



Droogteresistentie van grasland in de Gelderse Vallei

‘Kijk eens wat vaker onder de graszode’

Alterra-rapport 2373
ISSN 1566-7197

F.G.W.A. Ottburg, M.J.C. Barendse, F.W. Eijgenraam, G.M.J. Tubbing en J. Westerink

Droogteresistentie van grasland
in de Gelderse Vallei

Dit onderzoek is uitgevoerd in het programma Duurzame Ontwikkeling Ondergrond van de Stichting Kennisontwikkeling en Kennisoverdracht Bodem (SKB). Doel van dit programma is het ontwikkelen en delen van kennis en ervaring over verantwoord gebruik en beheer van bodem en ondergrond voor publieke en private praktijkontwikkeling. Het onderzoek werd uitgevoerd binnen het project 'Kijk eens wat vaker *onder* de graszode', dat mede werd gefinancierd door de provincie Utrecht en het waterschap Vallei en Eem.

Projectcode 050-5238944-01

Droogteresistentie van grasland in de Gelderse Vallei

'Kijk eens wat vaker onder de graszode'

Jack Faber, Henk Wösten, Gerben Bakker, Jan Bokhorst¹, Eduard Hummelink, Ivo Laros,
Nico van den Brink, Joachim Deru¹, Boki Luske¹ en Nick van Eekeren¹

Met medewerking van Dick van Pijkeren² en Marinus van Dijk³

- 1 Louis Bolk
- 2 Arcadis
- 3 Waterschap Vallei en Eem

Alterra-rapport 2373

Alterra Wageningen UR
Wageningen, 2012

Referaat

Jack Faber, Henk Wösten, Gerben Bakker, Jan Bokhorst, Eduard Hummelink, Ivo Laros, Nico van den Brink, Joachim Deru, Boki Luske en Nick van Eekeren, 2012. *Droogteresistentie van grasland in de Gelderse Vallei; 'Kijk eens wat vaker onder de graszode'* Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 2373. 112 blz.; 15 fig.; 13 tab.; 119 ref.

Bij de ontwikkeling van duurzaam en klimaatbestendig bodem- en waterbeheer in de Gelderse Vallei wordt gezocht naar mogelijkheden om de capaciteit van weidegrasland voor berging en nalevering van water te vergroten. Daarbij zou actief gebruik kunnen worden gemaakt van het vermogen van landbodems om neerslag op te vangen, vast te houden en na te leveren. Dit rapport geeft resultaten van veldonderzoek, literatuurstudie en modelberekeningen van fysische en hydrologische eigenschappen van bodems op bedrijven die aangesloten zijn bij 'Duurzaam Bodembeheer in de Gelderse Vallei/Utrecht-Oost'. Naleveringskarakteristieken worden modelmatig becijferd in relatie tot bodemtype en grondwaterpeil. Bewortelingsgraad en -diepte blijken succesfactoren waarmee de grootste winst kan worden behaald om de droogtegevoeligheid van grasland te verminderen en daarmee de vraag naar beregeningswater tijdens droogteperiodes te beperken. Er worden alternatieve maatregelen voor graslandbeheer beschreven die hiervoor kunnen worden toegepast. In veel gevallen moet hiermee echter in de agrarische praktijk in Nederland nog ervaring mee worden opgedaan.

Trefwoorden: duurzaam bodembeheer, klimaatverandering, droogtetolerantie, grasland beheer, veehouderij

ISSN 1566-7197

Dit rapport is gratis te downloaden van www.wageningenUR.nl/alterra (ga naar 'Alterra-rapporten'). Alterra Wageningen UR verstrekt geen gedrukte exemplaren van rapporten. Gedrukte exemplaren zijn verkrijgbaar via een externe leverancier. Kijk hiervoor op www.rapportbestellen.nl.

© 2012 Alterra (instituut binnen de rechtspersoon Stichting Dienst Landbouwkundig Onderzoek)
Postbus 47; 6700 AA Wageningen; info.alterra@wur.nl

- 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 2373

Wageningen, december 2012

Inhoud

Samenvatting	7
1 Inleiding	9
1.1 Historie	9
1.2 Opgave	9
1.3 Perspectief	10
1.4 Proces	10
1.5 Leeswijzer	11
2 Veldonderzoek bodemfysica	13
2.1 Locatiekeuze	13
2.1.1 Werkwijze	13
2.1.2 Resultaten	14
2.1.3 Selectie	16
2.2 Bepalingen	16
2.3 Resultaten veldstudie	17
2.3.1 Profielbeschrijvingen	17
2.3.2 Laboratoriumonderzoek	18
2.4 Discussie	22
3 Modellenstudie bodemhydrologie	25
3.1 Afgeleide functionele kenmerken	25
3.2 Resultaten	26
4 Functionele groepen bodemprofielen	29
4.1 Clusteringstechniek	29
4.2 Voorbewerking	29
4.3 Resultaten clustering	30
4.4 Resultaten functionele kenmerken	33
4.5 Resultaten PCA	34
5 Literatuurstudie praktijkmaatregelen	37
5.1 Beworteling van grasland	37
5.2 Maatregelen voor betere beworteling	41
5.2.1 Bodem	41
5.2.2 Gewas	45
5.2.3 Management	48
5.2.4 Overige factoren	53
5.2.5 Samenvattend overzicht	54
5.3 Discussie en conclusie	57
5.3.1 Maatregelen voor droogtetolerantie van grasland	57

6	Slotbeschouwing	59
6.1	Betekenis voor agrarische praktijk	59
6.2	Betekenis voor waterbeheer	60
	Literatuur	63
	Appendix 1 Functionele kenmerken bodemprofielen	69
	Appendix 2 Lijst van grassoorten	73
	Bijlage 1 Geselecteerde locaties en bodemhorizonten	75
	Bijlage 2 Topografie en hoogteligging locaties	77
	Bijlage 3 Profielbeschrijvingen	85
	Bijlage 4 Monsternummers	93
	Bijlage 5 Meetresultaten en MvG-curve fitting	101
	Bijlage 6 Retentiekarakteristieken	105
	Bijlage 7 Gehalten organische stof en aggregaten in geselecteerde horizonten	109
	Bijlage 8 Overzicht bodemfysische bouwstenen voor modelering	111

Samenvatting

Dit rapport bevat de resultaten van veldonderzoek, modellenstudie en literatuuronderzoek naar het watervasthoudend vermogen van de bodem van weidegrasland in de Gelderse Vallei. De studie vormde onderdeel van het project 'Kijk eens wat vaker *onder* de graszode' dat door Stichting Kennisontwikkeling en kennisoverdracht Bodem (SKB) gefinancierd werd en uitgevoerd is door Arcadis (penuoerder), Alterra Wageningen UR en LBI, met de provincie Utrecht en het waterschap Vallei en Eem als direct belanghebbende stakeholders en medefinanciers. De achterliggende vraagstelling van de provincie en het Waterschap was of duurzaam bodembeheer een meerwaarde kan zijn voor het klimaatbestendig maken van de agrarische praktijk in de regio. Er wordt gezocht naar een positieve wisselwerking in de waterhuishouding op percelen en het watermanagement door het Waterschap. Het perspectief is hierbij dat met duurzaam beheer van de bodem agrarische doelstellingen op de korte en lange termijn worden bediend, en tegelijkertijd een kwantitatieve bijdrage wordt geleverd aan het bufferen van pieken in overschotten en tekorten in watervoorziening van het grasland. In geval van de Gelderse Vallei en op basis van het beleid van het waterschap heeft het onderzoek zich geconcentreerd op het voorkomen van droogteschade. Het in de praktijk ervaren knelpunt is dat bij waterbeheer geen actief gebruik wordt gemaakt van het vermogen van landbodems om neerslag op te vangen en vast te houden. Door hierin samen te werken met de agrarische sector zou het mogelijk kunnen worden meer water beschikbaar te houden en daarmee het watertekort tijdens te droge perioden verminderen. Het doel van dit onderzoek is om wetenschappelijke gebiedspecifieke onderbouwing te geven aan de veronderstelling dat duurzaam bodembeheer een directe en kwantitatieve relatie heeft met het vasthouden en mogelijk zelfs het bergen van water in het agrarisch deel van de Gelderse Vallei. Het onderzoek richt zich daarbij op locatiespecifiek onderzoek van bodemfysische eigenschappen, waarna de verkregen gegevens worden gebruikt in een bodemhydrologische modellenstudie om kritische grenzen voor beschikbaarheid van water te bepalen voor de diverse bodemtypen in de Vallei.

De in dit onderzoek betrokken graslanden vallen uiteen in vijf groepen die zich bodemfysisch verschillend gedragen. Het gaat hierbij om twee algemeen voorkomende clusters van beekerdgronden en enkeerdgronden; de drie hiervan afwijkende clusters betreffen verstoringen van het oorspronkelijk profiel met elk eigen karakteristieken. De enkeerd- en beekerdprofielen verschillen onderling sterk in de weerstand van het profiel voor verticale verzadigde grondwaterstroming en zijwaartse transmissiviteit. Daardoor loopt bijvoorbeeld het verzadigingstekort bij een flux van 1 mm/dag bij een worteldiepte van 15 cm uiteen van gemiddeld 37,8 cm voor beekerdprofielen en 27,8 cm voor enkeerden. De hoeveelheid gemakkelijk beschikbaar bodemvocht in de wortelzone is iets groter voor de bekeerden dan voor de enkeerdgronden. Deze neemt evenredig toe met de worteldiepte. Om vochttekorten in grasland te voorkomen is het daarom vooral van belang om diepere en intensievere beworteling te stimuleren door gericht management, rekening houdend met de fysieke mogelijkheden van de lokale bodem.

Zoals blijkt uit de wetenschappelijke literatuur komt een breed scala aan maatregelen in aanmerking om de beworteling van grasland te verbeteren en worteldiepte te vergroten, al is hier in Nederland niet altijd ervaring mee opgedaan. Preventie van bodemverdichting door vertrapping en structuurschade en werken aan de herstelcapaciteit van de bodem is belangrijk. Maatregelen die hierbij horen zijn: verhogen van het organische stofgehalte, op peil houden van de pH en bevorderen van aantallen en activiteit van wormen. Ook kunnen er maatregelen genomen worden bij de inzaai van graslanden door snelgroeiende diepwortelende gewassen als dekvrucht te gebruiken en diepwortelende grassoorten of grasrassen te kiezen. Via de bemesting kan de beworteling verbeterd worden door de N-gift te verlagen, de N-gift uit te stellen na maaien en deze toe te

dienen onder het maaiveld. Hoger maaien en minder frequent maaien of beweiden vallen ook onder de management-opties voor een betere beworteling.

In aanvulling op de maatregelen die agrariërs kunnen nemen, kan het peilbeheer worden gericht op het handhaven van grondwaterstanden binnen 150 cm beneden maaiveld zodat voldoende vocht capillair kan opstijgen. Wanneer ook in de winter de grondwaterstand tussen de 100 en 150 cm wordt gehandhaafd, dan hebben de gronden voldoende capaciteit om neerslagoverschotten te bergen.

Managementmaatregelen kunnen in de praktijk worden getoetst op inpasbaarheid door op experimentele basis met boeren samen te werken. Daarnaast is bewustwording en kennisoverdracht nodig, zodat veehouders beter beseffen welke mogelijkheden zij hebben om de droogtetolerantie van hun grasland te vergroten. Het is van belang dat maatregelen deel gaan uitmaken van een structureel raamwerk, bijvoorbeeld gekoppeld worden aan vergunningen voor beregening, onderdeel zijn van een demoregeling, of opgenomen worden in de groenblauwe diensten binnen de herziening van het GLB.

1 Inleiding

1.1 Historie

In 2009/2010 is door de provincie Utrecht onderzocht of duurzaam bodembeheer in de agrarische praktijk verder gestimuleerd kan worden door dit thema te verbinden aan klimaatadaptatie. In eerste instantie is aan ARCADIS gevraagd om toe te werken naar een voorstel voor een project waarin dit streven uitgewerkt kan worden. Door ARCADIS werd na een korte bureaustudie geconcludeerd dat beide thema's in de onderzoekspraktijk niet kwantitatief aan elkaar zijn gekoppeld, maar dat uit de verschillende bronnen wel valt af te leiden dat duurzaam bodembeheer en klimaatadaptatie in een positieve relatie tot elkaar staan. Hier liggen mogelijk kansen.

