrond. De diepere ondergrond, die nochtans kleirijker is dan de bovengrond en verdichte ondergrond (respectievelijk, 17,7, 9,2 en 13,3%), vertoonde doorgaans een lager vochtgehalte.

Het veld lag er van half oktober 2014 tot april 2015 vrij nat bij, ook in de bovengrond. In die periode lag het luchtgehalte in de bovengrond onder de grenswaarde van 0,1 m³ m⁻³. Gelet op het lagere poriënvolume in de verdichte ondergrond was het luchtgehalte er pas vanaf juni groter dan de grenswaarde. In de diepere ondergrond bleef het luchtgehalte gedurende de hele meetperiode gunstig.

De vochtgehalten in de bovengrond en de verdichte ondergrond waren gedurende een groot deel van het jaar vrij hoog, ook al was de capillaire nalevering daar beperkt. Zeker in de verdichte ondergrond benaderde het vochtgehalte het poriënvolume en bleef de bodem dus heel nat. Het water leek wel uit de zakken na regen. Dergelijke hoge waarden worden niet meer vastgesteld begin mei, na de abnormaal hoge regenval van de eerste decade van 2015 (KMI, 2015). Verder nam in het voorjaar wanneer verdamping beperkt is het vochtgehalte in de bovengrond na een regenbui ook af en zakte het water ook in die periode wellicht uit. Het uitzakken van water in de verdichte ondergrond verliep op dit perceel relatief traag wat een gevolg kan zijn van minder snelle drainage. In de verdichte ondergrond was er wel een duidelijke daling van het vochtgehalte in mei en juni 2015. Op dit lemig perceel lijken de hoge vochtgehalten in het najaar tot voorjaar deels te wijten aan mindere drainage. Of dit te wijten is aan bodemverdichting of aan de intrinsiek mindere doorlatendheid van de lemige bodem valt niet eenduidig te verklaren.

Reference site L



Figuur 6.4 Verloop van neerslag, bodemvochtgehalte (op drie diepten), grondwaterstand en grondwatertemperatuur met de tijd op perceel L.

6.3.5 Perceel A

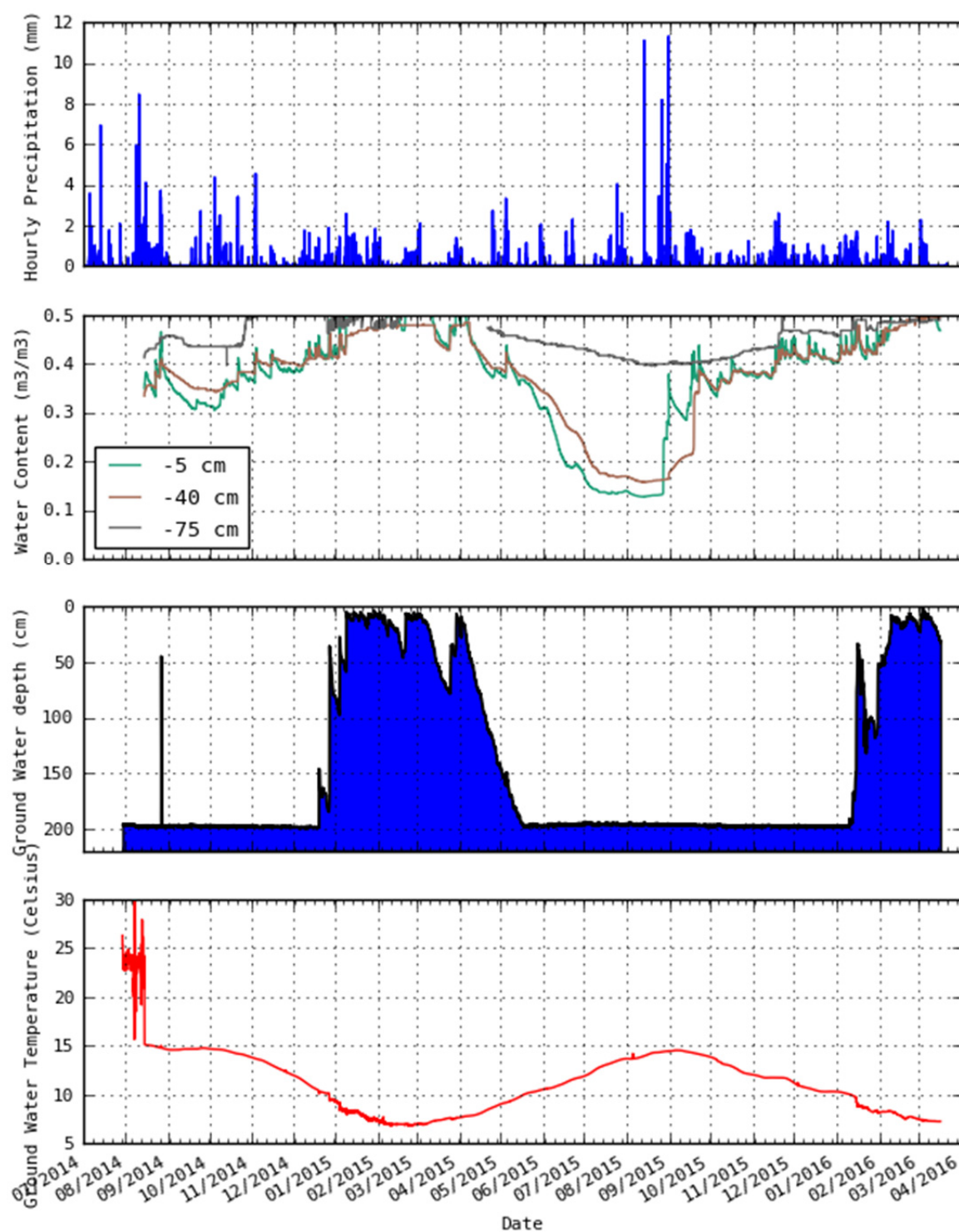
Zoals in Tabel 6.1 aangegeven, had het middendeel van perceel A een vrij homogeen textuurprofiel met in elke horizont een lemige textuur (A), al nam het kleigehalte wel toe met de diepte (10,1, 11,5 en 17,2%, voor respectievelijk bovengrond, verdichte ondergrond en ondergrond). Het organisch-koolstofgehalte bedroeg 1,14, 0,57 en 0,08% op 15, 40 en 75 cm-mv diepte. De BD op deze diepten was respectievelijk 1,386, 1,460 en 1,496 Mg m⁻³ (Annex). Dit komt overeen met een poriënvolume van respectievelijk 0,48, 0,45 en 0,43 m³ m⁻³. Ook hier was de BD in de diepere ondergrond iets hoger dan in de verdichte ondergrond, wat wordt bevestigd door de indringingsweerstandprofielen die een gemiddelde Iw van ~2,3 MPa op 40 cm-mv diepte tonen en van ~2,1 MPa op 70 cm-lv (Annex). Op 10 cm diepte was Iw <1 MPa. Perceel A is het minst verdichte perceel van de zes referentiepercelen. Van begin september 2014 tot begin juli 2015 werd op perceel A gerst (*Hordeum vulgare* L.) geteeld.

Zoals verwacht, reageerde (Figuur 6.5) het vochtgehalte het sterkst op de neerslag in de bovengrond (10 cm-mv). De beperkte schommelingen zijn echter ook waarneembaar in de verdichte ondergrond (40 cm-mv). In de diepere ondergrond (80 cm-mv) bleef het vochtgehalte nagenoeg onveranderd en bleef de bodem quasi verzadigd, ook al lag de grondwatertafel tussen half mei en half december onder 200 cm-mv. Vanaf april 2015 begon het vochtgehalte af te nemen in zowel de bovengrond als de verdichte ondergrond.

Het veld lag er van half oktober 2014 tot mei 2015 vrij nat bij, ook in de bovengrond. In die periode lag het luchtgehalte in de bovengrond onder de grenswaarde van 0,1 m³ m⁻³. Gelet op het lagere poriënvolume in de verdichte ondergrond was het luchtgehalte er pas vanaf half mei groter dan de grenswaarde. In de diepere ondergrond bleef het luchtgehalte gedurende de hele meetperiode ongunstig. Dit kan dus wijzen op een blijvend zuurstoftekort in de ondergrond.

De vochtgehalten in de bovengrond en de verdichte ondergrond waren gedurende een groot deel van het jaar vrij hoog, ook in periodes waarin er wellicht geen of beperkte capillaire nalevering was. Zeker in de dichtere ondergrond benaderde het vochtgehalte het poriënvolume en bleef de bodem dus heel nat. Het water leek wat uit de zakken na regen. Dergelijke hoge waarden werden ook hier begin mei niet meer vastgesteld, na de abnormaal hoge regenval van de eerste decade van 2015 (KMI, 2015). Verder nam in het voorjaar, wanneer verdamping beperkt is, het vochtgehalte in de bovengrond ook af na een regenbui en zakte het water ook in die periode wellicht uit. Het uitzakken van water in de verdichte ondergrond verliep op dit perceel relatief traag, wat een gevolg kan zijn van minder snelle drainage. In de verdichte ondergrond is er een duidelijke daling van het vochtgehalte in mei en juni 2015. Op dit lemige perceel lijken de hoge vochtgehalten in het najaar en voorjaar deels te wijten aan mindere drainage. Opvallend is toch wel dat op dit minst verdichte lemige perceel de waterhuishouding vrij gelijk verloopt als dat op de andere percelen en zeker in vergelijking met het iets meer verdichte perceel L. Dit kan erop wijzen dat verdichting op de onderzochte percelen een beperkte invloed had op de waterhuishouding.

Reference site A



Figuur 6.5 Verloop van neerslag, bodemvochtgehalte (op drie diepten), grondwaterstand en grondwatertemperatuur met de tijd op perceel A.

6.3.6 Perceel E

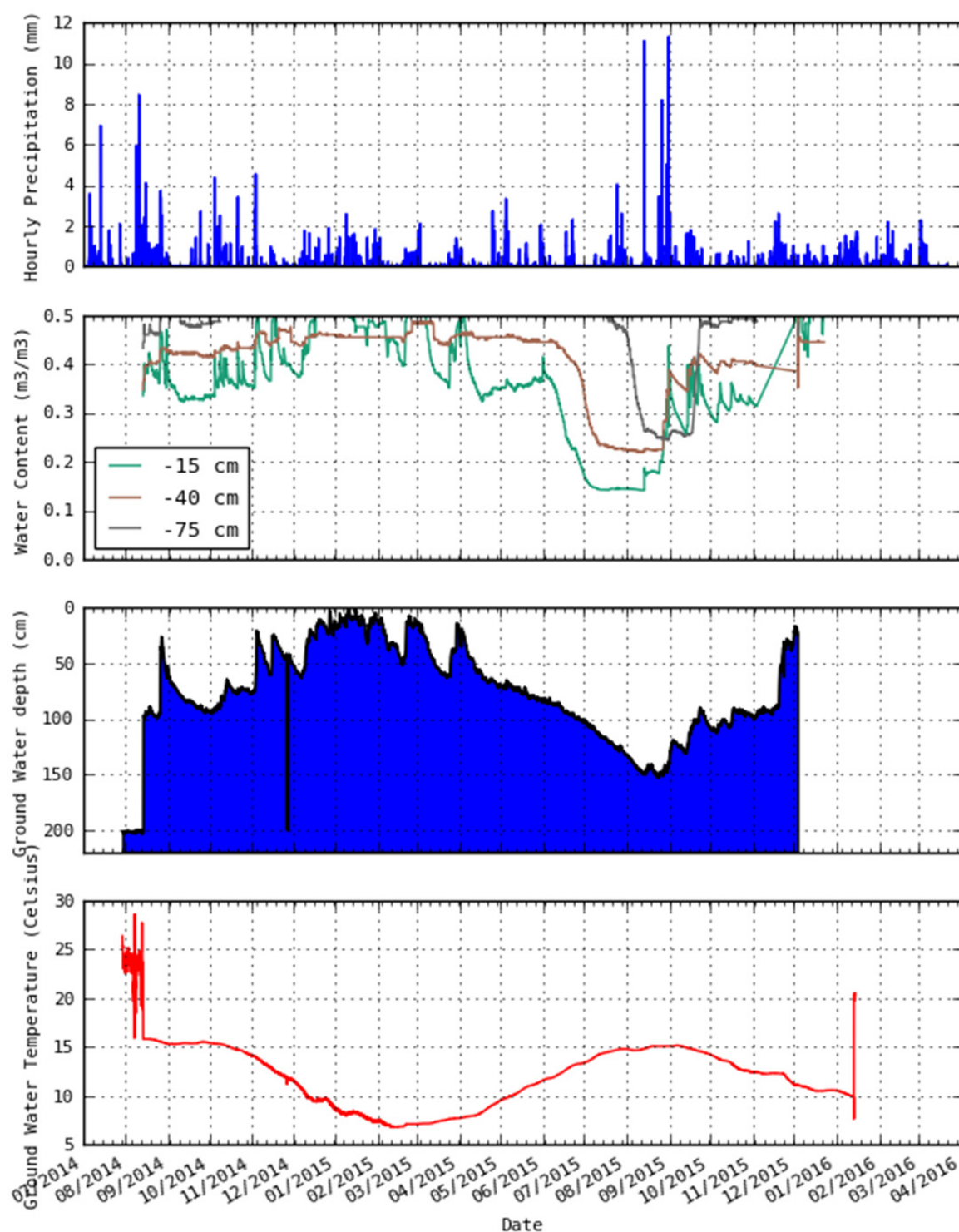
Zoals in Tabel 6.1 aangegeven, had het middendeel van perceel E een vrij homogeen textuurprofiel met in elke horizont een zandlemige textuur (L). Het organisch-koolstofgehalte bedroeg 1,22, 0,86 en 0,35% op 15, 45 en 75 cm-mv diepte. De BD op deze diepten was respectievelijk 1,326, 1,522 en 1,449 Mg m⁻³ (Annex). Dit komt overeen met een poriënvolume van respectievelijk 0,50, 0,42 en 0,45 m³ m⁻³. Dit wordt bevestigd door de indringingsweerstandprofielen die een gemiddelde Iw van ~3 MPa op 45 cm-mv diepte tonen en ~2 MPa op 75 cm-mv diepte (Annex). Op 10 cm diepte was Iw ~1,2 MPa. Tijdens 2014 en 2015 werd op perceel E respectievelijk wintertarwe (*Triticum aestivum* L.) en bieten (*Beta vulgaris* L.) (van april en tot begin november) geteeld.

Zoals verwacht, reageerde het vochtgehalte het sterkst op de neerslag in de bovengrond (10 cm-mv). De schommelingen waren echter vrij beperkt (Figuur 6.6). Dit is zeker zo in de verdichte ondergrond (45 cm-mv) waar schommelingen nagenoeg ontbraken. In de diepere ondergrond (80 cm-mv) veranderde het vochtgehalte vrijwel niet en bleef de bodem quasi verzadigd, met uitzondering van de maanden augustus en september 2015. Vanaf het ogenblik dat de grondwatertafel onder de 130 cm-mv zakte, zakt het vochtgehalte op 80 cm-mv. Er was dus waarschijnlijk sterke waternalevering tot op minstens 80 cm-mv diepte. Duidelijk is ook de sterke respons van de grondwaterstand op de neerslag, vooral wanneer de grondwatertafel vrij ondiep lag (winter, lente en herfst).

Het veld lag er tot zeker april vrij nat bij. De grondwatertafel reikte dan bijna tot aan het maaiveld. Vanaf april 2015 lijkt het luchtgehalte in de bovengrond boven de grenswaarde van 0,1 m³ m⁻³ uit te komen. In de verdichte ondergrond oversteeg het luchtgehalte de grenswaarde pas vanaf half juni 2015. Dit kan dus wijzen op een zuurstoftekort in de ondergrond gedurende een lange periode.

Deze hoge vochtgehalten in de bovengrond en de verdichte ondergrond kunnen het gevolg zijn van capillaire nalevering, zoals dat ook op grotere diepte wellicht het geval was. Het uitzakken van water in de verdichte ondergrond verliep op dit perceel relatief traag, wat een gevolg kan zijn van capillaire nalevering, maar ook van minder snelle drainage. Op dit zandlemig perceel is het minder duidelijk in welke mate bodemverdichting de waterhuishouding beïnvloedde.

Reference site E



Figuur 6.6 Verloop van neerslag, bodemvochtgehalte (op drie diepten), grondwaterstand en grondwatertemperatuur met de tijd op perceel E.

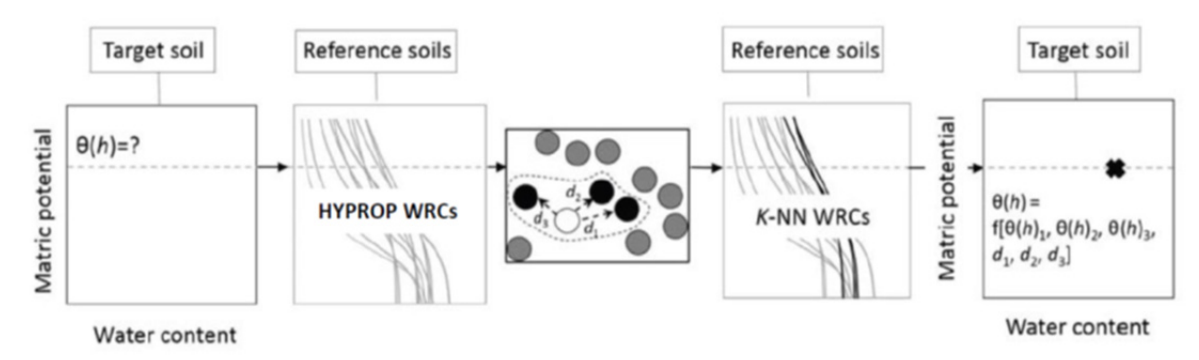
7 Modelleren watertransport in verdichte bodems

7.1 Nieuwe pedotransferfuncties

Nieuwe pedotransferfuncties voor de waterretentie- en doorlatendheidscurve die de actuele bodemtoestand in Vlaanderen weerspiegelen, worden opgesteld op basis van de opgemeten bodemeigenschappen als mogelijk verklarende parameters.

Voor de ontwikkeling van de pedotransferfuncties werd gebruikgemaakt van de k-dichtste burenmethode (k Nearest Neighbour k-NN). De k-NN methode is een zeer attractieve datamining-techniek die toelaat om wanneer nieuwe data beschikbaar komen, deze realtime aan te wenden zonder dat nieuwe functies moeten worden opgesteld. De methode werd recentelijk toegepast aan UGent voor het voorspellen van bulkdichtheid (Gharahi Ghehi *et al.*, 2012; Botula *et al.*, 2015) en waterretentiecurve (Botula *et al.*, 2013; Haghverdi *et al.*, 2015; Nguyen *et al.*, 2015). Zoals in hoofdstuk 4 aangegeven, werd geopteerd voor zgn. punt-pedotransferfuncties, waarbij punten van de vochtretentie- of van de doorlatendheidscurves worden geschat. Er worden m.a.w. respectievelijk vochtgehalten of doorlatendheden bij vooraf geselecteerde vochtspanningen (pF-waarden) geschat.

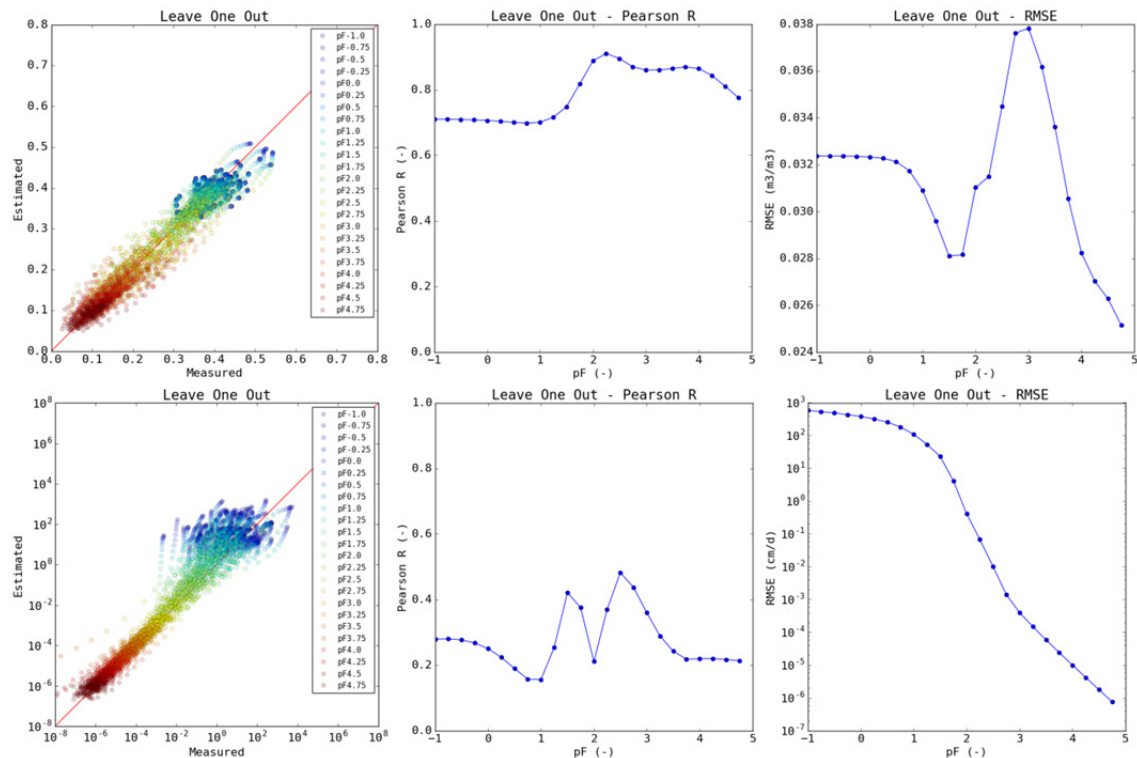
Om de pedotransferfuncties op te stellen, werd de volgende procedure doorlopen. Eerst selecteert het k-NN-algoritme een aantal (k) stalen uit de training-dataset die gelijkaardig zijn aan het input-staal. Dit gebeurt door de euclidische afstand tussen het input-staal en deze van de training-dataset te berekenen op basis van de attributen. Vervolgens wordt een gewogen gemiddelde genomen (op basis van de euclidische afstand) van de geselecteerde stalen om een voorspelling te maken voor het input-staal. De procedure wordt samengevat in Figuur 7.1. Voor meer details met betrekking tot de procedure, zie Botula *et al.* (2013).



Figuur 7.1 Grafische illustratie van de k-NN procedure. Witte cirkel = input-staal, zwarte cirkels/curves = k dichtste burens, grijze curves = training-dataset (hier k = 3) (aangepast van Haghverdi *et al.*, 2015).

Om de methode te valideren, werd een 'leave-one-out'-validatie uitgevoerd. In deze procedure wordt één staal verwijderd uit de training-dataset en vervolgens wordt een voorspelling voor dit punt gemaakt. Dit wordt herhaald voor elke staal in de dataset. Door de voorspelde waarden te vergelijken met de gemeten waarde, kunnen validatie-indices zoals Pearson r en RMSE bepaald worden om de performantie van de k-NN-pedotransferfunctie te bepalen. Hier werd een validatie uitgevoerd voor de voorspelling van de punten op de vochtretentiecurve en doorlaatbaarheidscurve bij bodemvochtspanningen in een range tussen pF -1 en pF 5, geschat op basis van textuur en OM. Aangezien verder in deze studie de Aardewerk-database gebruikt zal worden om schattingen van de niet-verdichte situatie te maken, is de bulkdichtheid niet meegenomen in deze pedotransferfunctie. De

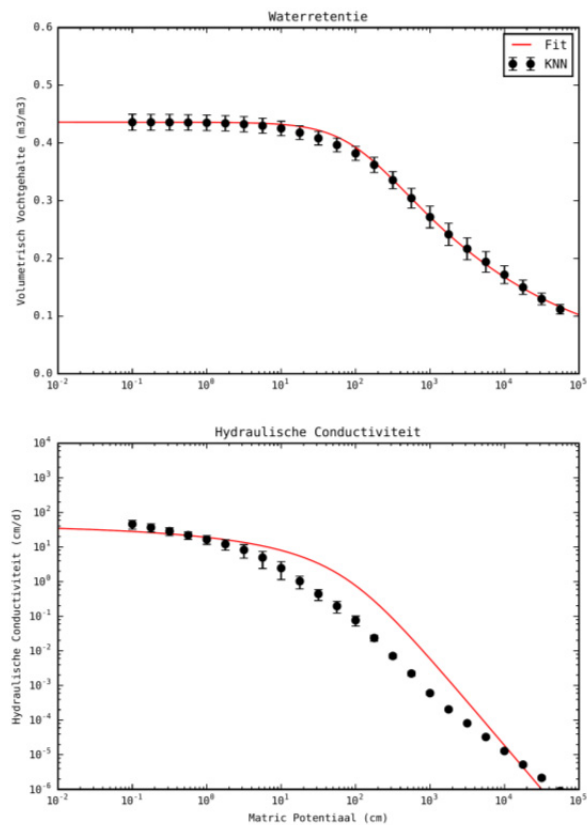
resultaten worden getoond in Figuur 7.2. De validatieresultaten geven een indicatie of de voorspellingen met k-NN op basis van de training-dataset aanvaardbaar zijn.



Figuur 7.2 Validatieresultaten voor waterretentie (boven) en doorlatendheid (onder), geschat met k-NN op basis van textuur en OM.

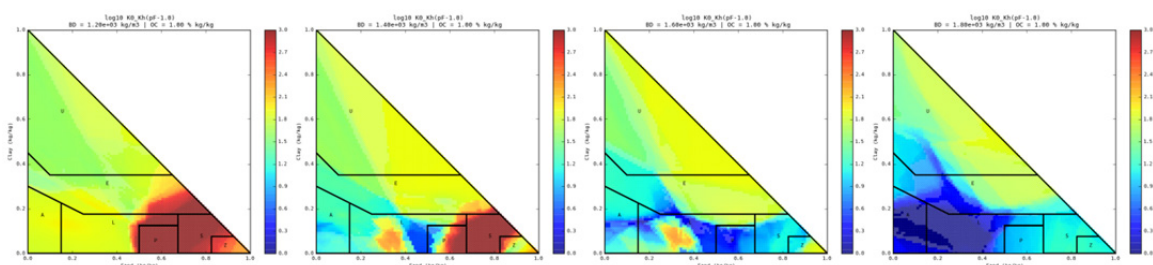
Deze pedotransferfunctie kan ingezet worden om de hydraulische eigenschappen van landbouwbodems voor Vlaanderen te schatten. De input-data is afkomstig van de Aardewerk-database, die textuur- en OM-data bevat voor Vlaanderen. Aan de k-NN- pedotransferfunctie werd verder een 'bootstrapping'-procedure toegevoegd. Dit houdt in dat met de k-NN een aantal voorspellingen worden gemaakt op basis van gerandomiseerde subsets van de training-dataset. Door enerzijds het gemiddelde te nemen van deze set van voorspellingen wordt een finale voorspelling bekomen, gelijkaardig aan degene die wordt verkregen wanneer de ganse dataset zou worden gebruikt voor de voorspelling. Anderzijds laat het bepalen van de variantie van de set van de voorspellingen toe de onzekerheid van de voorspelling in te schatten.

Aan de geschatte punten van de waterretentie- en de doorlatendheidscurve werd vervolgens het van Genuchten/Mualem-model gefit (met $m = 1-1/n$), zodat deze rechtstreeks in de SWAP-versie van het Vlaanderen-model gebruikt kunnen worden. Hiervoor werd een procedure gebruikt analoog als deze beschreven in hoofdstuk 4 (waarbij dus in dit geval het van Genuchten/Mualem-model simultaan werd gefit aan de met de pedotransferfunctie gegenereerde waterretentie- en doorlatendheidspunten). Figuur 7.3 geeft een resultaat als voorbeeld.

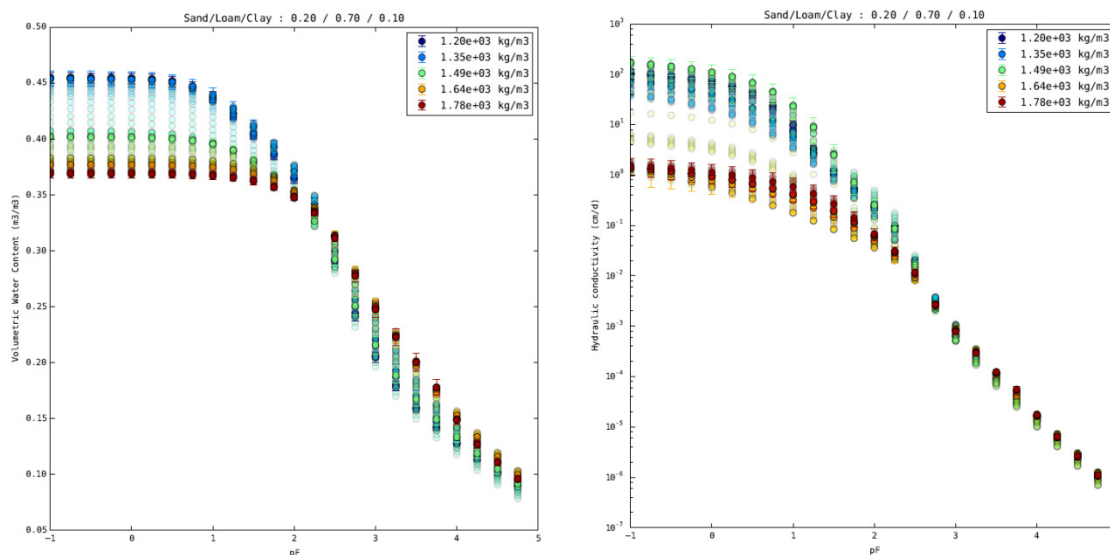


Figuur 7.3 Schatting van waterretentie en doorlatendheid met k -NN op basis van textuur en OM. De onzekerheidsvlaggen zijn de standaarddeviaties uit de bootstrapping-procedure. De rode curve is het gefitte van Genuchten/Mualem-model.

Indien bulkdichtheid toegevoegd wordt aan deze pedotransferfunctie is het mogelijk om scenario's met verschillende gradaties van verdichting te testen. De hypothetische bulkdichtheden moeten evenwel binnen het bereik van de training-dataset liggen. Extrapolatie is immers onmogelijk met k -NN. In Figuur 7.4a wordt het effect geïllustreerd van voorspellingen met bulkdichtheden tussen 1200 kg m^{-3} en 1800 kg m^{-3} voor verzadigde doorlatendheid. Figuur 7.4b illustreert een voorbeeld dat aantoont dat de pedotransferfuncties voor zowel de waterretentie- als de doorlatendheidscurve responsief zijn op bulkdichtheid, althans in het 'natte' traject nabij verzadiging.



Figuur 7.4a Gebruik van de k -NN- pedotransferfunctie om het effect van bulkdichtheid op verzadigde doorlatendheid te illustreren.



Figuur 7.4b Voorbeeld van voorspelde waterretentiecurve (links) en doorlatendheidscurve (rechts) voor een bodem met een zand-, leem- en kleigehalte van respectievelijk 20, 70 en 10% bij zes verschillende bulkdichtheden.

7.2 Simuleren effecten bodemverdichting

De effecten van bodemverdichting zijn gesimuleerd met het fysisch transportmodel SWAP (Van Dam et al, 2008; Kroes et al., 2008). SWAP simuleert de waterbeweging in de onverzadigde en verzadigde zone op basis van de Richards' vergelijking en is daardoor in staat de effecten van veranderingen in bodemeigenschappen als gevolg van verdichting te kwantificeren. Met SWAP is de waterhuishouding in situaties met bodemverdichting gesimuleerd: de effecten van de wijzigingen in de parameters zijn evident en de waargenomen respons van de grondwatervoeding blijkt adequaat te kunnen worden gesimuleerd (Feddes et al., 1988; Van den Akker et al., 2009; Van den Akker et al. 2012; Van Dijk en Miltenburg 2013; Swart en Broos, 2013; Hendriks et al., in voorbereiding).

7.2.1 Werkwijze

Voor de zes in Hoofdstuk 5 beschreven percelen zijn daartoe perceel-specifieke SWAP-modellen opgezet waarin de lokale veldomstandigheden zo goed mogelijk zijn nagebootst door behalve de perceel-specifieke bodemfysische eigenschappen, ook de lokale karakteristieken van de bodem en het gewas in het model te verwerken. De bij deze percelen horen de bodem-vochttoestand combinaties uit het Vlaanderen-model van VITO zijn daarbij als basis genomen. De schematisering en parametrisering uit het Vlaanderen-model zijn vervolgens perceel-specifiek gemaakt door:

- voor de neerslag een beschikbare regionale reeks met waarnemingen per uur te gebruiken;
- de bodemhorizonten aan te passen aan de veldsituatie en ook de verdichte laag expliciet te definiëren;
- de voor deze studie gemeten hydraulische parameters te gebruiken.

Omdat voor veld P Deinze goede meetgegevens beschikbaar zijn en omdat de gewasgegevens (in dit geval het snijden van het gras) hier redelijk bekend zijn, is eerst ervaring opgedaan met dit perceel en zijn de opgedane kennis en ervaring gebruikt als leidraad voor de aanpak van de andere vijf velden. De plek waar de metingen zijn uitgevoerd, het centrum van het perceel, is gemodelleerd voor de periode waarin de continue metingen hebben plaatsgevonden (start 29 juli 2014) waarbij deze wordt voorafgegaan door een aanlooperperiode (start 1 januari 2014). De rekenresultaten zijn getoetst aan de gemeten vochtgehalten.

7.2.1.1 Modelkolom

De modelkolom is 3 m diep. De 3 horizonten van Tabel 2.1 zijn onderscheiden op basis van de waarnemingen waarbij de diepste horizont doorloopt tot de onderrand van de kolom op 3 m diepte. De kolom is onderverdeeld in 300 modelcompartimenten van 1 cm dik.

De bodemeigenschappen van Tabel 2.1 zijn eveneens toegekend aan de drie horizonten: textuurgegevens en organische stofgehalte voor de bepaling van de warmtecapaciteit en het warmtegeleidingsvermogen voor het berekenen van de bodemtemperatuur, en de bulkdichtheid voor de berekening van de zuurstofbeschikbaarheid voor plantenwortels in WOFOST.

7.2.1.2 Parameters

SWAP vraagt als invoerdata neerslaggegevens, meteorologische gegevens en gewasgegevens voor de berekening van de evapotranspiratie en bodemeigenschappen. Als onderrand zijn de gemeten grondwaterstanden gebruikt. Deze data zijn afkomstig uit de volgende bronnen:

1. neerslag: op uurbasis van neerslagstations in omgeving van meetlocaties (zie Tabel 7.1);
2. meteorologische gegevens: meteostation Waregem en berekende globale straling;
3. gewasgegevens:
 - gewasrotatie per locatie uit de beschrijvingen van de percelen van Universiteit Gent;
 - gewaseigenschappen: standaardwaarden uit SWAP-gewas-bestanden en WOFOST-bestanden en kalibratie van de gewasfactoren op de gemeten vochtgehalten.
4. bodemeigenschappen:
 - profielopbouw in drie lagen TOP, cSUB en SUB uit bestand Albon_AllHydraulic.txt van Universiteit van Gent;
 - bewortelingsdiepte (door verdichte laag meer bodem- dan gewaseigenschap), idem;
 - hydraulische kenmerken in tabelvorm ('K0') als gefitte curven van Universiteit van Gent in de bestanden Gemeten Ksat-waarden voor modelexperimenten met deze waarden zijn verkregen uit de vergelijkbare tabellen met code KS i.p.v. K0;
 - textuurkenmerken uit bestand Albon_AllHydraulic.txt voor berekening thermische geleidbaarheid en warmtecapaciteit voor berekening bodemtemperatuur;
 - overige parameterwaarden: de default waarden of waarden uit vergelijkbare simulaties.
5. grondwaterstand als onderrand van het SWAP-model: de per uur gemeten grondwaterstanden van Universiteit Gent, gecompriemd tot daggemiddeldes (SWAP heeft een waarde per dag);
6. de op drie diepten gemeten volumetrische vochtgehalten om het model aan te toetsen: gemeten waarden per uur van Universiteit van Gent, gecompriemd tot vier 6 uren-medianen per dag om hoeveelheid ruis en uitbijters te elimineren. De 6 uren-medianen zijn vergeleken met SWAP-uitkomsten op 3:00, 9:00, 15:00 en 21:00 uur van elke dag.

Voor elk perceel is steeds de situatie van de meetperiode doorgerekend. Deze begon rond 1 augustus 2014 en eindigde 3 december 2015. Voor deze periode waren meetgegevens van grondwaterstanden en vochtgehalten beschikbaar. De gemeten grondwaterstanden zijn in het model opgelegd als onderrandvoorwaarde. Voor perceel L Roborst zijn geen gemeten grondwaterstanden beschikbaar, omdat deze zich onder de ondergrens van de metingen van 200 cm diepte bevonden. Daar is de grondwaterstand vastgezet op 300 cm diepte. In de berekeningen is de periode 1 januari 2014 tot het begin van de meetperiode als aanlooperperiode meegenomen. Hierbij is, met uitzondering van L Roborst, als begingrondwaterstand 100 cm beneden maaiveld gebruikt om deze vanaf 2 januari lineair af te laten nemen naar de eerste meetwaarde rond 1 augustus 2014. Tabel 7.1 geeft gebruikte kentallen voor de zes percelen.

Tabel 7.1

Kenmerken van de 6 percelen met Θ_{sat} en K_{sat} uit de K0-tabellen.

Textuur- klasse	Locatie- naam	Neerslag- station	Profiellagen		Θ_{sat} (m ³ /m ³)	K_{sat} (cm/d)	M&Bdpt ¹⁾ (cm)	Gewasrotatie in 2014-2015 ²⁾
			code	diepte (cm)				
A Leem	Baai- gem	Zingem	Top	0-34	0,430	5,62	5	2014: <u>zomertarwe</u> ; opkomst 1 mei,
			cSUB	34-44	0,384	2,04	40 40	oogst 1 november
			SUB	44-80	0,408	0,14	75	2015: <u>gerst</u> (wintertarwe); opkomst 2 november 2014, oogst 16 juli 2015
E Klei	Ouden- aarde	Zingem	Top	0-29	0,438	5,16	15	2014: <u>zomertarwe</u> ; opkomst 1 mei,
			cSUB	29-41	0,391	1,06	40	oogst 30 augustus
			SUB	41-80	0,432	1,51	75 50	2015: <u>bieten</u> (aardappelen); opkomst 1 mei, oogst 1 november
L Zand- leem	Roborst	Maarke- Kerkem	Top	0-35	0,441	5,12	15	2014: <u>gerst</u> (wintertarwe); opkomst
			cSUB	35-49	0,455	3,94	40	2013, oogst 1 juli 2014)
			SUB	49-80	0,416	14,4	70 55	2015: <u>gerst</u> (w.tarwe); opkomst 1 nov. 2014, oogst 1 juli 2015; rest van 2015 <u>groenbemester</u> (gras)
P Licht zand- leem	Deinze	Sint-Baafs- Vijve	Top	0-28	0,445	16,0	15	2014 en 2015: <u>gras</u> ; gehele jaar door,
			cSUB	28-44	0,393	6,34	35 40	3 sneden: 21 juli, 21 augustus en
			SUB	44-80	0,433	3,27	70	21 september
S Lemig zand	Kruis- houtem	Sint-Baafs- Vijve	Top	0-41	0,442	5505,4	15 35	2014: <u>aardappelen</u> ; opkomst 15
			cSUB	41-49	0,308	1,30	45	maart, oogst 10 september
			SUB	49-80	0,383	42,8	80	2015: <u>gerst</u> (wintertarwe); opkomst 10 september 2014, oogst 15 juni. Rest van 2015: <u>gras</u>
Z Zand	Zever- gem	Zingem	Top	0-31	0,368	94,1	10	2014: <u>aardappelen</u> ; opkomst 15
			cSUB	31-49	0,333	3,52	30 35	maart, oogst 10 september
			SUB	49-80	0,367	30,6	80	2015: <u>mais</u> ; opkomst 20 april, oogst 15 oktober

¹⁾ Meetdiepte vochtgehalten en bewortelingsdiepte.

²⁾ Gewassen tussen haakjes zijn gebruikt in SWAP als benadering van werkelijke gewassen.

7.2.1.3 Modelling

De modellering is uitgevoerd met SWAP versie 3.2.51 in combinatie met bij voorkeur het gewasgroeimodel WOFOST. Er wordt liefst voor WOFOST gekozen boven de 'eenvoudige gewas module', omdat effecten van verdichting op verdamping (en gewasproductie) belangrijk kunnen zijn.

Omdat de neerslag per uur is opgelegd, is voor de maximale tijdstapgrootte 0,05 dag genomen. Met de standaardinstelling (10^{-7} dag) voor de minimale tijdstapgrootte bleek rekenen met de tabellenoptie in SWAP voor de gebruikte hydraulische karakteristieken tot numerieke instabiliteiten te kunnen leiden. Door verhogen van de minimale tijdstapgrootte naar 10^{-6} dag werd dit verholpen en rekende het model aanzienlijk sneller.

7.2.1.4 Kalibratie

De eerste berekeningen zijn gebruikt om de modellen per perceel te kalibreren. Deze berekeningen zijn gedaan met de K0-tabellen die als het representatiefst zijn gezien voor de hydraulische karakteristieken van de velden. De onzekerheid in de modelinvoer zit, aangezien er weinig bekend is

van de gewassen, vooral in de gewasparameters, zoals groeiperiode (exacte moment van opkomst, moment van oogsten), (ontwikkeling in de tijd van de) worteldiepte, gewashoogten en -opbrengsten, eventuele berekening etc. Voor sommige gewassen waren er globale aanwijzingen voor bepaalde kenmerken. Die zijn samen met algemene kennis van de gewassen geïnterpreteerd tot de gebruikte informatie over gewasrotatie in Tabel 7.1.

Voor de bewortelingsdiepte is de aanwijzing voor de worteldiepte uit het bestand Albon_AllHydraulic.txt genomen als maximale worteldiepte (Tabel 7.1).

Gegeven deze onzekerheden rond de gewasparameters, maar ook rond de meteorologische gegevens (vooral globale straling) waaruit SWAP de potentiële evapotranspiratie per dag berekent en het belang van een realistische simulatie van de gewastranspiratie als grootste verliespost voor bodemwater aan de bovenrand van het model, is kalibratie van de gewasfactor in SWAP (die het meest direct de gewastranspiratie stuurt) verantwoord.

Van de gewassen gras, mais en aardappelen waren invoergegevens voor gewasproductiemodel WOFOST beschikbaar. Deze zijn met WOFOST als gewasgroeimodel in SWAP doorgerekend om de gewastranspiratie te beschrijven. De overige gewassen zijn met de eenvoudige gewasmodule van SWAP doorgerekend. Van bieten en gerst waren geen gewas-specifieke invoerparameters voorhanden. Voor deze gewassen zijn aardappelen en wintertarwe als vervangende gewassen genomen.

Van gras als gewas was het meeste bekend (Tabel 7.1 bij P Deinze), o.a. ook dat de standaardwaarde voor de gewasfactor 0,8 bedraagt (CV, 1988). Daarom is het perceel P Deinze als eerste doorgerekend. Zo kon een indruk worden verkregen van de verhouding tussen de gekalibreerde en de standaard gewasfactor. Kennis die ook voor de andere gewassen relevant was. De gekalibreerde waarden van de gewasfactor lagen tussen 0,6 en 0,8 in het groeiseizoen. Gezien de onzekerheid rond de overige gewasparameters en meteogegevens voor verdamping zijn deze waarden als acceptabel beoordeeld.

7.2.1.5 Modelexperimenten

Na de kalibratie zijn modelexperimenten uitgevoerd om de robuustheid van de pedotransferfuncties en de gevoeligheid van parameters te verkennen. Uiteindelijk is voor de finale modellen de betrouwbaarheid van de resultaten getoetst aan metingen.

1. K0S: vergelijken van het gebruik van de gemeten verzadigde doorlatendheid K_s aanvullend op de hydraulische eigenschappen die zijn vastgelegd in de $K(0)$ -tabellen. Nadat gebleken is dat fitten van curven aan de gemeten K_{sat} niet zinvol is, is in de $K(h)$ -tabellen voor verzadiging in plaats van de $K(0)$ de gemeten waarde van K_{sat} gebruikt. Omdat bij alle zes velden dit modelexperiment 'Ksat' resultaten gaf die nauwelijks of niet van de resultaten van de basissimulatie K0 afweken, wordt dit modelexperiment verder niet besproken.
2. MVG: de robuustheid van de nieuwe pedotransferfunctie s is beproefd door de modelruns voor de perceelmodellen in tweevoud uit te voeren: een serie runs met de bodemfysische relaties beschreven met Mualem-Van Genuchten-parameters en een serie runs met de bodemfysische relaties in tabelvorm. Omdat het Vlaanderen-model de hydraulische karakteristieken alleen met Mualem-Van Genuchten-parameters kan berekenen, zijn deze parameters gefit op de meetgegevens van deze karakteristieken en vervolgens getest in SWAP op de gevolgen voor het simuleren van de vochtgehalten.
3. MVG2m: omdat het Vlaanderen-model met vaste grondwaterstanden van 1, 2 of 3 m-mv als onderrandvoorwaarde werkt, is de onderrandvoorwaarde grondwaterstand op 2 m-mv eveneens met SWAP doorgerekend en is getoetst op de gevolgen voor het simuleren van de vochtgehalten. Deze berekeningen zijn uitgevoerd met gebruik van de MVG-parameters zodat dezelfde parametrisatie als in het Vlaanderen-model is gehanteerd: Mualem-VanGenuchten-parameters met vaste grondwaterstand op 2 m als onderrand.

7.2.2 Resultaten

De modeltoetsing is uitgevoerd door de op drie diepten gemeten vochtgehalten te vergelijken met de op de drie meetdiepten gemeten vochtgehalten. Omdat deze metingen nogal wat ruis vertoonden, zijn de gemeten vochtgehalten per uur omgezet naar de mediane vochtgehalten voor perioden van 6 uur. Deze zijn vergeleken met de modelresultaten op 3, 9, 15 en 21 uur.

7.2.2.1 Statistische beoordeling

De vergelijking is uitgevoerd met de statistische maten Root Mean Squared Error (RMSE) en Mean Absolute Error (MAE) en met de genormaliseerde varianten NRMSE en NMAE hiervan, die de verhouding van deze maten tot de vochtgehalten bij verzadiging geven. Voor de verzadigde vochtgehalten zijn de waarden uit de K0-tabellen gebruikt die zijn aangegeven in Tabel 7.1. De statistische maten van de resultaten zijn voor alle percelen gegeven in Tabel 7.2.

7.2.2.2 Visuele beoordeling

In de Figuren 7.5 t/m 7.10 zijn de resultaten grafisch weergegeven via tijdreeksen, de cumulatieve frequentieverdeling en een staafdiagram. Bij tijdreeksen van de vochtgehalten op drie diepten is de betekenis van de symbolen in de legenda:

- K0S = kalibratie met de K0-tabellen;
- MVG = modelexperiment met Mualem-VanGenuchten-parameters;
- MVG2m = modelexperimenten met Mualem-VanGenuchten-parameters met vaste grondwaterstand op 2 m als onderrand.

De cumulatieve frequentieverdeling en het staafdiagram vergelijken de gemeten vochtgehalten in het perceel met het verzadigde vochtgehalte θ_{sat} uit de bodemonsters dat is gebruikt in het model. Deze figuren maken duidelijk of het mogelijk is dat het model de maximale gemeten vochtgehalten kan bereiken of benaderen.

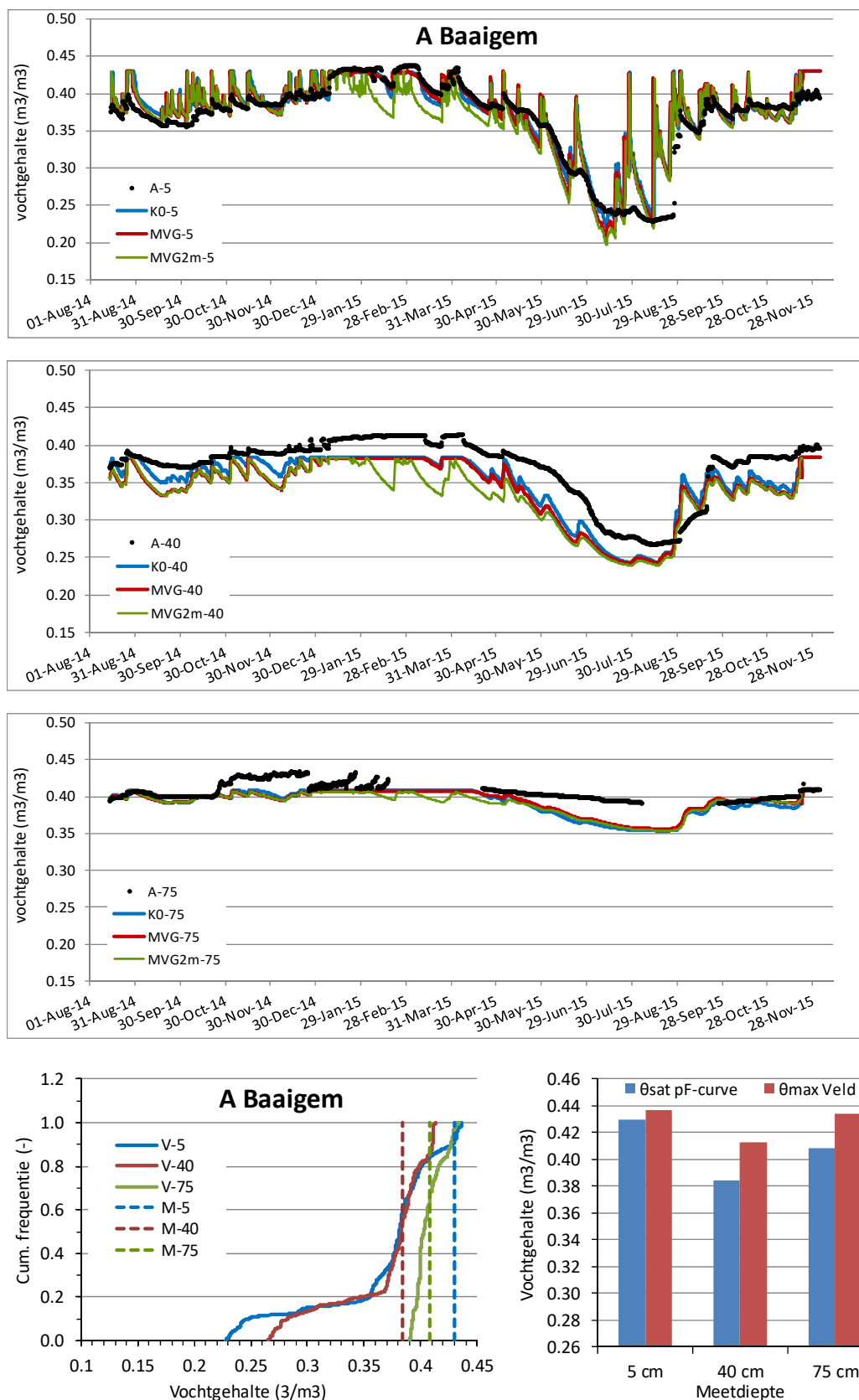
Is het maximale veldvochtgehalte groter dan θ_{sat} uit het model, dan blijft het model per definitie onder de maximale veldvochtgehalten. In dat geval kan een structurele onderschatting van het vochtgehalte door het model (deels) worden verklaard uit een *mismatch* tussen vochtgehaltemeetpunt in het perceel en het bodemonster genomen op een nabije plek op dezelfde diepte. Of dit het geval is, is in één oogopslag te zien in de staafdiagrammen. De cumulatieve frequentieverdeling kan meer inzicht geven in de mate en persistentie van de onderschatting. Zie bv. S Kruishoutem (Figuur 7.9) diepte van 45 cm: θ_{sat} is altijd kleiner dan de in het veld gemeten veldvochtgehalten.

In het omgekeerde geval, het maximale veldvochtgehalte is kleiner dan θ_{sat} , is er niet per definitie sprake van een dergelijke mismatch. Het veldvochtgehalte kan in dat geval eenvoudigweg nooit verzadiging hebben bereikt. Alleen als de grondwaterstand hoger is geweest dan een meetdiepte waar het maximale veldvochtgehalte kleiner is dan θ_{sat} , is er sprake van een mismatch. Dat geldt voor E Oudenaarde op 15 cm diepte (meetdiepte van 15 cm op 48 dagen overschreden door grondwaterstand) en voor P Deinze op 70 cm diepte (28 dagen overschrijding).

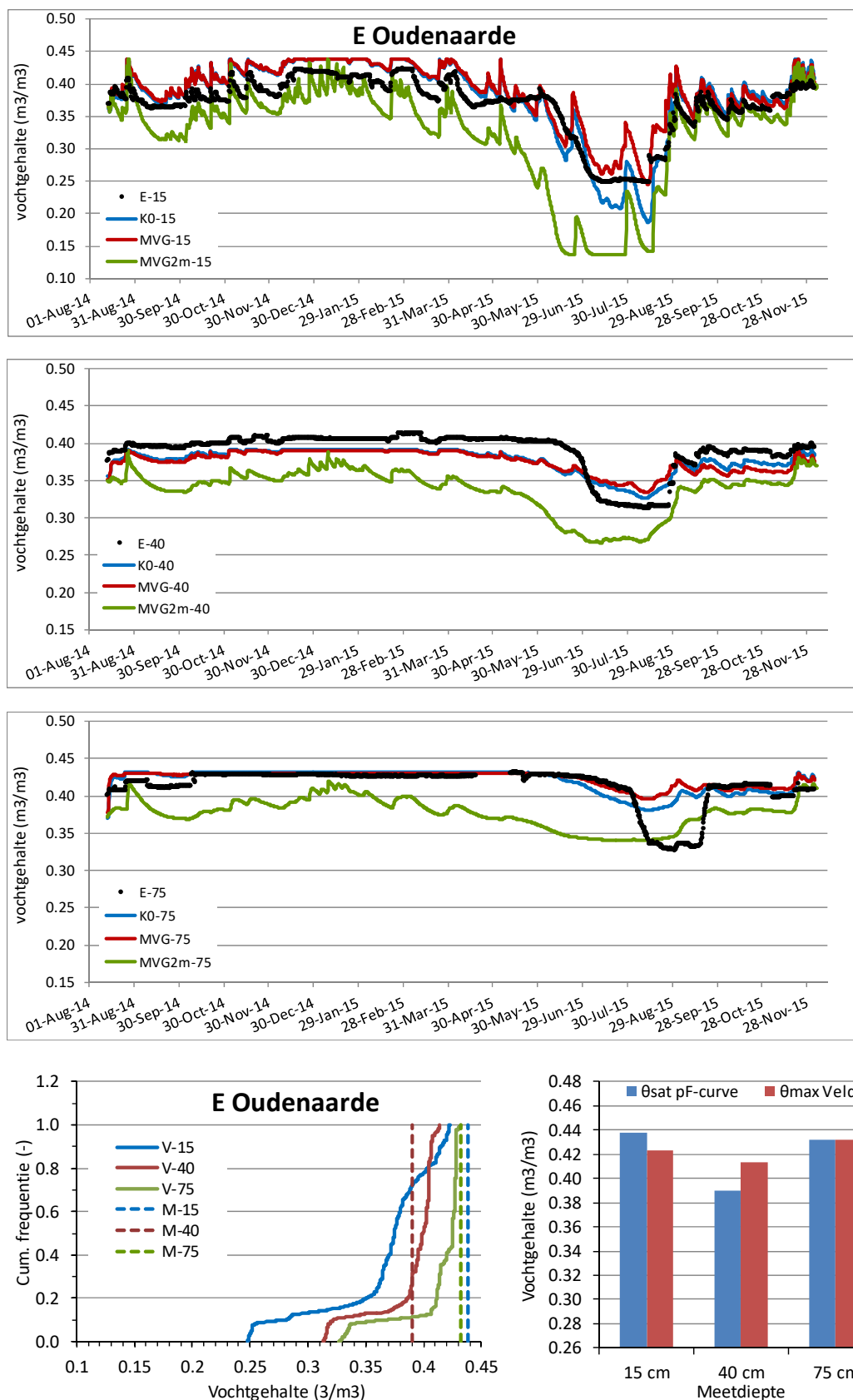
Tabel 7.2

Root Mean Squared Errors (RMSE), normalized RMSE (NRMSE) en Mean Absolute Errors (MAE) en normalized MAE (NMAE) van de vergelijking van gemeten en berekende vochtgehalten op drie diepten van de zes locaties voor de drie modelexperimenten K0 = kalibratie, K0S = K0 met toegevoegde gemeten Ksat (verzadigde doorlatendheid), MVG = Mualem-VanGenuchten-parameters, MVG-2m = Mualem-VanGenuchten-parameters met als onderrand een vaste grondwaterstand op 2 m beneden maaiveld.

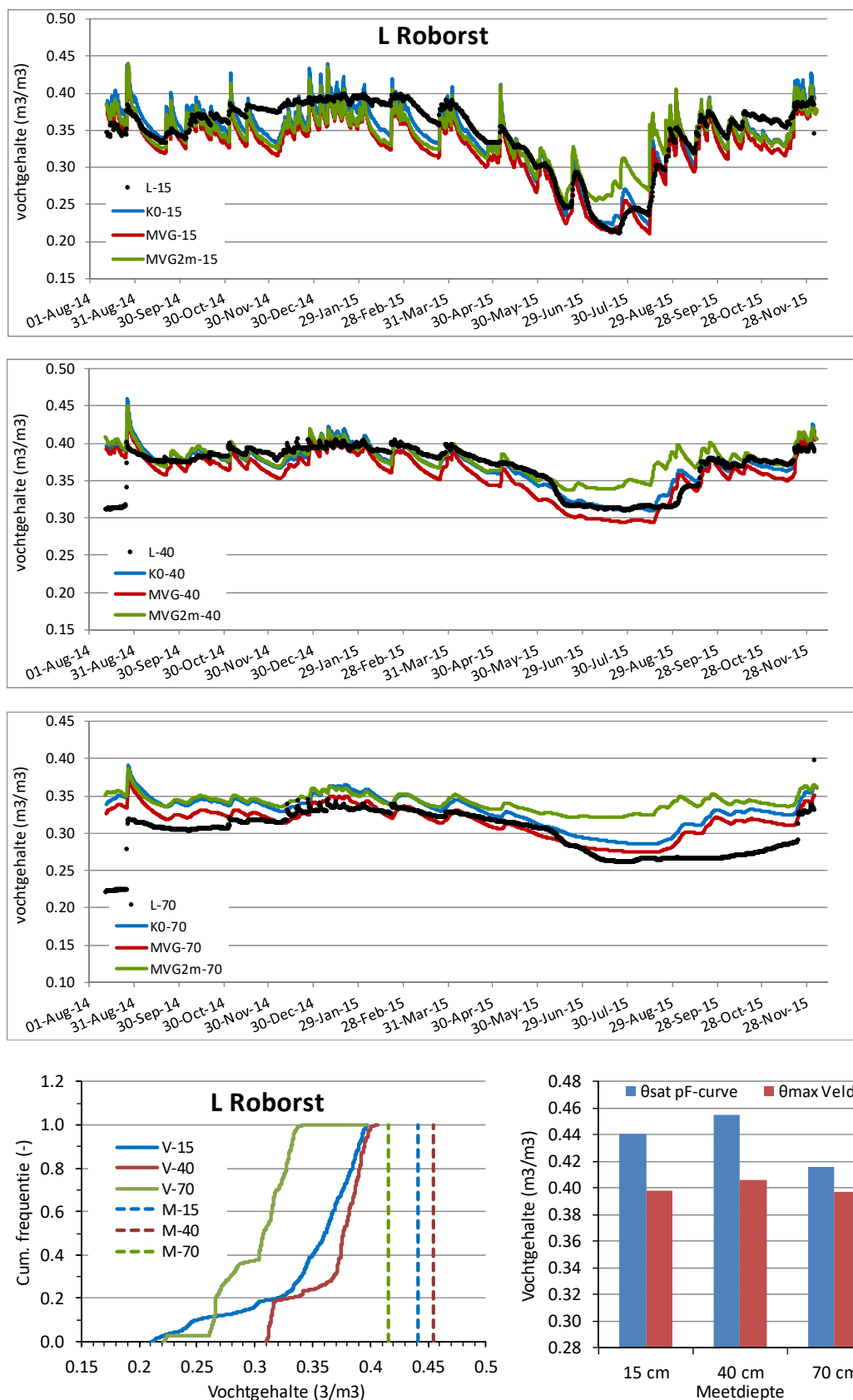
Textuur- klasse	Model- experiment	Stat. maat	RMSE en MAE (m ³ m ⁻³)				NRMSE en NMAE (%)			
			TOP	cSUB	SUB	Gemiddeld	TOP	cSUB	SUB	Gemiddeld
A leem	K0 en K0S	RMSE	0,026	0,027	0,018	0,024	6,1	7.0	4.4	5.9
		MAE	0,016	0,024	0,014	0,018	3,8	6,2	3,4	4.5
	MVG	RMSE	0.028	0.033	0.017	0.026	6.6	8.5	4.1	6.4
		MAE	0.017	0.030	0.013	0.020	4.0	7.9	3.1	5.0
	MVG-2m	RMSE	0.031	0.040	0.018	0.030	7.3	10.3	4.5	7.4
		MAE	0.022	0.036	0.014	0.024	5.2	9.4	3.5	6.0
E klei	K0 en K0S	RMSE	0.026	0.017	0.020	0.021	5.9	4.4	4.6	5.0
		MAE	0.023	0.016	0.012	0.017	5.2	4.2	2.9	4.1
	MVG	RMSE	0.028	0.021	0.023	0.024	6.3	5.3	5.4	5.7
		MAE	0.024	0.020	0.012	0.019	5.5	5.1	2.8	4.5
	MVG-2m	RMSE	0.064	0.055	0.043	0.054	14.5	14.1	10.0	12.9
		MAE	0.047	0.052	0.039	0.046	10.6	13.2	8.9	10.9
L zandleem	K0 en K0S	RMSE	0.019	0.018	0.037	0.025	4.4	3.9	9.0	5.7
		MAE	0.016	0.010	0.030	0.019	3.5	2.3	7.1	4.3
	MVG	RMSE	0.027	0.021	0.028	0.026	6.2	4.7	6.8	5.9
		MAE	0.023	0.017	0.018	0.019	5.2	3.7	4.4	4.4
	MVG-2m	RMSE	0.028	0.024	0.049	0.034	6.3	5.4	10.9	7.5
		MAE	0.022	0.016	0.041	0.026	5.1	3.4	9.2	5.9
P lichte zandleem	K0 en K0S	RMSE	0.049	0.051	0.044	0.048	11.0	13.0	10.3	11.4
		MAE	0.020	0.036	0.025	0.027	4.6	9.3	5.9	6.6
	MVG	RMSE	0.047	0.056	0.045	0.049	10.5	14.2	10.5	11.7
		MAE	0.022	0.043	0.026	0.030	4.9	10.9	6.1	7.3
	MVG-2m	RMSE	0.052	0.075	0.071	0.066	11.7	19.1	16.4	15.7
		MAE	0.033	0.064	0.056	0.051	7.4	16.3	12.9	12.2
S lemig zand	K0 en K0S	RMSE	0.047	0.074	0.045	0.055	10.6	24.1	11.7	15.5
		MAE	0.042	0.074	0.040	0.052	9.6	23.9	10.5	14.7
	MVG	RMSE	0.061	0.080	0.053	0.064	13.8	26.0	13.7	17.8
		MAE	0.058	0.079	0.048	0.062	13.1	25.8	12.5	17.1
	MVG-2m	RMSE	0.088	0.111	0.156	0.118	20.0	36.1	40.7	32.3
		MAE	0.079	0.109	0.154	0.114	17.9	35.5	40.2	31.2
Z zand	K0 en K0S	RMSE	0.068	0.047	0.035	0.050	18.5	14.1	9.4	14.0
		MAE	0.064	0.043	0.032	0.046	17.4	12.9	8.8	13.0
	MVG	RMSE	0.068	0.056	0.047	0.057	18.5	16.9	12.7	16.1
		MAE	0.064	0.052	0.042	0.053	17.4	15.6	11.4	14.8
	MVG-2m	RMSE	0.087	0.084	0.091	0.087	23.7	25.1	24.8	24.5
		MAE	0.081	0.076	0.090	0.082	22.0	22.8	24.5	23.1



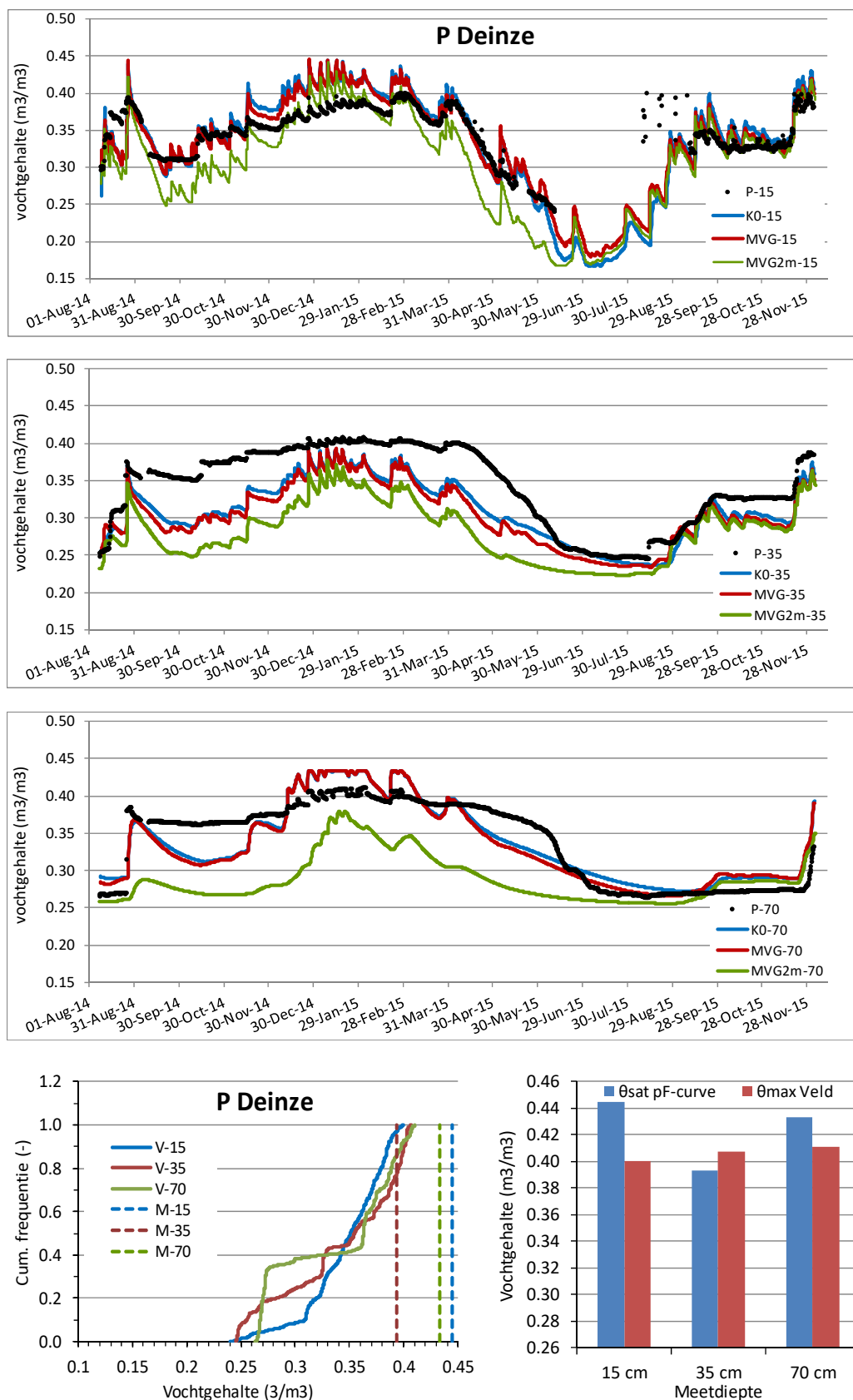
Figuur 7.5 Resultaten voor textuurklasse A, locatie Baaigem. Boven: gemeten en berekende volumetrische vochtgehalten op drie diepten. Onder: in het perceel gemeten vochtgehalten (V) vergeleken met de θ_{sat} van de bodemonsters (M); links via de cumulatieve frequentieverdeling, rechts via de gemeten maximum veldvochtgehalten. Getallen verwijzen naar diepten in cm.



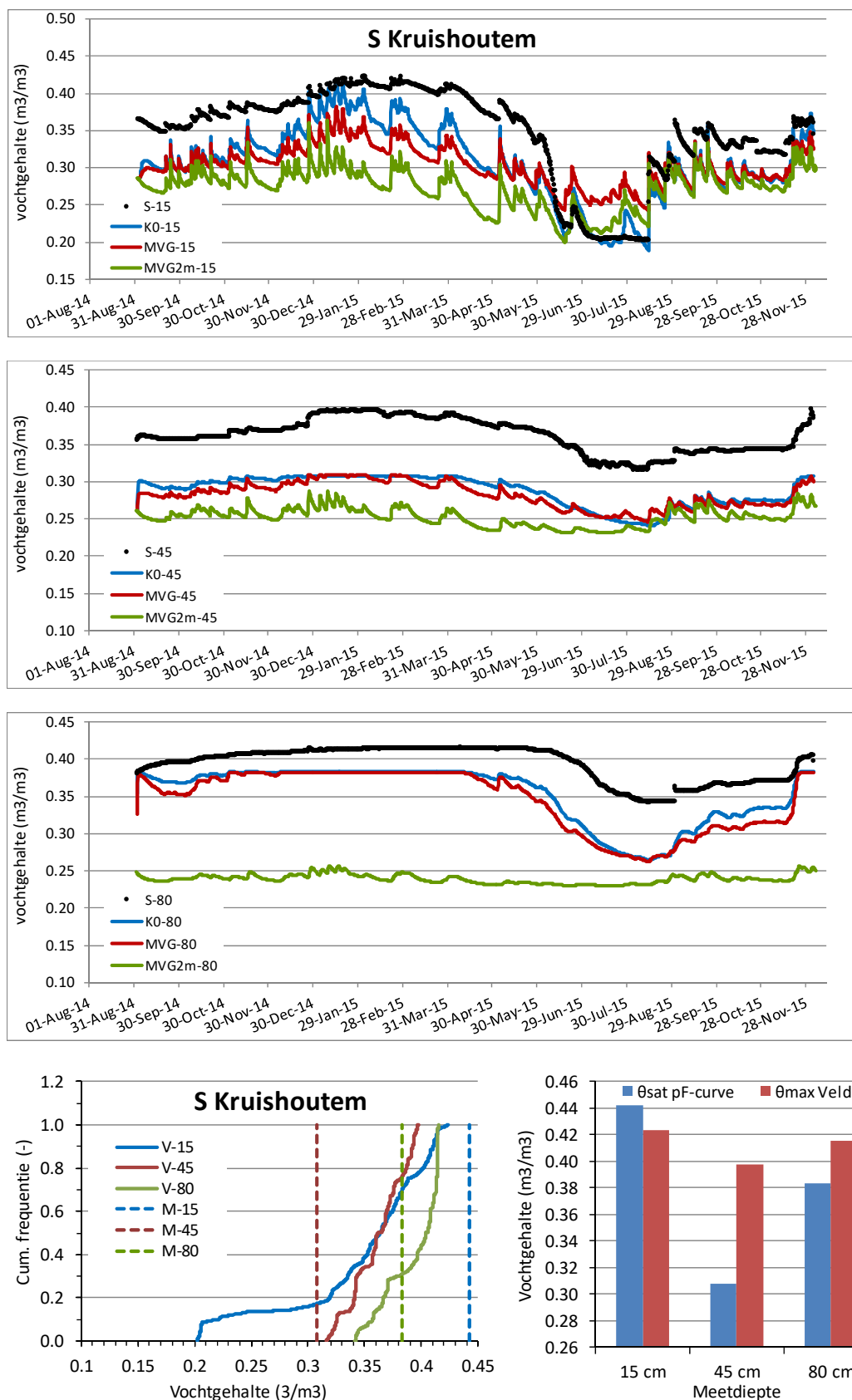
Figuur 7.6 Resultaten voor textuurklasse E, locatie Oudenaarde. Boven: gemeten en berekende volumetrische vochtgehalten op drie diepten. Onder: in het perceel gemeten vochtgehalten (V) vergeleken met de θ_{sat} van de bodemonsters (M); links via de cumulatieve frequentieverdeling, rechts via de gemeten maximum veldvochtgehalten. Getallen verwijzen naar diepten in cm.



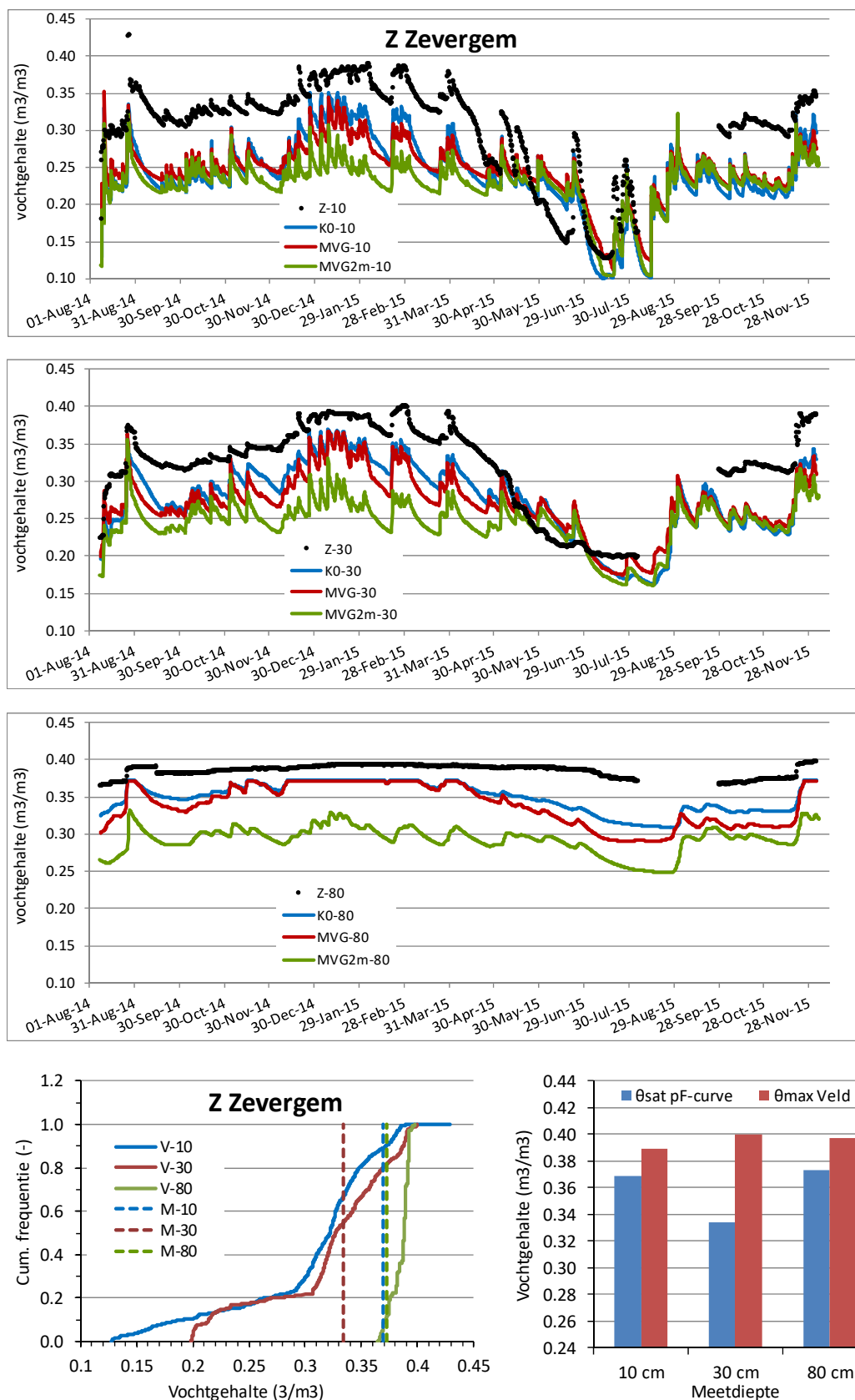
Figuur 7.7 Resultaten voor textuurklasse L, Roborst. Boven: gemeten en berekende volumetrische vochtgehalten op drie diepten. Onder: in het perceel gemeten vochtgehalten (V) vergeleken met de θ_{sat} van de bodemonsters (M); links via de cumulatieve frequentieverdeling, rechts via de gemeten maximum veldvochtgehalten. Getallen verwijzen naar diepten in cm.