Parallel hieraan heeft het Louis Bolk Instituut (LBI) in opdracht van de provincie onderzoek gedaan naar de relatie tussen klimaatadaptatie (in dit geval vooral waterhuishouding op perceelniveau) en duurzaam bodembeheer in de praktijk. Het LBI heeft op een aantal bedrijven in de weidebouw op zand waar werd gewerkt volgens de principes van duurzaam bodembeheer gezocht naar correlaties tussen bodemkenmerken en vochthuishouding.

Door ARCADIS werd in oktober 2010 een workshop georganiseerd met verschillende deskundigen waar de resultaten van de literatuurscan en de veldstudie bijeen werden gebracht, en waar het consortium werd geformeerd voor het project 'Kijk eens wat vaker onder de zode'. Dit project, door provincie Utrecht en Stichting Kennisontwikkeling en kennisoverdracht Bodem (SKB) gefinancierd, wordt uitgevoerd door Arcadis (penvoerder), Alterra Wageningen UR en LBI, met de provincie en het waterschap Vallei en Eem¹ als belanghebbende stakeholders.

1.2 Opgave

De opgave in dit project is kennisontwikkeling en -overdracht als onderbouwing voor provinciaal beleid voor duurzaam bodembeheer in de agrarische praktijk. In het bijzonder wordt hierbij gezocht naar een positieve duurzame wisselwerking in de vochthuishouding op weidegrasland en lokaal watermanagement door het waterschap. Deze opgave past binnen de duurzame ontwikkeling van (een deel van) de Gelderse Vallei onder de noemer *Food Valley*. Bij de ontwikkeling van duurzaam bodembeheer wordt nadrukkelijk het thema klimaatadaptatie betrokken. In deze opgave zijn de volgende zaken in het bijzonder relevant:

- Welke zaken maken het voor de agrariër aantrekkelijk om de principes van duurzaam bodembeheer onderdeel te maken van de bedrijfsvoering, en wat zijn mogelijke nadelen van duurzaam bodembeheer?
- In hoeverre is aantoonbaar te maken dat duurzaam bodembeheer een directe en kwantitatieve relatie heeft met het vasthouden en mogelijk zelfs het bergen van water in het agrarische gebied.
- Als nevensdoel wordt hieraan toegevoegd dat het optimaliseren van het waterbeheer op bedrijfsniveau wellicht een direct en positief effect heeft op natuurontwikkeling in de omgeving: het resultaat zou kunnen zijn minder verdroging door landbouwkundige activiteiten, met meer blijvend-natte natuur en watervoerende beken in tijden van droogte.

¹ Vanaf 1 januari 2013 samengevoegd met waterschap Veluwe tot Vallei en Veluwe

Als niet onbelangrijk neveneffect wordt gezien dat de tegenstelling tussen landbouw en natuurbeheer wordt verminderd. Het lijkt mogelijk om te werken met hogere grondwaterstanden. Eén en ander is echter nog onvoldoende uitgewerkt. Ditt project onderzoekt verdere mogelijkheden.

De doelgroepen bij dit project zijn de regionale veehouderij en het waterschap Vallei en Eem.

1.3 Perspectief

Het streven bij ontwikkeling van duurzaam bodembeheer is dat zowel op de korte en lange termijn agrarische doelstellingen kunnen worden bediend, terwijl tegelijkertijd een kwantitatieve bijdrage kan worden geleverd aan het vasthouden van water in de percelen. Pieken in de watervoorziening tijdens droge en natte perioden worden afgevlakt zodat de waterbeheerder minder kosten hoeft te maken voor de afvoer en aanvoer van water in agrarisch gebied. In geval van de Gelderse Vallei en op basis van kennisbehoefte van Waterschap Vallei en Eem voor dit gebied ligt het accent in het onderzoek bij het voorkomen van droogteschade en minder het afvlakken van afvoerpieken.

1.4 Proces

Het uitgevoerde onderzoek bestond uit vier opeenvolgende onderdelen: een veldonderzoek, een modellenstudie, een verkenning naar kansen en risico's voor het waterbeheer, en een literatuuronderzoek om inzicht te krijgen in de middelen die agrariërs kunnen gebruiken bij het beheer van graslanden. Bij tien agrarische bedrijven in de Gelderse Vallei is een bodemonderzoek op graslandpercelen uitgevoerd. Daarbij werd onderscheid gemaakt tussen droge en natte percelen van bedrijven die zijn aangesloten bij LaMi (tegenwoordig Project Duurzaam Bodembeheer Gelderse Vallei, Vallei-Horstee). Voor een optimale locatiekeuze in relatie tot het waterbeheer heeft het waterschap meegekeken. Er zijn in totaal 20 bodemprofielen opgenomen. Vervolgens zijn de locatiespecifieke gegevens uit het bodemonderzoek benut voor een modellenstudie. Daarvoor zijn functionele hydrologische kenmerken afgeleid en berekend voor verschillende worteldiepten. De berekeningen geven inzicht in wat de belangrijkste factoren zijn voor de vochthuishouding van de bodem. Hieruit bleek dat bewortelingsgraad en -diepte dominante factoren zijn voor de beschikbaarheid van water onder droge omstandigheden, méér dan bijvoorbeeld het organische stofgehalte van de bodem. Uit een aansluitende studie van wetenschappelijke literatuur gericht op maatregelen voor bevordering van beworteling is duidelijk geworden dat er een scala aan maatregelen beschikbaar is. Voor inzicht in de relatie met kansen voor het waterbeheer is tot slot samen met het waterschap Vallei en Eem een verkenning uitgevoerd naar kansen en risico's voor de waterhuishouding.

Het project werd uitgevoerd door een consortium van Alterra, Louis Bolk Instituut, waterschap Vallei en Eem en ARCADIS, met provincie Utrecht en SKB als betrokken agendaleden. Het veldonderzoek is uitgevoerd door Louis Bolk Instituut en Alterra, de bodemfysische laboratorium-bepalingen zijn verzorgd door Alterra. Vervolgens heeft Alterra de modellenstudie uitgevoerd en is Louis Bolk Instituut verantwoordelijk geweest voor de literatuurstudie. De evaluatie met kansen en risico's voor het waterschap is uitgevoerd door waterschap Vallei & Eem en ARCADIS. Het algehele proces is gecoördineerd door ARCADIS onder begeleiding van de provincie Utrecht en SKB.

Dit project werd uitgevoerd in het programma Duurzame Ontwikkeling Ondergrond van de Stichting Kennisontwikkeling en Kennisoverdracht Bodem (SKB). Doel van dit programma is ontwikkelen en delen van kennis en ervaring over verantwoord gebruik en beheer van bodem en ondergrond voor publieke en private praktijkontwikkeling.

1.5 Leeswijzer

De verschillende onderdelen van dit onderzoeksproject worden in aparte hoofdstukken besproken. Het hoofdstuk Veldonderzoek beschrijft de onderzoekslocaties, de gevolgde werkwijze en resultaten van profielbeschrijvingen en vochtretentie karakteristieken van de bodem. In het aansluitende hoofdstuk worden deze gegevens gebruikt voor een modelmatige analyse van de waterhuishouding van bodemprofielen, vooral voor de beschikbaarheid van water voor het gewas onder kritieke omstandigheden. Hoofdstuk 4 geeft vervolgens een opschaling van deze resultaten naar clusters van bodems met gemeenschappelijke hydrologische eigenschappen die als uitgangspunt kunnen worden genomen voor gericht graslandbeheer. Hoofdstuk 5 beschrijft alternatieve maatregelen ter verbetering van de hydrologische eigenschappen van de bodem. Tot slot volgt een slotbeschouwing.

2 Veldonderzoek bodemfysica

2.1 Locatiekeuze

De keuze van locaties voor bemonstering is gebaseerd op een onderscheid tussen natte en droge percelen. Dit onderscheid wordt in sterke mate beïnvloed door de grondwaterstand, textuur en structuur en het organische stofgehalte van de bodem. Deze bodemfysische eigenschappen kunnen worden beïnvloed door het gevoerde beheer, zoals bemestingsvorm, de manier van grondbewerking en keuze van machines, gewaskeuze, rotatieschema's en continuïteit in beheer. Hier liggen de aangrijpingspunten voor verbetering van het vochtvasthoudend vermogen van de bodem.

Bij de locatiekeuze werd uitgegaan van tien bij project Duurzaam Bodembeheer in de Gelderse Vallei/Utrecht Oost¹ aangesloten veehouderijbedrijven die in voorafgaand onderzoek door het Louis Bolk Instituut werden bezocht (Van Eekeren en Bokhorst, 2010). Voor de hier betrokken 20 locaties zijn al basale gegevens beschikbaar, die als een aantrekkelijke voorinvestering worden gezien. De steekproef is hiermee echter beperkt tot een groep van bedrijven die zijn aangesloten bij deze Utrechtse organisatie van innovatieve agrarische ondernemers op het vlak van landbouw en milieu, energie, water en andere thema's. Het is aannemelijk dat deze bedrijven een voorhoede vormen en relatief meer duurzame maatregelen toepassen.

Uitgaande van drie bodemlagen per locatie zouden er $3 \times 20 = 60$ horizonten zijn te beschrijven (die in veel gevallen vergelijkbaar zullen zijn). Uit overweging van kostenbesparing werd niet op alle locaties een volledig bodemprofiel bemonsterd. In plaats daarvan zijn locatiekarakteristieken op basis van de bodemkaart geanalyseerd en zijn de profielhorizonten van de LaMi-locaties voorzien van bodemfysische bouwstenen zoals opgenomen in de Staringreeks. Veel horizonten hebben dezelfde bodemfysische bouwstenen. Door van de 20 locaties alleen de meest voorkomende bouwstenen in de meest onderscheidende droogtegevoelige en -tolerante extremen (op basis van de opgave van betrokken boeren) in het veld te bemonsteren, kan met minder monsters een redelijk beeld van de bodemfysische eigenschappen in de regio worden verkregen. Locaties met een minder onderscheidend droog-nat vermogen zijn niet bemonsterd.

2.1.1 Werkwijze

Uitgangsmateriaal vormden een database van locaties en adressen die ter beschikking werd gesteld door het waterschap Vallei & Eem (ontvangen 12 mei 2011) en een database van meetgegevens uit 2010, ter beschikking gesteld door LBI (versie 5 juni 2011). Voor de selectie van de te bemonsteren locaties zijn de volgende handelingen uitgevoerd:

1. Coördinaten geconverteerd naar voor GIS-bestand leesbare eenheden.
2. Op basis van het rapport 'Karakterisering van Nederlandse gronden naar fysisch-chemische kenmerken' (De Vries, 1999) zijn de bodemeenheden bij de betreffende coördinaten vertaald naar een fysisch-chemische laagopbouw cq profielbeschrijving. Daarbij is onderscheid gemaakt naar grondgebruik. De

¹ Coördinatie door Bureau LaMi, provincie Utrecht. Aanvankelijk maakte ook LTO Noord Utrecht onderdeel uit van de projectorganisatie in een toenmalige Stichting LaMi.

eenheden zijn bepaald op basis van de Bodemkaart van Nederland, schaal 1:50 000. De Staringreeksbouwstenen maken onderdeel uit van deze kenmerken.

3. De profielopbouw volgens de bodemkaart is overigens gebaseerd op gemiddelden en kan in de praktijk afwijken.
4. Uit de Top10NL (2010-09) is het landgebruik bepaald.
5. Als check werd bekeken of er gegevens uit BIS bekend waren van punten die dichtbij één van de coördinaten liggen. Er zijn geen betrouwbare gegevens in BIS voorhanden die met de LaMi-punten kunnen worden vergeleken.

De Staringreeks

De Staringreeks is een database van waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken aan voornamelijk landbouwbodems (Wösten et al., 2001). De Staringreeks is in beheer bij Alterra Wageningen UR, en wordt voortdurend uitgebreid met resultaten van nieuwe metingen. De Staringreeks is een 'klasse vertaalfunctie' die voor iedere textuurklasse de gemiddelde bodemfysische karakteristieken vermeldt. Daarbij worden achttien bovengronden en achttien ondergronden onderscheiden. De aanduidingen onder- en bovengrond zijn gericht op de landbouwpraktijk. Met bovengrond wordt de bovenste 20 tot 35 cm grond bedoeld, die bij bouwland wordt los gemaakt door ploegen. De meeste wortels zitten in de bovengrond. De bovengrond is in het algemeen lossler en heeft een hoger organische stofgehalte dan de ondergrond. De ondergrond wordt in het algemeen niet dieper beschouwd dan 1 tot 1,5 m diepte. In 2001 zijn in aanvulling op de klasse vertaalfuncties continue vertaalfuncties ontwikkeld waarmee aan de hand van textuur, organische stofgehalte, dichtheid en ondergrond / bovengrond voorspellingen kunnen worden gemaakt van de vormparameters in analytische vergelijkingen van de bodemfysische vocht karakteristieken. De Staringreeks anno 2001 is gebaseerd op 832 gemeten bodemfysische karakteristieken. Uitgaande van dit bestand zijn de gemiddelde K-h-relaties berekend voor de 36 onderscheiden Nederlandse textuurklassen ofwel bouwstenen. Ze worden gepresenteerd in de vorm van waarden voor de vormparameters in de analytische vergelijkingen waarmee de relaties voor de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken zijn te beschrijven.
(naar: Van den Akker, 2001).