Figuur 7.8 Resultaten voor textuurklasse P, locatie Deinze. Boven: gemeten en berekende volumetrische vochtgehalten op drie diepten. Onder: in het perceel gemeten vochtgehalten (V) vergeleken met de θ_{sat} van de bodemon monsters (M); links via de cumulatieve frequentieverdeling, rechts via de gemeten maximum veldvochtgehalten. Getallen verwijzen naar diepten in cm.



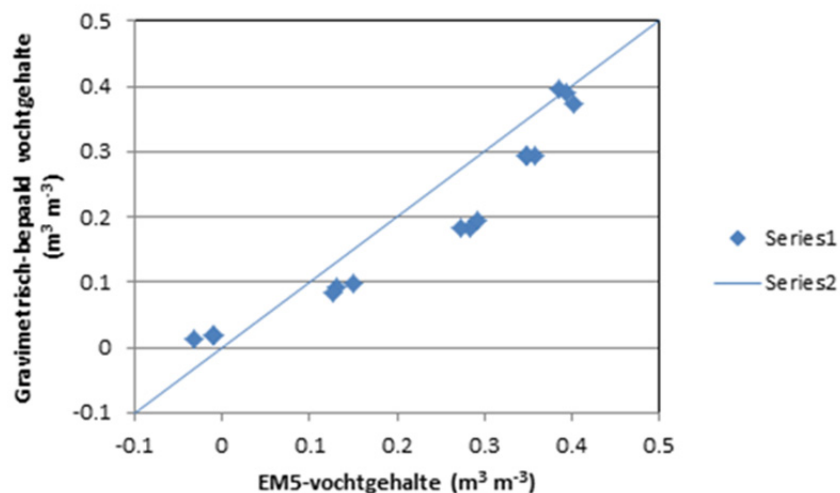
Figuur 7.9 Resultaten voor textuurklasse S, locatie Kruishoutem. Boven: gemeten en berekende volumetrische vochtgehalten op drie diepten. Onder: in het perceel gemeten vochtgehalten (V) vergeleken met de θ_{sat} van de bodemonsters (M); links via de cumulatieve frequentieverdeling, rechts via de gemeten maximum veldvochtgehalten. Getallen verwijzen naar diepten in cm.



Figuur 7.10 Resultaten voor textuurklasse Z, locatie Zevenegem. Boven: gemeten en berekende volumetrische vochtgehalten op drie diepten. Onder: in het perceel gemeten vochtgehalten (V) vergeleken met de θ_{sat} van de bodemonsters (M); links via de cumulatieve frequentieverdeling, rechts via de gemeten maximum veldvochtgehalten. Getallen verwijzen naar diepten in cm.

7.2.2.3 Correctie metingen vochtsensoren

De *mismatch* tussen het maximale vochtgehalte in het veld en dat gemeten aan bodemonsters en gebruikt in het model kan het gevolg zijn van heterogeniteit in het perceel of omdat de bodemvochtsensoren moeten worden gekalibreerd. Dat is bij installatie niet gebeurd, omdat de sensoren – om geen extra tijd te verliezen – meteen na de selectie van de percelen zijn geïnstalleerd. Omdat de bodems van de zes percelen 'standaard' minerale bodems zijn, zou in principe de fabriekskalibratie ook moeten volstaan. Anderzijds hebben we geopteerd om de vochtmetingen te laten doorgaan om zo langere tijdsreeksen te kunnen meten voor later gebruik. Recentelijk zijn de bodemvochtsensoren van één veld, veld E Zevergem, opgegraven en getest (Figuur 7.11).



Figuur 7.11 Kalibratie van de EC50-vochtsensor voor 3 bodemstalen bij 5 vochtgehalten.

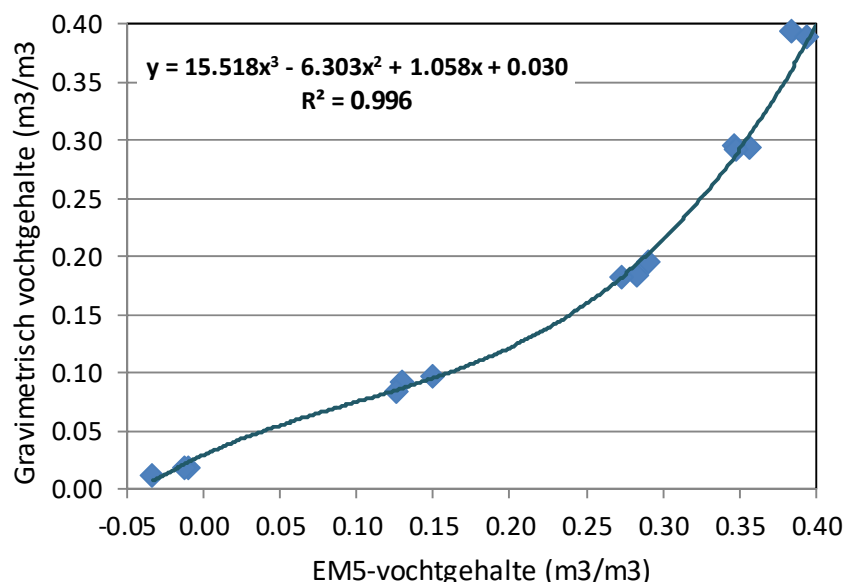
Deze vochtsensoren zijn gekalibreerd op drie mengstalen van bodemsoorten:

- Mengstaal 1 bevat bodem van de twee percelen met leem (perceel A & L) over drie diepten (dus effect van OM niet meegenomen);
- Mengstaal 2 idem voor de twee percelen met zandleem (E & P);
- Mengstaal 3 idem voor de twee percelen met zand (S & Z).

De stalen zijn manueel bevochtigd met vijf verschillende vochttoestanden van luchtdroog tot verzadiging. De resultaten laten bij verzadigde en lage vochtgehalten een bijna perfecte match zien, de tussenliggende vochtgehalten worden overschat door de sensor. De RMSE bedraagt $0.053 \text{ m}^3/\text{m}^3$, ongeveer gelijk aan de meetfout die de leverancier voor deze (indirecte) metingen geeft ($0.05 \text{ m}^3/\text{m}^3$). Deze fout blijkt systematisch: EC50 is (behalve voor negatieve EC50-waarden) altijd groter dan Grav. Omdat deze fout niet constant is, laten de gemeten tijdreeksen te veel dynamiek zien in het droge traject en te weinig dynamiek in het natte traject. Dit beïnvloedt mogelijk de visuele beoordeling, maar vrijwel zeker de statistieken. De resultaten van de kalibratie laten zien dat het nuttig kan zijn de metingen te corrigeren en om in de toekomst de sensoren voor het ingraven (en na afronden van de metingen) te kalibreren. Handmatige metingen van de vochtgehalten ter vergelijking met de data van de sensoren gedurende de proef kunnen extra inzicht geven, al zal ook daarbij met foutenmarges rekening moeten worden gehouden.

Omdat de vochtmetingen niet bedoeld zijn voor een strikte kalibratie/validatie van de modelresultaten, maar zijn opgezet als een indicatieve toets om te zien of het model in staat is de dynamiek en orde grootte van de gemeten vochtgehalten en daarmee de stroming door de bodem te simuleren, is een correctie achteraf niet per se nodig.

Het is echter mogelijk met de waarden van de manuele metingen van het vochtgehalte en die van de EC50-sensoren relaties voor correctiefactoren af te leiden voor de mengstalen van bodemsoorten (Figuur 7.12). Hiermee kunnen de vochtgehalten gemeten met de EC50-sensoren worden gecorrigeerd.



Figuur 7.12 Relaties van correctiefactoren als gravimetrisch bepaalde vochtgehalten als functie van vochtgehalten geregistreerd met EC50-sensoren.

7.2.2.4 Resultaten zes percelen

De simulatiresultaten worden per perceel besproken. Bij de vergelijking tussen modelsimulatie en meetgegevens moet worden bedacht dat er geen handmetingen van grondwaterstanden (modelinvoer) en vochtgehalten (modeltoetsing) op regelmatige tijdstippen zijn uitgevoerd om de automatische, continue metingen te kunnen controleren en ijken. Het is daardoor niet mogelijk om de meetresultaten op kwaliteit te beoordelen. Ook zijn de gewasparameters globaal bekend, waardoor de onzekerheid in de modelresultaten toeneemt.

A Baaigem (leem)

Op grond van de statistische maten is Baaigem na Oudenaarde en Roborst de beste simulatie. Afwijkingen zijn bij simulatie K0 gemiddeld rond 5-6% van θ_{sat} (Tabel 7.2). De eigenschappen van Baaigem zoals gegeven in Tabel 7.1 worden hieronder herhaald in Tabel 7.3.

Tabel 7.3

Kenmerken van perceel A Baaigem (leem). θ_{sat} en K_{sat} zijn uit de K0-tabellen.

Profiellagen		θ_{sat}	K_{sat}	Meet diepte	Wortel diepte	Gewasrotatie in 2014-2015 ²⁾
code	diepte (cm)	(m³/m³)	(cm)	(cm)	(cm)	
Top	0-34	0,430	5,62	5		2014: <u>zomertarwe</u> ; opkomst 1 mei, oogst 1 november
cSUB	34-44	0,384	2,04	40	40	2015: <u>gerst</u> (wintertarwe); opkomst 2 november 2014,
SUB	44-80	0,408	0,14	75		oogst 16 juli 2015

Het visuele beeld (Figuur 7.5) meewegend, is vooral de simulatie van de TOP-laag goed. Het gesimuleerde vochtgehalte fluctueert sterker dan gemeten, vooral in de tweede helft van de zomer. De cSUB-laag laat een systematische onderschatting van de door het model berekende vochtgehalten zien in de orde van 0,02-0,05 m³/m³, wat overeenkomt met het verschil tussen het maximale in het veld gemeten vochtgehalte en de in het laboratorium bepaalde θ_{sat} . Dat meewegende, is de simulatie van deze laag minstens zo goed als die van de TOP-laag. Voor de SUB-laag is te zien dat de overeenkomst in grote delen van het jaar groot is en dat er weinig dynamiek is, in de zomer zakken de modelresultaten verder uit dan de waarnemingen.

De MVG-simulaties zijn gemiddeld iets minder goed; dat geldt vooral voor de cSUB-laag waarvan het vochtgehalte iets meer wordt onderschat door het model dan bij de K0-simulatie. Bij de SUB-laag geldt juist het omgekeerde: bij de MVG-simulatie wordt een iets hoger vochtgehalte berekend door SWAP dan bij K0.

De MVG2m-simulatie, de combinatie van MVG en een vaste onderrand van een 2 m diepe grondwaterstand, doet het volgens de statistiek minder goed. De afwijkingen zijn 1,5 procentpunt groter dan bij K0, maar nog heel acceptabel. Blijkbaar is het vochtgehalte in het onverzadigde deel van het bodemprofiel van Baaigem niet sterk afhankelijk van capillaire nalevering uit het grondwater. Dit ondanks een behoorlijk groot verschil tussen gemeten grondwaterstand en vaste grondwaterstand van 2 m beneden maaiveld, dat voor de meetperiode als RMSE en MAE 83 cm respectievelijk 44 cm bedraagt. De gemiddelde gemeten grondwaterstand bedraagt 156 cm beneden maaiveld, wat gelijk is aan 200 cm – MAE (de gemeten grondwaterstand komt nooit dieper dan 2 m, omdat dat de ondergrens is van de meting). Maar in de zomer zakt de grondwaterstand uit tot minstens 2 m onder maaiveld. In 2015 wordt dit punt op 13 mei bereikt. Vanaf dat moment is er dus geen verschil meer met de vaste grondwaterstand van 2 m beneden maaiveld. De afwijkingen in vochtgehalte ten opzichte van MVG zijn vooral zichtbaar in de twee bovenste lagen waar de in MVG2m gesimuleerde vochtgehalten veel sneller en dieper uitzakken dan in de metingen en overige simulaties. Dit geldt vooral voor winter en voorjaar van 2015. Dan is ook het verschil tussen gemeten grondwaterstand en de opgelegde grondwaterstand het grootst: 150 tot 200 cm (de grondwaterstand begeeft zich in die periode tussen 0 en 50 cm diepte). In het model trekt de diepliggende, opgelegde grondwaterstand dan onrealistisch hard aan het vochtgehalte in de bovenliggende twee meter onverzadigde bodemlagen.

E Oudenaarde (klei)

Oudenaarde wordt op grond van de statistische maten het best gesimuleerd van alle zes velden. Afwijkingen zijn bij simulatie K0 gemiddeld 4-5% van θ_{sat} (Tabel 7.2). De eigenschappen van Oudenaarde zoals gegeven in Tabel 7.1 worden hieronder herhaald in Tabel 7.4.

Tabel 7.4

Kenmerken van perceel A Oudenaarde (klei). θ_{sat} en K_{sat} zijn uit de K0-tabellen.

Profiellagen		θ_{sat}	K_{sat}	Meet diepte	Wortel diepte	Gewasrotatie in 2014-2015 ²⁾
code	diepte (cm)	(m ³ /m ³)	(cm)	(cm)	(cm)	
Top	0-29	0,438	5,16	15		2014: <u>zomertarwe</u> ; opkomst 1 mei, oogst 30 augustus
cSUB	29-41	0,391	1,06	40		2015: <u>bieten</u> (aardappelen); opkomst 1 mei,
SUB	41-80	0,432	1,51	75	50	oogst 1 november

In natte perioden zijn de modelsimulaties van de TOP-laag natter en die van de cSUB-laag structureel droger dan de metingen (Figuur 7.6). De oorzaak hiervan is de *mismatch* hierboven genoemd van een grotere respectievelijk kleinere θ_{sat} in het model dan het maximale vochtgehalte in het perceel op deze twee diepten. Hiervoor corrigeren zou resulteren in kleinere verschillen en dus ook betere statistieken en een betere visuele vergelijking. Bij de SUB-laag zijn de statistische maten iets beter dan bij de twee bovenliggende lagen, maar het visuele beeld laat zien dat het model niet de daling in augustus 2015 volgt die de metingen aangeven.

De MVG-simulaties zijn volgens de statistische maten gemiddeld iets minder goed dan bij K0. Het visuele beeld laat zien dat de wat mindere simulaties vooral het gevolg zijn van hogere gesimuleerde vochtgehalten in de droge periode van 2015, vooral in de TOP-laag. Waarschijnlijk is het capillaire geleidingsvermogen in het droge traject bij de MVG-curve wat groter dan bij de K0-tabellen. Deze betere geleiding beperkt zich tot de toplaag, in de cSUB- en SUB-laag is het vochtgehalte bij MVG groter. De verdichte cSUB vormt hier waarschijnlijk een barrière voor een grotere nalevering uit de SUB-laag.

De MVG2m simulatie geeft veel hogere (factor 2,5) statistische waarden dan MVG, wat duidt op grotere afwijkingen tussen simulaties en metingen. In alle lagen zakken de gesimuleerde vochtgehalten veel sneller en dieper uit dan in de metingen en overige simulaties. Dit geldt vooral voor voorjaar en zomer 2015. Blijkbaar is het vochtgehalte in het onverzadigde deel van het bodemprofiel van Oudenaarde sterker afhankelijk van capillaire nalevering uit het grondwater dan dat van Baaigem. De verschillen tussen gemeten grondwaterstand en vaste grondwaterstand van 2 m beneden maaiveld zijn bij Oudenaarde als RMSE en MAE ook veel groter dan bij Baaigem: 140 cm respectievelijk 133 cm. De gemiddelde grondwaterstanddiepte bedraagt 67 cm. Maar de grondwaterstand fluctueert bij Oudenaarde veel minder dan bij Baaigem. Bij Oudenaarde zakt de grondwaterstand in de droge periode zeer geleidelijk en maximaal uit tot 150 cm beneden maaiveld. Daarom is het vochtgehalte bij de SUB-laag ook continu lager dan bij de K0-simulatie.

L Roborst (zandleem)

Roborst staat op de tweede plaats van beste simulaties op grond van de statistische maten.

Afwijkingen bij simulatie K0 zijn gemiddeld 5% van θ_{sat} (Tabel 7.2). De eigenschappen van Roborst zoals gegeven in Tabel 7.1 worden hieronder herhaald in Tabel 7.5.

Tabel 7.5

Kenmerken van perceel L Roborst (zandleem). θ_{sat} en K_{sat} zijn uit de K0-tabellen.

Profiellagen		θ_{sat}	K_{sat}	Meet diepte	Wortel diepte	Gewasrotatie in 2014-2015 ²⁾
code	diepte (cm)	(m^3/m^3)	(cm)	(cm)	(cm)	
Top	0-35	0,441	5,12	15		2014: <u>gerst</u> (wintertarwe); opkomst 2013, oogst 1 juli
cSUB	35-49	0,455	3,94	40		2015: <u>gerst</u> (w.tarwe); opkomst 1 nov.2014, oogst 1 juli
SUB	49-80	0,416	14,4	70	55	rest van 2015 <u>groenbemester</u> (gras)

Uit het visuele beeld (Figuur 7.7) spreekt vooral een goede simulatie van de droge periode in zomer 2015 bij de TOP- en cSUB-laag. De simulaties van de laatste laag zijn over de gehele periode goed, wat ook de laagste statistische maten geeft van 2-4%. De TOP-laag toont een onderschatting door het model van het vochtgehalte in de natte tijd in winter 2014-2015. Dit ondanks de grotere θ_{sat} dan het maximale gemeten vochtgehalte in deze laag. Voor de SUB-laag simuleert het model vooral te hoge vochtgehalten in de droge perioden.

De MVG-simulaties verschillen volgens de statistische maten gemiddeld gezien relatief weinig van de K0-simulaties. Voor de individuele lagen is er wel een verschuiving naar iets minder goed voor de TOP-laag en de cSUB-laag, en iets beter voor de SUB-laag. Blijkbaar zijn voor dit perceel de MVG-curven een goed alternatief voor de K0-tabellen.

De MVG2m simulatie laat zien dat het verhogen van de grondwaterstand van 3 m naar 2 m beneden maaiveld in alle lagen een duidelijke verhoging van het vochtgehalte geeft; vooral in de droge periode van de zomer van 2015. Dit geeft een verhoging van de statistische maten van dezelfde orde (2 procentpunt) als bij Baaigem. Maar dan, zoals verwacht, wel in omgekeerde richting: natter i.p.v. droger zoals bij Baaigem.

P Deinze (lichte zandleem)

Deinze is volgens de statistische maten de middenmoter van de zes velden met afwijkingen bij simulatie K0 van rond 10% van θ_{sat} . De grootste bijdrage aan de hoge gemiddelde waarden geeft de cSUB-laag (Tabel 7.2). De eigenschappen van Deinze zoals gegeven in Tabel 7.1 worden hieronder herhaald in Tabel 7.6.

Tabel 7.6

Kenmerken van perceel P Deinze (lichte zandleem). θ_{sat} en K_{sat} zijn uit de K0-tabellen.

Profiellagen		θ_{sat}	K_{sat}	Meet diepte	Wortel diepte	Gewasrotatie in 2014-2015 ²⁾
code	diepte (cm)	(m ³ /m ³)	(cm)	(cm)	(cm)	
Top	0-28	0,445	16,0	15		2014 en 2015: <u>gras</u> ; gehele jaar door, 3 sneden: 21 juli,
cSUB	28-44	0,393	6,34	35		21 augustus en 21 september
SUB	44-80	0,433	3,27	70	40	

Uit het visuele beeld (Figuur 7.8) blijkt dat het vochtgehalte van deze laag in het veld sterk wordt onderschat door het model. Voor een klein deel (0,015 m³/m³) wordt dat veroorzaakt door de kleinere θ_{sat} in het model dan het maximale vochtgehalte in het perceel op deze diepte. Hiervoor corrigeren zou een betere visuele vergelijking geven en kleinere afwijkingen. De TOP-laag en de SUB-laag laten het omgekeerde beeld zien: een grotere θ_{sat} in het model dan het maximale vochtgehalte in het perceel op deze diepten. Voor de SUB-laag is hier sprake van een echte *mismatch*, omdat het maximale vochtgehalte correspondeert met het verzadigde vochtgehalte, want de grondwaterstand was bij die metingen hoger dan de diepte van de meetsensor. Voor de TOP-laag heeft die situatie zich nooit voorgedaan en kan deze conclusie dan ook niet worden getrokken. Beide lagen laten in de natte winterperiode een overschatting van het vochtgehalte door het model zien. Bij de SUB-laag is correctie van deze overschatting op z'n plaats. Voor de onderschatting in de zomer geldt dat niet. De gesimuleerde dynamiek in vochtgehalten is, behalve voor de toplaag, groter dan de gemeten dynamiek.

De MVG-simulaties zijn iets minder goed, maar niet veel. Blijkbaar zijn voor de lichte zandleem te Deinze de MVG-curven een goed alternatief voor de K0-tabellen.

De MVG2m simulatie geeft hogere (factor 1,5) statistische waarden dan MVG. In alle lagen, maar vooral in de cSUB- en SUB-laag, zakken de gesimuleerde vochtgehalten dieper uit dan in de metingen. Dit gebeurt vooral in het najaar 2014 en voorjaar 2015. Blijkbaar is het vochtgehalte in het onverzadigde deel van het bodemprofiel van Deinze ook sterker afhankelijk van capillaire nalevering uit het grondwater dan dat van Baaigem. De verschillen tussen gemeten grondwaterstand en vaste grondwaterstand van 2 m beneden maaiveld zijn bij Deinze als RMSE en MAE met 69 cm respectievelijk 54 cm vergelijkbaar groot als bij Baaigem. De gemiddelde grondwaterstand bedraagt 146 cm beneden maaiveld (200 cm – MAE). Maar in de zomer op 7 juli 2015 bereikt de grondwaterstand een diepte van 200 cm, de ondergrens van de meting. Vanaf dat moment is er nog maar weinig verschil tussen de K0- en MVG2m-simulatie. In de winter fluctueert de grondwaterstand tussen een diepte van 50 en 100 cm; dan is het effect van een 100 tot 150 cm diepere grondwaterstand bij de MVG2m simulatie wel duidelijk zichtbaar. Maar omdat in het voorjaar de grondwaterstanddaling naar 2 m diepte geleidelijker verloopt dan bij Baaigem, is het effect van een 2 m diepe constante grondwaterstand bij Deinze groter dan bij Baaigem.

S Kruishoutem (lemig zand)

Kruishoutem heeft op grond van de statistische maten de slechtste simulatieresultaten. De statistische waarden zijn bij K0 gemiddeld 15% van θ_{sat} en drie keer zo groot als voor Oudenaarde (Tabel 7.2). De eigenschappen van Kruishoutem zoals gegeven in Tabel 7.1 worden hieronder herhaald in Tabel 7.7.

Tabel 7.7

Kenmerken van perceel S Kruishoutem (lemig zand). θ_{sat} en K_{sat} zijn uit de K0-tabellen.

Profiellagen		θ_{sat}	K_{sat}	Meet diepte	Wortel diepte	Gewasrotatie in 2014-2015 ²⁾
code	diepte (cm)	(m ³ /m ³)	(cm)	(cm)	(cm)	
Top	0-41	0,442	5505,4	15		2014: <u>aardappelen</u> ; opkomst 15 maart, oogst 10 sept.
cSUB	41-49	0,308	1,30	45	35	2015: <u>gerst</u> (wintertarwe); opkomst 10 september 2014,
SUB	49-80	0,383	42,8	80		oogst 15 juni. Rest van 2015: <u>gras</u>

Voor alle drie meetdiepten onderschat het model het vochtgehalte fors met gemiddeld 0,05-0,10 m³/m³. Met uitschakelen van bodemverdamping en gewastranspiratie was het model nog niet in staat het niveau van de gemeten vochtgehalten in de TOP-laag te halen. Het onvermogen van het model heeft dus een bodemfysische oorzaak. Om de opgelegde gemeten grondwaterstand te kunnen handhaven in de simulatie zonder verdamping, sluist het model het overtollige neerslagwater in grote hoeveelheden (500 mm) weg naar het grondwater zonder dat het vochtgehalte het niveau van de metingen bereikt. Bij vooral de cSUB-laag en ook de SUB-laag ligt dat deels aan de *mismatch* tussen het maximale veldvochtgehalte en θ_{sat} in het model. Bij cSUB is dat met 0,1 m³/m³ erg groot; gedurende de gehele meetperiode lag θ_{sat} hier onder de gemeten veldvochtgehalten (Figuur 7.9). Maar uit modelexperimenten met kleinere K_{sat}-waarden dan de zeer grote van de TOP-laag en de grote van de SUB-laag (Tabel 7.1) bleek dat de grote K_{sat}'s ook een rol spelen in dit proces: met kleinere K_{sat}-waarden simuleerde het model wel de gemeten vochtgehalten in de TOP-laag. De MVG-simulaties zijn gemiddeld iets slechter; dat geldt vooral voor de TOP-laag waarvan het vochtgehalte in natte tijden wat meer wordt onderschat door het model dan bij de K0-simulatie en in de droge periode van zomer 2015 juist wordt overschat. Voor de diepere lagen wordt de onderschatting van het vochtgehalte door het model iets groter dan bij de TOP-laag.

De MVG2m simulatie verlaagt het vochtgehalte meer, tot een fors lager constant niveau in de SUB-laag van 0,24 m³/m³, wat het vochtgehalte is bij een drukhoogte van -111 cm, oftewel ongeveer de afstand (120 cm) tussen de hoogte van het vochtgehaltemeetpunt en de constante grondwaterstand van 2 m beneden maaiveld. Blijkbaar heerst hydrostatisch evenwicht op 80 cm diepte in het model, mogelijk door de relatief hoge capillaire geleidbaarheid van de SUB-laag. In het veld lijkt niet echt sprake van hydrostatisch evenwicht in de SUB-laag. Voor de cSUB-laag gaat dit verhaal in iets mindere mate op. Hier lijkt er een, iets minder stabiel, evenwicht te bestaan rond 0,25 m³/m³, wat maar weinig verschilt van de 0,239 m³/m³ waarbij een drukhoogte hoort van -155 cm, de afstand tot meetpunt en grondwaterstand van 2 m beneden maaiveld. In de TOP-laag betekent de MVG2m-simulatie in de natte periode van winter 2014-2015 een extra verlaging met 0,05 m³/m³ van het toch al erg lage vochtgehalte, wat opnieuw duidt op het belang van capillaire nalevering. De verschillen tussen gemeten grondwaterstand en vaste grondwaterstand van 2 m beneden maaiveld zijn bij Kruishoutem als RMSE en MAE 97 cm respectievelijk 87 cm. De gemiddelde grondwaterstand is 113 cm onder maaiveld. De fluctuaties van de grondwaterstand liggen in de winter tussen 50 en 100 cm. In de droge periode zakt de grondwaterstand niet verder uit dan 170 cm op 7 augustus 2015. Daarom heeft een verdieping van de grondwaterstand naar een constant niveau van 2 m beneden maaiveld ook in de zomer een groot effect op de simulaties van het vochtgehalte bij Kruishoutem. Capillaire nalevering uit de SUB-laag speelt duidelijk een grote rol bij het zandleem van het perceel van Kruishoutem.

Z Zevergem (zand)

Zevergem is na Kruishoutem het tweede perceel met een zandprofiel en presteert gemiddeld op grond van de statistische maten iets minder slecht dan Kruishoutem. Statistische waarden zijn bij K0 met gemiddeld bijna 15% van θ_{sat} eveneens bijna drie keer zo groot als bij Oudenaarde, het perceel met de kleinste waarden (Tabel 7.2). De eigenschappen van Zeveergem zoals gegeven in Tabel 7.1 worden hieronder herhaald in Tabel 7.8.

Tabel 7.8

Kenmerken van perceel Z Zeveergem (zand). θ_{sat} en K_{sat} zijn uit de K0-tabellen.

Profiellagen		θ_{sat}	K _{sat}	Meet diepte	Wortel diepte	Gewasrotatie in 2014-2015 ²⁾
code	diepte (cm)	(m ³ /m ³)	(cm)	(cm)	(cm)	
Top	0-31	0,368	94,1	10		2014: <u>aardappelen</u> ; opkomst 15 maart, oogst 10 sept/
cSUB	31-49	0,333	3,52	30		2015: <u>mais</u> ; opkomst 20 april, oogst 15 oktober
SUB	49-80	0,367	30,6	80	35	

Ook voor dit zandprofiel onderschat het model bij alle drie meetdiepten het vochtgehalte fors met gemiddeld $0,05 \text{ m}^3/\text{m}^3$, maar hier is het de TOP-laag waarvoor het model het slechtst presteert. Vooral de cSUB-laag gaat bij Zevergem veel beter dan bij Kruishoutem. Dit geldt in mindere mate voor de SUB-laag. Bij alle lagen, maar ook hier vooral bij de cSUB-laag, kan deze onderschatting deels worden verklaard uit de *mismatch* tussen het maximale veldvochtgehalte en θ_{sat} in het model. Bij cSUB is het verschil met $0,06 \text{ m}^3/\text{m}^3$ erg groot. Ook hier wezen modelexperimenten met kleinere Ksat-waarden dan de vrij grote van de TOP-laag (Tabel 7.1) uit dat de grote Ksat ook een rol speelt in dit proces: de simulatie met lagere Ksat gaf een veel betere simulatie van de vochtgehalten in de TOP-laag.

De MVG-simulaties zijn gemiddeld iets slechter (Figuur 7.10). Voor alle drie lagen geeft de MVG-simulatie een wat grotere onderschatting van de vochtgehalten.

De MVG2m-simulatie verlaagt het vochtgehalte meer, vooral in de natte tijden (met $0,05\text{-}0,07 \text{ m}^3/\text{m}^3$ als de gemeten grondwaterstanden het hoogst zijn). De statistische maten voor de afwijkingen zijn bij deze simulatie dan ook navenant hoger. Ze zijn echter niet zo hoog als bij Kruishoutem. De situatie van Zevergem is dan ook niet zo extreem als bij Kruishoutem. Er lijkt ook geen sprake van een constant hydrostatisch evenwicht op 80 cm diepte in het model. De verschillen tussen gemeten grondwaterstand en vaste grondwaterstand van 2 m beneden maaiveld zijn bij Zevergem als RMSE en MAE 100 cm respectievelijk 95 cm. De gemiddelde grondwaterstand bedraagt 105 cm beneden maaiveld. De dynamiek van de grondwaterspiegel is in dit perceel echter opvallend gering: de grondwaterstand begeeft zich tussen 40 en 140 cm diep, maar de ondergrens van 140 cm, die vanaf 5 juli 2015 ruim drie maanden aanhoudt, lijkt op een meetfout te berusten. Net als bij Kruishoutem is het optreden van capillaire nalevering in het zandprofiel van Zevergem een belangrijk proces in de vochthuishouding.

7.2.3 Discussie en conclusies

De simulaties met SWAP van het vochtgehalte op drie diepten gaan goed voor de velden op klei (E), leem (A) en zandleem (L), vrij goed voor het perceel met licht zandleem (P) en minder goed op de velden met zand (Z) en lemig zand (S). Omdat ook zonder bodemverdamping en gewastranspiratie de gesimuleerde vochtgehalten beneden de gemeten vochtgehalten bleven, moeten de oorzaken van de mindere simulaties voor de zanden worden gezocht in bodemfysische processen en eigenschappen die tussen model en meetpercelen verschillen.

Verschillen tussen gemeten en gesimuleerde vochtgehalten kunnen vaak deels worden verklaard uit de verschillen tussen de θ_{sat} (vochtgehalte bij verzadiging) in het model, ingevoerd op basis van metingen aan bodemmonsters en de θ_{sat} die in het perceel heerst (afgeleid uit het maximale gemeten vochtgehalte). Deze verschillen duiden op een *mismatch* tussen het vochtgehaltemeetpunt in het perceel en het bodemmonster genomen op een nabije plek op dezelfde diepte. Of deze *mismatch* het gevolg is van heterogeniteit in het perceel of van onnauwkeurige metingen is niet helemaal duidelijk, omdat de metingen niet zijn geverifieerd in het veld. Hierbij gaat het ook om de metingen van grondwaterstanden als invoer voor het model.

Het ontbreken van handmetingen van grondwaterstanden (modelinvoer) en vochtgehalten (modeltoetsing) in het perceel op regelmatige tijdstippen om de automatische, continue metingen aan te controleren en iken is een gemis, omdat de kwaliteit van de metingen nu niet kan worden beoordeeld. Bij verlengen van de meetreeksen wordt geadviseerd aanvullende metingen uit te voeren om ook de diepere grondwaterstanden te meten, om de gewasinformatie nauwkeurig te verzamelen en om regelmatig handmetingen uit te voeren om de kwaliteit van de continue metingen te borgen.

Het vervangen van de gedetailleerde (op metingen aan bodemmonsters gefitte relaties) tabellen voor waterretentie en hydraulische geleidbaarheid door (op dezelfde metingen gefitte) parameters van Mualem-VanGenuchten-relaties, geeft over het algemeen relatief kleine, acceptabele verschillen in gesimuleerde vochtgehalten met een tendens tot een lichte onderschatting van de met de tabellen gesimuleerde vochtgehalten.

Simulaties met een vaste grondwaterstand van 2 m beneden maaiveld geeft sterk wisselende effecten op de simulaties van de vochtgehalten. Hierbij speelt de grootte van het verschil tussen de opgelegde gemeten grondwaterstanden en de vaste grondwaterstand van 2 m beneden maaiveld een belangrijke rol. Als dit verschil groot is, dan zijn de effecten groter. Maar ook het bodemmateriaal is van belang, waarschijnlijk in termen van capillaire geleidbaarheid: hoe groter dit is, hoe geringer de effecten op de simulaties van de vochtgehalten.

De perceelberekeningen laten zien dat het fysisch transportmodel SWAP goed in staat is het verloop in de tijd van het gemeten vochtgehalte op drie diepten in de drie belangrijke bodemhorizonten te simuleren. Dit geldt zeker als in ogenschouw wordt genomen dat gedetailleerde kennis ontbrak over belangrijke invoer van het model, vooral over de gewassen op de percelen. Kalibratie van enkele gewasparameters in het model op de gemeten vochtgehalten heeft dit euvel grotendeels kunnen oplossen. Daarmee is een instrument beschikbaar waarmee de database van hydraulische karakteristieken van bodems van verschillende textuur en in niet-verdichte en verdichte staat gebruikt kan worden om effecten van verdichte bodems op verschillende milieu- en omgevingsfactoren te voorspellen. Belangrijke factoren hierbij zijn snelle afvoer over het oppervlak die leidt tot piekafvoeren van overtollig neerslagwater en de hierdoor verminderde grondwateraanvulling, maar ook effecten op de gewasproductie door nat- en droogteschade en de verhoogde uitspoeling van meststoffen en gewasbeschermingsmiddelen.

Om deze effecten te evalueren, zijn de parametrisatie en daarmee de dataverzameling belangrijk. Voor een juiste modellering van de percelen zijn verbeteringen mogelijk:

- Gewasgroei gedetailleerd bijhouden
- Lokale neerslagmetingen (in het betreffende perceel)
- Gekalibreerde sensoren voor bodemvochtmetingen
- Handmetingen om continu gemeten grondwaterstanden en vochtgehalten te corrigeren

Geleerd hebbende van de simulaties en toetsing van de resultaten van de zes percelen kunnen aanpassingen worden doorgevoerd om het Vlaanderen-model te verbeteren:

- Neerslag met kleinere tijdstappen
- Dynamische grondwaterstanden met gedetailleerdere klassen of op basis van grondwatermodellen
- Gebruiken van het gewasgroeimodel WOFOST i.p.v. de eenvoudige gewasmodule

In Nederland is recentelijk een studie uitgevoerd om ook deze effecten te bepalen voor twee bodems, een zwaklemig fijn zand en een lichte zavel (Schipper *et al.*, 2015; Hendriks *et al.*, in prep.). In deze studie zijn ook de effecten van verslemping van het bodemoppervlak op de oppervlakte-afvoer verkend. SWAP is gekoppeld aan het gewasgroeimodel WOFOST en het nutriëntenkringloopmodel ANIMO om het effect van bodemverdichting op snelle oppervlakte-afstroming, grondwateraanvulling, nat- en droogteschade in relatie tot de gewasproductie en de af- en uitspoeling van de nutriënten stikstof en fosfor te simuleren. Aanvullend zijn de potentiële effecten van bodem-verbeterende maatregelen op de waterhuishouding (waterkwantiteit en -kwaliteit) inzichtelijk gemaakt. Voor de twee gronden zijn uit het Nederlandse bestand van bodemfysische eigenschappen voor boven- en ondergrond specifieke monsters (met bijbehorende MVG-karakteristieken) geselecteerd om de niet-verdichte, verdichte en 'verbeterde' situatie te beschrijven. Deze selectie is niet onderbouwd door werkelijke kennis over het niet of wel (en in welke mate) verdicht zijn van de bodemlaag waaruit de monsters afkomstig zijn. De rekenresultaten zijn daarom gepresenteerd als een worstcasescenario. De conclusies van deze exercitie zijn kort samengevat:

- Piekafvoeren: de oppervlakkige afstroming bij een verdichte bodem is significant hoger dan bij een niet-verdichte of verbeterde bodem. Vooral de infiltratiecapaciteit en -snelheid bepalen deze effecten. Ook de berging op het maaiveld, en dus het reliëf en de helling van de percelen, bepalen de risico's voor oppervlakteafstroming. Bij een 'gunstig maaiveld', met veel berging en weinig helling zal verdichting vooral leiden tot (langdurige) plasvorming.
- Droogte/beregeningsbehoefte: door verdichting nemen de droogtegevoeligheid en de beregeningsbehoefte toe. De diepte van de beworteling heeft een groot effect op de droogteschade en de beregeningsbehoefte, de bodemfysische relaties hebben (voor deze gronden) nauwelijks invloed.

- Emissies nutriënten: door verdichting nemen de uitspoeling van nitraat en de afspoeling van fosfaat toe. Deze resultaten moeten worden verbeterd door enkele terugkoppelmechanismen beter mee te nemen om de factoren die bodemkwaliteit bepalen (organische stof, bodemchemie, bodemleven, bodemstructuur, waterhuishouding en beworteling) in samenhang te beschouwen.
- Bodem-verbeterende maatregelen kunnen (grote) effecten hebben op de vermindering van piekafvoeren en de vermindering van droogte.

Toepassen van deze werkwijze met de in dit project opgebouwde database van fysische karakteristieken voor Vlaamse bodems zal resulteren in beter onderbouwde, realistischere effecten van bodemverdichting op ook gewasproductie en de uitspoeling van nutriënten. Verlengen van de meetreeksen op de zes percelen en het verzamelen van aanvullende gegevens (gewasopbrengsten, concentraties nutriënten in grond- en oppervlaktewater) voor deze percelen helpt in dat geval de resultaten verder te onderbouwen.

7.3 Effecten van ruimtelijke scenario's

Op basis van de pedotransferfuncties afgeleid in dit project, wordt verkend wat het effect is van verdichting op de schaal van een stroomgebied. Om deze evaluatie te maken, wordt ook het effect van een klimaatverandering meegenomen. Daartoe worden de resultaten van vier sets van scenario's vergeleken voor vijf studiegebieden:

1. referentiescenario: 'niet-verdichte' situatie bij huidig klimaat
2. referentie-klimaatscenario: 'niet-verdichte' situatie bij (een range van) klimaatscenario's
3. verdicht scenario: 'verdichte' situatie bij huidig klimaat
4. verdicht-klimaatscenario: 'verdichte' situatie bij (een range van) klimaatscenario's

Het niet-verdichte scenario gebruikt de bodemfysische data uit 'Aardewerk', het verdichte scenario gebruikt de op basis van de pedotransferfuncties gefitte Mualem-Van Genuchten-functies.

Het doel is om met deze modellering inzicht te krijgen in de antwoorden op de volgende vragen:

- wat is het effect van verdichting op grondwatervoeding?
- wat is het effect van verdichting op run-off?
- wat is het effect van verdichting op beschikbaar water voor planten?
- hoe verhoudt zich het effect van verdichting tot het effect van klimaatverandering?

In deze paragraaf worden achtereenvolgens het gebruikte SWAP-Vlaanderen-model toegelicht, wordt de selectie van de vijf studiegebieden beschreven, worden de gebruikte klimaatscenario's besproken, wordt de opzet van de berekeningen samengevat en worden ten slotte de resultaten van de modellering besproken en worden conclusies geformuleerd.

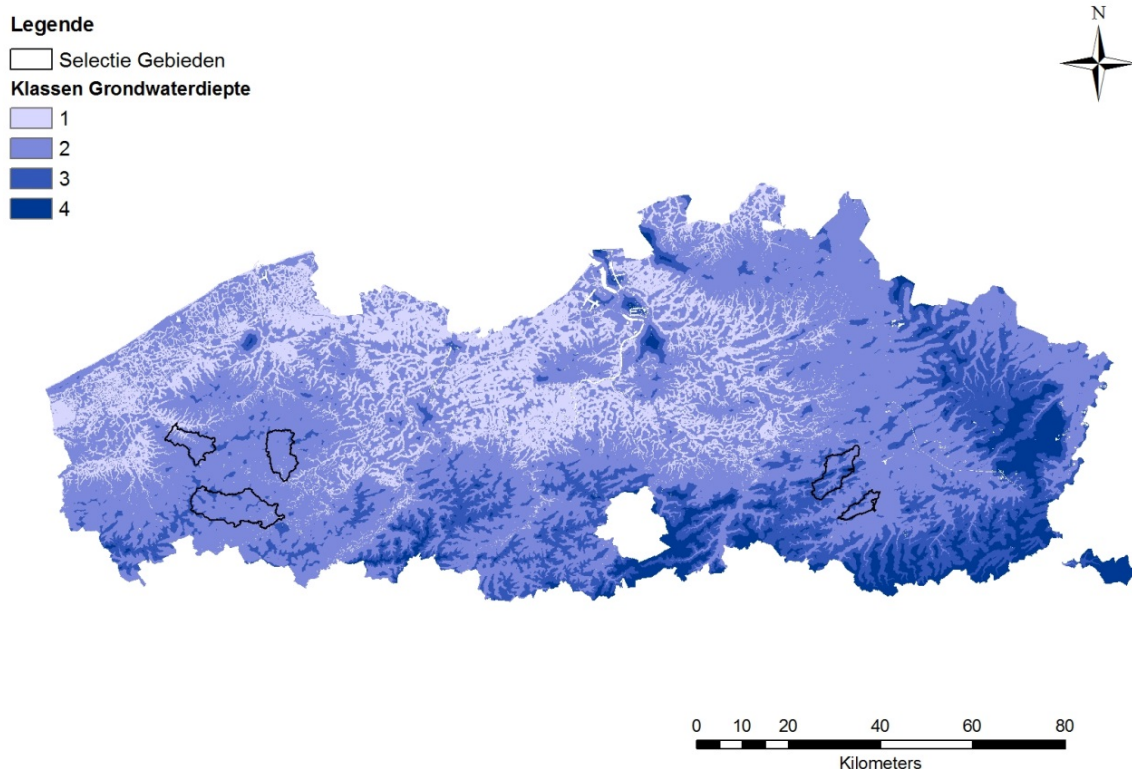
7.3.1 Vlaanderen-model

In het Vlaanderen-model (Joris *et al.*, 2010) zijn SWAP-kolommen geparametriseerd voor 1434 unieke combinaties van bodemtype, grondwaterdiepte en klimaat. De ruimtelijke schematisering van de SWAP-kolommen is beschikbaar voor heel Vlaanderen op een resolutie van 50x50m in rasterformaat, gebaseerd op de ruimtelijke verdeling van bodem, grondwater, klimaat en bodemgebruik (landbouw). De oorspronkelijke opzet van het Vlaanderen-SWAP-model was als deel van een GeoPEARL simulatie met GeoPEARL v3.3.3 (zie Tiktak *et al.* (2003, 2004)) waarbij het risico op uitspoeling van pesticiden berekend werd. Binnen deze studie worden de bodemtype-grondwaterdiepte combinaties uit het bestaande Vlaanderen-model gebruikt om de niet-verdichte situatie weer te geven.

De basis voor de schematisatie van de bodemkolommen is de Belgische Bodemkaart in combinatie met de Aardewerk-databank. Voor elke bodemzone zijn de dominante bodemtypes geïdentificeerd (die gecombineerd minstens 80% van het areaal dekken) en vervolgens zijn die bodemtypes geparametriseerd door de mediaan van de bodemeigenschappen uit Aardewerk aan de verschillende horizonten toe te kennen. Op die manier zijn textuur, organisch materiaal en pH voor de bodemprofielen uit Aardewerk gehaald, aangevuld met bulkdensiteit volgens de formule van

Vereecken (1988). Met die basiskenmerken zijn de pedotransferfuncties van Wösten *et al.* (1999) gebruikt om de bodemhydraulische parameters te bepalen. In het Vlaanderen-model zijn er op die manier 536 unieke bodemprofielen gedefinieerd.

Als onderste randvoorwaarden hebben de SWAP-kolommen een vaste grondwaterstand gelijk aan de gemiddeld hoogste grondwaterdiepte. Deze grondwaterdieptekaart vertrekt van beschikbare metingen van grondwaterstand en houdt in een statistische aanpak rekening met de afstand van een bepaalde locatie tot oppervlaktewater en de topografie (van der Kwast *et al.*, 2009). De resulterende kaart (zie Figuur 7.13) geeft met een resolutie van 50 x 50 m de grondwaterdiepte in vier klassen: < 1 m-mv, 1-2 m-mv, 2-3 m-mv en > 3 m-mv. In het SWAP-model worden de klassegrenzen toegepast als vaste grondwaterstad in het profiel, of vrije drainage voor de laatste klasse.



Figuur 7.13 Grondwaterdieptekaart voor Vlaanderen met klassen grondwaterdiepte van 1 m-mv, 2 m-mv, 3 m-mv of >3 m-mv en aanduiding van de vijf geselecteerde stroomgebieden (van der Kwast *et al.*, 2009).

De klimatologische tijdsreeksen op dagbasis in het originele Vlaanderen-SWAP-model zijn gebaseerd op de MARS (JRC) en ECA&D (EU Ensembles project) databases. Voor dit project zijn nieuwe klimatologische tijdsreeksen gebruikt (zie volgende sectie).

Binnen de context van deze studie kent het model enkele beperkingen:

- Bodemhydraulische relaties kunnen enkel ingevoerd worden als Mualem-van Genuchten-parameters, terwijl deze niet de beste fit van de experimentele waarden geven. Uit de SWAP-berekeningen voor de zes bemeten profielen is echter gebleken dat gebruik van Mualem-van Genuchten-parameters een aanvaardbare fit van de gemeten data geeft.
- De onderste randvoorwaarde voor waterstroming in de kolommen is een vaste grondwaterstand (1, 2 of 3 m-mv) of vrije drainage. Dit is niet inherent aan de code als wel aan de parametrisatie, aangezien tijdsvariabele metingen van de grondwaterstand niet op regionale schaal beschikbaar zijn.
- GeoPEARL 3.3.3 kan enkel met dagelijkse neerslagwaarden werken en niet met fijnere tijdsresolutie. Voor het inschatten van het effect van verdichting op run-off is die resolutie niet optimaal. Daarom is beslist om bijkomend voor één pilotgebied ook simulaties met uurlijkse neerslagwaarden uit te voeren om de gevoeligheid van de resultaten voor deze randvoorwaarde in te schatten.

7.3.2 Selectie studiegebieden

De gevolgde aanpak voor de selectie van studiegebieden kan als volgt samengevat worden:

1. De stroomgebieden werden gedefinieerd als afstroomgebieden van de Vlaamse oppervlaktewaterlichamen zoals gedefinieerd door VMM.
2. Uit deze set werden afstroomgebieden van kunstmatige waterlichamen en grensgebieden weggefilterd.
3. Er werd een drempel toegepast van minstens 65% oppervlakte ingenomen door landbouw (op basis van de Vlaamse landbouwgebruikspercelenkaart 2014).
4. Binnen deze deelset werd dan gekeken naar voldoende aanwezigheid van bodems gevoelig voor verdichting en naar een variatie in grondwaterdiepte over de vijf gebieden.

Een overzicht van de vijf studiegebieden is gegeven in Tabel 7.9. De ligging van de gebieden op de hybride-gevoeligheidskaart voor verdichting en de grondwaterdieptekaart is weergegeven in Figuur 7.13 en Figuur 7.14.

Tabel 7.9

Overzicht van de vijf geselecteerde studiegebieden.

OWL	Naam	Oppervlakte (ha)	% landbouw	Gemiddelde grondwaterdiepte (m-mv)(1)	% verdichtings-gevoelige gronden(2)
VL05_105	Gete I	2138	75,3	2,1	75
VL05_180	Zarrenbeek	4145	80,8	1,1	72
VL05_44	Devebeek	5103	71,2	2,6	64
VL05_47	Heulebeek	10830	66,2	2,9	81
VL11_96	Begijnenbeek	5287	65,1	3,4	57

(1) berekend op basis van klassegrenzen grondwaterdieptekaart

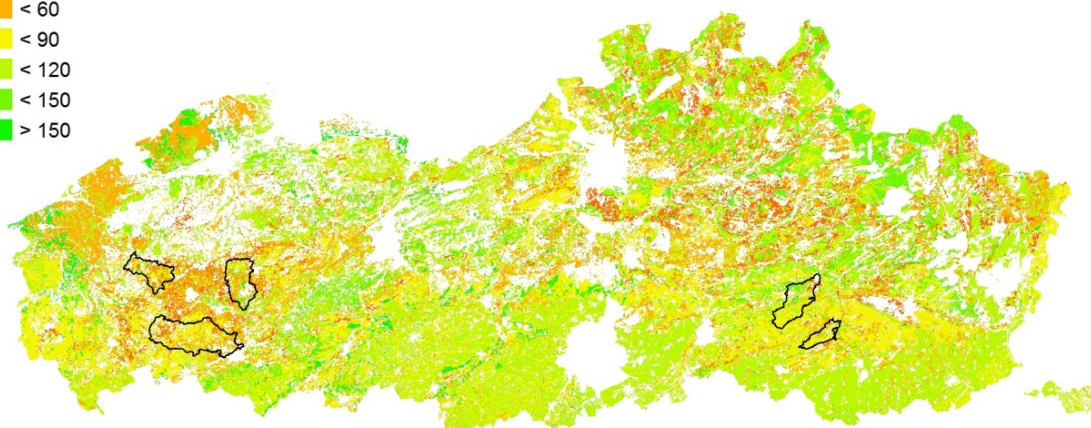
(2) PCS < 90 kPa

Legende

□ Selectie Gebieden

Hybride Gevoeligheidskaart
PCS

< 30
< 60
< 90
< 120
< 150
> 150



0 10 20 40 60 80
Kilometers

Figuur 7.14 Hybride-gevoeligheidskaart verdichting met aanduiding van de vijf geselecteerde stroomgebieden (van west naar oost: Zarrenbeek, Heulebeek, Devebeek, Begijnenbeek, Gete).

7.3.3 Klimaatscenario's

7.3.3.1 Perturbatietool

De klimaatscenario's voor deze studie zijn berekend met de CCI-HYDR tool, origineel ontwikkeld door Ntegeka & Willems (2009). Historische neerslag en potentiële verdamping tijdreeksen worden door de CCI-HYDR tool geperturbeerd op basis van klimaatveranderingen voorspeld door beschikbare Regionale en Globale klimaatmodellen (RCM en GCM). Voor de perturbatie wordt gebruikgemaakt van seizoenafhankelijke perturbatiefactoren die per kwantiel de veranderingsfactor tussen de controle- en scenarioperiode van de klimaatmodellen weergeven (Willems & Vrac, 2011; Willems, 2013; Ntegeka *et al.*, 2014). Deze aanpak op basis van een statistische neerschaling resulteert in geperturbeerde historische tijdreeksen, die representatief zijn voor toekomstige klimaatscenario's voor België. Tijdschalen tot 2100 zijn mogelijk.

In dit project is gebruikgemaakt van de recente R-versie van de CCI-HYDR tool (Van Uytven en Willems, 2016). De gebruikte perturbatiefactoren zijn deze voor België (Ukkel) die standaard in de tool zijn opgenomen en die recentelijk geüpdatet zijn op basis van de CMIP5 klimaatmodel runs (Tabari *et al.*, 2015). Om de perturbatiefactoren te berekenen, werden door Tabari *et al.* (2015) de nieuwe CMIP5-klimaatmodelresultaten voor België (meer dan 200 klimaatmodelruns) geëxtraheerd en statistisch geanalyseerd voor neerslag (inclusief extreme neerslag) temperatuur en potentiële evapotranspiratie (ET_o). De klimaatscenario's zijn gebaseerd op de verschillende 'Representative concentration pathways' (RCPs).

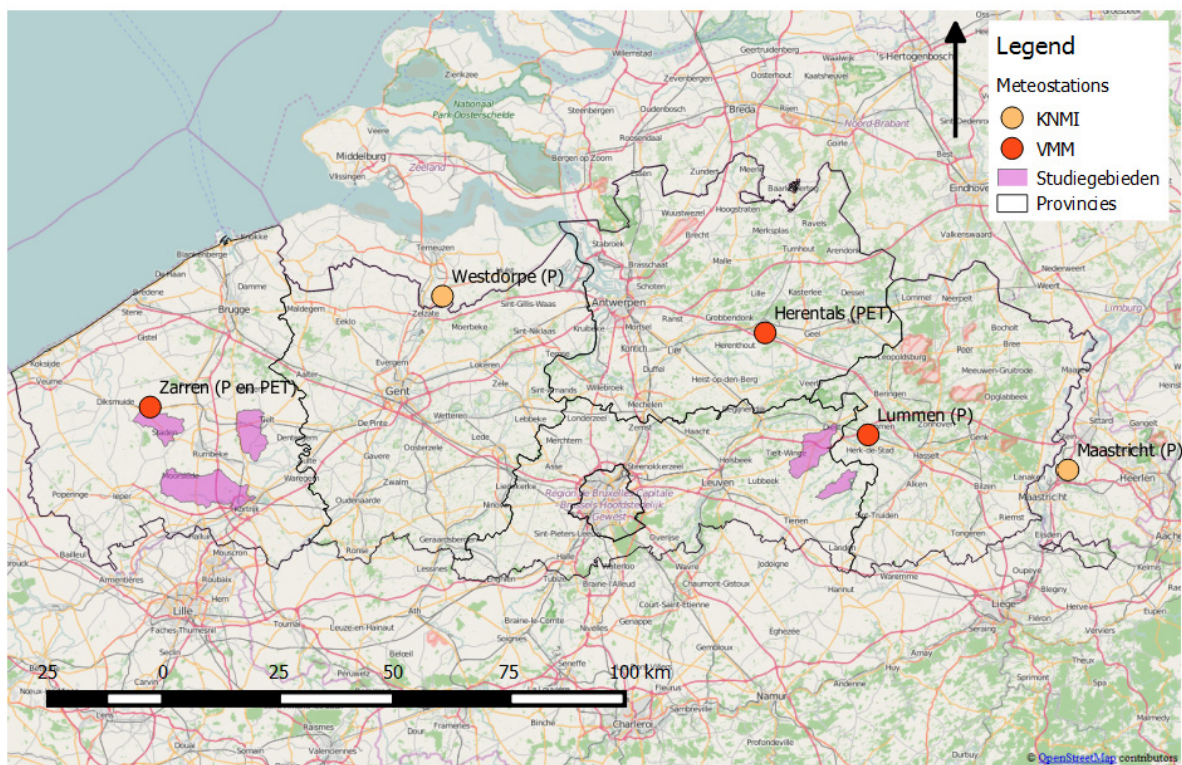
Gebaseerd op gecombineerde veranderingen en effecten op de neerslag, temperatuur en ET_o stelt de CCI-HYDR tool vier klimaatscenario's voor:

- 'high winterscenario' met natte winters en droge zomers
- 'high summerscenario' met droge winters en natte zomers
- 'mean scenario' met gemiddeld natte winters en zomers
- 'low scenario' met droge winters en droge zomers

De range tussen deze vier scenario's geeft een indicatie van de onzekerheid van de klimaatscenario's.

7.3.3.2 Tijdreeksen

Input voor de klimaatperturbatietool zijn continue historische neerslag en potentiële verdamping tijdreeksen. Omdat we de modellering met een uurlijkse tijdstap willen uitvoeren, moeten de historische tijdreeksen een uurlijkse tijdstap hebben. Omdat drie studiegebieden in het westen van Vlaanderen liggen en de twee andere in het oosten van Vlaams-Brabant, voorzien we afzonderlijke historische neerslag en potentiële verdampingstijdreeksen voor deze twee zones (Figuur 7.15). Voor beide gebieden zijn uurlijkse tijdreeksen van 1 januari 2005 tot 31 december 2015 opgemaakt.



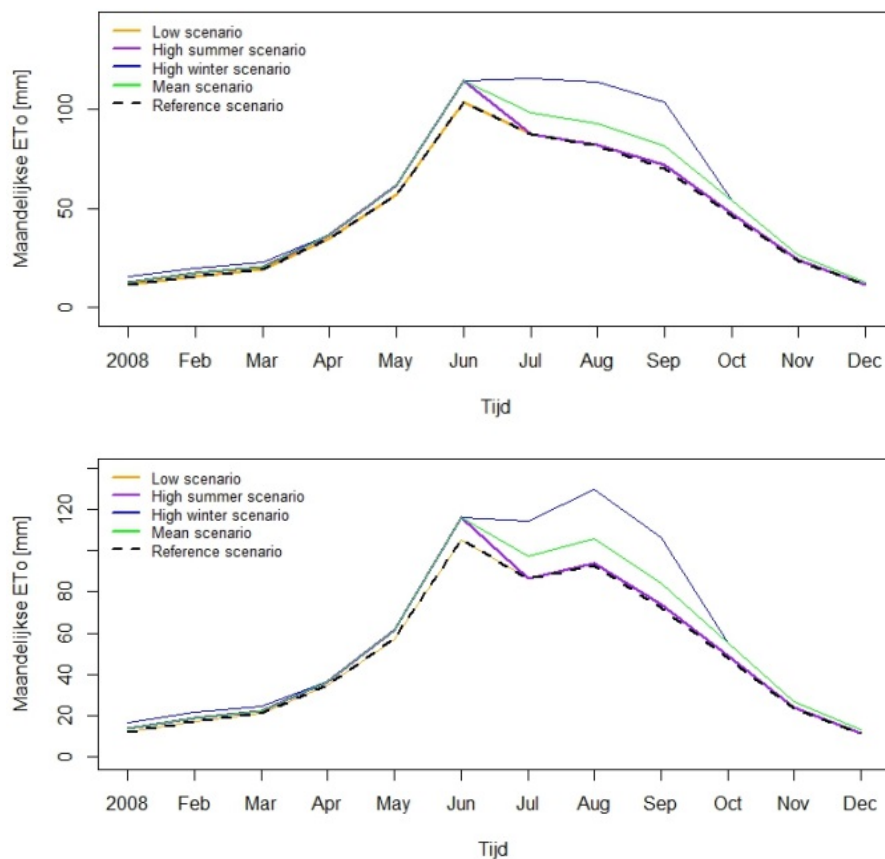
Figuur 7.15 Locatie van de gebruikte meteostations voor deze studie. De meteostations in Vlaanderen zijn eigendom van VMM. Stations in Nederland worden uitgebaat door KNMI.

Voor de drie studiegebieden in West-Vlaanderen vertrekken we van de uurlijkse neerslag en potentiële verdampingstijdreeksen van het VMM meteostation te Zarren. Waar er geen neerslaggegevens beschikbaar zijn voor het station in Zarren, worden deze opgevuld door neerslaggegevens van het KNMI station in Westdorpe, Nederland. Wanneer er geen ETo-gegevens zijn voor Zarren, worden deze eerst opgevuld door de ETo-gegevens van het station in Herentals. De daarna nog ontbrekende tijdstappen worden opgevuld met de jaarlijks gemiddelde waarde voor dat bepaalde uur.

Voor de twee resterende studiegebieden in Vlaams-Brabant zijn de neerslaggegevens gebaseerd op het meteostation in Lummen. Voor Lummen is geen ETo-tijdreeks beschikbaar, er wordt daarom gebruikgemaakt van het VMM meteostation in Herentals voor de ETo-gegevens voor deze twee studiegebieden. Waar er geen neerslaggegevens beschikbaar zijn voor het station in Lummen, worden deze opgevuld door neerslaggegevens van het KNMI-station in Maastricht, Nederland. Wanneer er geen ETo-gegevens zijn voor Herentals, worden deze eerst opgevuld door de ETo-gegevens van het station in Zarren. De daarna nog ontbrekende tijdstappen worden opgevuld met de jaarlijks gemiddelde waarde voor dat bepaalde uur.

7.3.3.3 Referentiescenario versus klimaatscenario's

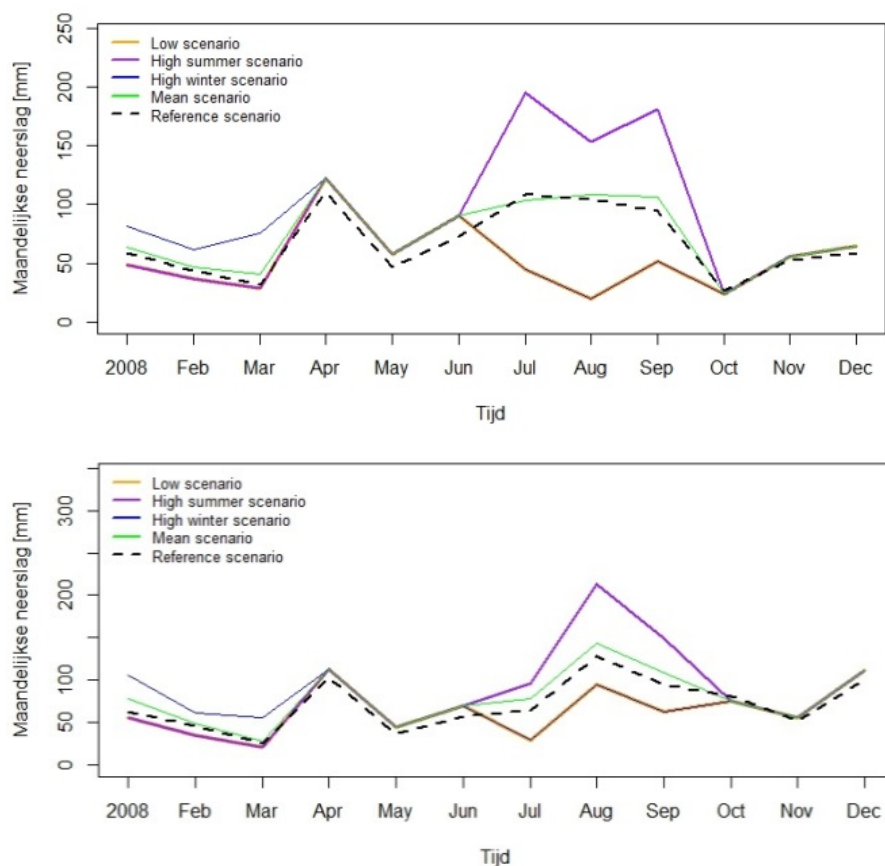
In Figuur 7.16 en Figuur 7.17 wordt respectievelijk de geobserveerde maandelijkse ETo en neerslag in 2008 vergeleken met de overeenkomstige voorspelling onder invloed van de verschillende klimaatscenario's (2100). De bovenste figuur bevat telkens de data die we gebruiken voor de drie studiegebieden in West-Vlaanderen. De onderste figuur bevat de data voor de studiegebieden in Vlaams-Brabant.



Figuur 7.16 Vergelijking van de geobserveerde maandelijkse ETo in 2008 met de maandelijkse ETo van de verschillende klimaatscenario's (2100) voor de stations in Zarren (onder) en Herentals (boven).

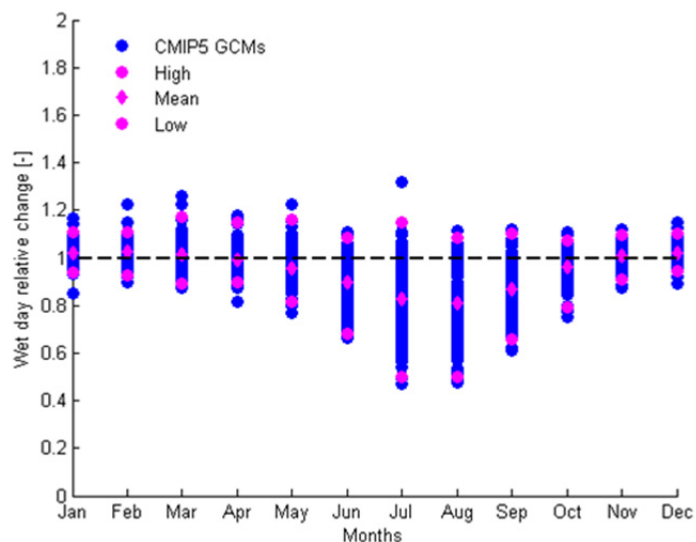
Figuur 7.16 toont dat de potentiële maandelijkse verdamping in de zomer sterk stijgt voor het 'high winter'-scenario en matig stijgt voor het 'mean'-scenario. Voor alle andere scenario's is geen of slechts een beperkte stijging van de ETo. Voor de maanden van oktober tot en met mei is de verandering van de ETo ten opzichte van het referentiescenario voor alle scenario's beperkt.

Voor de neerslag (Figuur 7.17) zien we een sterke stijging van de neerslag tijdens de zomer voor het 'high summer'-scenario. Voor het 'high winter'-scenario is de stijging van de totale maandelijkse neerslag in de winter beperkter. De 'high winter'- en 'low'-scenario's voorspellen een daling van de neerslag in de zomer. Het 'mean'-scenario verschilt voor de totale maandelijkse neerslag slechts weinig van het referentiescenario.

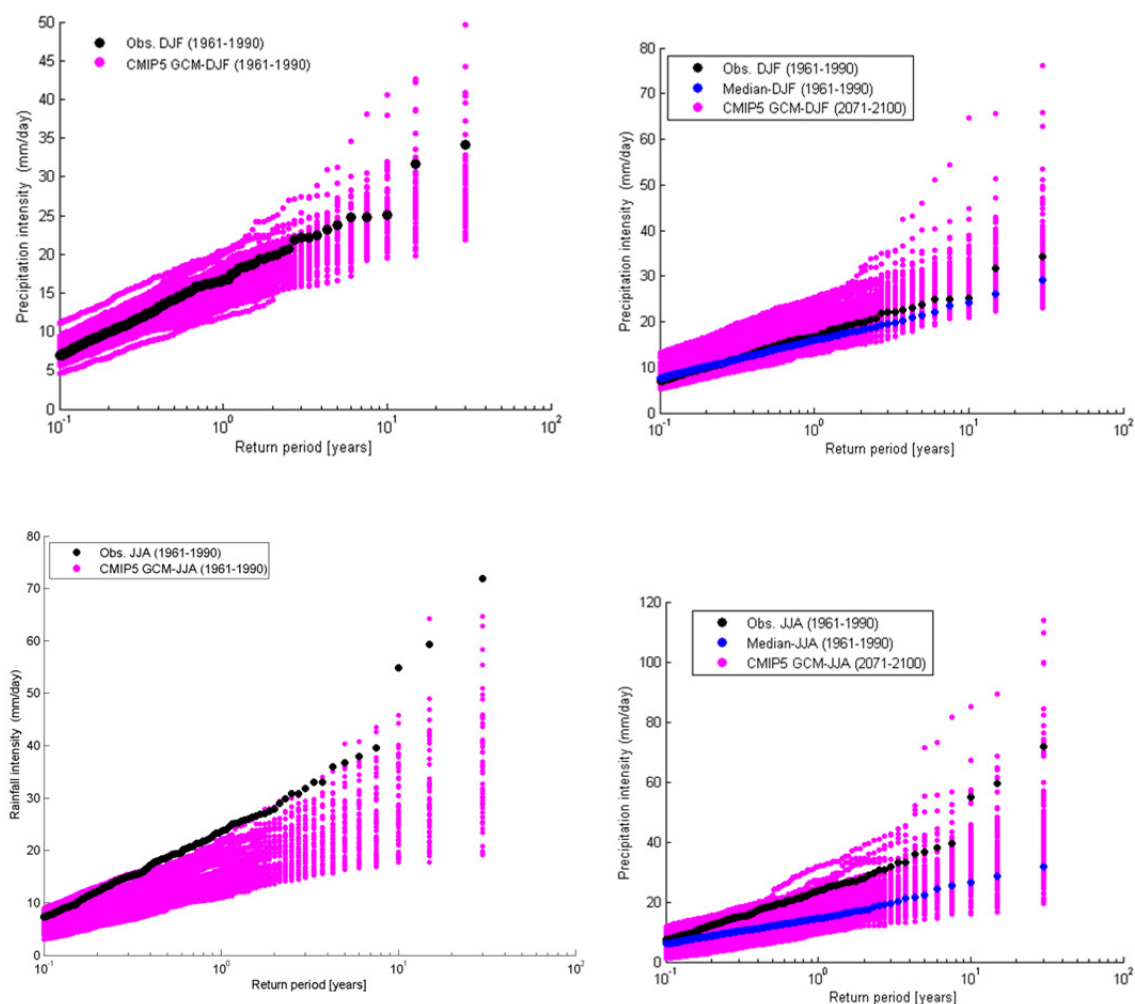


Figuur 7.17 Vergelijking van de geobserveerde maandelijkse neerslag in 2008 met de maandelijkse ET_o van de verschillende klimaatscenario's (2100) voor de stations in Zarren (onder) en Lummen (boven).

Naast de totale maandelijkse neerslag en potentiële verdamping houdt de CCI-HYDR-tool ook rekening met de verandering van het aantal dagen met neerslag en de neerslagintensiteit. Voor de volledigheid worden de perturbatiefactoren voor dagen met neerslag en neerslagintensiteit voor Ukkel, zoals door Tabari *et al.* (2014) bepaald op basis van de CMIP5-data, getoond in respectievelijk Figuur 7.18 en Figuur 7.19. Voor de zomer voorspellen de meeste klimaatruns een daling van het aantal dagen met neerslag (Figuur 7.18). De voorspelde verandering van de neerslagintensiteit verschilt sterk tussen de verschillende klimaatruns (Figuur 7.19).



Figuur 7.18 Perturbatiefactoren voor het aantal dagen met neerslag voor alle RCP's zoals berekend uit de CMIP5-data (Bron: Tabari et al., 2014).



Figuur 7.19 Vergelijking van de neerslagintensiteit voor de CMIP5 GCM control run (1961-1990) met de observaties in Ukkel en scenario (2071-2100) runs voor alle RCP-scenario's tijdens de winter (DJF) (boven) en tijdens de zomer (JJA) (onder) (Bron: Tabari et al., 2014).

7.3.4 Berekeningen

Binnen de vijf geselecteerde studiegebieden zijn er 209 unieke combinaties van bodemtype en grondwaterdiepte. Zoals beschreven in de vorige sectie, is er uitgegaan van twee datasets voor klimaat voor de gebieden in het westen enerzijds en in het oosten anderzijds.

Voor de beschouwde SWAP-kolommen worden twee factoren gevarieerd over de verschillende scenario's:

1) Bodemhydraulische parameters:

- **Niet-verdicht:** ruimtelijke schematisatie Vlaanderen-model met bodemhydraulische parameters afgeleid van de (oorspronkelijke) Aardewerk-databank met de pedotransferfuncties van Wösten *et al.* (1999).
- **verdicht:** bodemhydraulische parameters op basis van de pedotransferfuncties afgeleid in deze studie op basis van metingen verdichte bodems en toegepast op dezelfde bodemeigenschappen uit Aardewerk. De gelaagdheid van het profiel is in rekening gebracht door schattingen te maken op o.m. basis van organisch stofgehalte om een onderscheid te maken tussen TOP enerzijds en SUB/CSUB anderzijds.

2) **Klimaat:** er wordt gerekend met huidig klimaat en drie klimaatscenario's: 'high winter'-scenario, 'high summer'-scenario en 'low'-scenario. Binnen alle scenario's wordt een periode van elf jaar doorgerekend (gebaseerd op metingen 2005 tot 2015), voorafgegaan door een opwarmperiode van vier jaar.

Dit geeft een totaal van acht scenario's voor de vijf gebieden (voor een totaal van 209 unieke combinaties van bodemtype-grondwaterstand-klimaat). In de scenario's wordt geen rekening gehouden met mogelijke veranderingen in wortelgroei, waterstressrespons van de vegetatie of andere teelten.

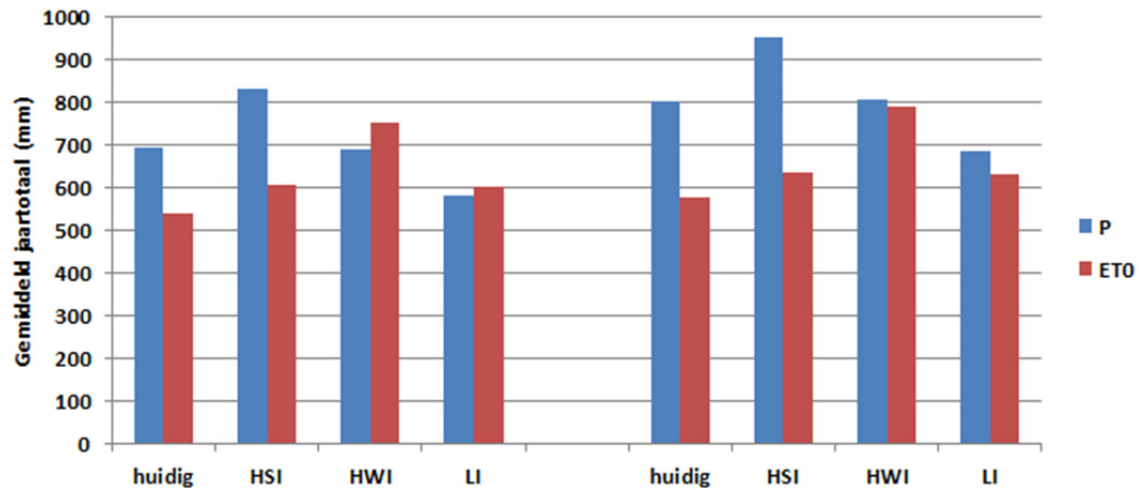
Bijkomend is voor één gebied (nl. Heulebeek) dezelfde set van acht scenario's met uurlijkse neerslag doorgerekend om een betere inschatting te hebben van run-off. Deze berekeningen zijn uitgevoerd met Hydrus-1D (Simunek *et al.*, 2010), een numeriek model dat dezelfde fysische vergelijkingen als SWAP oplost. De keuze voor het model is ingegeven door praktische overwegingen en haalbaarheid binnen het tijdsbestek van de studie. Met de opzet van de berekeningen (onderste randvoorwaarde vaste grondwaterstand, geen laterale drainage) worden geen verschillende uitkomsten tussen beide modellen verwacht. Deze berekeningen zijn uitgevoerd voor één jaar uit de dataset (2008) om de rekentijd te beperken.

7.3.5 Resultaten

7.3.5.1 De vijf studiegebieden

Voor de vijf studiegebieden zijn SWAP-simulaties uitgevoerd voor een periode van elf jaar voor verdichte/niet-verdichte bodems en bij huidig klimaat en onder drie klimaatscenario's. Deze berekeningen gebruiken dagwaarden voor neerslag en potentiële evapotranspiratie als randvoorwaarde.

De gemiddelde jaartotalen van de gebruikte neerslag- en ET0-tijdsreeksen zijn weergegeven in Figuur 7.20. De kaarten voor de gebieden van jaarlijkse neerslag, actuele transpiratie, actuele evaporatie, grondwatervoeding en run-off zijn gegeven in Bijlage 4.



Figuur 7.20 Gemiddelde jaartotalen van neerslag P en potentiële evapotranspiratie ETO bij huidig klimaat, 'high summer' klimaatscenario, 'high winter' klimaatscenario en 'low' klimaatscenario voor de westelijke gebieden Zarrenbeek, Devebeek en Heulebeek links en de oostelijke gebieden Gete en Begijnenbeek rechts.

De berekende gemiddelde jaartotalen voor transpiratie door planten zijn gegeven in Tabel 7.10. In deze tabel is ook een indicator voor waterstress opgenomen: deze is berekend als de verhouding tussen actuele transpiratie en potentiële transpiratie. In optimale omstandigheden is deze gelijk aan 1 en hoe kleiner de waarde wordt, hoe meer waterstress de vegetatie ondervindt. Dit kan zowel optreden bij droogte omwille van waterbeschikbaarheid als onder zeer natte omstandigheden omwille van zuurstofbeschikbaarheid. De respons van de plant op waterstress is in SWAP ingebouwd met de functie van Feddes (transpiratie van de plant neemt lineair af vanaf een ingegeven drempelwaarde voor drukhoogte in de wortelzone zowel bij te droge als te natte omstandigheden).