Voor de locatieselectie hebben we ook naar de gegevens uit het LBI-rapport (Van Eekeren en Bokhorst, 2010) gekeken om te bezien hoe de locaties onderling verschillen in bodemfysische en biologische eigenschappen. Binnen de aanwezige variatie kunnen dan met voorkeur uiteenliggende percelen worden geselecteerd, zodanig dat regionale verschillen goed worden verdisconteerd. Hierbij is gelet op de vochtigheid van de bodem, het organische stofgehalte in de bovengrond, en de aanwezigheid van regenwormen.

2.1.2 Resultaten

Er zijn acht bodem-landgebruik combinatie-eenheden gevonden binnen zeventien percelen (20 punten). De meest voorkomende combinaties zijn:

- pZg23-grasland (Beekeerd lemig fijn zand),
- cHn21-grasland (Laarpodzol leemarm en zwak lemig fijn zand).

Twee gevonden combinaties komen niet voor in de database van het voornoemde rapport (cHn23-Loofbos en pZn23-Akkerland). Deze zijn daarom niet verder beschouwd. De bodemeenheden komen wel overeen met andere combinaties.

De gekozen monsterlocaties en horizonten zijn weergegeven in bijlage 1. In bijlage 2 worden de topografische situering en hoogteligging weergegeven.

Binnen de acht bodemeenheden-landgebruik combinaties zijn vijf bodemfysische bouwstenen uit de Staringreeks te onderscheiden: O1, O2, O3 en B2 en B3.

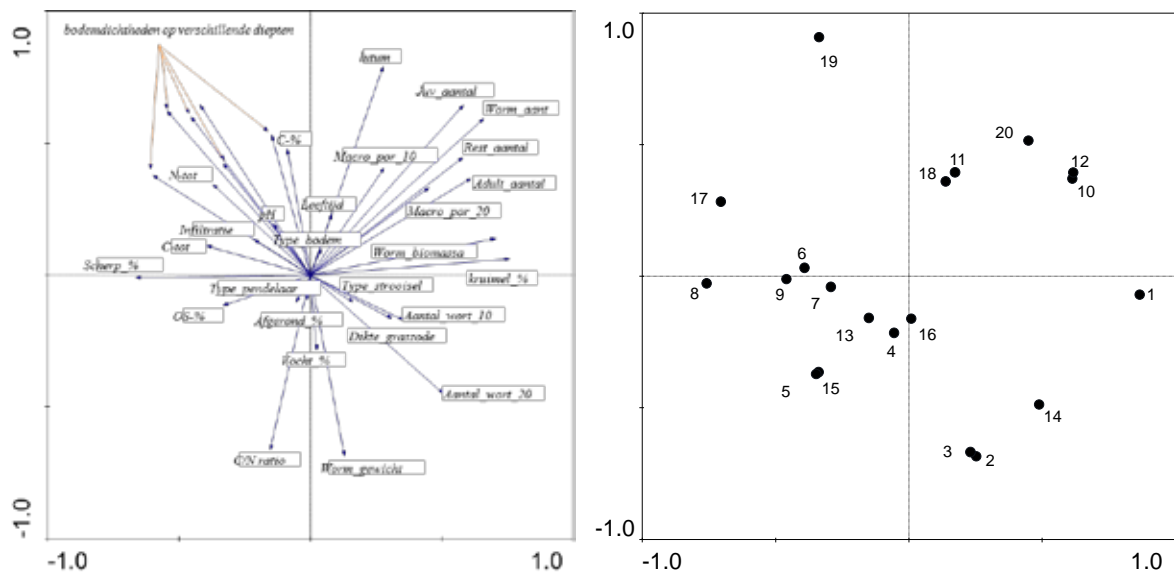
Uit de aanvullende analyse van bodemgegevens van 20 LaMi locaties uit eerder onderzoek van LBI komen interessante resultaten. Er is gekeken naar de mate waarin de diverse gemeten parameters (meetgegevens) van de locaties onderling samenhangen. De gebruikte techniek heet principale componenten analyse (PCA), ofwel hoofdcomponentenanalyse. Dit is een multivariate analysemethode in de statistiek om een grote hoeveelheid gegevens te beschrijven met een kleiner aantal relevante grootheden, de hoofdcomponenten of principale componenten. PCA is bruikbaar als eerste stap bij een factoranalyse om het maximale aantal en de aard van de factoren te bepalen, in ons geval om hoofdfactoren van minder bepalende zaken te scheiden bij een onderbouwde locatiekeuze.

Principale Component Analyse

Als hoofdcomponenten berekent de methode de eigenvectoren van de covariantiematrix van de gegevens en kiest daaruit de belangrijkste. Deze eigenvectoren zijn de hoofdassen van de ellipsoïde die door de covariantiematrix wordt beschreven en die min of meer de 'puntenwolk' van de data voorstelt.

Uitgangspunt van de hoofdcomponentenanalyse is de covariantiematrix van de gegevens. De hoofdcomponenten zijn de orthogonale eigenvectoren van deze matrix. De hoofdcomponenten worden gerangschikt naar belangrijkheid volgens de bijbehorende eigenwaarden. Als slechts een deel van de hoofdcomponenten nodig is om de waargenomen variatie in de data grotendeels te verklaren levert dat datareductie op.

(Ter Braak en Šmilauer, 2002).



Figuur 1.

PCA-diagram van bodemgegevens uit het vooronderzoek (data: Van Eekeren en Bokhorst, 2010) en de plaatsing van de LaMi locaties U1 t/m U20 langs dezelfde hoofdcomponenten.

De resultaten worden weergegeven in Figuur 1. Uit de analyse blijkt dat natte en droge percelen goed zijn te onderscheiden. Wat boeren nat en droog noemen is redelijk consistent. Hierop lijkt dus al goede scheiding mogelijk.

Op natte percelen worden meer regenwormen gevonden, en minder organische stof in de 10 cm bovengrond. Er is sprake van een enigszins onverwacht negatief verband tussen wormen en organische stof. Organische stof dieper dan 10 cm –mv en de totale verdeling over profiel kan hierbij een rol spelen. Het zou goed kunnen zijn dat wormen het organisch materiaal dieper de grond in brengen, en dus relatief hebben verlaagd in de bovenste 10 cm.

De betekenis hiervan kan zijn dat water dat wordt vastgehouden door organische stof dieper in de bodem (maar wel binnen de wortelzone) beter beschermd is tegen uitdroging: in dat geval is sprake van grotere retentie.

Droog-nat blijkt een belangrijkere factor dan de leeftijd van het grasland. Dat is interessant voor scenario-studies.

De leeftijd van het grasland correleert met regenwormen, maar wormen vormen een veel belangrijkere verklarende factor (grotere pijlen).

De leeftijd van grasland is tegengesteld aan de hoeveelheid organische stof in de bovengrond (!), maar het gaat hier om kleine effecten (kleine pijlen).

Op natte percelen wordt een lagere indringingsweerstand en lagere waterinfiltratiesnelheid gemeten.

2.1.3 Selectie

De vijf eenheden zijn aanwezig in de pZg23-Grasland (O2, O3, B3) (perceel 1100, 1483, 1514, 1408, 2160: percelen U4, U10 of Harten) en cHn21-Grasland (O1 en B2) (perceel 22, 23, 360, 423: U14 of U5) (percelen zijn gecodeerd voor privacy van eigenaren).

Bij het bemonsteren is de grootste kans op een overeenstemmend profiel wanneer een locatie gekozen wordt die zich in het midden van een bodemeenheid bevindt. Dat is het meest het geval bij perceel 64457/1100: U4/pZg23-gras en bij perceel 147065/22: U14/cHn21-gras.

Het punt bij U2 (perceel 224748/1075: cHn23-Akkerland) heeft de laagste GLG (>3m) en is daarom ook bemonsterd.

2.2 Bepalingen

Tijdens de bemonsteringen zijn profielbeschrijvingen gemaakt, is de grondwaterstand indicatief vastgesteld en zijn visuele beoordelingen gedaan van het aantal aanwezige regenwormen, de bewortelingsgraad en de bewortelingsdiepte. Aan de bodemmonsters zijn in het laboratorium bepalingen uitgevoerd van retentiekarakteristieken en onverzadigde doorlatendheid.

Retentiekarakteristiek

Bepaald aan onverstoord gestoken 100 cm³ ringmonsters.

De karakteristieke vochtspanningen werden gemeten met de *suction plate* en de drukplaatextractor. De werkzaamheden zijn uitgevoerd in een klimaat-geconditioneerde laboratoriumruimte met omgevingstemperatuur 16±1 °C en relatieve luchtvochtigheid 60±5%.

Onverzadigde waterdoorlatendheid

Bepaald aan onverstoord gestoken 700 cm³ ringmonsters.

Doorlatendheid en retentiekarakteristiek zijn gemeten volgens de verdampingsmethode.

Uit de meetresultaten van de verdampingsmethode zijn de Mualem-Van Genuchten (MvG) parameters bepaald met het RETC-programma (via de Appia-schil), zodat deze direct toepasbaar zijn in modelberekeningen.

Organische stofgehalte

Gravimetrisch bepaald als gloeiverlies bij 550°C na voordroging bij 105°C.

Aggregaat grootte en -stabiliteit

Bepaald aan onverstoorde 100 cm³ ringmonsters.

Veldvochtige grond werd gezeefd (8 mm), gedroogd aan de lucht en verder gezeefd over 4.0, 2.0, 1.0 en 0.5 mm. Gewichtsfracties op basis van droge grond.

Stabiele aggregaten werden met NaOH bepaald, afgezet tegen instabiele aggregaten in water gewassen. De stabiliteit werd bepaald aan de groottefracties 1-2 en 2-4 mm.

2.3 Resultaten veldstudie

2.3.1 Profielbeschrijvingen

We hebben zeven van de 20 LaMi-locaties bezocht en daar het bodemprofiel beschreven (LBI) en metingen verricht (Alterra) aan de verschillende bodemlagen. De profielbeschrijvingen zijn weergegeven in bijlage 3, inclusief foto en veldobservaties. De metingen geven de invoergegevens voor de model berekeningen.

Van de zeven profielen bleken er vier duidelijk anders dan op basis van de bodemkaart werd verwacht, waardoor niet alle voor het gebied verwachte Staringreeks-eenheden ook in het veld zijn aangetroffen. De werkelijk aangetroffen Staringreeks-bouwstenen B2 en O1 zijn in het lab gemeten en samengevoegd tot regionale bouwstenen RB2 en RO1. Voor RB2 zijn de monsters V11 t/m V32 en H11 t/m H22 samengevoegd. Voor RO1 zijn de monsters B11 t/m B22 samengevoegd.

Voor de dertien resterende LaMi locaties zijn aanvullende profielbeschrijvingen gemaakt ter verificatie van de bodemkaart en ter controle of voor alle relevante profieleenheden inderdaad metingen zijn gedaan (cq. welke eenheden ontbreken).

In bijlage 3h zijn van deze resterende locaties de profielbeschrijvingen gegeven. Op grond van de gevonden bodemeenheden zijn opnieuw de bijbehorende bodemfysische Staringreeks bouwstenen toegekend (De Vries, 1999).

Voor modelberekeningen wordt uitgegaan van

1. de gemeten bouwstenen van tabel 1 (en bijlage 5) op de locaties U2, U4 en U14.
2. de gemeten samengevoegde regionale bouwstenen RB2 en RO1 op de locaties die niet direct zijn bemeten, maar waar een B2 of O1 bouwsteen is toegekend aan een horizont.
3. de standaard Staringreeks bouwstenen op de overige niet gemeten locaties c.q. horizonten

Een compleet overzicht van de te hanteren bodemfysische parameters is weergegeven in bijlage 10.