Onder de verschillende klimaatscenario's is de berekende transpiratie altijd hoger dan bij ongewijzigd klimaat. Het effect is het grootst voor het 'high winter'-scenario en is ongeveer even groot voor het 'high summer'- en 'low'-scenario. Bij verdichting neemt de transpiratie bij ongewijzigd klimaat af. Dit is een klein effect en is het meest uitgesproken in de drie westelijke gebieden (Zarrenbeek, Devebeek, Heulebeek). Uit Figuur 7.21 en Figuur 7.22 blijkt echter dat zelfs als de berekende totalen klein zijn, er toch duidelijke ruimtelijke verschillen zijn. Onder de klimaatscenario's is er een gewijzigde respons bij verdichting: de toename in transpiratie ligt lager in de verdichte situatie vergeleken met de niet-verdichte situatie voor het 'high winter'- en 'low'-scenario.

Wanneer we de waterstressindicator in de verschillende situaties vergelijken, blijkt dat de berekende waterstress onder alle klimaatscenario's hoger is dan bij ongewijzigd klimaat (lagere waarden voor de indicator). Bij verdichting is er een kleine verhoging van de waterstress bij huidig klimaat, maar de waterstress neemt meer toe onder de klimaatscenario's bij verdichting dan bij de niet-verdichte situatie. De verschillen zijn met name zichtbaar in het 'high winter'- en 'low'-scenario, en treden nauwelijks op in het 'high summer'-scenario. Gezien het 'high winter'- en 'low'-scenario gekenmerkt worden door een hogere potentiële evapotranspiratie en geen of weinig (beperkt in de winter in 'high winter') toename in neerslag, kan men de toename in waterstress voornamelijk toeschrijven aan een toename in droogtestress.

Tabel 7.10

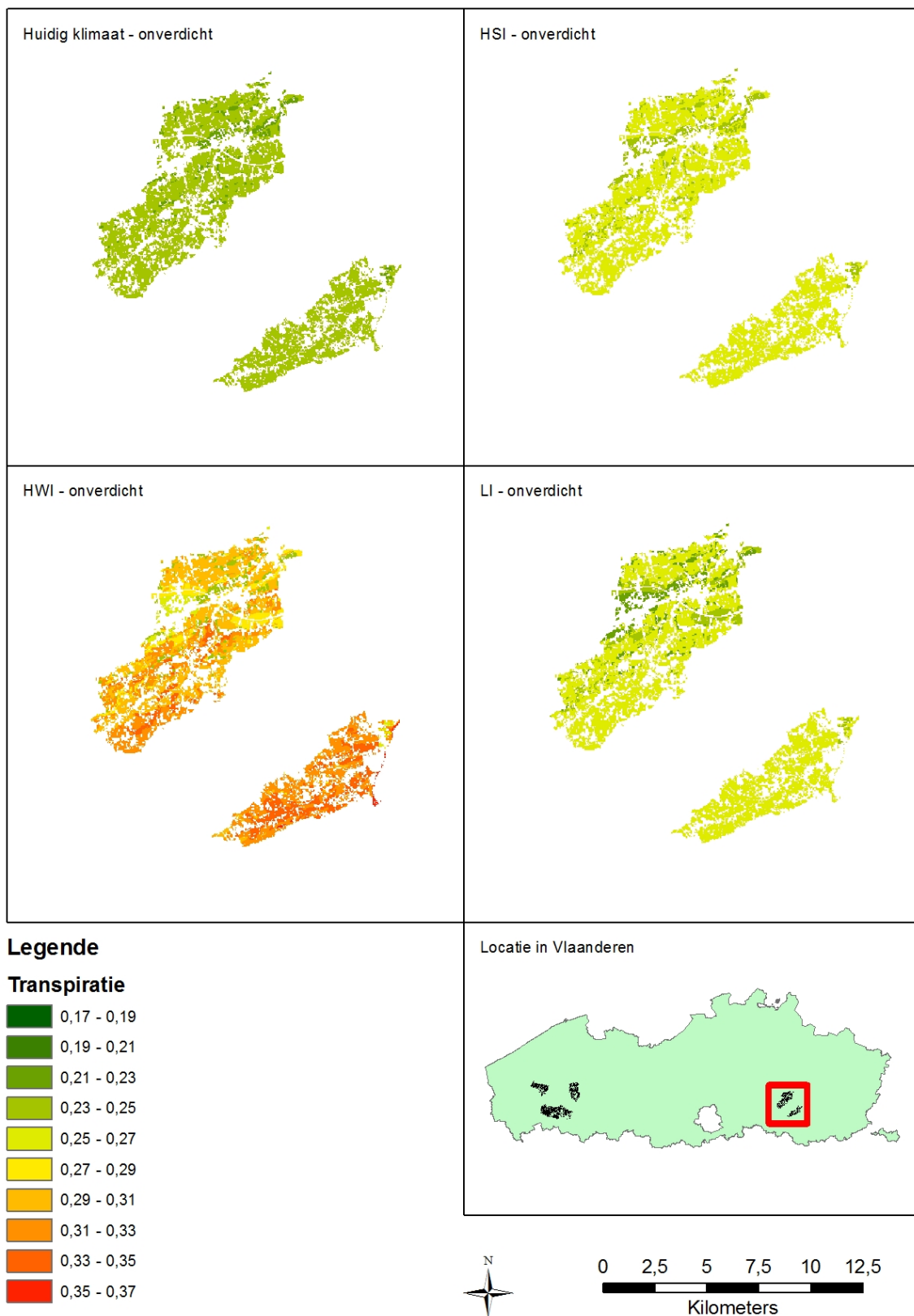
Berekende gemiddelde jaartotalen voor actuele transpiratie en waterstress (berekend als verhouding actuele tot potentiële transpiratie) voor de vijf gebieden.

		Huidig klimaat		HSI		HWI		LI	
Zarrenbeek									
Trp Act (mm)	niet-verdicht	217,6	(100,0)	238,8	(109,7)	288,6	(132,6)	243,3	(111,8)
	verdicht	211,4	(97,1)	230,4	(105,9)	251,1	(115,4)	220,7	(101,4)
Water stress	niet-verdicht	0,99		0,98		0,83		0,95	
	verdicht	0,96		0,95		0,73		0,86	
Devebeek									
Trp Act (mm)	niet-verdicht	217,4	(100,0)	238,7	(109,8)	276,7	(127,3)	238,2	(109,6)
	verdicht	212,6	(97,8)	233,5	(107,4)	248,5	(114,3)	220,2	(101,3)
Water stress	niet-verdicht	0,99		0,98		0,80		0,93	
	verdicht	0,97		0,96		0,72		0,86	
Heulebeek									
Trp Act (mm)	niet-verdicht	218,2	(100,0)	239,5	(109,8)	285,2	(130,7)	243,0	(111,4)
	verdicht	212,4	(97,3)	232,8	(106,7)	249,1	(114,2)	220,3	(101,0)
Water stress	niet-verdicht	0,99		0,98		0,82		0,95	
	verdicht	0,97		0,96		0,72		0,86	
Begijnenbeek									
Trp Act (mm)	niet-verdicht	232,8	(100,0)	250,6	(107,6)	299,7	(128,7)	252,2	(108,3)
	verdicht	229,5	(98,5)	249,5	(107,1)	276,6	(118,8)	238,9	(102,6)
Water stress	niet-verdicht	0,99		0,98		0,82		0,93	
	verdicht	0,98		0,98		0,76		0,89	
Gete									
Trp Act (mm)	niet-verdicht	234,3	(100,0)	252,9	(108,0)	326,7	(139,4)	262,7	(112,1)
	verdicht	234,0	(99,9)	253,8	(108,4)	306,1	(130,7)	256,1	(109,3)
Water stress	niet-verdicht	1,00		0,99		0,90		0,97	
	verdicht	0,99		0,99		0,84		0,95	

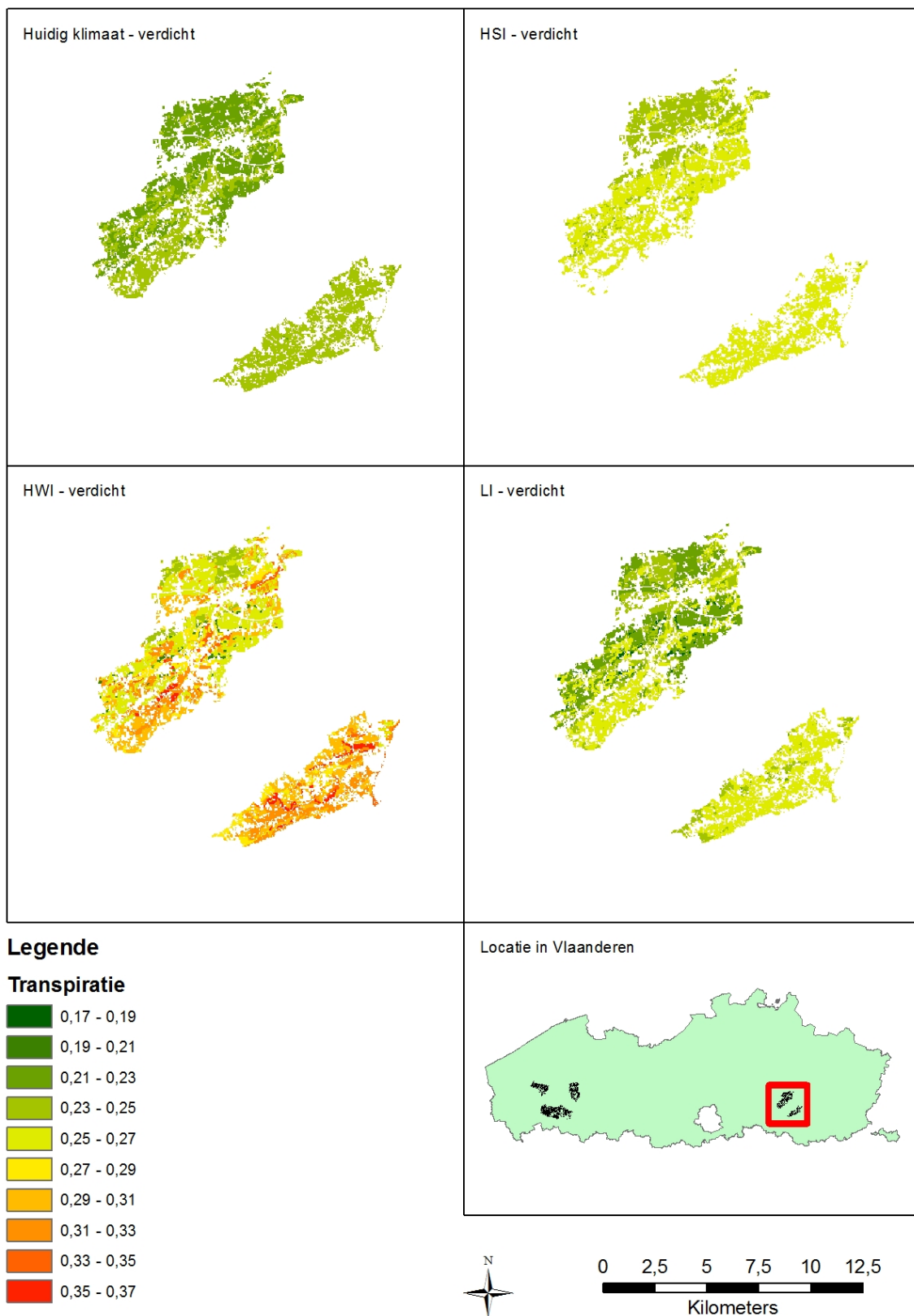
HSI: 'high summer', het klimaatscenario met droge winters en natte zomers

HWI: 'high winter', het klimaatscenario met natte winters en droge zomers

LI: 'low' klimaatscenario met droge winters en droge zomers



Figuur 7.21 Berekende actuele transpiratie voor Begijnenbeek en Gete voor de niet-verdichte situatie bij verschillende klimaatscenario's.



Figuur 7.22 Berekende actuele transpiratie voor Begijnenbeek en Gete voor de verdichte situatie bij verschillende klimaatscenario's.

Ook de effecten op grondwatervoeding onder de verschillende scenario's zijn geëvalueerd. In Tabel 7.11 zijn de berekende gemiddelde jaartotalen voor de waterflux komende uit de top meter van de bodem gegeven. Hieruit blijkt dat de effecten van de klimaatscenario's verschillend zijn: de grondwatervoeding neemt toe in het 'high summer'-scenario en is lager in het 'high winter'- en 'low'-

scenario. Bij verdichting en ongewijzigd klimaat wijzen de simulaties op een lichte toename in grondwatervoeding, maar dit effect is klein en treedt niet op in het gebied Gete. Onder de klimaatscenario's is er minder afname in grondwatervoeding voor het 'high winter'- en 'low'-scenario bij verdichting vergeleken met de niet-verdichte situatie.

De voeding naar het grondwater kan beschouwd worden als de term die de waterbalans van het bodemprofiel sluit en wordt niet rechtstreeks gedreven door de atmosferische randvoorwaarden aan de top. De berekende grondwatervoeding zal ook beïnvloed worden door het opleggen van een vaste grondwaterstand als onderste randvoorwaarde aan het bodemprofiel, omdat het model onderaan wateraanvoer of -afvoer zal toestaan om dit vaste niveau aan te houden. Daarom reflecteren deze berekende waarden het effect van een lagere berekende transpiratie, een onderschatting van de oppervlakkige afstroming omwille van de tijdsresolutie van de neerslag en het opleggen van een vaste grondwaterstand onderaan het profiel.

Tabel 7.11

Berekende gemiddelde jaartotalen voor grondwatervoeding voor de vijf gebieden.

Grondwatervoeding (mm)		Huidig klimaat		HSI		HWI		LI	
Zarrenbeek	niet-verdicht	294	(100,0)	387	(131,7)	208	(70,7)	162	(55,1)
	verdicht	299	(101,8)	393	(133,8)	242	(82,5)	182	(62,1)
Devebeek	niet-verdicht	294	(100,0)	387	(131,7)	219	(74,5)	167	(56,8)
	verdicht	298	(101,5)	391	(133,2)	246	(83,5)	183	(62,3)
Heulebeek	niet-verdicht	293	(100,0)	386	(131,8)	211	(72,0)	162	(55,4)
	verdicht	298	(101,8)	392	(133,7)	245	(83,5)	183	(62,5)
Begijnenbeek	niet-verdicht	360	(100,0)	466	(129,3)	286	(79,5)	238	(64,9)
	verdicht	363	(100,7)	469	(130,3)	308	(85,6)	246	(68,4)
Gete	niet-verdicht	358	(100,0)	465	(129,6)	259	(72,1)	223	(62,3)
	verdicht	358	(99,8)	468	(130,7)	278	(77,5)	229	(63,9)

Tot slot is ook een analyse gemaakt van de verschillen in jaarlijkse run-off voor de vijf gebieden onder de verschillende scenario's (Tabel 7.12). De berekende waarden voor run-off zijn zeer laag, waarschijnlijk mede te wijten aan het gebruik van dagelijkse neerslag als randvoorwaarde, waardoor de run-off onderschat wordt. In de drie westelijke gebieden (Zarrenbeek, Devebeek, Heulebeek) is er een toename in run-off bij verdichting, vooral onder de klimaatscenario's en het meest uitgesproken in het 'high summer'-scenario. In de oostelijke gebieden Gete en Begijnenbeek is de trend omgekeerd. Dat is allicht te wijten aan het gebruik van andere meteo-data eerder dan aan verschillen in bodemeigenschappen.

Tabel 7.12

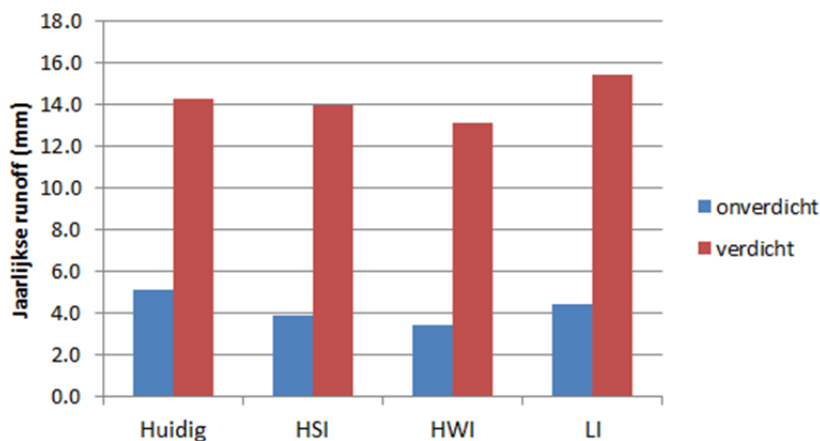
Berekende gemiddelde jaartotalen voor run-off voor de vijf gebieden.

Runoff (mm)	Huidig klimaat		HSI		HWI		LI	
	onverdicht	verdicht	onverdicht	verdicht	onverdicht	verdicht	onverdicht	verdicht
Zarrenbeek	0,0	0,4	0,2	2,1	0,0	0,5	0,0	0,2
Devebeek	0,0	0,0	0,0	0,7	0,0	0,1	0,0	0,1
Heulebeek	0,0	0,0	0,0	0,9	0,0	0,1	0,0	0,0
Begijnenbeek	0,4	0,0	7,7	4,4	0,6	0,5	0,9	0,5
Gete	0,5	0,0	6,2	0,5	0,5	0,1	0,5	0,0

7.3.5.2 Uurlijkse neerslag

Voor het gebied Heulebeek zijn er bijkomend simulaties gedaan voor 2008 met uurlijkse neerslag en potentiële evapotranspiratie als randvoorwaarde. De berekende run-off is weergegeven in Figuur 7.23. Uit deze resultaten blijkt dat bij verdichting er een aanzienlijke toename (tot een factor 4 bij gebruik van uurlijkse neerslagdata) is in berekende run-off en dat dit effect sterker is dan het effect van

klimaatscenario's. Daarbij moet worden gerealiseerd dat deze factor verder kan toenemen bij gebruik van neerslagdata voor kortere tijdintervallen, zoals kwartierwaarden.



Figuur 7.23 Berekende jaarlijkse run-off voor het gebied van de Heulebeek berekend op basis van uurlijkse neerslag.

Er is ook een beperkte analyse gedaan naar andere effecten op de waterhuishouding in de Heulebeek. De trends in berekende waterstress liggen helemaal in lijn met de berekeningen met dagwaarden voor neerslag: terwijl de waterstress toeneemt van 0,99 naar 0,82 en 0,95 in resp. het 'high winter'- en 'low'-scenario in het niet-verdichte scenario, neemt dit toe naar 0,75 en 0,89 bij verdichting (terwijl dit bij berekeningen in SWAP naar 0,72 en 0,86 ging; zie Tabel 2). Wat betreft de grondwatervoeding is het effect van de klimaatscenario's een toename of afname afhankelijk van het scenario (naar 47-117% van referentiewaarde), terwijl bij verdichting de effecten licht gedempt worden (verandering naar 73-109% van waarde bij ongewijzigd klimaat).

7.3.6 Conclusies

Uit de ruimtelijke verdichtingsscenario's zijn enkele conclusies te trekken op basis van de berekende waterbalansen voor de studiegebieden:

- Transpiratie door planten is onder alle klimaatscenario's hoger dan bij ongewijzigd klimaat. In verdichte bodems is de transpiratie (licht) lager in vergelijking tot de niet-verdichte situatie, en de stijging in transpiratie onder de klimaatscenario's is kleiner dan in de niet-verdichte situatie. Wanneer gekeken wordt naar waterstress, is te zien dat de waterstress voor vegetatie toeneemt en dat dit effect meer uitgesproken is bij verdichting.
- De berekende grondwatervoeding is groter onder het 'high summer'-klimaatscenario en lager onder het 'high winter'- en 'low'-klimaatscenario. Het effect van verdichting is niet zo uitgesproken: er is een kleine toename bij verdichting voor de drie westelijke gebieden (gekoppeld aan een afname in transpiratie, maar niet in de oostelijke gebieden. De afname in grondwatervoeding is kleiner voor het 'high winter'- en 'low'-klimaatscenario in de verdichte situatie vergeleken met de niet-verdichte situatie. De berekende waarden zijn echter sterk gelinkt aan de modelopzet (vaste grondwaterstand) en de andere termen van de waterbalans (minder toename in transpiratie).
- De evaluatie van run-off geeft geen consistent beeld over de vijf gebieden wanneer gerekend wordt met dagelijkse neerslag. Voor de Heulebeek zijn scenario's met uurlijkse neerslag doorgerekend en op basis van die resultaten wordt een sterke toename van run-off verwacht in de verdichte situatie en dat effect is groter dan het effect van wijzigend klimaat.
- Het effect van verdichting op de waterhuishouding is op basis van de resultaten van de regionale simulaties beperkt. Bij scenario's van klimaatverandering is de reactie echter verschillend bij niet-verdichte en verdichte bodems en zijn de verdichte bodems droogtegevoeliger (relatief lagere transpiratie en meer toename in waterstress).

8 Conclusies

Het opmeten van diverse fysische en hydraulische bodemkenmerken op kopakkers en middendelen van de geselecteerde 26 percelen over de diverse hoofdbodemtextuurklassen en risicoklassen voor bodemverdichting heen, liet toe om steekproefsgewijs bodemverdichting te inventariseren. Er werden in totaal 1560 metingen van de indringingsweerstand gedaan en 936 ongestoorde stalen genomen ten behoeve van het bepalen van de verzadigde doorlatendheid, verdeeld over drie diepten (bovengrond, verdichte ondergrond inclusief ploegzool en diepere ondergrond). Op een beperkter aantal daarvan werden bulkdichtheid en de waterretentie- en doorlatendheidscurve bepaald alsook basisbodemeigenschappen als textuur en organisch-koolstofgehalte.

Globaal gezien kon op basis van een aantal geselecteerde bodemkwaliteitsindicatoren die typisch in een context van bodemverdichting worden aangewend, worden vastgesteld dat de in deze studie bemonsterde percelen onderhevig waren aan bodemverdichting. De geselecteerde bodemkwaliteitsindicatoren waren de indringingsweerstand, de bulkdichtheid, de luchtcapaciteit, de verzadigde doorlatendheid (geometrisch gemiddelde en minimale waarde) en het macroporiënvolume. Vooral de indringingsweerstand was voor alle percelen op verschillende plaatsen vanaf de verdichte ondergrond te hoog ($> 3 \text{ MPa}$), waardoor wortelgroei belemmerd kan worden. De luchtcapaciteit was op de meeste percelen te laag ($< 0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), zeker vanaf de verdichte ondergrond, waardoor een goede luchthuishouding daar in het gedrang kan komen, zeker onder natte omstandigheden. Het gunstigst waren de zandbodems, al was ook hier de luchtcapaciteit in de verdichte ondergrond in een paar gevallen te laag.

De bulkdichtheid, een directe maat voor bodemverdichting, was op verschillende percelen hoger dan of leunde aan bij de drempelwaarde voor bodemverdichting, al was dit voor een aanzienlijk deel van de percelen niet het geval. Verder onderzoek zou kunnen uitwijzen of de drempelwaarden voor bulkdichtheid niet aan herziening toe zijn. Bepaalde studies hanteren immers lagere drempelwaarden dan de in deze studie gehanteerde 'Europese normen'. Het macroporiënvolume lag op ruim de helft van de percelen onder de grenswaarde ($< 0,04 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). Op de zandbodems bleef deze indicator echter zelfs in de verdichte ondergrond boven de grenswaarde. Ter verwachten valt dat een snelle *drainage* van overtollig water in vele bodems belemmerd wordt. Op vele percelen, en vooral deze waar het macroporiënvolume gunstig was, was in de meeste gevallen de gemiddelde verzadigde doorlatendheid niet belemmerend ($> 10 \text{ cm d}^{-1}$). In de verdichte en diepere ondergrond was de *gemiddelde* verzadigde doorlatendheid vaak gunstig, en dit o.w.v. grote doorgaande macroporiën. De *minimale* verzadigde doorlatendheid was echter op bijna alle percelen te laag in de verdichte ondergrond. Lokaal kan de infiltratiecapaciteit dus sterk belemmerd worden. Bovendien moet hier aan worden toegevoegd dat de metingen betrekking hebben op bodemstalen genomen vanaf een diepte van 15 cm. Dit betekent dat gunstige waarden met betrekking tot drainage niet noodzakelijkerwijs betekenen dat de *infiltratie* aan het bodemoppervlak gunstig is. Daar kan immers een verslachte of korstlaag de infiltratiecapaciteit van de bodem aanzienlijk reduceren, waardoor toch plasvorming kan ontstaan.

Globaal gezien kan worden gesteld dat de zandbodems, ondanks hun hoge indringingsweerstand, het minst onderhevig zijn aan de (gevolgen van) bodemverdichting.

Vergelijking van de resultaten gemeten ter hoogte van de kopakker met deze gemeten in de middendelen laten toe het effect van bodemverdichting op de bodemkwaliteit en op de waterretentie- en doorlatendheidscurves beter in te schatten. De hypothese was immers dat bodemverdichting er meer uitgesproken is. Ook kan de op de kopakker gemeten bodemkwaliteit een indicatie zijn voor de toekomstige bodemgesteldheid van het perceel, mocht bodemverdichting zich blijven voortzetten t.g.v. intensievere berijding. De resultaten tonen bodemverdichting en dus achteruitgang van de bodemkwaliteit van de kopakkers aan. Wel waren de verschillen in bodemkwaliteit tussen kopakker en middendeel sterker uitgesproken in de diepere ondergrond dan in de verdichte ondergrond. Een

uitzondering hierop vormt de indringingsweerstand die op alle percelen ook in de verdichte ondergrond groter was ter hoogte van de kopakkers.

Wat de waterretentie- en doorlatendheidscurves betreft, toonde de studie aan dat op de onderzochte percelen, de effecten van mogelijke verdichting vooral een impact hebben in het natte traject, nabij verzadiging. Zeker vanaf veldcapaciteit konden geen uitgesproken trends worden waargenomen wanneer kopakkers met middendelen werden vergeleken.

De via de k-NNN-methode opgestelde pedotransferfuncties gaven zeer bevredigende resultaten en scoorden beter dan functies vermeld in de literatuur, zelfs wanneer bulkdichtheid niet als predictor-variabele werd meegenomen, maar enkel textuur en organisch-koolstofgehalte (zoals in Aardewerk opgenomen). Wordt bulkdichtheid opgenomen als predictor-variabele, dan neemt de voorspellingsfout af, vooral in het 'nattere' traject van de waterretentie- en doorlatendheidscurves. De functie bleek trouwens responsief op veranderende bulkdichtheid, zij het in beperktere mate nabij de extreme bulkdichtheidswaarden in de dataset (i.e., zeer hoge en zeer lage bulkdichtheden).

De simulaties met SWAP van het vochtgehalte op drie diepten gaan goed voor de velden op klei (E), leem (A) en zandleem (L), vrij goed voor het perceel met licht zandleem (P) en minder goed op de velden met zand (Z) en lemig zand (S). Verschillen tussen gemeten en gesimuleerde vochtgehalten kunnen vaak (deels) worden verklaard uit de verschillen tussen het vochtgehalte bij verzadiging op basis van metingen aan de bodemonmonsters en het maximale in het perceel gemeten vochtgehalte bij verzadiging.

Het vervangen van de gedetailleerde (op metingen aan bodemonmonsters gefitte relaties) tabellen voor waterretentie en hydraulische geleidbaarheid door (op dezelfde metingen gefitte) parameters van Mualem-VanGenuchten-relaties, geeft over het algemeen relatief kleine, acceptabele verschillen in gesimuleerde vochtgehalten. Vaak resulteren de Mualem-VanGenuchten-relaties in een lichte onderschatting van de met de tabellen gesimuleerde vochtgehalten.

De toetsing aan de op drie diepten in het veld gemeten vochtgehalten laten zien dat het fysisch transportmodel SWAP bij gebruik van goede data in staat is gemeten vochtgehalten, en dus ook het transport van water door de bodem, te simuleren. SWAP kan worden gebruikt om met de database van hydraulische karakteristieken van bodems van verschillende textuur en in niet-verdichte en verdichte staat de effecten van verdichte bodems te voorspellen. De gesimuleerde vochtgehalten en daarmee de stroming door de bodem worden in belangrijke mate bepaald door de als onderrand opgelegde grondwaterstand. Complementair is ook de capillaire geleidbaarheid van de bodem van belang.

De effecten van verdichting in combinatie met klimaatscenario's zijn voor vijf stroomgebiedjes met het Vlaanderen-model verkend:

- In verdichte bodems is de transpiratie (licht) lager in vergelijking tot de niet-verdichte situatie, en de stijging in transpiratie onder de klimaatscenario's is in verdichte bodems kleiner dan in de niet-verdichte situatie.
- De waterstress voor vegetatie neemt toe voor de klimaatscenario's en dit effect is meer uitgesproken bij verdichting.
- Het effect van verdichting op de grondwatervoeding is beperkt: er is een kleine toename bij verdichting voor de drie westelijke gebieden (gekoppeld aan een afname in transpiratie) maar niet in de oostelijke gebieden. De afname in grondwatervoeding voor de klimaatscenario's is kleiner in de verdichte situatie vergeleken met de onverdichte situatie.
- De evaluatie van run-off in scenario's met uurlijkse neerslag voor de Heulebeek resulteren in een sterke toename van run-off in de verdichte situatie. Het effect van neerslaggegevens met kleinere intervallen blijkt groter dan het effect van wijzigend klimaat.
- Het effect van verdichting op de waterhuishouding is op basis van de resultaten van de regionale simulaties beperkt. Bij scenario's van klimaatverandering is de reactie echter verschillend bij niet-verdichte en verdichte bodems en zijn de verdichte bodems droogtegevoeliger (relatief lagere transpiratie en meer toename in waterstress).

In Nederland is recentelijk een studie uitgevoerd waar SWAP is gekoppeld aan het gewasgroeimodel WOFOST en het nutriëntenkringloopmodel ANIMO om het effect van bodemverdichting op snelle oppervlakte-afstroming, nat- en droogteschade in relatie tot de gewasproductie en de af- en uitspoeling van de nutriënten stikstof en fosfor te simuleren. De conclusies van deze exercitie zijn voor run-off en droogtegevoeligheid in lijn met de resultaten van deze studie: de oppervlakkige afstroming bij een verdichte bodem is significant hoger dan bij een niet-verdichte bodem en de droogtegevoeligheid (en ook beregeningshoeft) neemt bij verdichting toe. Aanvullende conclusies uit deze verkenning zijn:

- Door verdichting lijken de uitspoeling van nitraat en de afspoeling van fosfaat toe te nemen; geconstateerd is dat de methode t.a.v. dit onderdeel moet worden verbeterd door de terugkoppeling tussen de nutriëntenopname en effecten op gewasgroei beter in het model te brengen.
- Bodem-verbeterende maatregelen kunnen (grote) effecten hebben op de vermindering van piekafvoer en de vermindering van droogte.

Synthese: effect van bodemverdichting op het watertransport in de bodem

Globaal gezien kon op basis van de geselecteerde bodemkwaliteitsindicatoren worden vastgesteld dat de in deze studie bemonsterde percelen onderhevig waren aan bodemverdichting. Opvallend is dat de verzadigde doorlatendheid van de verdichte ondergrond relatief goed is als gevolg van de aanwezigheid van macroporiën. De op basis van de metingen afgeleide pedotransferfuncties laten in het bereik van pF 0 tot 2 effecten van verdichting zien in de waterretentie- en doorlatendheidscurve. Deze veranderingen resulteren globaal gezien in beperkte gesimuleerde effecten in de waterhuishouding. Dit neemt niet weg dat de lokale effecten mogelijk aanzienlijk kunnen zijn, gelet op de grote variatie in bodemverdichting die binnen de percelen werd opgemeten. De verschillen tussen de verdichte en niet-verdichte situatie in stroomgebieden zijn beperkt. Bij klimaatverandering nemen de gesimuleerde effecten van verdichting toe: klimaatscenario's leiden op verdichte bodems tot meer oppervlakkige afstroming en meer droogtegevoeligheid dan niet-verdichte bodems.

De effecten van slemp en structuurbederf in de bouwvoor binnen een groeiseizoen zijn in deze studie niet onderzocht. Nu de effecten van bodemverdichting op het watertransport in de bodem globaal gezien beperkt lijken te zijn, wordt geadviseerd te verkennen of slemp dan wel structuurbederf in de bouwvoor de visueel waarneembare plasvorming kan veroorzaken.

Literatuur

- Bittelli, M., & Flury, M., 2009. Errors in water retention curves determined with pressure plates. *Soil Science Society of America Journal*, 7, 1453-1460.
- Botula, Y.D., Nemes, A., Mbe-Mpied, M., Van Ranst, E., Cornelis, W.M., 2013. Prediction of water content of soils from the humid tropics by the non-parametric nearest neighbor approach. *Vadose Zone J.* 12: doi:10.2136/vzj2012.0123.
- Botula, Y.D., A. Nemes, P. Mafuka, E. Van Ranst, W.M. Cornelis, 2015. Hierarchical pedotransfer functions to predict bulk density of highly weathered soils in Central Africa. *Soil Science Society of America Journal*, 79, 476-486.
- Boucneau, G., M. Van Meirvenne, G. Hofman, 1998. Comparing pedotransfer functions to estimate soil bulk density in northern Belgium. *Pedologie-themata*, 5, 67-70.
- Chatfield, C., 1995. Model uncertainty, data mining and statistical inference. *Journal of the Royal Statistical Society A* 158: 419-466.
- Cornelis, W., 2013. Soil data from Belgium. In: Weynants *et al.* European HYdropedological Data Inventory (EU-HYDI). Publications Office of the European Union, Luxembourg. doi: 10.2788/5936. p. 21-23.
- Cresswell, H.P., Green, T.W., & McKenzie, N.J., 2008. The adequacy of pressure plate apparatus for determining soil water retention. *Soil Science Society of America Journal*, 72, 41-49.
- Cultuurtechnisch Vademecum, 1988. Werkgroep Herziening Cultuurtechnisch Vademecum, Cultuurtechnische Vereniging, Utrecht.
- De Leenheer, L., 1959. Werkwijzen van de analyses aan het Centrum voor Grondonderzoek. Rijkslandbouwhogeschool Gent, Ghent.
- Duan, Q., Sorooshian, S., & Gupta, V., 1992. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resources Research*, 28, 1015-1031.
- Durner, W., 1994. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. *Water Resources Research*, 30, 211-223.
- Feddes, R.A.F., Graaf, M. De, Bouma, J., & Loon, C.D., 1988. Simulation of water use and production of potatoes as affected by soil compaction. *Potato Research*, 31(2), 225-239.
- Gee, G.W., Ward, A.L., Zhang, Z.F., Campbell, G.S., & Mathison, J., 2002. The influence of hydraulic nonequilibrium on pressure plate data. *Vadose Zone Journal*, 1, 172-178.
- Gharahi Ghehi, N., Nemes, A., Verdoodt, A., Cornelis, W.M., Van Ranst, E., Boeckx, P., 2012. Use of the Nonparametric Nearest Neighbor and Boosted Regression Tree techniques to estimate soil bulk density in tropical rainforest soils. *Soil Science Society of America Journal* 76:1172-1183.
- Glab, T., 2014. Effect of soil compaction and N fertilization on soil pore characteristics and physical quality of sandy loam soil under red clover/grass sward. *Soil Till. Res.* 144, 8-19
- Grossman, R.B., Reinsch, T.G., 2002. Bulk density and linear extensibility, in: Dane, J.H., Topp, G.C. (Eds.), *Methods of soil analysis. Part 4. Physical methods*. SSSA Madison Wisconsin, USA, pp. 201-228.
- Haghverdi, A., Leib, B.G., Cornelis, W.M., 2015. A simple nearest-neighbor technique to predict the soil water retention curve. *Transactions of the ASABE*. 10.13031/trans.58.10990.
- Håkansson, I., Lipiec, J., 2000. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. *Soil and Tillage Research*, 53, 71-85.
- Hendriks, R.F.A., J.J.H. van den Akker en P. Groenendijk (in voorbereiding). Perceelsberekeningen met het model SWAP-WOFOST-ANIMO voor het project Goede Grond. Alterra-rapport.
- Hillel, D., 1998. *Environmental Soil Physics: Fundamentals, Applications, and Environmental Considerations*. Academic Press, San Diego, USA.
- Horn, R., H. Fleige, S. Peth & X. Peng eds., 2005. *Soil management for sustainability. Advances in Geocology*, 38.
- Huber, S., Prokop, G., Arrouays, D., Banko, G., Bispo, A., Jones, R.J.A., Kibblewhite, M.G., Lexer, W., Möller, A., Rickson, R.J., Shishkov, T., Stephens, M., Toth, G. Van den Akker, J.J.H., Varallyay, G., Verheijen, F.G.A., Jones, A.R. (eds), 2008. *Environmental Assessment of Soil for Monitoring*

- Volume I Indicators & Criteria. EUR 23490 EN/1, Office for the Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 339pp. <http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/projects/envasso/>
- Iden, S., Durner, W., 2014. Comment to Simple consistent models for water retention and hydraulic conductivity in the complete moisture range by A. Peters. *Water Resour. Res.* 50, 7530–7534.
- Jarvis, N.J., 2007. A review of non-equilibrium water flow and solute transport in soil macropores: principles, controlling factors and consequences for water quality. *European Journal of Soil Science*, 58, 523–546.
- Jury, W.A., Horton, R., 2004. *Soil Physics*. John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, USA.
- Jones, R.J.A., Verheijen, F.G.A., Reuter, H.I., Jones, A.R. (eds), 2008. *Environmental Assessment of Soil for Monitoring Volume V: Procedures & Protocols*. EUR 23490 EN/5, Office for the Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 165pp. <http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/projects/envasso/>
- Joris, I., N. Stuber, P. Seuntjens, H. Van der Kwast, R. Smolders, J. Bronders, K. Touchant, 2010. Spatially distributed modelling of pesticide leaching to groundwater in the Flemish region of Belgium. Presented at the SETAC Meeting, Seville, Spain.
- KMI, 2015. <http://www.meteo.be/meteo/view/nl/123766-Huidige+jaar.html>. Data van 2/10/2015
- Kroes, J.G., R. Bartholomeus, J.C. van Dam, M.J.D. Hack-ten Broeke, I. Supit, R.F.A. Hendriks, A.J.W. de Wit, F.J.E. van der Bolt, D.J.J. Walvoort, I.E. Hoving en J. van Bakel, 2015. *Waterwijzer Landbouw, fase 2. Modelleren van het bodem-water-plantsysteem met het gekoppelde instrumentarium SWAP-WOFOST*. Amersfoort : Stowa, Rapport / STOWA 2015.
- Kroes, J.G., J.C. Van Dam, P. Groenendijk, R.F.A. Hendriks, C.M.J. Jacobs, 2008. *SWAP version 3.2. Theory description and user manual*. Wageningen, Alterra, Alterra Report 1649.
- Lipiec, J., Hatano, R., 2003. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. *Geoderma*, 116, 107–136.
- Lebert, M., Brunotte, J. Sommer, C., 2003. Ableitung von Kriterien zur Charakterisierung einer schädlichen Bodenveränderung, entstanden durch nutzungsbedingte Verdichtung von Böden/Regelungen zur Gefahrenabwehr. Abschlussbericht Förderkennzeichen (UFOPLAN) 200 71 245, Umweltbundesamt, Berlin.
- Marquardt, D.W., 1963. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *Journal of the Society for Industrial & Applied Mathematics*, 11, 431–441.
- Mualem, Y., 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.* 12:512–522.
- Nguyen, M.P., De Pue, J., Le, V.K., Cornelis, W.M., 2015. Impact of regressions methods on improved effects of soil structure on soil water retention estimates. *Journal of Hydrology*, 525, 598–606.
- Ntegeka, V. and Willems, P., 2009. CCI-HYDR Perturbation Tool : a climate change tool for generating perturbed time series for the Belgian climate. Manual version January 2009, KU Leuven – Hydraulics section & Royal Meteorological Institute of Belgium, 7 p.
- Ntegeka, V., Willems, P., Roulin, E. and Baguis, P., 2014. Developing tailored climate change scenarios for hydrological impact assessments. *Journal of Hydrology*, 508C, 307–321.
- Peters, A., 2013. Simple consistent models for water retention and hydraulic conductivity in the complete moisture range. *Water Resour. Res.* 49, 6765–6780.
- Peters, A., 2014. Reply to comment by S. Iden and W. Durner on Simple consistent models for water retention and hydraulic conductivity in the complete moisture range. *Water Resour. Res.* 50, 7535–7539.
- Peters, A. & Durner, W., 2008a. Simplified evaporation method for determining soil hydraulic properties. *J. Hydrol.* 356, 147–162
- Peters, A. & Durner, W., 2008b. A simple model for describing hydraulic conductivity in unsaturated porous media accounting for film and capillary flow. *Water Resources Research*, 44, W11.
- Peters, A. & Durner, W., 2015. Parameter estimation in HYPRO-FIT. Internal report. Technische Universität Braunschweig, Germany.
- Pulido Moncada, M., Gabriels, D., Cornelis, W.M., 2014. Data-driven analysis of soil quality indicators using limited data. *Geoderma*, 235–236, 271–278.
- Reynolds, W.D., Bowman, B.T., Brunke, R.R., Drury, C.F., & Tan, C.S., 2000. Comparison of tension infiltrometer, pressure infiltrometer, and soil core estimates of saturated hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, 64, 478–484.
- Reynolds, W.D., Drury, C.F., Yang, X.M., & Tan, C.S., 2008. Optimal soil physical quality inferred through structural regression and parameter interactions. *Geoderma*, 146, 466–474.

- Reynolds, W.D., Drury, C.F., Tan, C.S., Fox, C.A., & Yang, X.M., 2009. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma*, 152, 252-263.
- Schindler, U. Müller, L., 2006. Simplifying the evaporation method for quantifying soil hydraulic properties. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 169:623-629.
- Schelle, H., Heise, L., Jänicke, K. & Durner, W., 2013. Water retention characteristics of soils over the whole moisture range: A comparison of laboratory methods. *European Journal of Soil Science*, 64, 814-821.
- Schindler, U. & Müller, L., 2006. Simplifying the evaporation method for quantifying soil hydraulic properties. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 169, 623-629.
- Schindler, U., Durner, W., von Unold, G., Mueller, L. & Wieland, R., 2010. The evaporation method: Extending the measurement range of soil hydraulic properties using the air entry pressure of the ceramic cup. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 173, 563-572.
- Schipper, P., P. Groenendijk, N. van Eekeren, M. van Zanen, J. Rozemeijer, G. Jansen en B. Swart, 2015. Goed grond voor een duurzaam watersysteem. Verdere verkenningen in de relatie tussen agrarisch bodembeheer, bodemkwaliteit en waterhuishouding. STOWA-rapport 2015-19.
- Schwark, A., Isensee, E., 2004. Limitations on axle loads. *Agriculture*, 4, 28-30.
- Šimůnek, J., M.Th. Van Genuchten, M. Šejna, 2008. Modeling subsurface water flow and solute transport with HYDRUS and related numerical software packages. *Proceedings of the International Workshop on Numerical Modelling of Hydrodynamics for Water Resources - Numerical Modelling of Hydrodynamics for Water Resources*, pp. 95-114.
- Swart, B. en M. Broos, 2013. De invloed van bodemstructuur op het watersysteem, een beschouwing op grond van een eerste onderzoek bij waterschap Vallei en Veluwe en aanbevelingen voor een vervolg. Amersfoort, STOWA. Rapport 2013 13B.
- Tabari, H., Taye, M.T., Willems, P., 2014. Actualisatie en verfijning klimaatscenario's tot 2100 voor Vlaanderen – Technische Appendix 2: Nieuwe modelprojecties voor Ukkel op basis van globale klimaatmodellen (CMIP5), studie uitgevoerd in opdracht van de Afdeling Operationeel Waterbeheer van de Vlaamse Milieumaatschappij en MIRA, MIRA/20XX/XX, KU Leuven.
- Tabari, H., Taye, M.T. and Willems P., 2015. Water availability change in central Belgium for the late 21th century. *Global and Planetary Change*, 131, 115-123.
- Ten Cate, J.A.M., van Holst, A.F., Kleijer, H., Stolp, J., 1995. Handleiding bodemgeografisch onderzoek; richtlijnen en voorschriften. Deel D: interpretatie van bodemkundige gegevens voor diverse vormen van bodemgebruik (No. 19-D). SC-DLO.
- Tiktak, A., Van der Linden, A., Boesten, J., 2003. The GeoPEARL model. Model description, applications and manual. RIVM Report 716601007/2003. Bilthoven, The Netherlands. 79p.
- Tiktak, A., Van der Linden, A., Boesten, J., Van Kruijne, R., Kraalingen, D., 2004. The GeoPEARL model. Part II. User guide and model description update. RIVM Report 716601008/2004. Bilthoven, The Netherlands. 82p.
- Van Dam, J.C., P. Groenendijk, R.F.A. Hendriks and J.G. Kroes, 2008. Advances of modeling water flow in variably saturated soils with SWAP. *Vadose Zone J.*, Vol.7, No.2, May 2008.
- Van den Akker, J.J.H., 2006. Evaluation of soil physical quality of Dutch subsoils in two databases with some threshold values. In: *Soil management for sustainability* (eds R. Horn, H. Fleige, S. Peth & X. Peng), pp. 490-497. *Advances in Geoecology*, 38.
- Van den Akker, J.J.H., W.J.M. de Groot, 2008. Een inventariserend onderzoek naar de ondergrondverdichting van zandgronden en lichte zavel. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 1450, 77 blz.
- Van den Akker, J.J.H., Groot, W.J.M. de, Vroon, H.R.J., Bolt, F.J.E. van der, Kekem, A.J. van, 2009. Stijghoogteverschillen en verdichting: een eerste Twentse verkenning in de praktijk. Wageningen : Alterra, (Alterra-rapport 1735) - p. 85.
- Van den Akker, J.J.H., F. de Vries, G.D. Vermeulen, M.J.D. Hack-ten Broeke en T. Schouten, 2012. Risico op ondergrondverdichting in het landelijk gebied in kaart. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 2409. 80 blz.
- Van der Kwast, H., Bronders, J., Smolders, R., Seuntjens, P. and Patyn, J., 2009. A phreatic groundwater depth map for Flanders. VITO-report. RMA/LWM/N9522/JvdK-jb/02072009.
- Van Dam, J.C., P. Groenendijk, R.F.A. Hendriks and J.G. Kroes, 2008. Advances of modeling water flow in variably saturated soils with SWAP. *Vadose Zone J.*, Vol.7, No.2, May 2008.

-
- Van De Vreken, Ph., L. Van Holm, J. Diels en J. Van Orshoven, 2009. Verkennde studie betreffende bodemverdichting in Vlaanderen en afbakening van risicogebieden voor bodemverdichting: Eindrapport. Leuven, Katholieke Universiteit.
- Van Dijk, M. van en S. van Miltenburg, 2013. De invloed van bodemstructuur op het watersysteem, een verkenning. Amersfoort, STOWA. Rapport 2013 13A.
- Van Genuchten, M.Th., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44:892–898.
- Van Hove, J., 1969. Variatie van het gehalte aan organisch materiaal en van de C/N-verhouding in de oppervlakte-horizonten van de bodems van Laag- en Midden-België. Aggregaat voor het Hoger Onderwijs. Universiteit Gent, 291 blz.
- Van Ranst, E. en C. Sys, 2000. Eenduidige legenda voor de digitale bodemkaart van Vlaanderen (Schaal 1 : 20 000). Gent, Laboratorium voor bodemkunde, universiteit van Gent.
- Van Uytven, E. en Willems P., 2016 Climate Perturbation Tool. Manual. KULeuven, Leuven, Belgium.
- Verbist, K., Cornelis, W.M., Torfs, S., Gabriels, D., 2013. Comparing methods to determine hydraulic conductivities on stony soils. *Soil Science Society of America Journal*, 77, 25–42.
- Vereecken, 1988. Pedotransfer functions for the generation of hydraulic properties for Belgian soils. Thesis, Doctoraatsproefschrift Nr 171 aan de Fakulteit der Landbouwwetenschappen van de Katholiek Universiteit te Leuven, pp. 254.
- Vereecken, H., Weynants, M., Javaux, M., Pachepsky, Y., Schaap, M.G., & Genuchten, M.T., 2010. Using pedotransfer functions to estimate the van Genuchten–Mualem soil hydraulic properties: a review. *Vadose Zone journal*, 9, 795–820.
- Walkley, A., Black, I.A., 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil science*, 37, 29–38.
- Willems, P. and Vrac, M., 2011. Statistical precipitation downscaling for small-scale hydrological impact investigations of climate change. *Journal of Hydrology*, 402, 193–205.
- Willems, P., 2013. Revision of urban drainage design rules after assessment of climate change impacts on precipitation extremes at Uccle, Belgium. *Journal of Hydrology*, 496, 166–177.
- Wind, G.P., 1966. Capillary conductivity data estimated by a simple method, in: *Proc. UNESCO/IASH Symp. Water in the unsaturated zone*. Wageningen, The Netherlands, pp. 181–191.
- Wind, G.P., 1968. Capillary conductivity data estimated by a simple method. In: Rijtema, P.E., Wassink, H. (Eds.), *Water in the Unsaturated Zone*, vol. 1. Proceedings of the Wageningen Symposium, 19–23 June 1966. Int. Assoc. Sci. Hydrol. Publ. (IASH), Gent-Brugge, The Netherlands and UNESCO, Paris.
- Wösten, H., Lilly, A., Nemes, A. and Bas, C., 1999. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma* (90): 169–185.
- Zhang, S., Grip, H., Lövdahl, L., 2006. Effect of soil compaction on hydraulic properties of two loess soils in China. *Soil Till. Res.* 90, 117–125.

Bijlage 1 Metingen Deinze

Voor het perceel Deinze is beschreven welke meetdata beschikbaar zijn voor de modellering.

Bodem

In het midden van de percelen is een profielkuil gegraven van ongeveer 80 cm diepte, hierin is het profiel met de verschillende bodemhorizonten beschreven, zijn op drie diepten bodemonsters genomen en zijn op drie diepten (15, 35 en 70 cm) TDR-probes geïnstalleerd voor meting van vochtgehalten per uur. Naast de kuil is een grondwaterstandsbuis geplaatst waarin een sensor is ingebracht op 2 m diepte waarmee grondwaterstand en watertemperatuur op uurbasis zijn gemeten. Verspreid over het perceel zijn indringingsweerstand als functie van de diepte gemeten. De indringingsweerstand als functie van de diepte is gegeven in Figuur 5.2 van het hoofdrapport. De in het veld gemeten vochtgehalten zijn opgenomen in de figuren van de resultaten van de modellering.

In gestoorde monsters zijn de bodemeigenschappen textuur en organisch stofgehalte gemeten (Tabel 1). In ongestoorde monsters zijn de volumieke massa en hydraulische karakteristieken gemeten. Opvallend is dat de volumieke massa tussen de c-sub en de sub-horizont gelijk is.

Tabel 1

Kenmerken van de drie onderscheiden bodemhorizonten van perceel P-Deinze.

Horizont	Diepte traject (cm)	Org.stof (massa-%)	Textuur (massa-%)			Volumieke massa (kg m ⁻³)
			zand	leem	klei	
Top	0-28	1.14	48.4	44.3	7.2	1467
C-sub	28-44	1.06	48.0	44.6	7.4	1524
Sub	44-80	0.22	51.3	38.5	10.2	1526

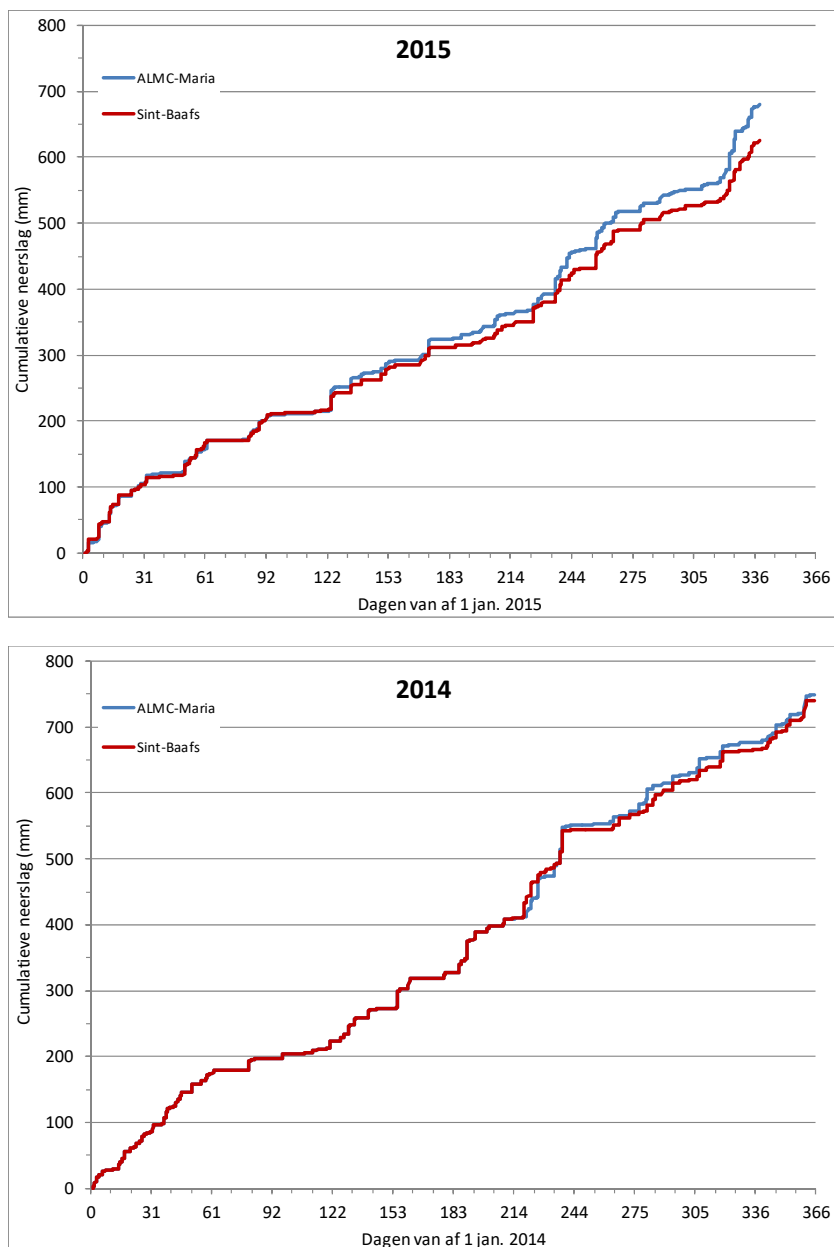
De textuurgegevens en organisch stofgehalte zijn gebruikt om de warmtecapaciteit en het warmtegeleidingsvermogen te bepalen ten behoeve van het berekenen van de bodemtemperatuur, de bulkdichtheid is nodig om de zuurstofbeschikbaarheid voor plantenwortels in WOFOST te berekenen.

De hydraulische karakteristieken waterretentie en hydraulische geleidbaarheid zijn de voor het transport door de bodem belangrijkste bodemkenmerken. Twee varianten van fitten aan dezelfde meetgegevens van bodemonsters in het lab zijn vergeleken: Ks met meenemen van de apart gemeten Ksat in de fitprocedure en K0 zonder meenemen hiervan. Omdat bij gebruik van de Ksat bij het fitten een duidelijk slechtere fit aan de metingen werd verkregen, is deze methode verworpen. Ksat is meegenomen door vanaf h = -5 cm van de gefitte K0 lineair naar Ksat te interpoleren.

Bovenrand

De bovenrand van het bodemsysteem en daarmee van de gemodelleerde bodemkolom bestaat uit de neerslag en de verdamping (interceptie- en bodemverdamping en gewastranspiratie). Het gewas maakt hier onderdeel van uit en fungeert zowel als buffer (interceptie van neerslag, rem op bodemverdamping) als verbindende schakel (transpiratie) tussen bodem en atmosfeer.

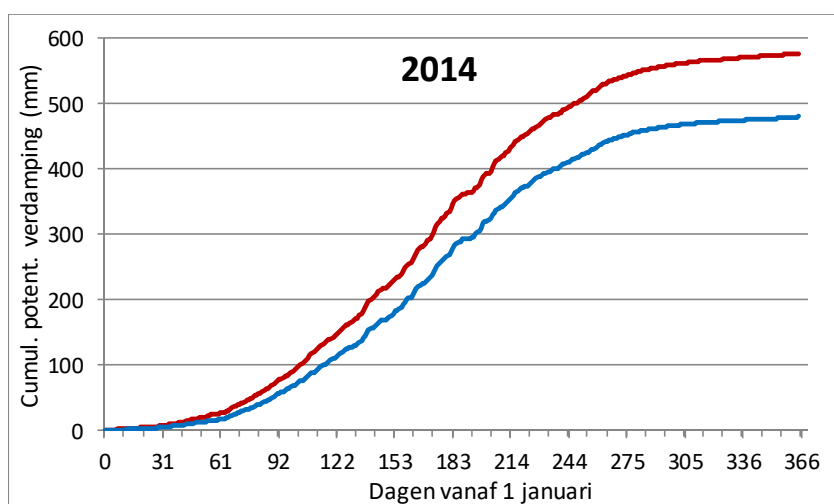
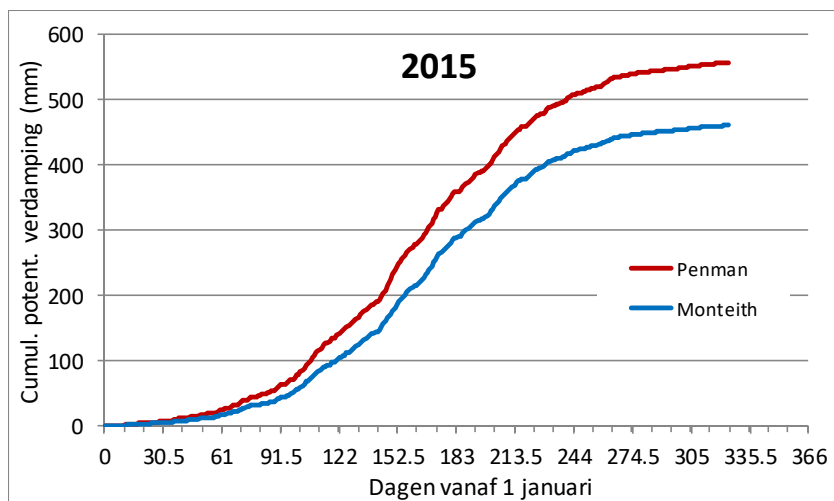
Omdat het bij deze modellering gaat om verandering van run-off, is het van belang om met buien te rekenen i.e. gemeten neerslag op basis van maximaal urengegevens in plaats van met dagsommen. Er zijn vijf neerslagstations in de buurt van de zes onderzoeksvelden. Voor P-Deinze, het onderzoeksveld dat het verst van beschikbare neerslagstations af ligt, waren stations 'ALMC_mariakerke_P' en 'Sint-Baafs-Vijve_OOT_P' relevant. De neerslaggegevens op uurbasis zijn verkregen van het KMI van <https://www.waterinfo.be/>. De cumulatieve neerslag van beide stations is gegeven in Figuur 1 (de gegevens van de aanloopperiode 1-1-2014 tot 1-8-2014 zijn afkomstig van station Zingem_P).



Figuur 1 Cumulatieve neerslag in de tijd van de twee KMI-neerslagstations 'ALMC_mariakerke_P' en 'Sint-Baafs-Vijve_OOT_P'. De gegevens van de aanlooperperiode 1-1-2014 tot 1-8-2014 zijn afkomstig van station Zingem_P.

Door de gelijke waarden voor de aanlooperperiode ontlopen de cumulatieve hoeveelheden van beide stations elkaar weinig in 2014. In 2015, waarvoor uitsluitend waarden van de eigen stations zijn gebruikt, is de totale neerslag van ALMC_mariakerke zo'n 60 mm groter. Daarom is besloten de gesimuleerde resultaten met gebruik van beide stations te vergelijken om te verkennen of een van beide tot betere resultaten leidt.

Omdat met SWAP-gewasmodule WOFOST wordt gerekend, is het nodig om voor de verdamping de optie 'Penman-Monteith' te kiezen (althans zeker voor gras). Alle benodigde invoergegevens voor deze optie zijn op dagbasis beschikbaar, behalve de essentiële grootheid 'global radiation'. De 'Penman potentiële verdamping' en de 'Monteith potentiële verdamping' van KMI weerstation Waregem (Figuur 2).



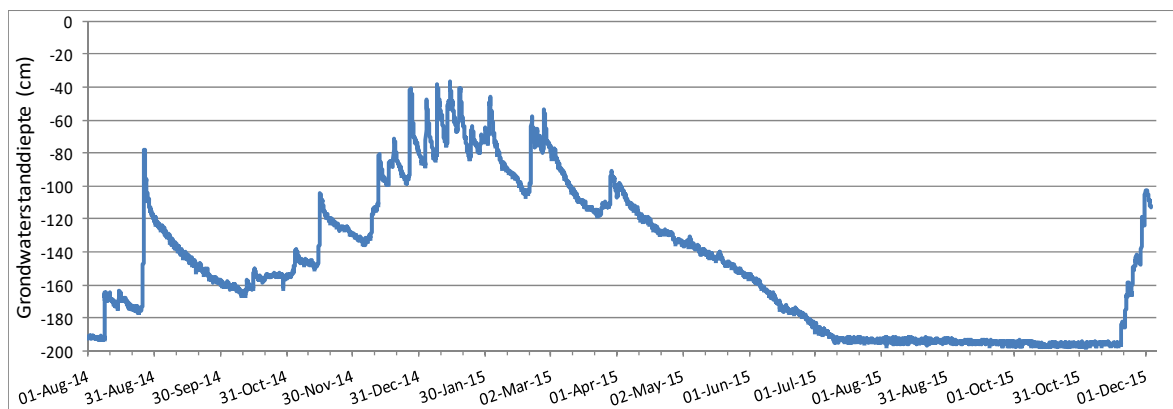
Figuur 2 Cumulatieve potentiële verdamping in de tijd volgens 'Penman' en 'Monteith' van KMI-station Waregem.

Omdat tussen beide op elke dag exact een factor 0,81 zit, is aangenomen dat de 'Penman' de klassieke openwaterverdamping E_{0mow} volgens Penman is en dat 'Monteith' de referentiegewasverdamping E_r voor gras is. Deze factor is voor de modellering van de referentiegewasverdamping gebruikt.

Voor het gewas 'gras' beschikbare gegevens zijn: 'gezaaid september 2013, werd afgereden in juli (21), augustus, september 2014 en juli (21), augustus, september 2015.' Verder blijkt uit de profielbeschrijving dat de geschatte bewortelingsdiepte 40 cm bedraagt en dat de 'worteldiepte visueel' 45 cm was.

Onderrand

De gemeten grondwaterstand (Figuur 33) is in het model gebruikt als onderrand.

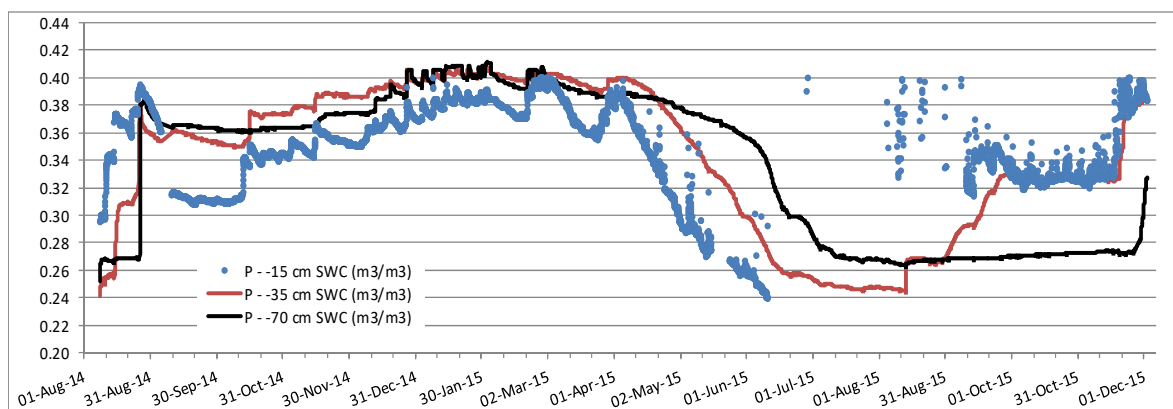


Figuur 3 Gemeten grondwaterstand als functie van de tijd van proefveld P-Deinze weergegeven op uurbasis.

De gemeten grondwaterstand op uurbasis schetst een realistisch beeld op enkele kleine uitschieters na. Behalve de periode 10 juli 2015 tot 20 november 2015 die een vrijwel constante waarde met wat ruis laat zien rond -197 cm. In die tijd bevond de grondwaterstand zich beneden de laagste waarde van rond -200 cm, de diepte waarop de sensor in de buis hing. Over het eigenlijke verloop van de grondwaterstand in die periode is geen informatie beschikbaar, er is geen sensor op grotere diepte geplaatst.

Gegevens voor modeltoetsing

Het model is getoetst aan tijdreeksen van gemeten volumetrische vochtgehalten op drie diepten: 15, 35 en 70 cm (Figuur 4). Het verloop van de vochtgehalten in de tijd oogt realistisch, hoewel op alle diepten ruis zichtbaar is. Dat geldt vooral voor de ondiepe meting waarbij in de droge zomer van 2015 regelmatig uitval van de meting heeft plaatsgevonden. Het is sterk de vraag wat de realiteitswaarde is van de enkele meetwaarden in de perioden met vaak en langdurige uitval.



Figuur 4 Gemeten volumetrische vochtgehalten op drie diepten als functie van de tijd van proefveld P-Deinze weergegeven op uurbasis.

Bijlage 2 Parameters Deinze

De parameters zijn gefit voor het perceel Deinze als leidraad voor de andere percelen.

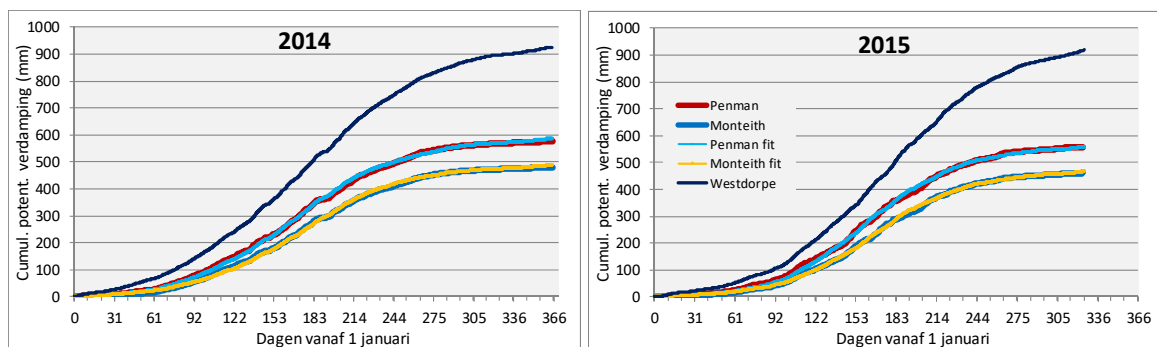
Bovenrand

Twee modelexperimenten zijn uitgevoerd om het effect van het verschil in neerslag tussen de stations 'ALMC_mariakerke_P' en 'Sint-Baafs-Vijve_OOT_P' te onderzoeken. De neerslaggegevens zijn ingevoerd op uurbasis.

De snelle afvoer van neerslag bij overschrijding van de infiltratiecapaciteit aan maaiveld in de vorm van oppervlakte-afvoer wordt in SWAP geregeld door een drempel die tot plaspvorming leidt en die moet worden overschreden voordat afvoer plaatsvindt, en een weerstand. Voor deze stuurparameters zijn twee varianten onderzocht: een gemiddelde toestand met waarden van 0,5 cm voor de drempel en 0,5 dagen voor de weerstand, en een toestand met een 'ongunstig maaiveld' met een drempel van 0 cm en een weerstand op de minimumwaarde in SWAP van 0,001 dag.

Voor de parametrisatie van de WOFOST-grasmodule is aangesloten bij het project Waterwijzer Landbouw (kroes *et al.* 2015ivullen). De beschikbare informatie voor P-Deinze is gebruikt: voor zowel 2014 als 2015 is aan het model opgelegd dat op 21 juli, 21 augustus en op 21 september een snede wordt gemaaid. Op basis van de worteldiepte plus het verloop van de indringingsweerstand met de diepte is opgelegd dat de worteldiepte groeit met 0,1 cm per dag van 20 cm aan het begin van het groeiseizoen tot maximaal 40 cm diepte. Voor de verdeling van de wortelmassa met de relatieve worteldiepte is genomen 1,0 op diepte 0 tot 0,5 op 70% diepte (28 cm bij max. worteldiepte, de bovengrens van de verdichte laag), tot 0,05 op 80% diepte tot 0 op 100% diepte. Het idee hierachter was dat de wortels van gras de neiging hebben om boven een verdichte laag 'uit te waaieren' en met geringere massa in de verdichte laag door te dringen (normaal verwacht je op 70% diepte hooguit 0,15 relatieve massa). Voor de verdere parametrisatie van het gewas zijn de gegevens uit de invoerfile van Waterwijzer genomen.

Omdat de Penman-Monteith-optie noodzakelijk is voor WOFOST-gras, zijn hiervoor de gegevens van KNMI-station Westdorpe (20 km boven Gent) gebruikt. Om de zo verkregen potentiële verdamping aan te passen op de Vlaamse situatie, zijn de gewasfactoren in de tijd zo aangepast dat de gegenereerde potentiële verdamping samenvalt met de 'Monteith' potentiële verdamping van KMI-station Waregem. Deze kan worden beschouwd als maat voor de referentiegewasverdamping en daarmee voor de potentiële verdamping bij een grasgewas (dit is de som van interceptieverdamping, potentiële bodemverdamping en gewastranspiratie). Als modelexperiment is dit ook gedaan voor de 'Penman'-verdamping van Waregem die in principe 25% groter is dan de gewasverdamping bij gras. De resultaten van de met deze kalibratieprocedure verkregen gewasfactoren staan in Figuur 1 en Tabel 1. De niet gefitte potentiële gewasverdamping, door SWAP berekend met de gegevens van station Westdorpe, is bijna twee keer zo groot als de 'Monteith' potentiële verdamping van Waregem. De gewasfactoren zijn daarom navenant sterk geknepen (Tabel 1).



Figuur 1 Potentiële verdamping volgens methode 'Penman' en 'Monteith' van KMI-station Waregem in Vlaanderen en door SWAP berekend met optie 'Penman-Monteith' op basis van gegevens van KNMI-station Westdorpe in Nederland, met gewasfactoren 1 (Westdorpe) en met gefitte gewasfactoren (Penman fit en Monteith fit).

Tabel 1

Gefitte gewasfactoren in WOFOST om de potentiële verdamping op basis van gegevens van KNMI-station Westdorpe om te zetten in potentiële verdamping volgens 'Penman' en volgens 'Monteith' van KMI-station Waregem.

Dagnummer in 2014	Gewasfactoren 2014		Gewasfactoren 2015	
	Penman	Monteith	Penman	Monteith
0	0.00	0.00	0.00	0.00
70	0.60	0.40	0.60	0.40
180	0.78	0.65	0.85	0.65
240	0.47	0.50	0.63	0.60
300	0.45	0.10	0.60	0.50
310	0.00	-	0.37	0.30
366	0.00	0.00	0.08	0.05
			0.03	0.00
			0.00	0.00

Onderrand

Als onderrand is de gemeten grondwaterstand genomen. Hiertoe zijn de daggemiddeldes van de gemeten grondwaterstanden als tijdreeks ingevoerd in SWAP. Deze optie garandeert een realistische scheiding van verzadigde en onverzadigde zone in het bodemprofiel, wat een goed uitgangspunt is voor de dynamische berekening van de vochtgehalten in de onverzadigde zone.

Er zijn aanvullende modelexperimenten uitgevoerd om het effect van de onderrand op de gesimuleerde vochtgehalten te analyseren:

1. voor de periode met onbekende grondwaterstanden dieper dan 2 m is een grondwaterstand beneden de modelkolomdiepte (3 m) opgelegd;
2. voor de gehele periode is een grondwaterstand beneden 3 m opgelegd;
3. voor regionale modellering van andere dan de in deze studie beschouwde periode is een 'onderrandflux-grondwaterstand-relatie' afgeleid.

De afleiding van de 'onderrandflux-grondwaterstand-relatie', een onderrandoptie van SWAP, is gedaan door de twee parameters van deze relatie te fitten op de samenhang tussen opgelegde grondwaterstanden en de bijbehorende berekende onderrandfluxen. De wiskundige vergelijking van deze onderrandrelatie is:

$$q_{\text{onderrand}} = a \cdot \exp(b \cdot \text{abs}[hgwl_v])$$

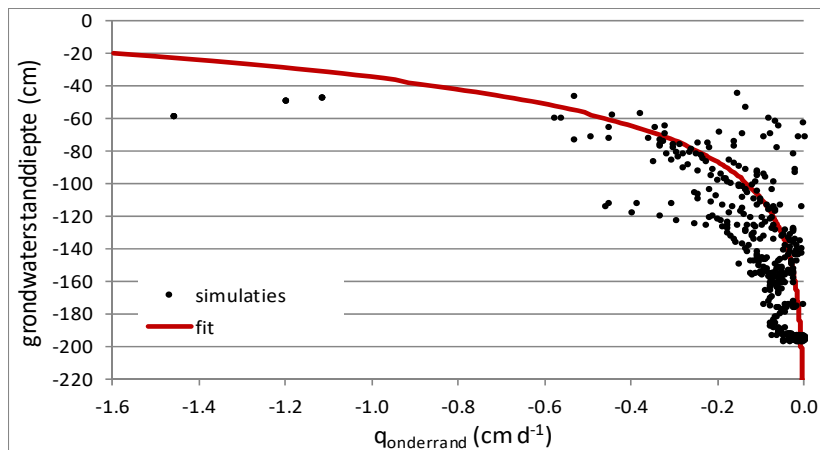
waarbij:

$$q_{\text{onderrand}} = \text{onderrandflux};$$

$$hgwl_v = \text{grondwaterstanddiepte (cm)};$$

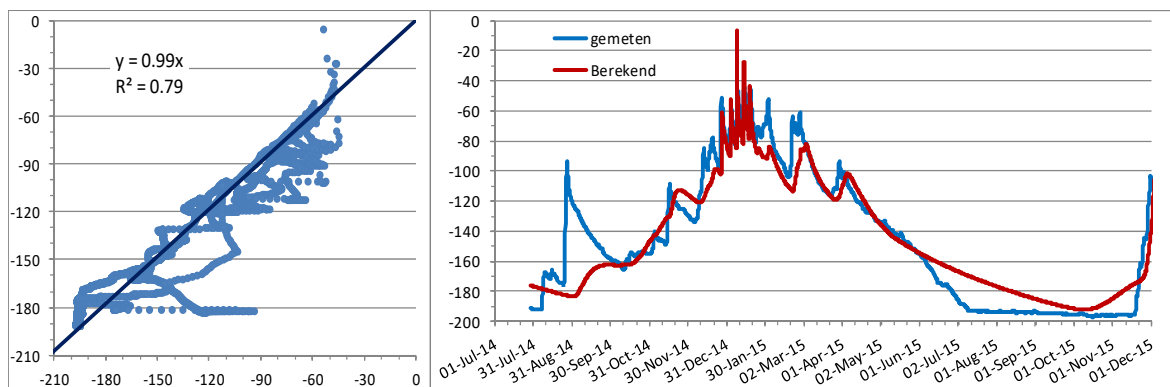
$$a, b = \text{coëfficiënten (cm d-1 en cm-1)}.$$

Het fitten van coëfficiënten a en b is gedaan door minimaliseren van de som van de kwadraten van de verschillen tussen de SWAP-fluxen en de met de gefitte relatie voorspelde fluxen. Hiertoe zijn alleen de door SWAP berekende negatieve (neerwaartse) fluxen genomen. Opwaartse fluxen zijn in het gemodelleerde systeem niet erg waarschijnlijk. Omdat de grondwaterstand als onderrand in een model als SWAP een erg rigide onderrandvorm is, zal het regelmatig voorkomen dat er opwaartse fluxen optreden om de waterbalans van de modelkolom sluitend te maken. De grafische weergave van de gefitte relatie staat in Figuur 2. De optimale waarden van a bedroeg -2,97 cm d-1 en die van b -0,031 cm-1. De geminimaliseerde RMSE van de fit was 0,126 cm d-1.



Figuur 2 Gefitte relatie tussen gemeten grondwaterstanden en door SWAP berekende onderrandflux (negatief is neerwaartse flux).