2.3.2 Laboratoriumonderzoek

Vochtreentie

In Tabel 1 zijn de Mualem-Van Genuchten (MvG) parameters van de doorgemeten 700cm³ duplo-monsters weergegeven. Bijlage 4 geeft een overzicht van de monsternummers. Deze grootheden vormen invoer voor het modelmatige onderzoek in de vervolgfase van het project. In bijlage 5 worden de meetresultaten en de MvG-curve fitting van de duplo-monsters grafisch weergegeven. In bijlage 6 zijn de retentiekarakteristieken gegeven van de 100 cm³ duplo-monsters.

Tabel 1

Vochtreentie-karakteristiek zoals gemeten aan geselecteerde bodemprofiel-eenheden. Karakteristieken worden uitgedrukt aan de hand van Mualem-Van Genuchten parameters van duplo monsters. θ_s verzadigde watergehalte [L^3L^{-3}]; θ_r residueel watergehalte [L^3L^{-3}]; α is gerelateerd aan de inverse van de luchtaanzuiging, $\alpha > 0$ ($[L^{-1}]$, of cm^{-1}); n is maat voor de porie-grootte verdeling, $n > 1$ (dimensieloos)

Monster	θ_r	θ_s	α	n	l	m	K_s'
<i>U2</i>							
V11,12	0.050	0.410	0.0085	1.698	3.284	0.411	6.622
V21, 22	0.050	0.470	0.0130	1.750	0.443	0.429	6.603
V31, 32	0.079	0.405	0.0123	2.327	0.000	0.570	5.518
<i>U4</i>							
B11,12	0.066	0.470	0.0213	2.816	0.000	0.645	19.98
B21, 22	0.052	0.347	0.0108	4.009	0.274	0.751	1.563
<i>U14</i>							
H11,12	0.100	0.447	0.0105	1.900	1.722	0.474	6.860
H21,22	0.050	0.340	0.0260	1.600	0.000	0.375	17.621

Op basis van deze gegevens werden voor de 20 LaMi-locaties de watervasthoudende eigenschappen schematisch bepaald op basis van Staring eenheden (Tabel 2.). Bodemkundige profielen zijn hierbij dus geduid op basis van bodemfysische eigenschappen aan de hand gemeten retentie-eigenschappen en de literatuur (De Vries, 1999; Wösten et al., 2001). De hier vermelde locatiespecifieke grootheden vormen invoer voor het modelmatige onderzoek in de vervolgfase van het project.

Tabel 2.

Vochtretentie-karakteristiek van bodemprofielenheden uitgedrukt aan de hand van Mualem-Van Genuchten-parameters voor de 20 LaM-locaties.

Locatie	Bovenkant (cm -mv)	Onderkant (cm -mv)	Code	Wcr θ_r	wcs θ_s	Alfa α	n	l	Ks	m
U1	0	90	RB2	0,030	0,400	0,0150	1,700	0,000	7,884	0,412
	90	105	O2	0,020	0,380	0,0213	1,951	0,168	12,68	0,487
	105	120	RO1	0,039	0,325	0,0103	3,500	0,000	1,656	0,714
U2	0	30	V1x	0,050	0,410	0,0085	1,698	3,284	6,622	0,411
	30	65	V2x	0,050	0,470	0,0130	1,750	0,443	6,603	0,429
	65	73	V3x	0,079	0,405	0,0123	2,327	0,000	5,518	0,570
	73	120	O2	0,020	0,380	0,0213	1,951	0,168	12,68	0,487
U3	0	41	B3	0,020	0,460	0,0144	1,534	-0,215	15,42	0,348
	41	100	O2	0,020	0,380	0,0213	1,951	0,168	12,68	0,487
U4	0	5	B1	0,020	0,430	0,0234	1,801	0,000	23,41	0,445
	5	43	B1x	0,066	0,470	0,0213	2,816	0,000	19,98	0,645
	43	>80	B2x	0,052	0,347	0,0108	4,009	0,274	1,563	0,751
U5	0	27	RB2	0,030	0,400	0,0150	1,700	0,000	7,884	0,412
	27	36	O2	0,020	0,380	0,0213	1,951	0,168	12,68	0,487
	36	100	RO1	0,039	0,325	0,0103	3,500	0,000	1,656	0,714
U6	0	41	B3	0,020	0,460	0,0144	1,534	-0,215	15,42	0,348
	39	55	O3	0,010	0,340	0,0170	1,717	0,000	10,87	0,999
	>55		O2	0,020	0,380	0,0213	1,951	0,168	12,68	0,487
U7	0	60	B3	0,020	0,460	0,0144	1,534	-0,215	15,42	0,348
	>60		O3	0,010	0,340	0,0170	1,717	0,000	10,87	0,999
U8	0	36	RB2	0,030	0,400	0,0150	1,700	0,000	7,884	0,412
	36	120	RO1	0,039	0,325	0,0103	3,500	0,000	1,656	0,714
U9	0	25	RB2	0,030	0,400	0,0150	1,700	0,000	7,884	0,412
	25	50	O2	0,020	0,380	0,0213	1,951	0,168	12,68	0,487
	50	120	RO1	0,039	0,325	0,0103	3,500	0,000	1,656	0,714
U10	0	31	B3	0,020	0,460	0,0144	1,534	-0,215	15,42	0,348
	31	100	O2	0,020	0,380	0,0213	1,951	0,168	12,68	0,487
U11	0	30	B3	0,020	0,460	0,0144	1,534	-0,215	15,42	0,348
	30	60	O3	0,010	0,340	0,0170	1,717	0,000	10,87	0,999
	60	120	O2	0,020	0,380	0,0213	1,951	0,168	12,68	0,487
U12	0	42	B3	0,020	0,460	0,0144	1,534	-0,215	15,42	0,348
	42	100	O2	0,020	0,380	0,0213	1,951	0,168	12,68	0,487
U13	0	28	RB2	0,030	0,400	0,0150	1,700	0,000	7,884	0,412
	28	60	O2	0,020	0,380	0,0213	1,951	0,168	12,68	0,487
	60	120	RO1	0,039	0,325	0,0103	3,500	0,000	1,656	0,714
U14	0	54	H1x	0,100	0,447	0,0105	1,900	1,722	6,860	0,474
	54	>100	H2x	0,050	0,340	0,0260	1,600	0,000	17,621	0,375

Locatie	Bovenkant (cm -mv)	Onderkant (cm -mv)	Code	Wcr θ_r	wcs θ_s	Alfa α	n	l	Ks	m
U15	0	44	RB2	0,030	0,400	0,0150	1,700	0,000	7,884	0,412
	44	120	R01	0,039	0,325	0,0103	3,500	0,000	1,656	0,714
U16	0	46	B3	0,020	0,460	0,0144	1,534	-0,215	15,42	0,348
	46	60	O3	0,010	0,340	0,0170	1,717	0,000	10,87	0,999
	60	120	O2	0,020	0,380	0,0213	1,951	0,168	12,68	0,487
U17	0	28	RB2	0,030	0,400	0,0150	1,700	0,000	7,884	0,412
	28	50	O2	0,020	0,380	0,0213	1,951	0,168	12,68	0,487
	50	120	R01	0,039	0,325	0,0103	3,500	0,000	1,656	0,714
U18	0	34	B3	0,020	0,460	0,0144	1,534	-0,215	15,42	0,348
	34	100	O2	0,020	0,380	0,0213	1,951	0,168	12,68	0,487
U19	0	70	RB2	0,030	0,400	0,0150	1,700	0,000	7,884	0,412
	70	120	R01	0,039	0,325	0,0103	3,500	0,000	1,656	0,714
U20	0	90	RB2	0,030	0,400	0,0150	1,700	0,000	7,884	0,412
	90	105	O2	0,020	0,380	0,0213	1,951	0,168	12,68	0,487
	105	120	R01	0,039	0,325	0,0103	3,500	0,000	1,656	0,714

Organische stof en micro-aggregaten

Organische stofgehalten werden eerder al bepaald in het onderzoek van LBI (Van Eekeren en Bolkhorst, 2010). Daar ging het om metingen aan de bovenste 10 cm van de bodem. In ons onderzoek hebben we aanvullende bepalingen gedaan voor horizonten die werden geselecteerd als model voor de Staring-eenheden voor de regio. Resultaten worden samengevat in Tabel 3, waarin ook de bepalingen van stabiele micro-aggregaten.

Tabel 3

Gehalten organische stof en percentage stabiele aggregaten op verschillende diepten in het bodemprofiel van geselecteerde LaMI-locaties.

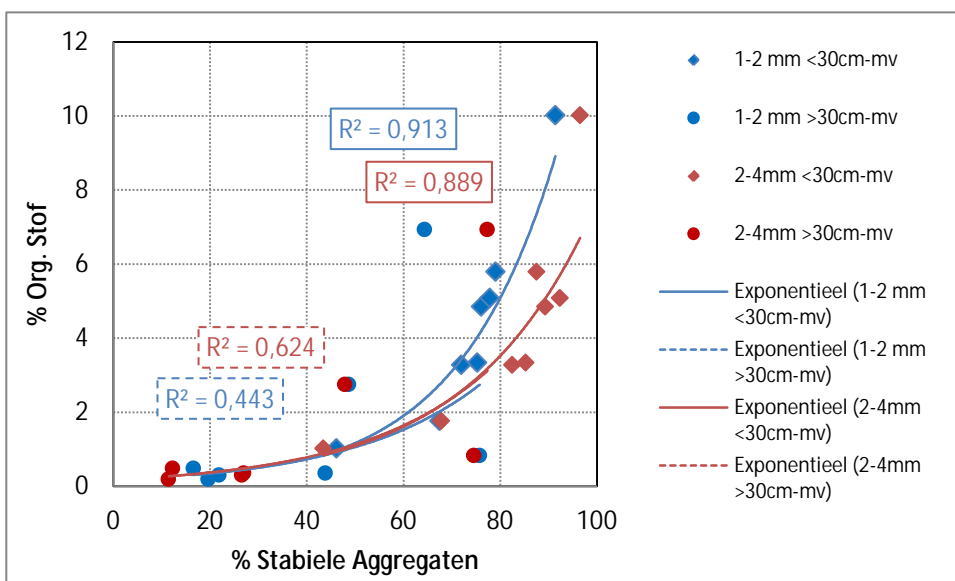
Perceel	Diepte	% Organische Stof		% Stabiele Aggregaten			
		gemiddelde	standaardevatie	1-2 mm		2-4 mm	
	(cm)			gemiddelde	standaardfout	gemiddelde	standaardfout
U2	5-10	4,9	0,02	76,1	2,4	89,4	5,9
U4	5-10	1,0	0,01	46,2	1,2	43,4	5,9
U5	10-15	5,1	0,11	77,9	2,2	92,4	1,9
U10	10-15	3,3	0,06	75,3	6,0	85,3	8,2
U12	5-10	5,8	0,14	79,0	11,4	87,5	9,1
U14	5-10	10,0	0,01	91,4	6,7	96,5	1,5
U18	5-10	3,3	0,01	72,0	1,5	82,5	5,0
U2	45-50	6,9	0,05	64,3	0,3	77,4	3,0
U10	27-32	1,8	0,18	67,5	0,7	67,8	7,3
U2	60-65	2,8	0,11	48,7	1,9	47,9	4,8
U4	60-65	0,3	0,05	21,9	5,0	26,6	6,1
U5	82-87	0,3	0,06				
U10	46-51	0,4	0,03	43,9	1,5	27,0	4,0
U12	54-59	0,2	*	19,6	7,6	11,4	1,4
U14	67-72	0,8	0,05	75,8	4,0	74,6	4,2
U18	47-52	0,5	0,03	16,5	5,5	12,3	0,9

*) Bepaling in enkelvoud.

2.4 Discussie

Vooruitlopend op aansluitend modelmatig onderzoek over de droogteresistentie van de graslanden in de Gelderse Vallei kunnen de resultaten van metingen aan aggregaten en organische stof alvast kwalitatief worden besproken.

Er blijkt een sterke samenhang tussen het gehalte aan organische stof in de bodem en de stabiliteit van aggregaten: naarmate aggregaten stabiel worden is er meer organische stof aanwezig (lees: wordt organische stof minder snel afgebroken). Dit is een exponentieel verband (Figuur 2). Een positief verband ligt natuurlijk in de lijn der verwachting omdat stabiele aggregaten een fysisch-chemische bescherming bieden tegen microbiële afbraak. Het interessante aan de data is hier vooral dat bodemhorizonten met een organische stofgehalte van 5% en meer al gauw 80% of méér stabiele aggregaten hebben, vooral ook in de vorm van grotere aggregaten (2-4 mm) die -méér dan de 1-2 mm aggregaten- van biologische oorsprong zijn. Dit geldt ongeacht de diepte van een horizont beneden maaiveld. Hieruit spreekt de activiteit van het bodemleven, met name saprofytische schimmels, mycorrhiza en regenwormen, die kleinere aggregaten tot grotere hebben doen integreren. Bodemleven wordt gevoed door organische stof, wordt er door aangetrokken, en heeft op haar beurt ook een positieve terugkoppeling. Daarmee neemt de mate van bescherming van de organische stof verder toe, en dat is weer belangrijk voor het water-regulerend vermogen van de bodem dat evenredig is aan het gehalte organisch stof en de omvang van aggregaten. Grotere aggregaten drogen minder snel uit dan kleinere; de droogteresistentie neemt dus toe.



Figuur 2

Relatie tussen het aandeel stabiele aggregaten in twee grootteklassen en het totale gehalte aan organische stof in de bodem, oppervlakkig (<30 cm -mv) of dieper (>30 cm -mv) in het profiel.

In termen van klimaatgerichte maatregelen is er dus veel voor te zeggen om het functioneel betrokken bodemleven ('functionele agrobiodiversiteit' in de bodem) te stimuleren met best passende maatregelen voor bodembeheer (zie bijvoorbeeld Faber et al., 2009; Vosman en Faber, 2011).

Toch moet daarbij ook rekening worden gehouden met ongewenste neveneffecten. Aan een toename van afmetingen van aggregaten zijn in principe ook consequenties verbonden met betrekking tot de regulatie van broeikasgassen. Op het eerste gezicht lijken die ook gunstig, omdat met een toename van organische stof en de fysisch-chemische bescherming daarvan meer koolstof wordt vastgelegd in de bodem. Deze potentie van (agrarische) bodems wordt al langere tijd onderkend, vooral in relatie tot het al-dan-niet ploegen in de akkerbouw (Six et al., 2000, 2004). Er is evenwel ook de observatie dat er juist vanwege de vochtige omstandigheden en lage zuurstofspanning in aggregaten een grotere ontwikkeling van lachgas kan optreden (Sexstone et al., 1985). Hoewel op zich niet bekend, kan worden aangenomen dat dit fenomeen zal toenemen bij grotere omvang van aggregaten. Omdat lachgas een veel sterker broeikasgas is dan kooldioxide, zou de balans in termen van CO₂-equivalenten wel eens snel negatief kunnen uitpakken (zoals ook al betoogd door Six et al. (2000). Vooralsnog is dit echter een kwalitatief inzicht, en zal kwantitatief onderzoek onder representatieve omstandigheden nodig zijn om een betere kosten-batenanalyse te kunnen maken.

3 Modellenstudie bodemhydrologie

3.1 Afgeleide functionele kenmerken

Om te kwantificeren hoe de 20 profielen zich in de waterhuishouding gedragen, werden uit de bodemfysische karakterisering onderstaande functionele kenmerken afgeleid. Voor een toelichting op de definities van deze kenmerken en de wiskundige afleiding ervan wordt verwezen naar appendix 1.

1. Weerstand voor verticale stroming (C waarde, d) van het profiel tussen maaiveld en 4 m -mv.
2. Transmissiviteit voor horizontale stroming van water naar bijvoorbeeld drains of sloten (kD waarde, $\text{cm}^2 \cdot \text{d}^{-1}$) van het profiel tussen maaiveld en 4 m -mv.
3. Beschikbare waterberging (cm) van de wortelzone voor gemakkelijk beschikbaar water (tussen pF 2.0 en pF 2.7).
4. Beschikbare waterberging (cm) van de wortelzone voor moeilijk beschikbaar water (tussen pF 2.7 en pF 4.2).
5. Beschikbare waterberging (cm) van de ondergrond voor gemakkelijk beschikbaar water (tussen pF 2.0 en pF 2.7).
6. Beschikbare waterberging (cm) van de ondergrond voor moeilijk beschikbaar water (tussen pF 2.7 en pF 3.0). Omdat in de ondergrond geen wortels voorkomen wordt hier als grens pF 3.0 gehanteerd en niet pF 4.2 zoals in de bovengrond)
7. Maximale diepte van de grondwaterstand (cm) waarbij een flux van 1 mm/d de onderkant van de wortelzone (bij pF4.2) nog kan bereiken (kritieke z-afstand bij 1 mm/d).
8. Verzadigingstekort (cm) bij een flux van 1 mm/d over de bodemlagen tussen de berekende grondwaterstand en de onderkant van de wortelzone.
9. Maximale diepte van de grondwaterstand (cm) waarbij een flux van 2 mm/d de onderkant van de wortelzone (bij pF4.2) nog kan bereiken (kritieke z-afstand bij 2 mm/d).
10. Verzadigingstekort bij een flux van 2 mm/d over de bodemlagen tussen de berekende grondwaterstand en de onderkant van de wortelzone.

Let wel: het bodemprofiel is beschreven tot 1,20 m-mv, terwijl de grondwaterstand van waaruit een flux de onderkant van de wortelzone kan bereiken in sommige gevallen dieper is dan 1,20 m-mv. Om toch de maximale diepte te kunnen berekenen is het profiel niet afgekapt bij 1.20 m-mv, maar werd aangenomen dat de onderste horizont doorloopt. Dit introduceert onzekerheid in het model, omdat niet bekend is hoe de bodem beneden de waarnemingsdiepte werkelijk is samengesteld.

3.2 Resultaten

De berekende tien functionele kenmerken voor de 20 bodemprofielen worden hieronder weergegeven (Tabel 4, Tabel 5, Tabel 6 en Tabel 7) voor worteldiepten van 15, 20, 25 en 30 cm. De resultaten worden hieronder samengevat en kort bediscussieerd. Een discussie van de resultaten in termen van een onderscheid tussen bodemprofielen op hoofdlijnen volgt in hoofdstuk 3. De betekenis van de resultaten voor de waterhuishouding wordt daarna verder bediscussieerd in hoofdstuk 4.

1. De weerstand (in dagen) van het profiel voor verticale verzadigde grondwaterstroming, de C-waarde, is bij alle profielen hoog. Dit komt doordat een laagdikte van 4 m is beschouwd. Ruwweg valt er een tweedeling te maken in een groep profielen met C-waarden variërend van 34 tot 40 dagen en een groep van profielen met C-waarden variërend van 195 tot 228 dagen. De C-waarden zijn onafhankelijk van de worteldiepte.
2. De transmissiviteit voor horizontale stroming van water, de kD-waarden, van de afzonderlijke profielen is hoog. Dit komt omdat een laagdikte van 4 m is beschouwd. Als de C-waarde van een profiel hoog is, dan is de kD-waarde van dit profiel laag; dit vloeit voort uit de definities van C-waarde (paragraaf 2.4) en kD-waarde (paragraaf 2.5). Net als bij de C-waarden is ook bij de kD-waarden ruwweg een tweedeling te maken in een groep profielen met kD-waarden variërend van 846 tot 1287 m²/dag en een andere groep van profielen met kD-waarden variërend van 4287 tot 4732 cm²/dag. Ook de kD-waarden zijn onafhankelijk van de worteldiepte.
3. De hoeveelheid gemakkelijk beschikbaar water (tussen pF 2.0 en pF 2.7) in een wortelzone van 15 cm bedraagt gemiddeld 2.3 cm, dit komt overeen met ongeveer 15% van de bewortelbare zone. Op het eerste oog lijken er relatief kleine verschillen te bestaan tussen de afzonderlijke profielen. De hoeveelheid gemakkelijk beschikbaar water in de wortelzone neemt uiteraard toe naarmate de worteldiepte toeneemt en is bij een worteldiepte van 30 cm ongeveer twee keer zo groot als bij een worteldiepte van 15 cm.
4. De hoeveelheid moeilijk beschikbaar water (tussen pF 2.7 en pF 4.2) in een wortelzone van 15 cm bedraagt gemiddeld 1.5 cm en dit komt overeen met ongeveer 10% van de bewortelbare zone. Er zijn verschillen tussen de afzonderlijke bodemprofielen. De hoeveelheid moeilijk beschikbaar water in de wortelzone neemt uiteraard toe naarmate de worteldiepte toeneemt, en is bij een worteldiepte van 30 cm ongeveer twee keer zo groot als bij een worteldiepte van 15 cm.
De totale hoeveelheid beschikbaar water (tussen pF 2.0 en pF 4.2) in een wortelzone van 15 cm bedraagt gemiddeld 3.8 cm, dit komt overeen met ongeveer 25% van de bewortelbare zone. Er zijn verschillen tussen de afzonderlijke profielen. De totale hoeveelheid beschikbaar water in de wortelzone neemt uiteraard toe naarmate de worteldiepte toeneemt en is bij een worteldiepte van 30 cm ongeveer twee keer zo groot als bij een worteldiepte van 15 cm.
5. De hoeveelheid gemakkelijk beschikbaar water (tussen pF 2.0 en pF 2.7) in de ondergrond bedraagt gemiddeld 54 cm en dit komt overeen met ongeveer 13%. Er bestaan verschillen tussen de afzonderlijke profielen.
6. De hoeveelheid moeilijk beschikbaar water (tussen pF 2.7 en pF 3.0) in de ondergrond bedraagt gemiddeld 5 cm en dit komt overeen met ongeveer 1.3%. Er bestaan verschillen tussen de afzonderlijke profielen. De totale hoeveelheid (cm) beschikbaar water (tussen pF 2.0 en pF 3.0) in de ondergrond bedraagt gemiddeld 59 cm en dit komt overeen met ongeveer 15.3%. Er bestaan verschillen tussen de afzonderlijke profielen.
7. De kritieke z-afstand bij een flux van 1 mm/dag bedraagt gemiddeld 173 cm en er bestaan verschillen tussen de afzonderlijke profielen.
8. Het verzadigingstekort bij een flux van 1 mm/dag bedraagt bij een worteldiepte van 15 cm gemiddeld 32 cm. Er bestaan verschillen tussen de afzonderlijke profielen. Dit verzadigingstekort neemt af naarmate de worteldiepte toe en dus de dikte van de ondergrond afneemt.
9. De kritieke z-afstand bij een flux van 2 mm/dag bedraagt gemiddeld 133 cm en er bestaan verschillen tussen de afzonderlijke profielen.
10. Het verzadigingstekort bij een flux van 2 mm/dag bedraagt bij een worteldiepte van 15 cm gemiddeld 24 cm. Er bestaan verschillen tussen de afzonderlijke profielen. Dit verzadigingstekort neemt af naarmate de worteldiepte toeneemt en dus de dikte van de ondergrond afneemt.

Tabel 4

Berekende functionele kenmerken bij een worteldiepte van 15 cm.

Id	Profiel	Wortel- diepte cm	C dag	kD cm ² /dag	Wortel- Gemak cm	Wortel- Moeilijk cm	Onder Gemak cm	Onder Moeilijk cm	ZCrit1 cm	VCrit1 cm	ZCrit2 cm	VCrit2 cm
1	U1	15	195	1287	2.2	1.2	60.9	3.9	178	28.6	132	21.4
2	U2	15	40	4287	2.4	1.7	49.4	8.2	163	29.8	126	20.0
3	U3	15	34	4732	2.4	1.9	47.5	7.7	175	39.2	138	29.3
4	U4	15	235	1389	1.6	0.3	57.6	0.7	160	30.6	124	23.8
5	U5	15	228	889	2.2	1.2	62.2	2.0	170	27.2	127	18.8
6	U6	15	34	4697	2.4	1.9	47.6	7.8	182	40.3	144	30.0
7	U7	15	40	4002	2.4	1.9	49.8	11.3	209	39.6	161	29.1
8	U8	15	228	846	2.2	1.2	62.5	2.1	176	28.5	132	19.7
9	U9	15	220	1040	2.2	1.2	61.6	2.1	165	26.4	122	18.7
10	U10	15	34	4727	2.4	1.9	47.2	7.4	167	36.8	131	27.8
11	U11	15	34	4661	2.4	1.9	47.3	7.6	179	38.5	141	28.5
12	U12	15	34	4732	2.4	1.9	47.6	7.7	175	39.0	139	29.7
13	U13	15	215	1127	2.2	1.2	61.2	2.3	164	26.5	122	19.4
14	U14	15	34	5080	2.5	1.1	37.7	8.5	150	23.8	119	18.3
15	U15	15	224	889	2.2	1.2	62.3	2.4	177	28.5	133	19.5
16	U16	15	34	4704	2.4	1.9	47.8	7.9	185	41.2	147	30.9
17	U17	15	220	1026	2.2	1.2	61.7	2.2	167	26.9	124	19.0
18	U18	15	34	4728	2.4	1.9	47.3	7.5	169	37.3	133	28.2
19	U19	15	212	1028	2.2	1.2	61.9	3.1	180	28.4	132	19.1
20	U20	15	195	1287	2.2	1.2	60.9	3.9	178	28.6	132	21.4

Tabel 5

Berekende functionele kenmerken bij een worteldiepte van 20 cm.