Figuur 3 toont de door SWAP met de onderrandrelatie berekende grondwaterstand en de gemeten grondwaterstand. De berekende grondwaterstand is wat meer afgevlakt dan de gemeten en lijkt bij pieken enkele dagen achter te lopen. Dat laatste is goed verklaarbaar, omdat de grondwaterstand de onderrandflux aanstuurt die dan vervolgens weer de grondwaterstand bepaalt. Dat kost blijkbaar enkele dagen tijd. De regressielijn met gedwongen intercept van 0 toont een hoge R^2 van 0,79 bij een helling van bijna 1. De onderrandrelatie neigt naar onderschatting van de gemeten grondwaterstand.



Figuur 3 Gemeten en met de onderrandrelatie berekende grondwaterstanden (cm-mv) vergeleken voor intervallen van 3 uur (links, x-as de gemeten grondwaterstanden, y-as de berekende grondwaterstanden) en als verloop in de tijd (rechts, x-as de tijd en de y-as de grondwaterstanden).

Bijlage 3 Gevoeligheid Deinze

De resultaten van de verkenning van de gevoeligheid van de parameters zijn verkend voor het perceel Deinze.

Gevoeligheid bodem

De vergelijking van de drie modelexperimenten voor de hydraulische karakteristieken is voor meerdere combinaties van boven- en onderrandvoorwaarden getoetst. Hier worden de resultaten besproken van de combinaties met de beste – in termen van simuleren van vochtgehalten – varianten of met gemiddelde situaties:

- neerslag van station Sint-Baafs-Vijve_OOT_P;
- potentiële verdamping volgens Monteith;
- gemiddeld maaiveld voor oppervlakteafvoer met drempel van 0,5 cm en weerstand van 0,5 dagen;
- metingen van grondwaterstand als onderrandvoorwaarde.

De modelexperimenten die zouden worden uitgevoerd met de hydraulische karakteristieken:

- **K0**: aan alle drie horizonten zijn de K0-curven toegekend;
- **KS**: aan alle drie horizonten zijn de KS-curven toegekend;
- **KL**: aan alle drie horizonten zijn de curven met de laagste K(h)-waarden toegekend: voor Deinze Ks voor 'top' en K0 voor beide andere horizonten.

Zijn niet gerealiseerd nadat bij analyse van de gefitte K0- en Ks-curven bleek dat de Ks-curven dusdanig slecht presteerden t.o.v. de metingen dat deze terzijde moeten worden geschoven.

Conclusie op basis van de vergelijking aan de meetgegevens is dat de hydraulische karakteristieken van K0 de beste simulatieresultaten van het vochtgehalte geven.

Gevoeligheid bovenrand

Voor de bovenrand zijn eveneens drie modelexperimenten uitgevoerd op basis van modelexperiment K0:

1. **Maria**: met neerslag van KMI-station ALMC_Mariakerke_P i.p.v. station Sint-Baafs-Vijve_OOT_P;
2. **Penman**: met 'Penman' potentiële verdamping i.p.v. 'Monteith' potentiële verdamping;
3. **Run-off**: met een ongunstiger maaiveld voor oppervlakteafstroming (run-off).

Figuur 1 toont de vergelijking tussen de gemeten en berekende vochtgehalten voor de twee varianten Maria en Penman en ter vergelijking van K0 als moederexperiment. Tabel 1 geeft de bijbehorende RMSE-waarden.

Tabel 1

RMSE-waarden van de vergelijking van gemeten met berekende vochtgehalten voor de drie modelexperimenten van de bovenrand per diepte en gemiddeld over de drie diepten.

Modelexperiment	RMSE (m ³ m ⁻³)				RMSE relatief tov θ_{sat} (%)			
	15 cm	35 cm	70 cm	Gemiddeld	15 cm	35 cm	70 cm	Gemiddeld
K0	0.049	0.051	0.056	0.052	11.6	12.7	13.0	12.4
Maria	0.052	0.050	0.059	0.054	12.2	12.5	13.7	12.8
Penman	0.051	0.059	0.053	0.054	12.0	14.7	12.2	12.9

De resultaten van experiment run-off zijn niet opgenomen in figuur en tabel, omdat deze niet zichtbaar afwijken van moederexperiment K0. Oorzaak hiervan was de grote gemeten verzadigde doorlatendheid van 500 cm per dag van de toplaag van K0.

De resultaten van modelexperimenten Maria en Penman laten zien dat de neerslag van station Sint-Baafs-Vijve_OOT_P representiever is voor proefveld P-Deinze dan die van station ALMC_mariakerke_P en dat de theoretisch juiste potentiële verdamping 'Monteith' als referentiegasverdamping geschikter is voor de bodemvochtsimulaties dan de 25% hogere 'Penman'-verdamping. Deze hogere verdamping geeft veel lagere vochtgehalten dan gemeten, vooral in het voorjaar van 2015. De 60 mm hogere neerslag van Mariakerke in 2015 geeft te hoge vochtgehalten in dat jaar.

Gevoeligheid onderrand

Voor de onderrand zijn drie modelexperimenten uitgevoerd op basis van modelexperiment K0:

1. **K0**: voor de periode met onbekende grondwaterstanden dieper dan 2 m is een grondwaterstand beneden de modelkolomdiepte (3 m) opgelegd; de modelkolom heeft dan geen verzadigde zone. Omdat dit experiment geen merkbaar effect vertoonde, wordt het verder niet behandeld;
2. **NoGwl**: voor de gehele simulatie is een grondwaterstand beneden 3 m opgelegd;
3. **FitBot**: als onderrand is de gefitte grondwaterstand-onderrandflux-relatie gebruikt.

Tabel 2 geeft de bijbehorende RMSE-waarden en die van experiment FitBot. Dit experiment gaf slechts een licht effect op 70 cm diepte en geen effect op de andere twee diepten en is daarom niet opgenomen in Figuur 2. Figuur 2 toont de vergelijking tussen de gemeten en berekende vochtgehalten voor experiment NoGwl.

Tabel 2

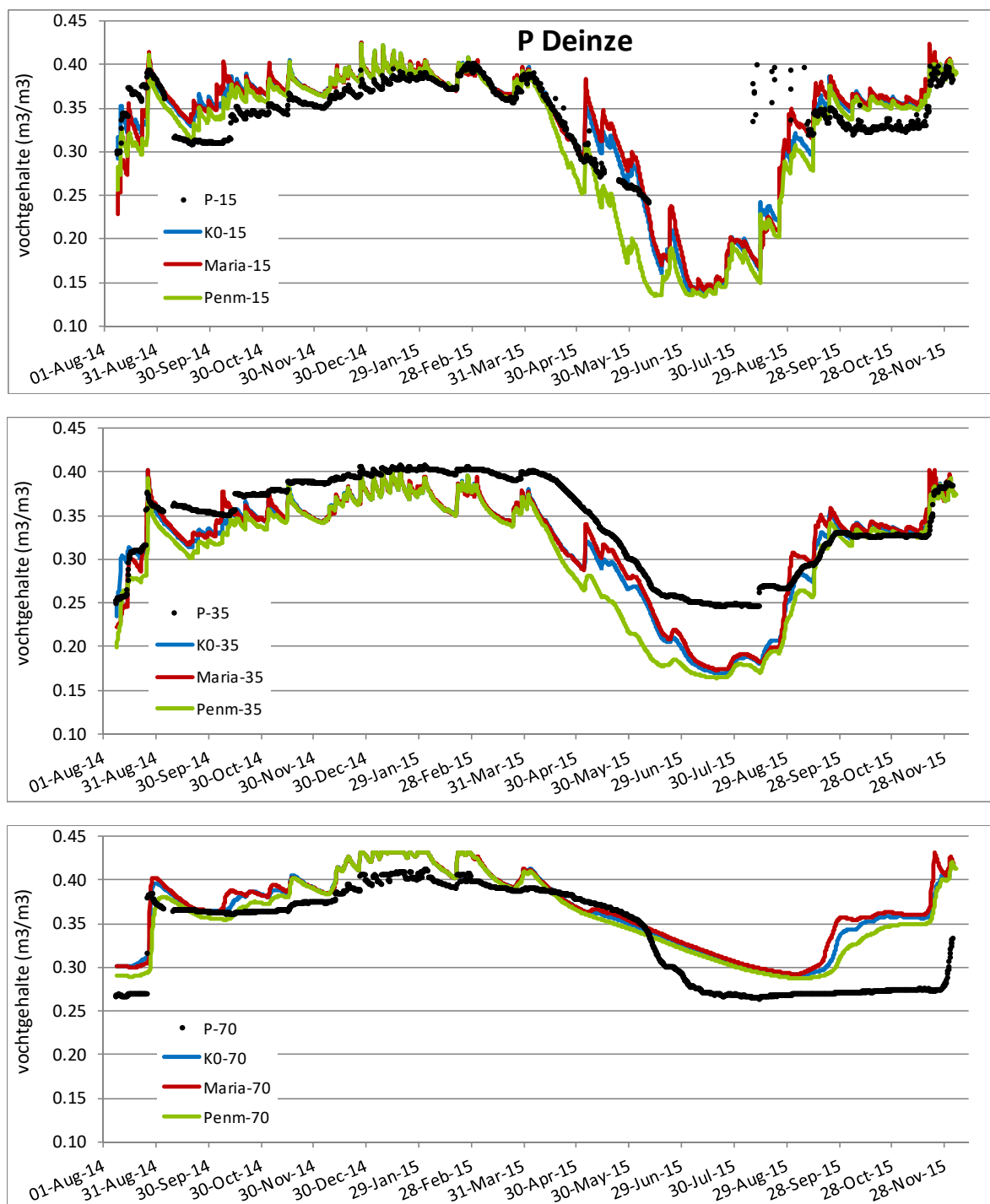
RMSE-waarden van de vergelijking van gemeten met berekende vochtgehalten voor de drie modelexperimenten van de bovenrand per diepte en gemiddeld over de drie diepten.

Modelexperiment	RMSE (m ³ m ⁻³)				RMSE relatief tov θ_{sat} (%)			
	15 cm	35 cm	70 cm	Gemiddeld	15 cm	35 cm	70 cm	Gemiddeld
K0	0.049	0.051	0.056	0.052	11.6	12.7	13.0	12.4
NoGwl	0.047	0.058	0.048	0.051	11.0	14.4	11.0	12.2
Fitbot	0.049	0.051	0.057	0.052	11.6	12.7	13.1	12.4

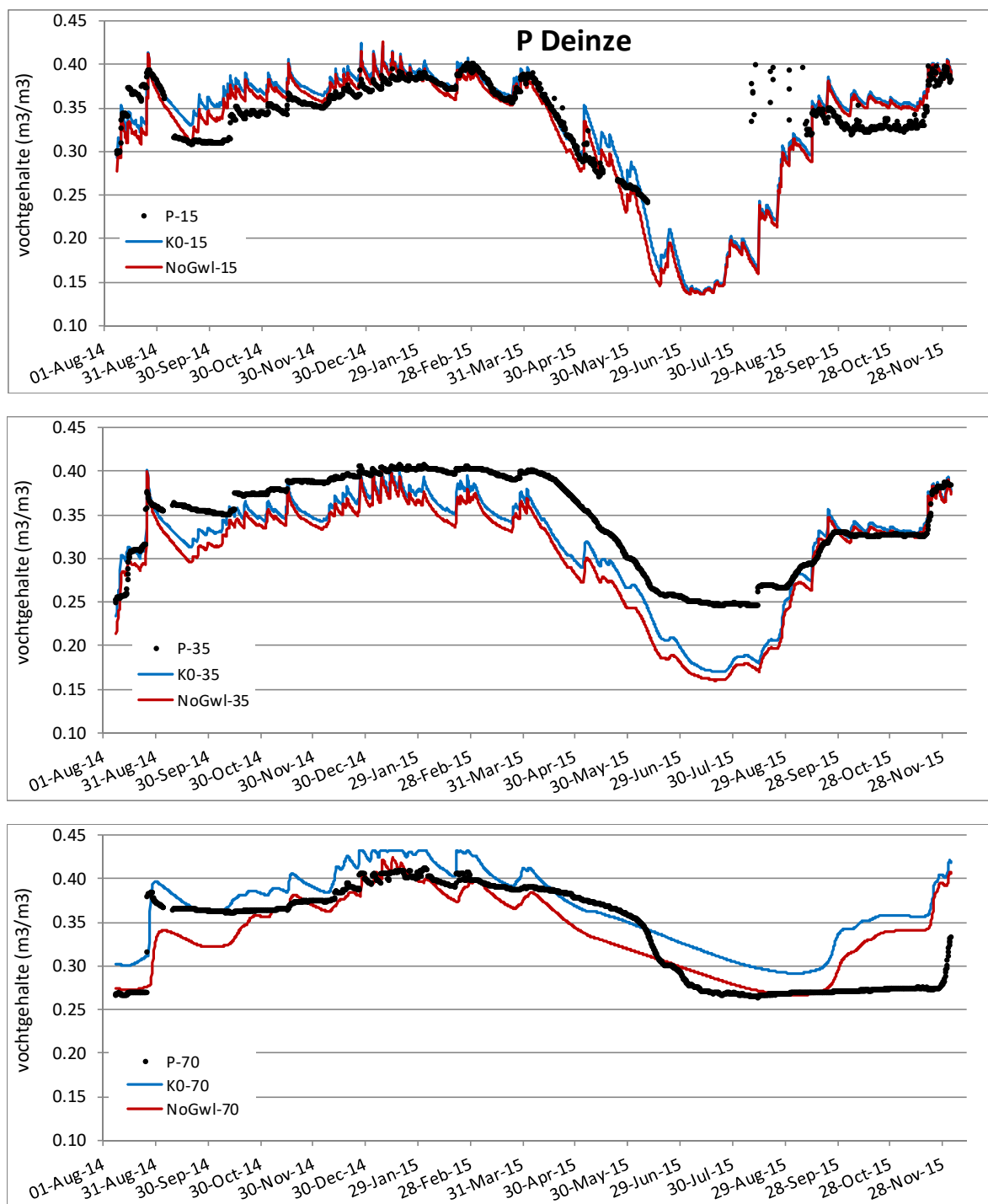
Dat experiment FitBot geen grote verschillen geeft in de bodemvochtsimulaties ten opzichte van K0 met opgelegde gemeten grondwaterstanden is een gunstig resultaat, dat aangeeft dat een gefitte onderrandflux-grondwaterstand-relatie goed voldoet voor bodemvochtsimulaties.

Experiment NoGwl met de grondwaterstand buiten de gemodelleerde bodemkolom geeft een sterk bodemvochtverlagend effect op 70 cm diepte dat gunstig uitwerkt voor de vergelijking met de gemeten vochtgehalten. Naar bovengaand neemt dit effect af. Op 35 cm diepte is het verlagend effect op de vochtgehalten negatief, maar op 15 cm diepte is het eveneens positief. Het overalleffect in termen van de RMSE's is licht positief.

In relatie tot de grootte van de ingreep in de onderrandvoorwaarde van experiment NoGwl – geen verzadigde zone in de drie m diepe modelkolom – zijn de effecten van dit experiment op de vochthuishouding nog beperkt. Reden is dat de bodemkolom het neerslagoverschot kwijt moet.



Figuur 1 Gemeten (P) en door SWAP gesimuleerde vochtgehalten in de tijd voor de drie meetdiepten 15, 35 en 70 cm. De simulaties betreffen de drie modelexperimenten K0, Maria en Penman.

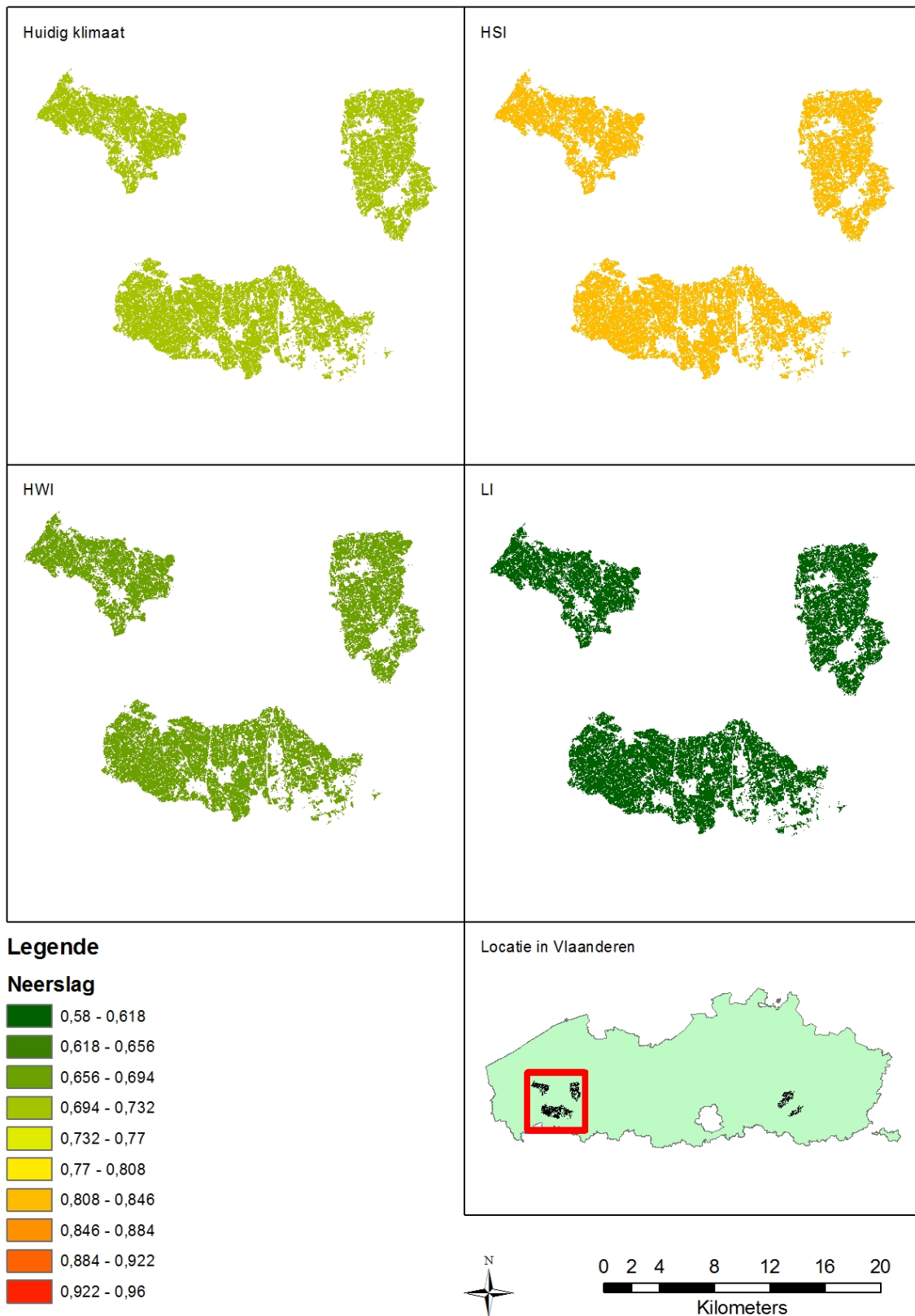


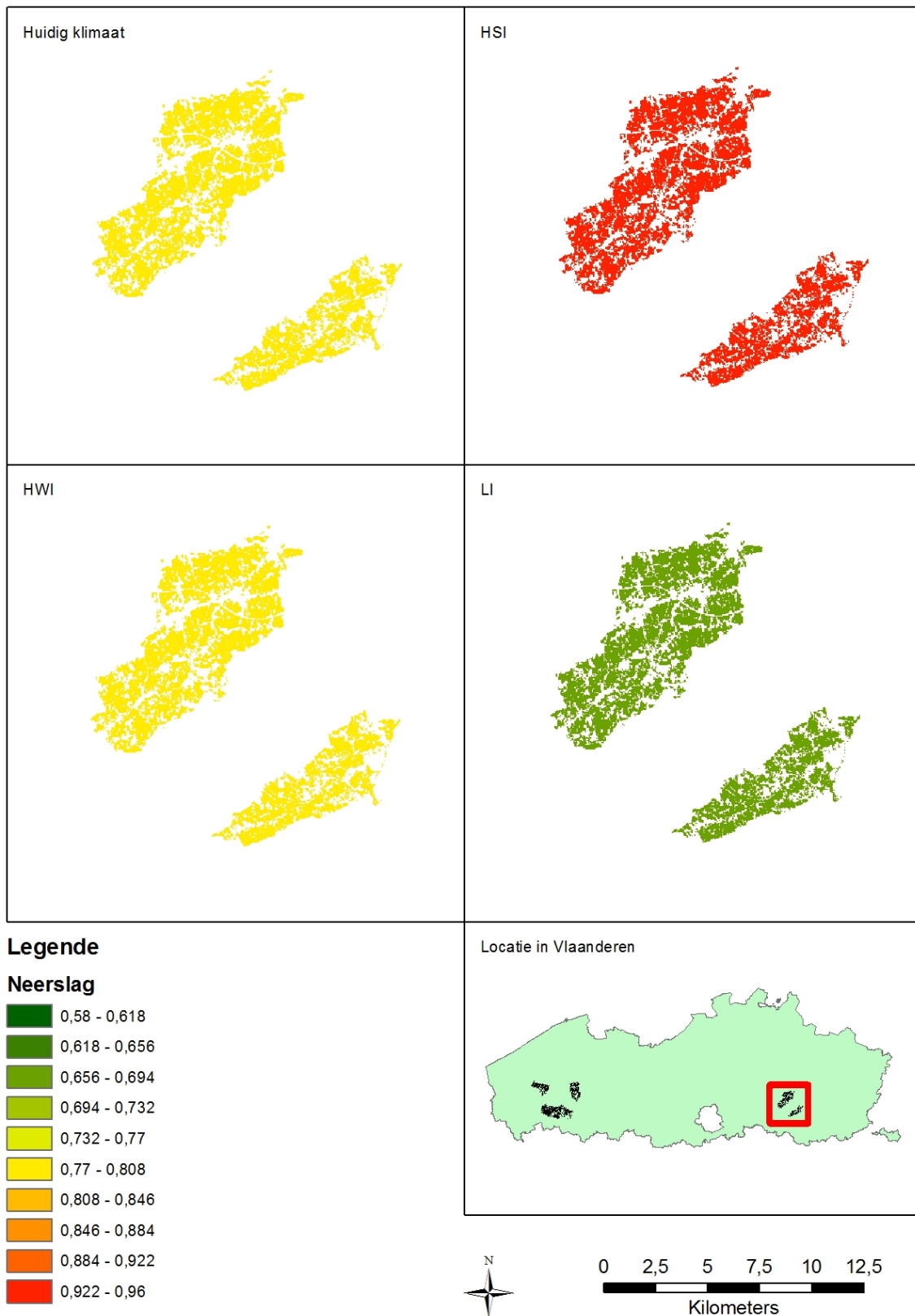
Figuur 2 Gemeten (P) en door SWAP gesimuleerde vochtgehalten in de tijd voor de drie meetdiepten 15, 35 en 70 cm. De simulaties betreffen de twee modelexperimenten K0 en NoGwl.

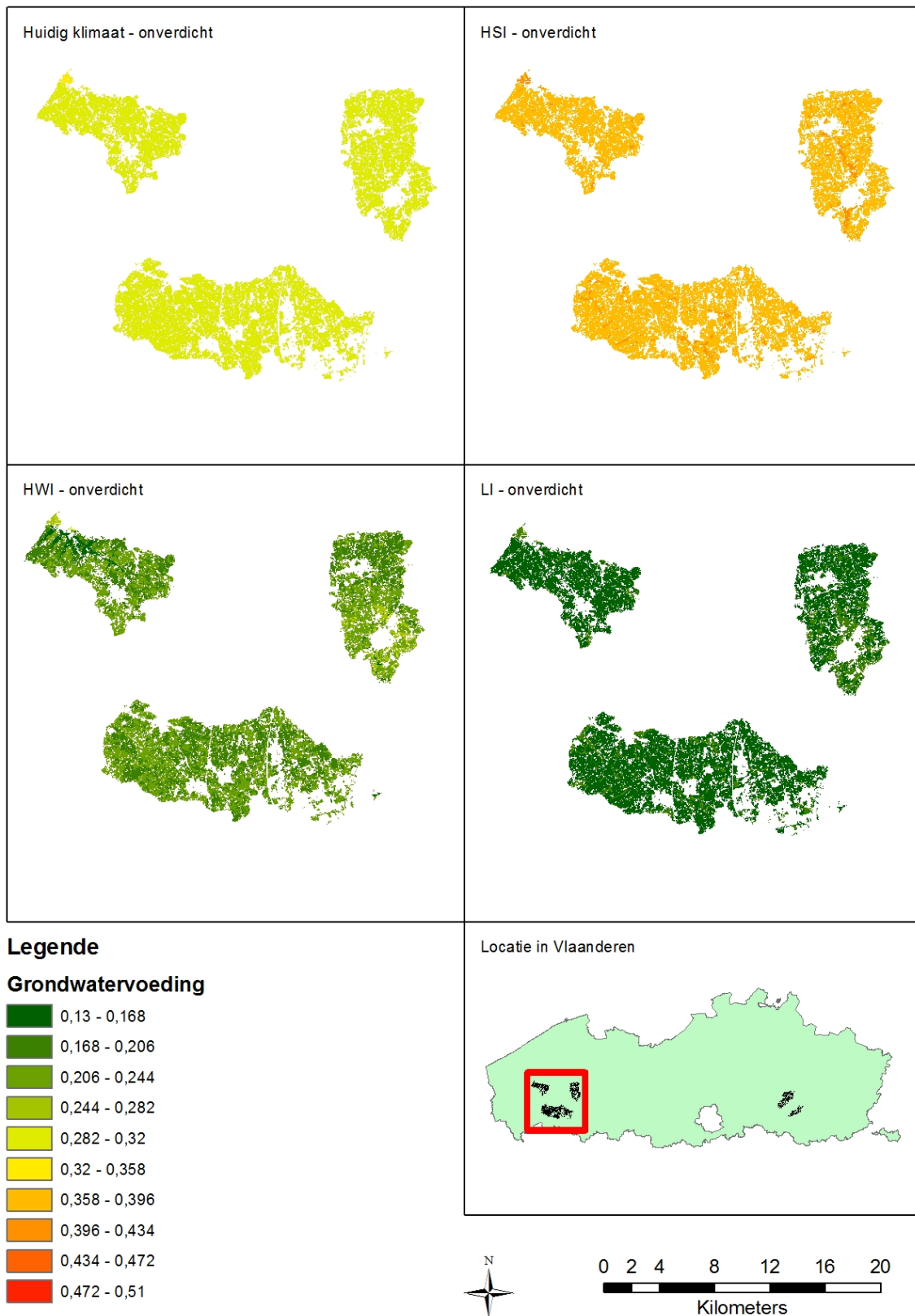
Bijlage 4 Kaarten waterbalansen ruimtelijke verdichtingsscenario's

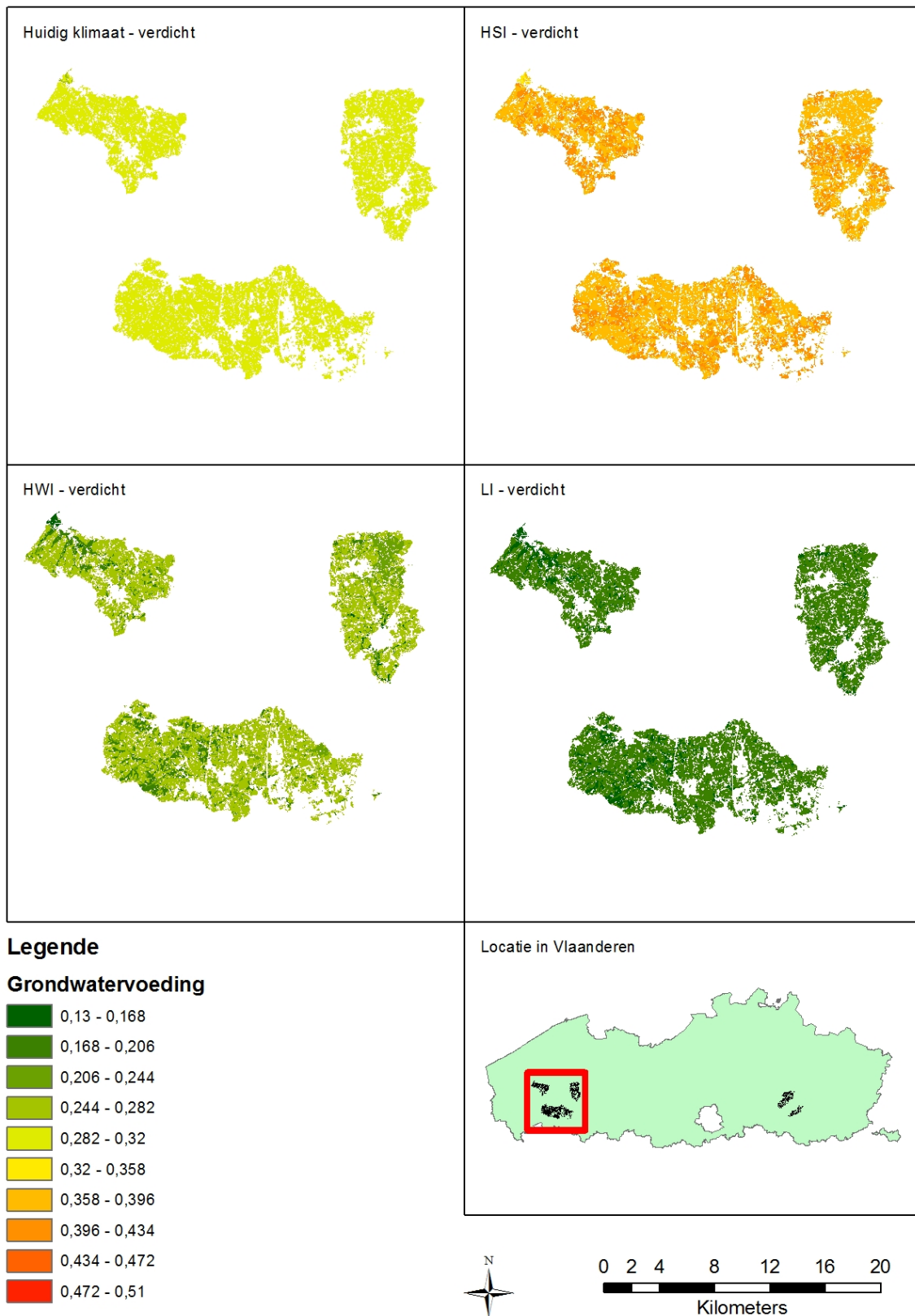
De kaarten laten de gemiddelde jaarsommen zien voor verschillende klimaatscenario's:

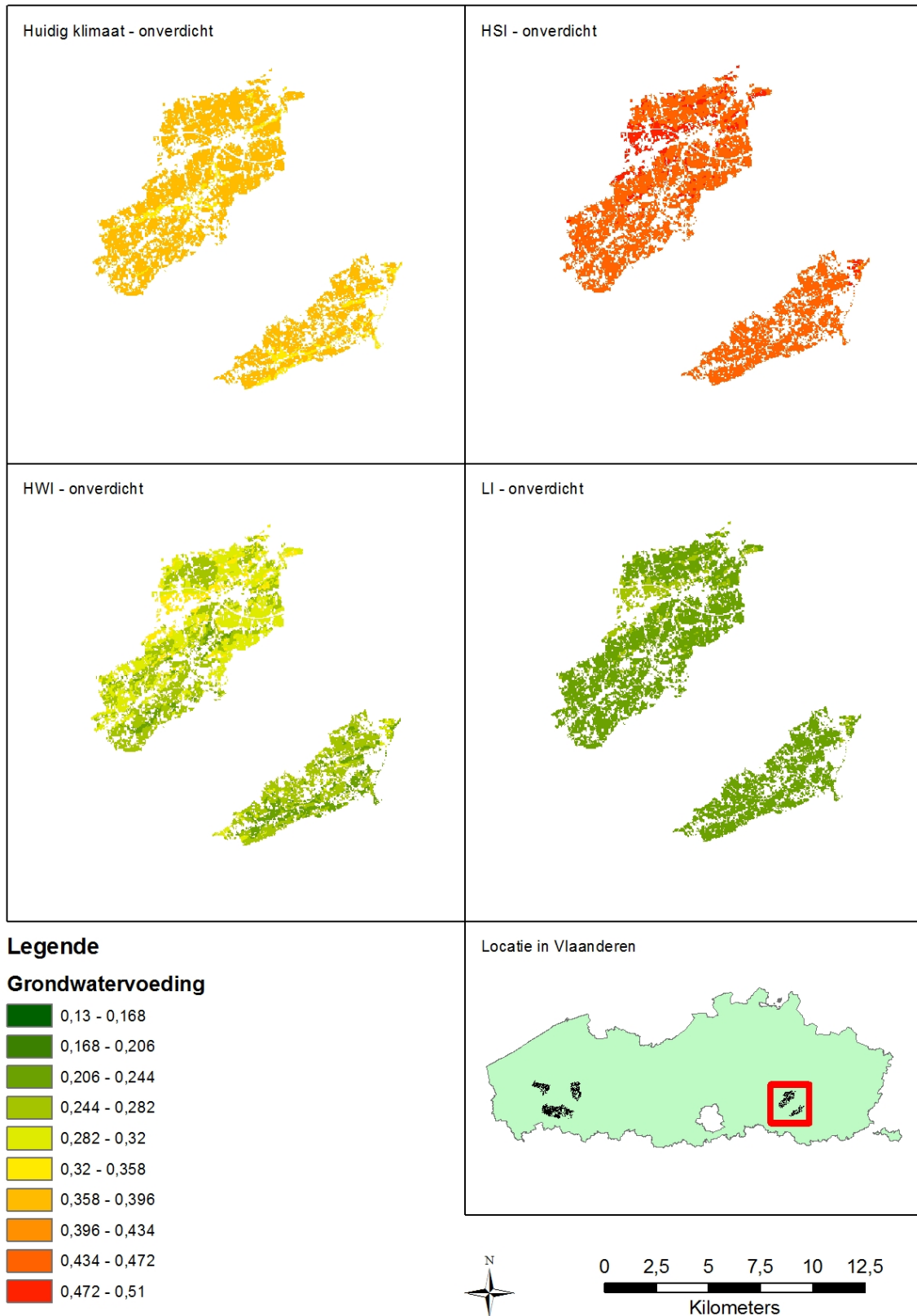
- huidig klimaat: de metingen 2001-2015
- HSI: 'high summer', het klimaatscenario met droge winters en natte zomers
- HWI: 'high winter', het klimaatscenario met natte winters en droge zomers
- LI: 'low' klimaatscenario met droge winters en droge zomers