Id	Profiel	Wortel- diepte cm	C dag	kD cm ² /dag	Wortel- Gemak cm	Wortel- Moeilijk cm	Onder Gemak cm	Onder Moeilijk cm	ZCrit1 cm	VCrit1 cm	ZCrit2 cm	VCrit2 cm
1	U1	20	195	1287	2.9	1.6	60.2	3.8	178	30.7	131	22.8
2	U2	20	40	4287	3.2	2.3	48.7	7.9	163	32.2	127	22.8
3	U3	20	34	4732	3.2	2.5	46.8	7.4	171	40.1	134	30.4
4	U4	20	235	1389	2.0	0.3	57.2	0.7	157	31.3	122	24.7
5	U5	20	228	889	2.9	1.6	61.5	1.8	168	28.5	126	20.5
6	U6	20	34	4697	3.2	2.5	46.8	7.6	178	41.2	141	31.5
7	U7	20	40	4002	3.2	2.5	49.1	11.0	207	41.1	159	30.9
8	U8	20	228	846	2.9	1.6	61.7	1.9	174	29.8	131	21.3
9	U9	20	220	1040	2.9	1.6	60.8	2.0	163	27.6	120	19.8
10	U10	20	34	4727	3.2	2.5	46.4	7.2	162	37.0	127	28.7
11	U11	20	34	4661	3.2	2.5	46.5	7.4	175	39.3	137	29.3
12	U12	20	34	4732	3.2	2.5	46.8	7.5	171	39.8	135	30.7
13	U13	20	215	1127	2.9	1.6	60.5	2.2	162	27.7	120	20.6
14	U14	20	34	5080	3.4	1.5	36.9	8.4	148	25.4	116	19.5
15	U15	20	224	889	2.9	1.6	61.6	2.2	176	30.2	132	21.2
16	U16	20	34	4704	3.2	2.5	47.0	7.7	181	42.1	143	31.8
17	U17	20	220	1026	2.9	1.6	60.9	2.0	165	28.1	122	20.2
18	U18	20	34	4728	3.2	2.5	46.5	7.3	165	38.1	129	29.2
19	U19	20	212	1028	2.9	1.6	61.2	3.0	180	30.3	132	20.8
20	U20	20	195	1287	2.9	1.6	60.2	3.8	178	30.7	131	22.8

Tabel 6

Berekende functionele kenmerken bij een worteldiepte van 25 cm.

Id	Profiel	Wortel- diepte cm	C dag	kD cm2/dag	Wortel- Gemak cm	Wortel- Moeilijk cm	Onder Gemak cm	Onder Moeilijk cm	ZCrit1 cm	VCrit1 cm	ZCrit2 cm	VCrit2 cm
1	U1	25	195	1287	3.7	2.0	59.5	3.6	177	32.1	131	24.5
2	U2	25	40	4287	4.0	2.9	47.9	7.7	165	35.5	128	25.6
3	U3	25	34	4732	4.0	3.2	46.0	7.2	167	41.0	131	32.0
4	U4	25	235	1389	2.5	0.4	56.7	0.6	155	32.2	119	25.4
5	U5	25	228	889	3.7	2.0	60.8	1.6	166	29.7	124	21.8
6	U6	25	34	4697	4.0	3.2	46.0	7.4	174	42.0	137	32.5
7	U7	25	40	4002	4.0	3.2	48.3	10.8	204	42.3	157	32.6
8	U8	25	228	846	3.7	2.0	61.0	1.8	172	31.1	130	23.1
9	U9	25	220	1040	3.7	2.0	60.1	1.8	160	28.5	118	20.9
10	U10	25	34	4727	4.0	3.2	45.6	6.9	158	37.9	123	29.6
11	U11	25	34	4661	4.0	3.2	45.7	7.2	171	40.0	134	30.7
12	U12	25	34	4732	4.0	3.2	46.0	7.2	167	40.8	131	31.7
13	U13	25	215	1127	3.7	2.0	59.8	2.0	160	28.9	118	21.7
14	U14	25	34	5080	4.2	1.8	36.0	8.2	146	26.6	114	20.9
15	U15	25	224	889	3.7	2.0	60.9	2.0	175	31.8	132	23.3
16	U16	25	34	4704	4.0	3.2	46.2	7.5	177	43.0	140	33.4
17	U17	25	220	1026	3.7	2.0	60.2	1.9	163	29.3	120	21.3
18	U18	25	34	4728	4.0	3.2	45.7	7.0	161	39.0	125	30.1
19	U19	25	212	1028	3.7	2.0	60.4	2.8	179	32.1	133	22.8
20	U20	25	195	1287	3.7	2.0	59.5	3.6	177	32.1	131	24.5

Tabel 7

Berekende functionele kenmerken bij een worteldiepte van 30 cm.

Id	Profiel	Wortel- diepte cm	C dag	kD cm2/dag	Wortel- Gemak cm	Wortel- Moeilijk cm	Onder Gemak cm	Onder Moeilijk cm	ZCrit1 cm	VCrit1 cm	ZCrit2 cm	VCrit2 cm
1	U1	30	195	1287	4.4	2.4	58.7	3.4	177	33.8	131	26.1
2	U2	30	40	4287	4.8	3.4	47.1	7.5	170	40.4	132	29.8
3	U3	30	34	4732	4.8	3.8	45.2	7.0	162	41.2	127	32.9
4	U4	30	235	1389	2.9	0.4	56.3	0.6	152	32.9	117	26.4
5	U5	30	228	889	4.3	2.3	60.1	1.5	166	31.3	124	23.4
6	U6	30	34	4697	4.8	3.8	45.2	7.1	170	42.9	134	34.0
7	U7	30	40	4002	4.8	3.8	47.5	10.6	201	43.5	154	33.7
8	U8	30	228	846	4.4	2.4	60.3	1.6	170	32.3	128	24.4
9	U9	30	220	1040	4.3	2.2	59.5	1.7	162	30.7	119	22.6
10	U10	30	34	4727	4.8	3.8	44.8	6.7	154	38.6	118	30.1
11	U11	30	34	4661	4.8	3.8	44.9	7.0	167	40.7	130	31.5
12	U12	30	34	4732	4.8	3.8	45.2	7.0	163	41.7	127	32.8
13	U13	30	215	1127	4.3	2.3	59.1	1.9	159	30.2	117	22.8
14	U14	30	34	5080	5.0	2.2	35.2	8.0	144	27.9	112	22.5
15	U15	30	224	889	4.4	2.4	60.1	1.8	173	33.2	131	25.1
16	U16	30	34	4704	4.8	3.8	45.4	7.3	173	43.9	136	34.4
17	U17	30	220	1026	4.3	2.3	59.5	1.7	162	30.7	119	22.6
18	U18	30	34	4728	4.8	3.8	44.9	6.8	156	39.4	121	31.0
19	U19	30	212	1028	4.4	2.4	59.7	2.6	179	34.2	133	24.6
20	U20	30	195	1287	4.4	2.4	58.7	3.4	177	33.8	131	26.1

4 Functionele groepen bodemprofielen

In het voorgaande hoofdstuk zijn de belangrijkste hydrologisch functionele kenmerken van de onderzochte bodems berekend met een model. Deze berekeningen geven inzicht in de belangrijkste factoren voor de vochthuishouding van de bodems. De uitkomsten zijn instrumenteel in verdere uitwerking van mogelijkheden om verbeteringen aan te brengen in de waterregulerende capaciteit van de bodems via gericht bodembeheer, bijvoorbeeld anticiperend op klimaatsverandering. In het volgende hoofdstuk wordt ingegaan op de verschillende alternatieve maatregelen van bodembeheer die hiervoor in aanmerking komen. Hieronder wordt eerst verder ingegaan op modelberekeningen in vergelijking tot het veldonderzoek, om de resultaten beter te kunnen opschalen. Hierbij worden individuele meetpunten samengevoegd in een clustering van bodems met vergelijkbare functionele kenmerken die vervolgens elk als eenheid kunnen worden beschouwd voor optimalisatie van het te voeren beheer.

4.1 Clusteringstechniek

Clusteranalyse is de verzamelnaam voor procedures die gebruikt worden om een grote verzameling waarnemingen in te delen in groepen. Elementen van de verzameling die dezelfde of gelijk(w)aardige informatie uitdrukken worden samengevoegd tot groepen. Clusteranalyse is een multivariate procedure waarbij een (grote) dataset met meerdere eigenschappen wordt opgesplitst in relatief homogene groepen. De indeling in deze groepen is vooraf onbekend en ook het aantal groepen hoeft vooraf niet bekend te zijn. Doel is om een maximaal onderscheid te verkrijgen tussen van elkaar te onderscheiden maximaal homogene clusters, ofwel:

- zoveel mogelijk gelijkens binnen een groep;
- zoveel mogelijk verschil tussen groepen.

Wanneer we willen nagaan of twee objecten al dan niet 'dicht' bij elkaar liggen (gelijkenis vertonen), dan hebben we daarbij een afstandsmaat nodig. Een populaire maat is de afstand 'in vogelvlucht': de Euclidische afstand. Maar er zijn ook andere maten en indexen. Een bekende niet-hiërarchische clusteringstechniek die vaak wordt toegepast op data met kwantitatieve eigenschappen is Kmeans (MacQueen, 1967). De stappen in Kmeans clusteranalyse zijn als volgt:

1. verdeel de data in een van tevoren bepaald aantal (k) groepen;
2. observaties worden ingedeeld in clusters op basis van afstand tot het clustergemiddelde (centra);
3. bereken het nieuwe clustercentrum na het toevoegen van een observatie aan een cluster;
4. herhaal de stappen 2 en 3 tot er geen of nog maar zeer kleine veranderingen optreden in de clustercentra.

Om optimale cluster aantallen te helpen kiezen zijn diverse criteria ontwikkeld, waarvan de Calinski-Harabasz Index en het Silhouette Width Criterion twee bekende en goed presterende zijn (Vendramin et al., 2009).

4.2 Voorbewerking

De dataset waarop cluster-analyse is toegepast bevat 20 bodemprofielen met elk tien functionele bodemfysische kenmerken. Om de verschillende kenmerken onderling vergelijkbaar te maken voor het clusteren is de verzameling data gestandaardiseerd. Eigenschappen uitgedrukt in grote getallen krijgen op deze manier evenveel gewicht in de clusteranalyse als eigenschappen uitgedrukt in kleinere getallen. Door