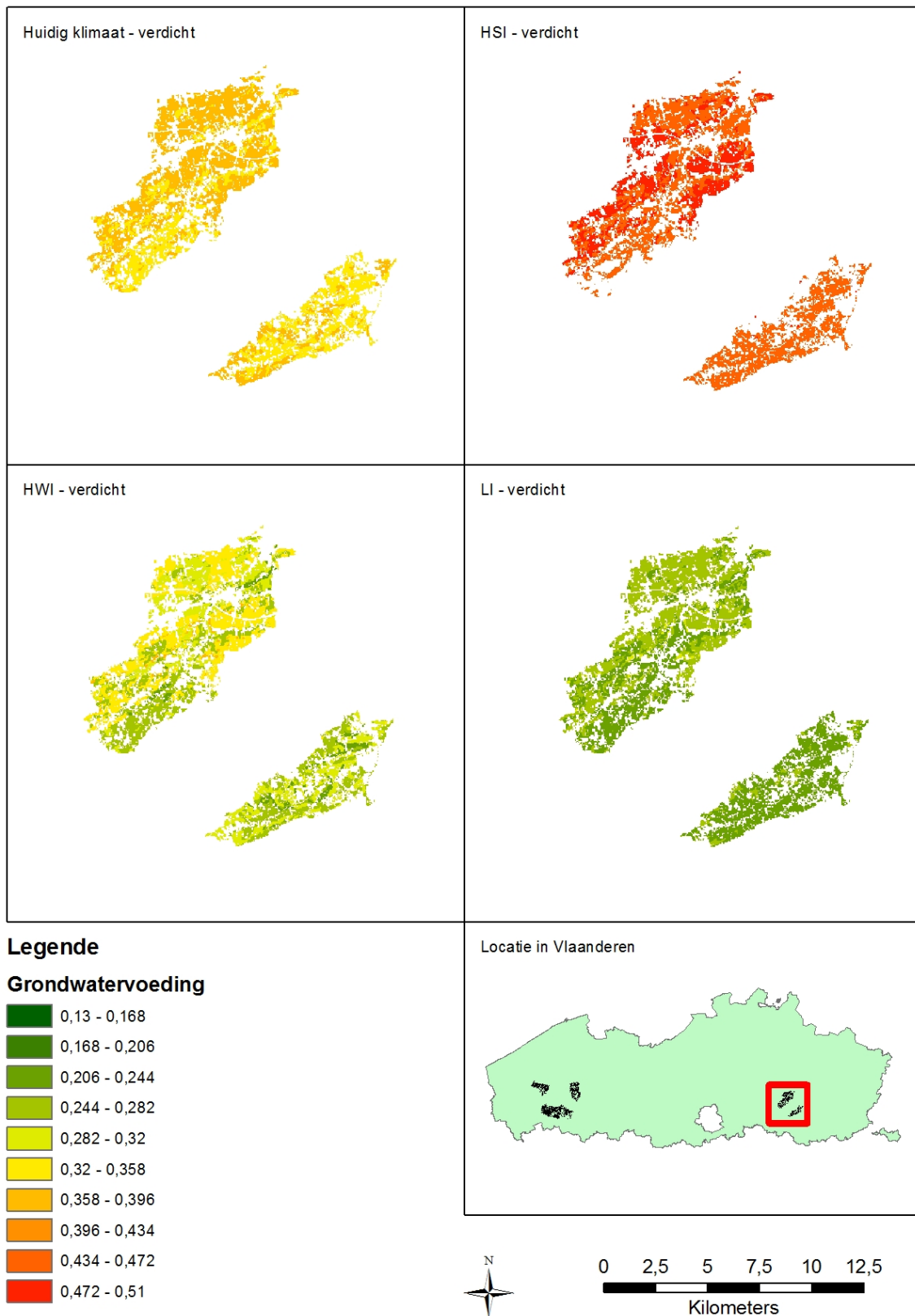


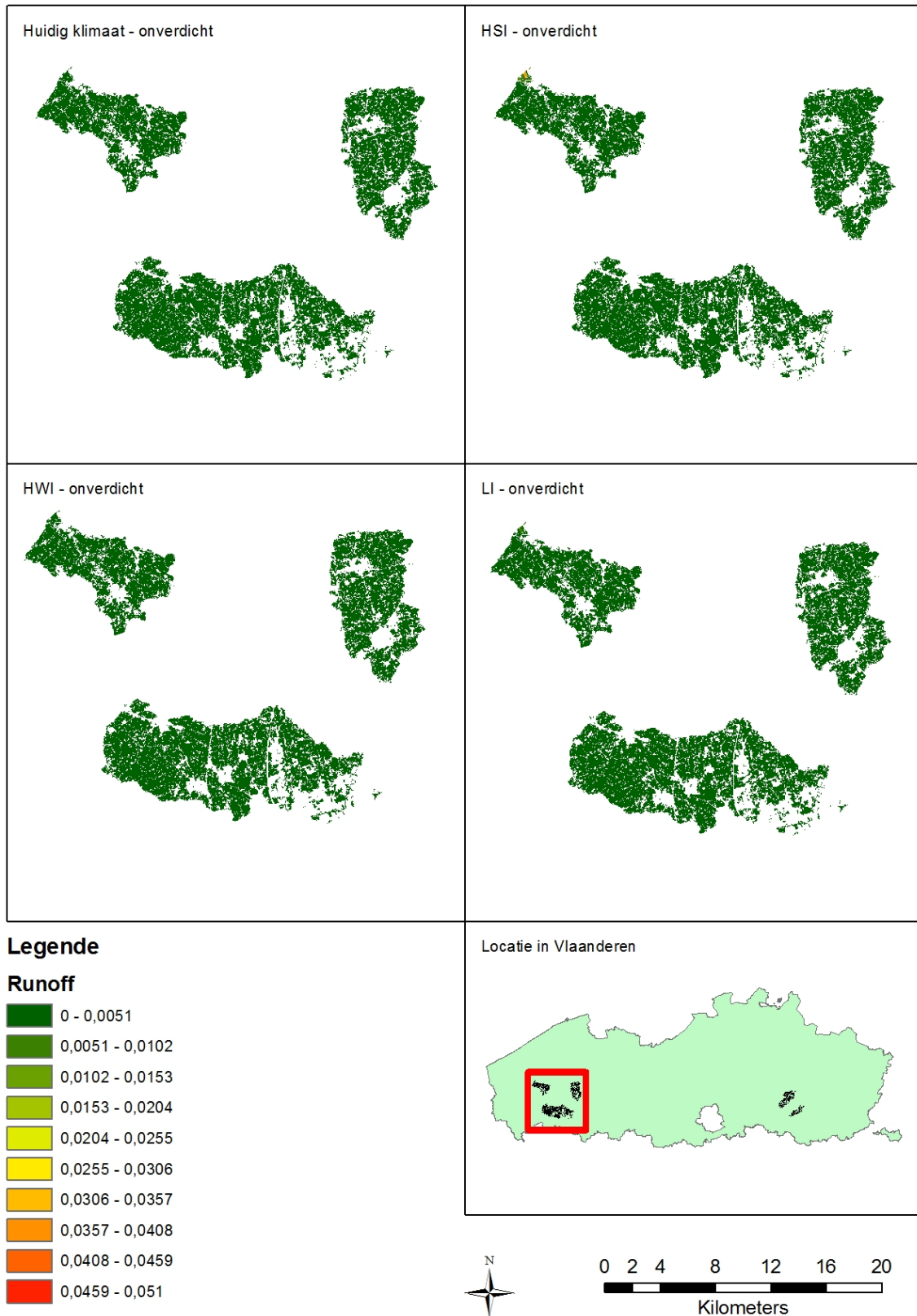


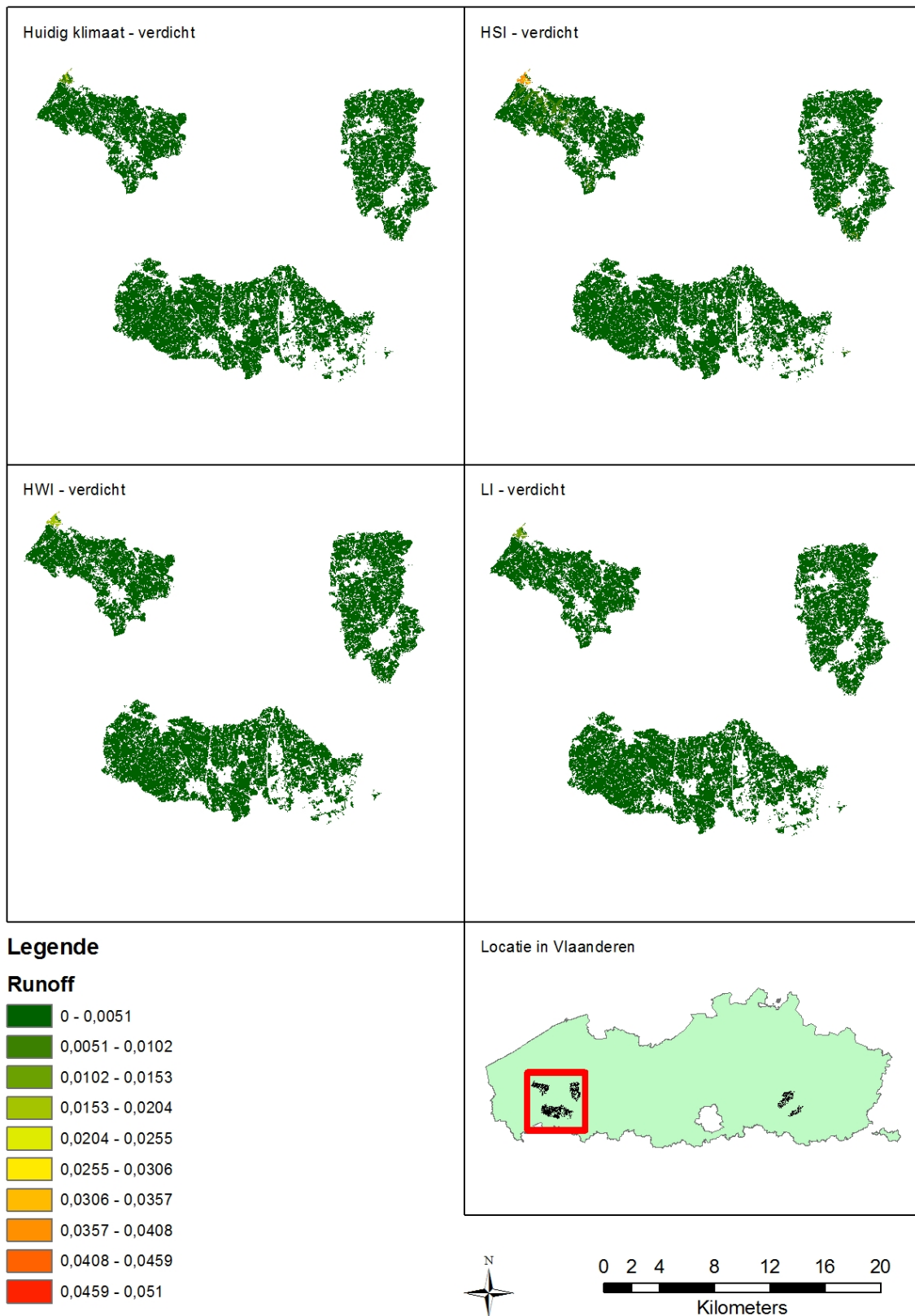


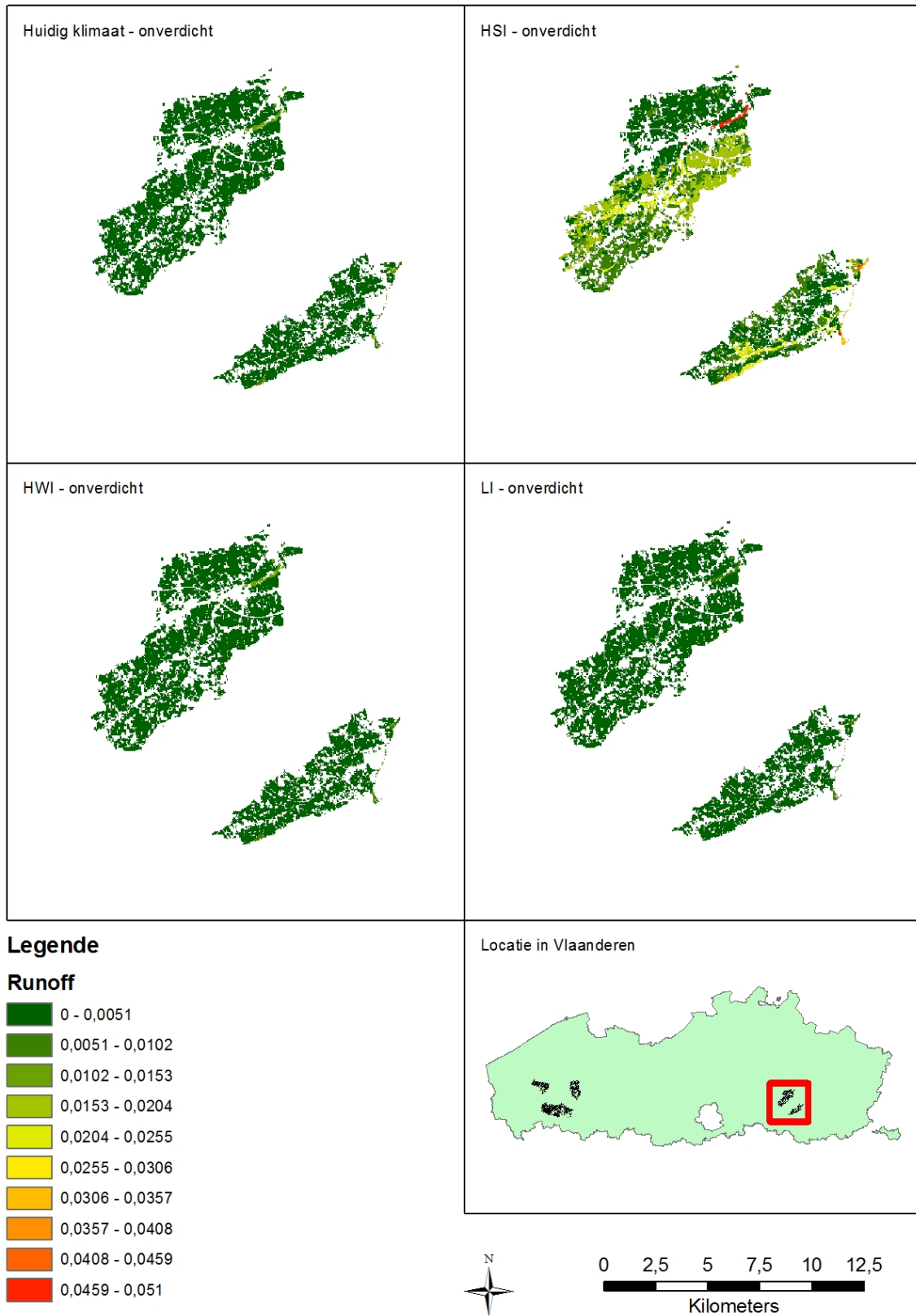


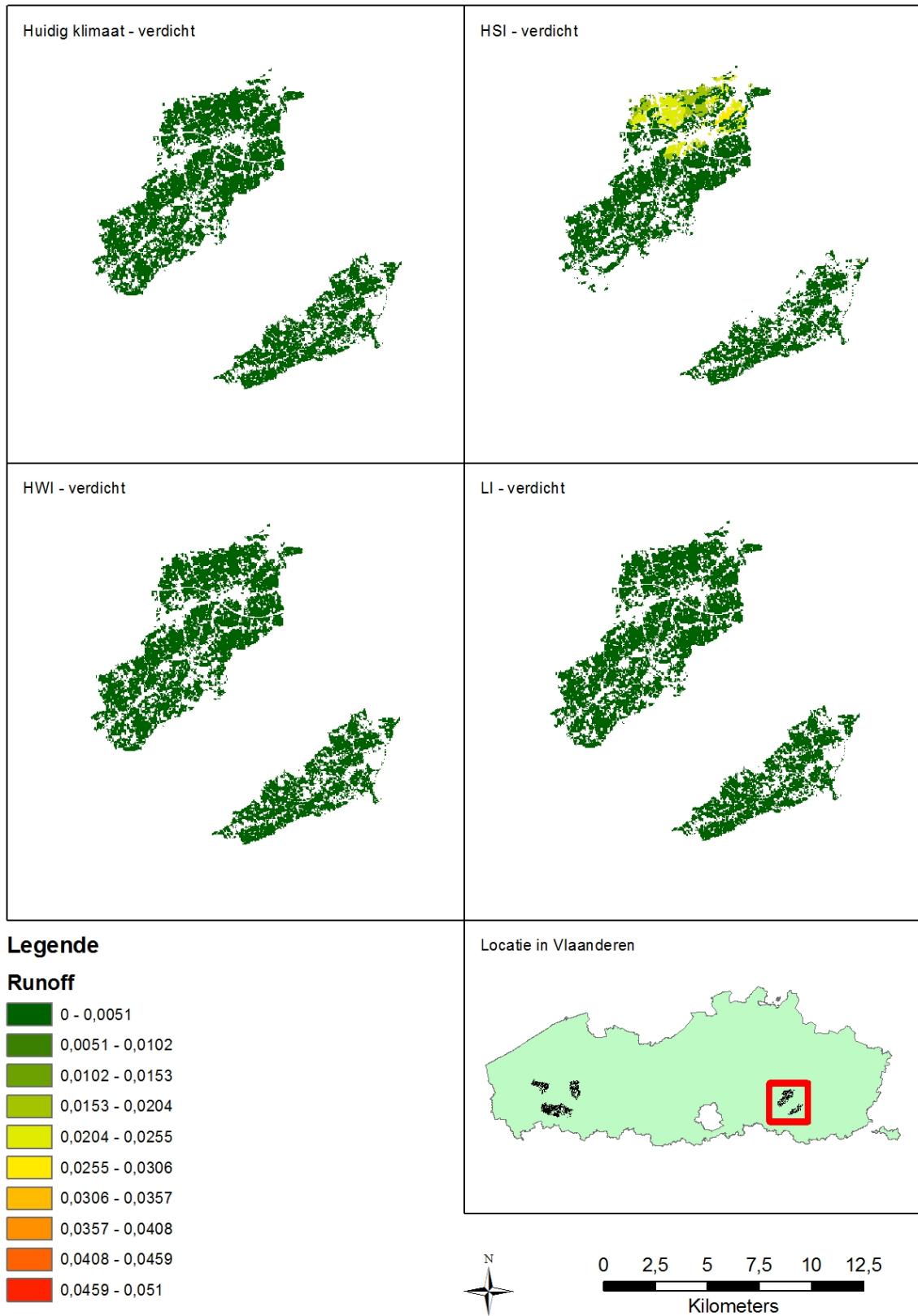


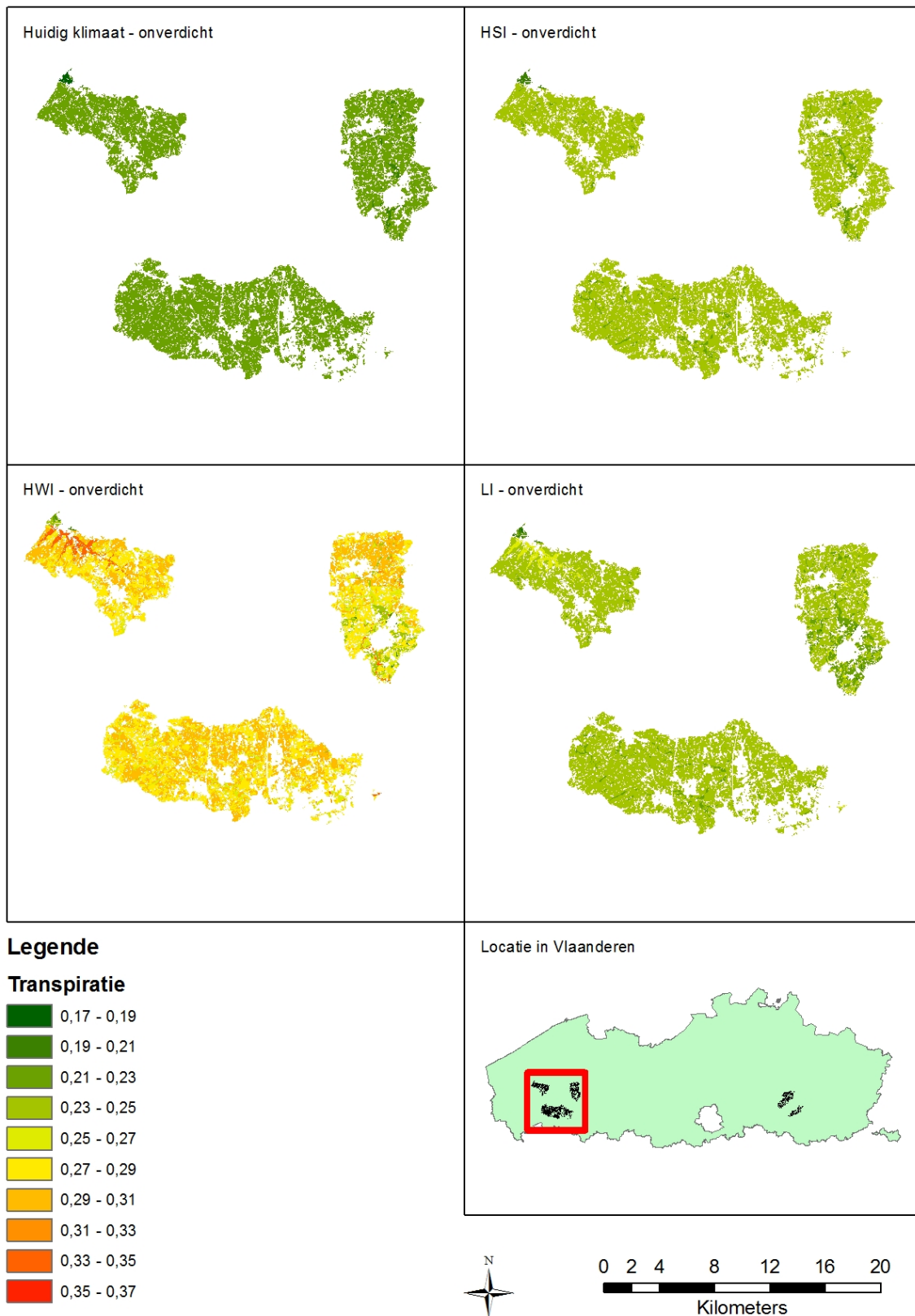


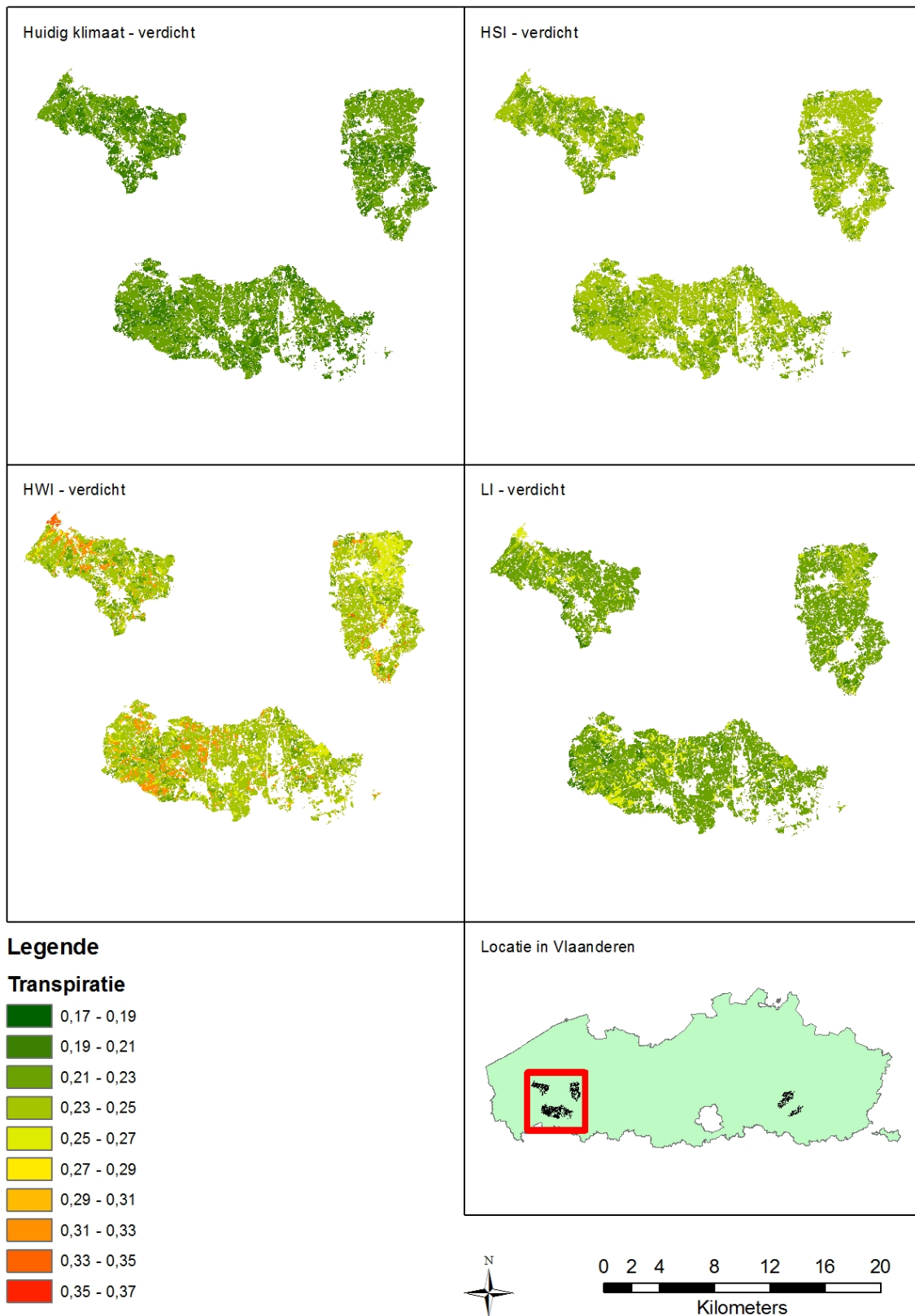


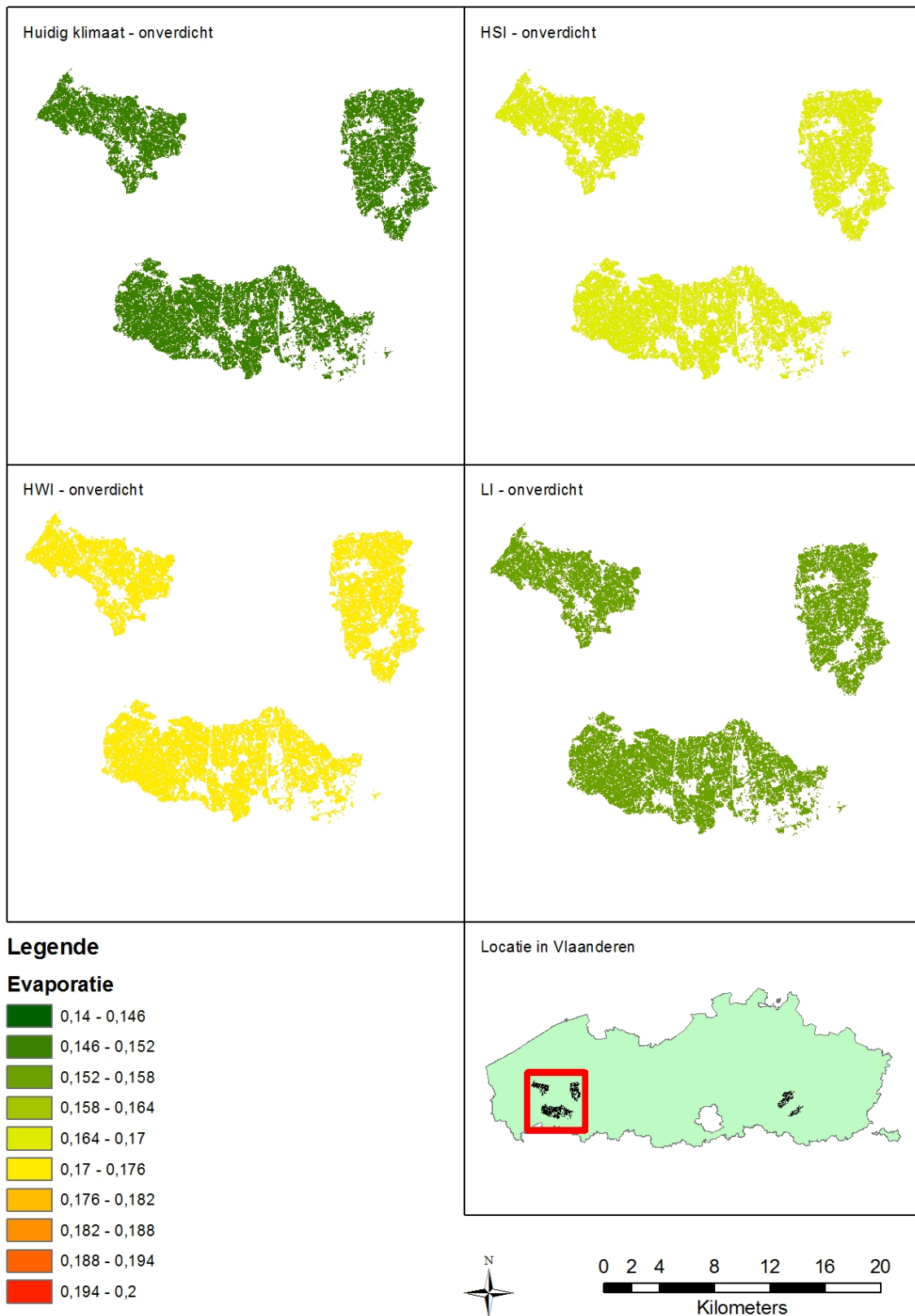


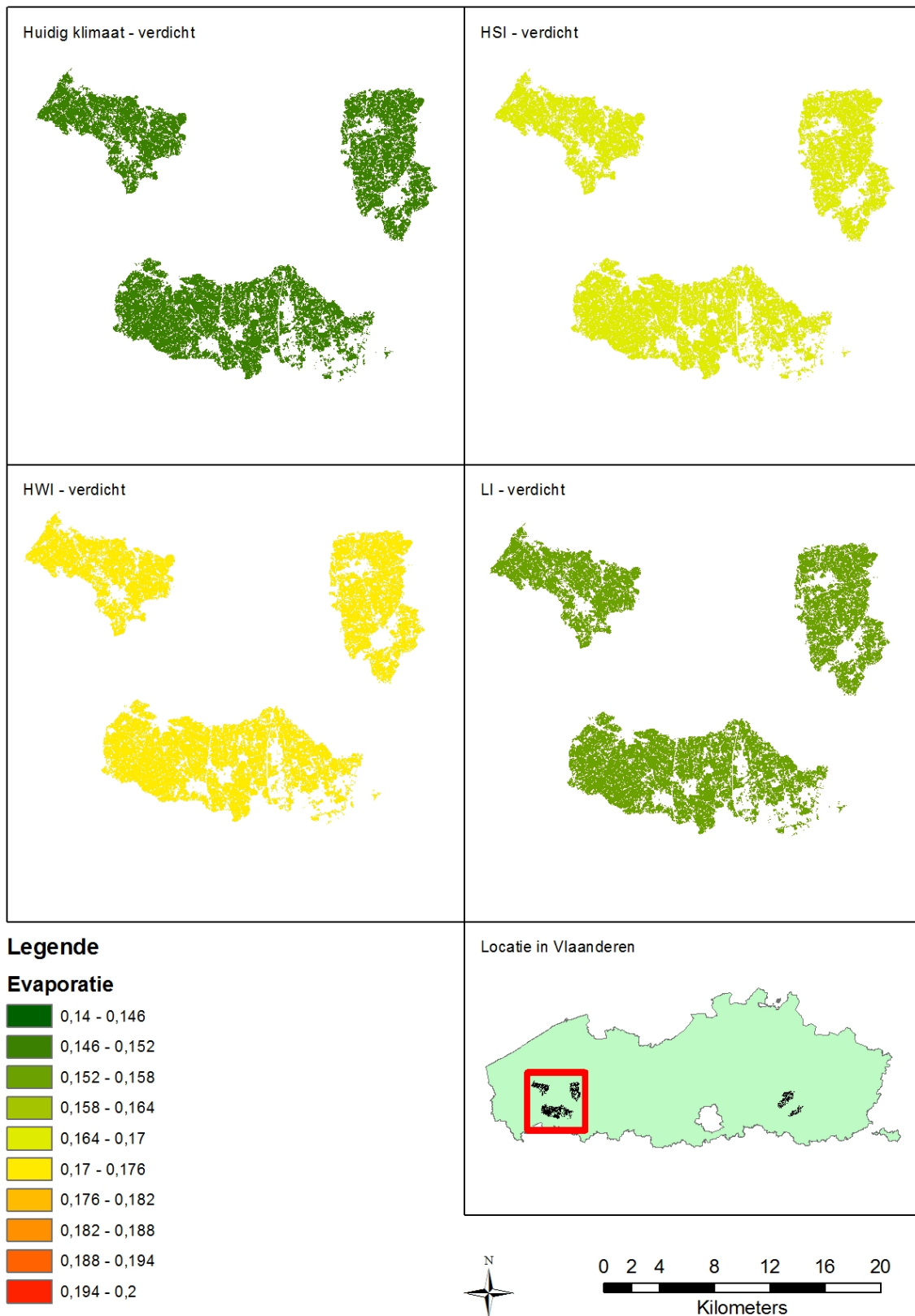


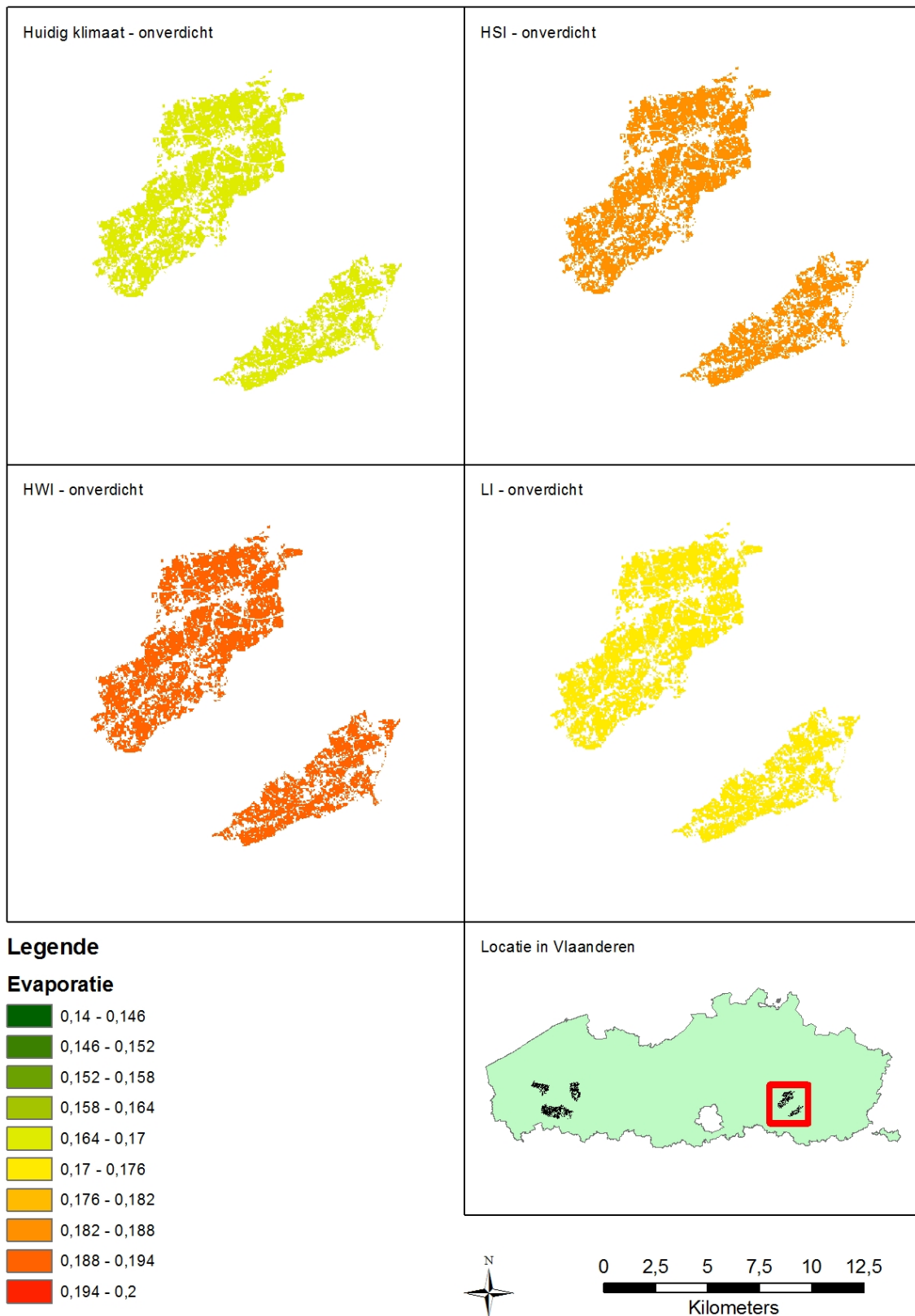


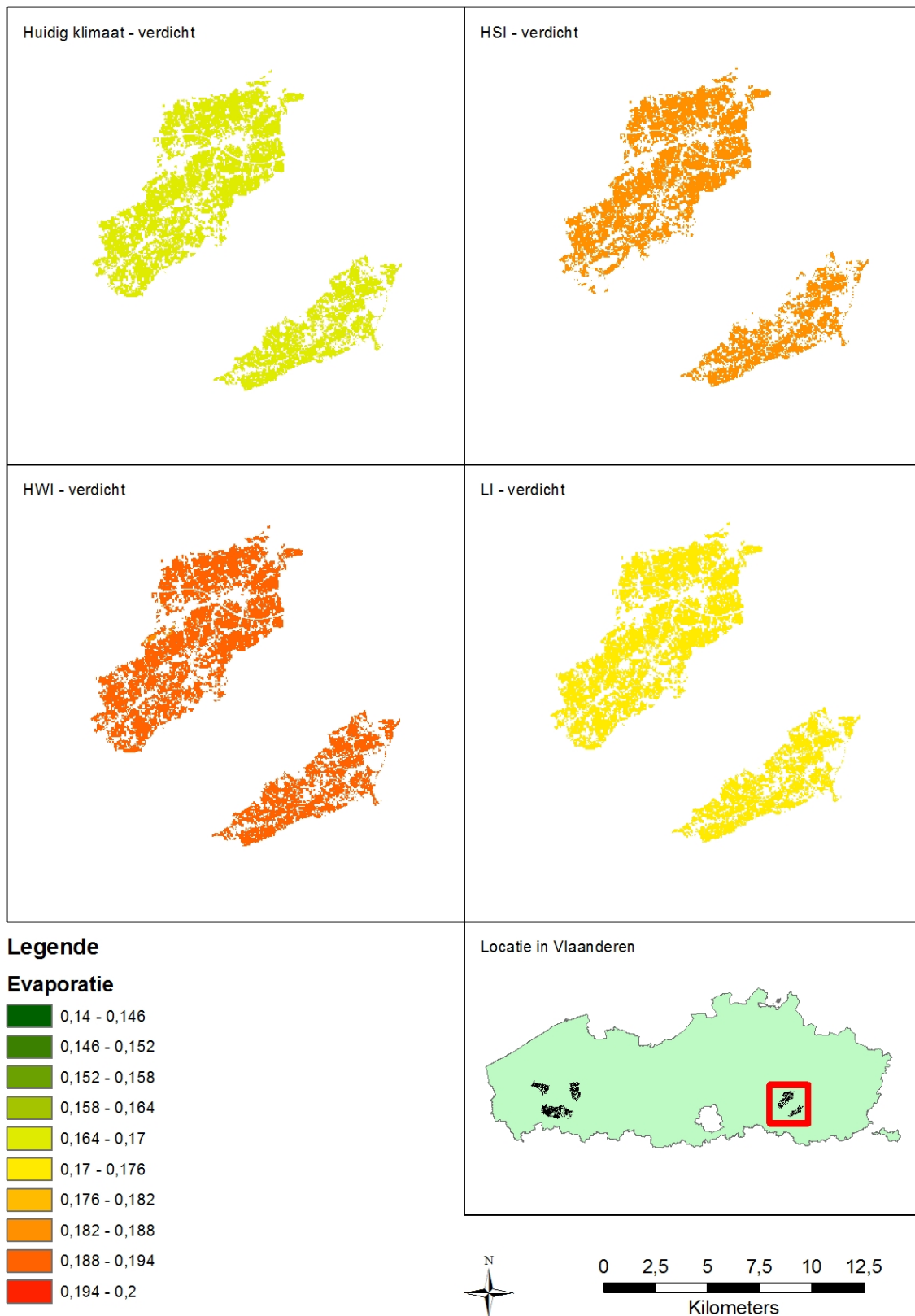












Alterra Wageningen UR
Postbus 47
6700 AA Wageningen
T 0317 48 07 00
www.wageningenUR.nl/alterra

Alterra-rapport 2725
ISSN 1566-7197



Alterra Wageningen UR is hét kennisinstituut voor de groene leefomgeving en bundelt een grote hoeveelheid expertise op het gebied van de groene ruimte en het duurzaam maatschappelijk gebruik ervan: kennis van water, natuur, bos, milieu, bodem, landschap, klimaat, landgebruik, recreatie etc.

De missie van Wageningen UR (University & Research centre) is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen UR bundelen 9 gespecialiseerde onderzoeksinstituten van stichting DLO en Wageningen University hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 6.000 medewerkers en 9.000 studenten behoort Wageningen UR wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.

To explore
the potential
of nature to
improve the
quality of life



Alterra Wageningen UR
Postbus 47
6700 AA Wageningen
T 317 48 07 00
www.wageningenUR.nl/alterra

Alterra-rapport 2725
ISSN 1566-7197

Alterra Wageningen UR is hét kennisinstituut voor de groene leefomgeving en bundelt een grote hoeveelheid expertise op het gebied van de groene ruimte en het duurzaam maatschappelijk gebruik ervan: kennis van water, natuur, bos, milieu, bodem, landschap, klimaat, landgebruik, recreatie etc.

De missie van Wageningen UR (University & Research centre) is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen UR bundelen 9 gespecialiseerde onderzoeksinstituten van stichting DLO en Wageningen University hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 6.000 medewerkers en 9.000 studenten behoort Wageningen UR wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.