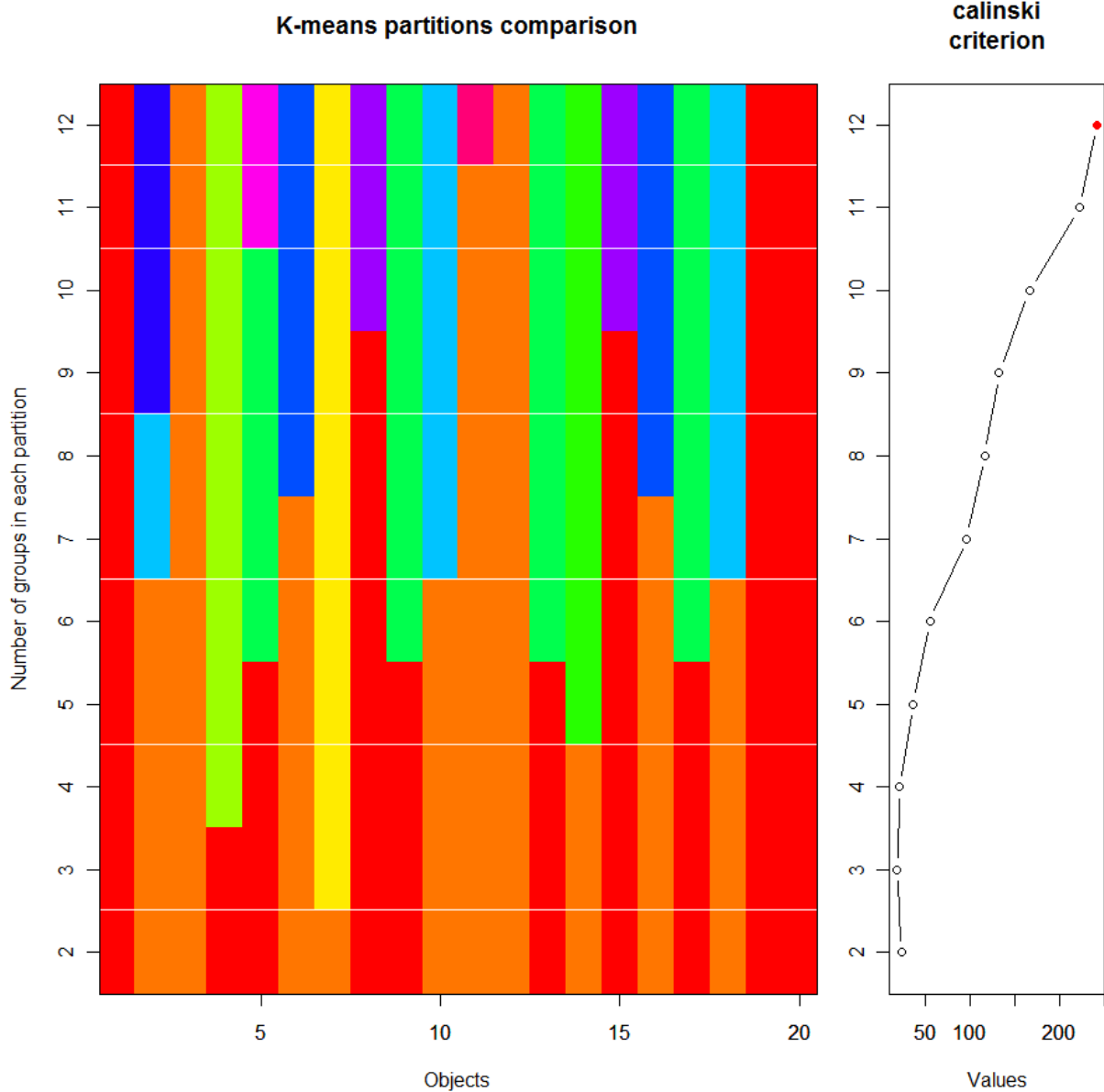
ieder afzonderlijk kenmerk K_i te verminderen met de gemiddelde waarde van dit kenmerk gevolgd door deling door de standaarddeviatie, $sd(K_i)$ worden kenmerken dimensieloos en van gelijke orde grootte.

$$st(K_i) = (K_i - \bar{K}_i) / sd(K_i)$$

4.3 Resultaten clustering

Voor de range van cluster aantallen is een aantal cluster-validiteitsindices berekend en is het Calinski-Harabasz criterium in Figuur 3 weergegeven, samen met een verdeling van de elementen over de clusters. De maximale waarde van het Calinski-Harabasz criterium geeft het voorkeurs aantal clusters. Voor de 20 profielen in Figuur 3 zouden vijf of zes clusters de voorkeur hebben. Bij de keuze van vijf clusters is in de figuur te zien dat de profielen U1, U5, U8, U9, U13, U15, U17, U19 en U20 in hetzelfde cluster 4 thuis horen, evenals de profielen U2, U3, U6, U10, U11, U12, U16 en U18 in cluster 2. De profielen U4, U7 en U14 horen niet bij één van de voorgaande clusters en vormen elk een apart cluster, respectievelijk 1, 3 en 5. Naast de aantallen profielen per cluster en het Calinski-Harabasz criterium is ook gekeken naar de getalswaarde van de functionele kenmerken per cluster om een keuze te maken. Clustercentra die wat betreft functionele kenmerken sterk lijken op de centra van één van de overige clusters leveren waarschijnlijk geen zinvol onderscheid.

De clusters 4 en 2 vormen de twee grote, duidelijke clusters met respectievelijk acht en negen bodemprofielen; deze clusters gedragen zich in bodemfysisch opzicht onderling verschillend van elkaar. De overige drie profielen gedragen zich afwijkend van de rest en vormen op zichzelf staande gevallen. Uit de profielbeschrijving blijkt dat het profiel U4 oorspronkelijk een beekbed was, maar dat het door recente vermenging en egalisatie sterk veranderd is en nu geclassificeerd wordt als een duinvaaggrond. Een deel van de oorspronkelijke zwarte bovengrond is waarschijnlijk afgevoerd naar een ander deel van het perceel. Ook profiel U7 is geëgaliseerd, opgehoogd en vergraven waardoor het een afwijkende opbouw heeft gekregen. Profiel U14 heeft een dikke bovengrond, waarschijnlijk doordat grond is opgebracht. Hierdoor wijkt ook dit profiel af van de rest.



Figuur 3

Verdeling van de 20 bodemprofielen over een variabel aantal clusters en de bijbehorende waarde van het Calinski-Harabasz criterium.

De 20 profielen worden bij elk van de vier worteldiepten in dezelfde vijf clusters gegroepeerd, met uitzondering van profiel U2 dat bij een worteldiepte van 15 cm in cluster 5 valt in plaats van in cluster 2 (Tabel 8). Uit de tabel blijkt dat:

- De C-waarden van de profielen in cluster 2 met gemiddeld 35 dagen sterk verschillen van de C-waarden van de profielen in cluster 4 met gemiddeld 215 dagen.
- De kD-waarden van de profielen in cluster 2 met gemiddeld 4659 cm²/dag duidelijk verschillen van de C-waarden van de profielen in cluster 4 met gemiddeld 1047 cm²/dag.
- De hoeveelheid gemakkelijk beschikbaar water in een wortelzone van 15 cm bedraagt gemiddeld 2.4 cm voor de profielen in cluster 2 en 2.2 cm voor de profielen in cluster 4.

- De hoeveelheid moeilijk beschikbaar water in een wortelzone van 15 cm bedraagt gemiddeld 1.9 cm voor de profielen in cluster 2 en 1.2 cm voor de profielen in cluster 4.
- De hoeveelheid gemakkelijk beschikbaar water in de ondergrond bedraagt gemiddeld 47.7 cm voor de profielen in cluster 2 en 61.7 cm voor de profielen in cluster 4.
- De hoeveelheid moeilijk beschikbaar water in de ondergrond bedraagt gemiddeld 7.7 cm voor de profielen in cluster 2 en 2.7 cm voor de profielen in cluster 4.
- De kritieke z-afstand bij een flux van 1 mm/dag bedraagt gemiddeld 174 cm voor de profielen in cluster 2 en 173 cm voor de profielen in cluster 4.
- Het verzadigingstekort bij een flux van 1 mm/dag bedraagt bij een worteldiepte van 15 cm gemiddeld 37.8 cm voor de profielen in cluster 2 en 27.8 cm voor de profielen in cluster 4.
- De kritieke z-afstand bij een flux van 2 mm/dag bedraagt gemiddeld 137 cm voor de profielen in cluster 2 en 128 cm voor de profielen in cluster 4.
- Het verzadigingstekort bij een flux van 2 mm/dag bedraagt bij een worteldiepte van 15 cm gemiddeld 28.1 cm voor de profielen in cluster 2 en 19.7 cm voor de profielen in cluster 4.

De profielen U4, U7 en U14 nemen door hun afwijkende profielopbouw voor de functionele kenmerken tussenliggende waarden aan en zijn daarom niet onder te brengen in de clusters 2 of 4, zodat ze afzonderlijk te onderscheiden clusters 1, 3 en 5 vormen.

Tabel 8

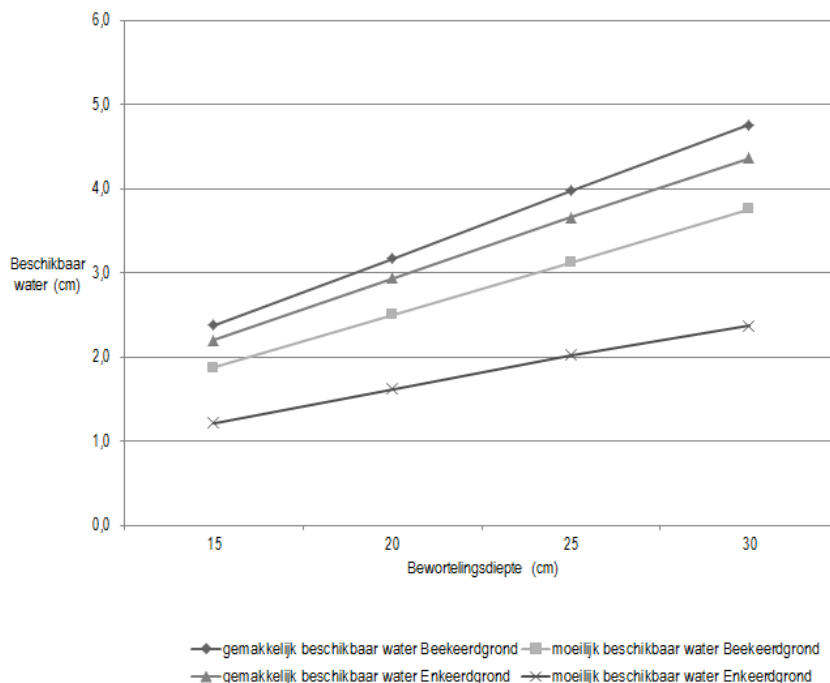
Rangschikking van de 20 profielen in vijf afzonderlijke clusters bij een worteldiepte van 15 cm.

Id	Bodemsoort	Profiel	C dag	kD cm2/dag	Wortel-Gemak cm	Wortel-Moeilijk cm	Onder Gemak cm	Onder Moeilijk cm	ZCrit1 cm	VCrit1 cm	ZCrit2 cm	VCrit2 cm	cluster wd15	cluster wd20	cluster wd25	cluster wd30
4	Zd21	U4	235	1389	1.6	0.3	57.6	0.7	160	30.6	124	23.8	1	1	1	1
	vergraven															
2	zEz21	U2	40	4287	2.4	1.7	49.4	8.2	163	29.8	126	20	5	2	2	2
3	pZg23	U3	34	4732	2.4	1.9	47.5	7.7	175	39.2	138	29.3	2	2	2	2
6	pZg23	U6	34	4697	2.4	1.9	47.6	7.8	182	40.3	144	30	2	2	2	2
10	pZg23	U10	34	4727	2.4	1.9	47.2	7.4	167	36.8	131	27.8	2	2	2	2
11	pZg23	U11	34	4661	2.4	1.9	47.3	7.6	179	38.5	141	28.5	2	2	2	2
12	pZg23	U12	34	4732	2.4	1.9	47.6	7.7	175	39	139	29.7	2	2	2	2
16	pZg23	U16	34	4704	2.4	1.9	47.8	7.9	185	41.2	147	30.9	2	2	2	2
18	pZg23	U18	34	4728	2.4	1.9	47.3	7.5	169	37.3	133	28.2	2	2	2	2
Gem.			35	4659	2.4	1.9	47.7	7.7	174	37.8	137	28.1				
7	EZg23	U7	40	4002	2.4	1.9	49.8	11.3	209	39.6	161	29.1	3	3	3	3
	vergraven															
1	zEz21	U1	195	1287	2.2	1.2	60.9	3.9	178	28.6	132	21.4	4	4	4	4
5	Hn21	U5	228	889	2.2	1.2	62.2	2	170	27.2	127	18.8	4	4	4	4
8	chN21	U8	228	846	2.2	1.2	62.5	2.1	176	28.5	132	19.7	4	4	4	4
9	pZn21	U9	220	1040	2.2	1.2	61.6	2.1	165	26.4	122	18.7	4	4	4	4
13	Hn21	U13	215	1127	2.2	1.2	61.2	2.3	164	26.5	122	19.4	4	4	4	4
15	pZn21	U15	224	889	2.2	1.2	62.3	2.4	177	28.5	133	19.5	4	4	4	4
17	pZn21	U17	220	1026	2.2	1.2	61.7	2.2	167	26.9	124	19	4	4	4	4
19	EZg21	U19	212	1028	2.2	1.2	61.9	3.1	180	28.4	132	19.1	4	4	4	4
20	zEz21	U20	195	1287	2.2	1.2	60.9	3.9	178	28.6	132	21.4	4	4	4	4
Gem.			215	1047	2.2	1.2	61.7	2.7	173	27.8	128	19.7				
14	zEz21 opgebracht	U14	34	5080	2.5	1.1	37.7	8.5	150	23.8	119	18.3	5	5	5	5

4.4 Resultaten functionele kenmerken

Uit de analyse van de profielbeschrijvingen zoals gerapporteerd in bijlage 3 en de resultaten van de functionele kenmerken zijn de volgende conclusies getrokken:

- De 20 bodemprofielen kunnen worden gegroepeerd in vijf clusters die zich in bodemfysisch opzicht verschillend gedragen. Hierbij zijn er twee hoofdgroepen van acht respectievelijk negen profielen, en drie afwijkende clusters die elk door een enkel profiel worden gerepresenteerd.
- De afwijkende functionele kenmerken van profielen U4, U7 en U14 hangen zeer waarschijnlijk samen met het feit dat deze profielen geëgaliseerd, opgehoogd dan wel vergraven zijn. Deze afwijkende profielopbouw resulteert in afwijkende berekende functionele kenmerken.
- Cluster 4 met de negen profielen U1, U5, U8, U9, U13, U15, U17, U19 en U20 bestaat vooral uit enkeerd- en gooreerdgronden met een relatief dik cultuurdek. Cluster 2 met de acht profielen U2, U3, U6, U10, U11, U12, U16 en U18 bestaat uit beekeerdgronden met een minder dik cultuurdek en een hoger leemgehalte. Profiel U4 is door recente vermenging en egalisatie sterk veranderd en is nu een duinvaaggrond; profiel U7 is geëgaliseerd, opgehoogd en vergraven; profiel U14 is nu een enkeerd doordat er grond is opgebracht. Deze ingrepen hebben tot een sterk van de twee grote clusters afwijkende profielopbouw geleid.
- De C-waarden voor de enkeerdgronden zijn duidelijk hoger dan die voor de beekeerdgronden. Dit wordt veroorzaakt door de lagere verzadigde doorlatendheid van de onderste laag van de enkeerdgrond vergeleken met de beekeerdgrond.
- De hoeveelheid makkelijk en moeilijk beschikbaar vocht in de wortelzone is nagenoeg recht evenredig met de dikte van de wortelzone dus een dikke wortelzone draagt sterk bij aan de vochtbeschikbaarheid.
- De hoeveelheid makkelijk en moeilijk beschikbaar vocht in de wortelzone is bij de beekeerden iets groter dan bij de enkeerden (Figuur 4), dit kan verklaard worden door een hoger leemgehalte bij de beekeerdgrond met een gunstiger waterretentiekarakteristiek tot gevolg.



Figuur 4

Beschikbaar water in de wortelzone uitgezet tegen de bewortelingsdiepte voor grasland op Enkeerd- en Beekeerdgronden (gemiddelde waarden voor de twee clusters).

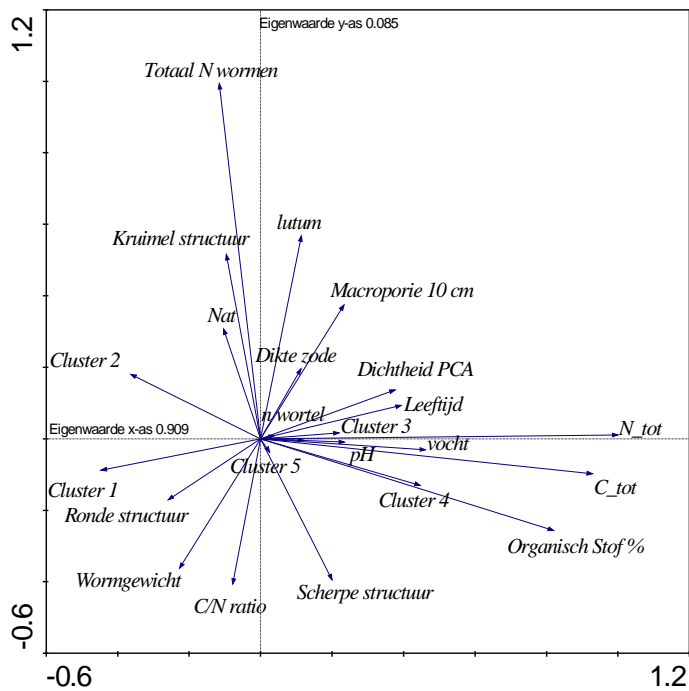
- De hoeveelheid makkelijk en moeilijk beschikbaar vocht in de ondergrond is bij de bekeerden lager dan bij de enkeerden, dit kan verklaard worden door afwijkende waterretentiekaracteristieken van de ondergrond.
- De kritieke z-afstanden voor de enkeerd- en bekeerdgronden bij een flux van 1 mm/dag zijn vergelijkbaar. Bij een flux van 2 mm/dag is de z-afstand van de meer lemige bekeerden groter dan die voor de enkeerden.
- Een kritieke z-afstand van 128 cm voor de enkeerdgronden bij een flux van 2 mm/dag en een worteldiepte van 15 cm geeft aan dat de grondwaterstand $128+15=143$ cm beneden maaiveld mag zakken voordat minder dan 2 mm/dag capillair opstijgt naar de wortelzone. Voor de gooreerdgronden mag de grondwaterstand zelfs zakken tot $137+15=152$ cm beneden maaiveld. Al met al zijn dit redelijk diepe grondwaterstanden en uitgaande van de waargenomen grondwaterstanden mag worden verondersteld dat in de meeste gevallen de grondwaterstand niet dieper zakt dan 150 cm waardoor de kans op verdroging voor beide grondsoorten gering is.
- De verzadigingstekorten van de ondergrond bij fluxen van 1 en 2 mm/dag zijn een afspiegeling van de hoeveelheden makkelijk en moeilijk beschikbaar vocht in de ondergrond. De verschillen tussen bekeerden en gooreerden kunnen verklaard worden door afwijkende waterretentiekaracteristieken van de ondergrond.
- Verschillen in organische stofgehalte van de bovengrond resulteren niet in duidelijk verschillende waarden voor de berekende functionele kenmerken.

Samenvattend kan worden gesteld dat de hoeveelheid makkelijk beschikbaar vocht in de wortelzone voor de bekeerden iets groter is dan voor de enkeerdgronden. Deze hoeveelheid vocht neemt echter rechtlijnig toe met de worteldiepte. Om vochttekorten te voorkomen is het dus vooral van belang om diepe beworteling te stimuleren, of althans deze niet te beperken door bijvoorbeeld zware landbouwmachines in te zetten die storende lagen in de ondergrond kunnen veroorzaken. In aanvulling moet het peilbeheer erop gericht zijn om grondwaterstanden binnen 150 cm beneden maaiveld te handhaven zodat voldoende vocht capillair kan opstijgen. Als ook in de winter de grondwaterstand tussen de 100 en 150 cm wordt gehandhaafd, dan hebben de gronden voldoende capaciteit om neerslagoverschotten te bergen.

4.5 Resultaten PCA

Tot slot van het onderzoek zijn alle resultaten van de veldstudie en de modelberekeningen naast elkaar gezet en in een allesomvattende serie principale component-analysen bekeken. Eerst werd een PCA uitgevoerd waarbij de gegevens van de bodemdichtheden zijn geanalyseerd. Deze gegevens waren erg uniform, en in de uiteindelijke PCA zijn de PCA-scores van de dichtheden gebruikt van de eerste as, om de grafische weergave inzichtelijk te houden.

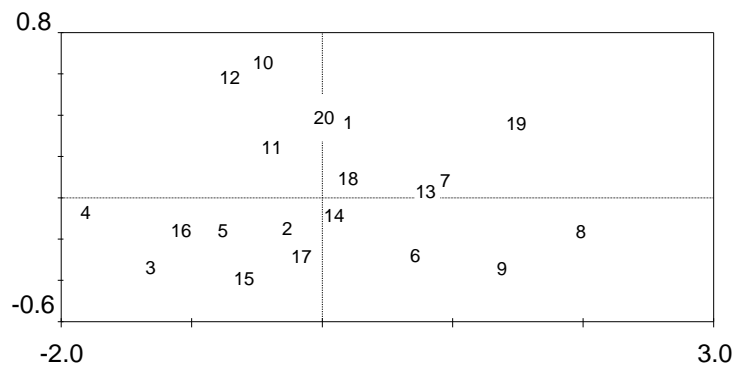
In Figuur 5 is te zien dat de horizontale eerste as veruit de meest verklaarde variantie in de waarnemingen beschrijft (eigenwaarde van 0.909). De variatie in deze richting wordt in grote mate bepaald door factoren die samen lijken te vallen met de leeftijd van de graszode: C-totaal, N-totaal, organische stofgehalte, vocht en pH. De variatie op de tweede as is minder belangrijk (eigenwaarde 0.085), en valt samen met het aantal regenwormen en bodemstructuur, bijvoorbeeld de mate van kruimeligheid van de bodem en ook de C/N ratio.



Figuur 5
 PCA op basis van alle gegevens uit veldonderzoek en modelberekeningen.

De locaties van cluster 2 (de bekeerdersgronden) en ook cluster 1 (vergraven bodem) vallen samen met een kruimelige of ronde structuur van de bodem, cluster 4 (de enkeerders) correleren juist met een scherpe, minder goede bodemstructuur, ook al is hier het organische stofgehalte hoger. Beworteling (zoals in het veld geschat) blijkt in deze analyse geen grote response te geven, dit betekent dat de aanwezige variatie in beworteling niet structureel samenhangt met de hier geanalyseerde factoren. Omdat op grond van de modellenstudie bewortelingsdiepte juist als een sleutelparameter naar voren komt, kan uit dit PCA-resultaat impliciet worden afgeleid dat er in het veld nog veel ruimte voor verbetering mogelijk is.

Reflecterend op de discussie in paragraaf 2.4 over de samenhang tussen organische stof, bodemstructuur en bodemleven kan het volgende nog worden opgemerkt. De monsterpunten zijn vooral over de x-as gespreid, zoals expliciet weergegeven in Figuur 6, met aan de linkerkant de punten met relatief lage C en N concentraties, en lage organische stof-gehalten. Bijvoorbeeld het organische stofgehalte op locatie U4 is slechts 2.3%, terwijl dit op locatie U8 10.9% is. Het aantal regenwormen is echter hoger op locatie U4 (334 tegenover 163 op locatie U8). De verschillen in wormen-dichtheden zijn groter tussen locaties die verdeeld over de y-as liggen, bijvoorbeeld locatie U10 en U15 met 903 respectievelijk 47 regenwormen per m². Dit uit zich ook in verschillende bodemstructuur parameters, bijvoorbeeld het percentage kruimelig, respectievelijk 69.5% en 55.3% en organische stofgehalte van respectievelijk 5.4 en 4.8% - dat weinig verschilt tussen deze locaties. Het lijkt er op dat de bodemstructuur, zoals gemeten aan de aggregaten (scherp, rond en kruimelig) direct verband houdt met dichtheden van regenwormen, en dat de effecten op bodemkarakteristieken als C- en N-gehalte en vochthuishouding meer afhankelijk zijn van de leeftijd van de graszode.



Figuur 6

PCA-resultaten voor monsterlocaties op basis van alle data uit veldonderzoek en modelberekeningen.

5 Literatuurstudie praktijkmaatregelen

Uit het vorige hoofdstuk is duidelijk geworden hoezeer diepe beworteling van belang is voor de bereikbaarheid van water, en dus op de onderzoek locaties van het grootste belang is om vochttekorten in droge perioden te voorkomen. Het is voor de betreffende boeren daarom van belang om diepe beworteling te stimuleren. Dit is het vertrekpunt geweest voor een literatuurstudie om beschikbare kennis op een rijtje te zetten. De vragen die in dit onderzoek beantwoord worden zijn:

- *Wat is er bekend over graslandbeworteling vanuit langjarige en kortlopende experimenten?*
- *Welke maatregelen kunnen boeren nemen om de beworteling van grasland te stimuleren?*
- *Wat betekenen deze bevindingen voor de agrarische praktijk?*

5.1 Beworteling van grasland

Worteldiepte is sterk gerelateerd aan de hydrologische balans en kan sterk verschillen tussen ecosysteemtypen. In gebieden met lange droogteperiodes zoals woestijnen en savannes worden worteldiepten aangetroffen van wel 50 tot 60 meter (Canadell, 1996). Voor graslanden in gematigde gebieden is de maximale bewortelingsdiepte gemiddeld 2,5 m, afhankelijk van biotische en abiotische factoren.

Beworteling kan niet los worden gezien van de kwaliteit van de bodem (Van Eekeren et al., 2007). Gewasgroei, wortelgroei, bodemleven en bodem hebben onderling versterkende wisselwerking (Figuur 7). Beworteling geeft voedsel en leefruimte voor het bodemleven. Dit bodemleven zorgt voor een betere bodemstructuur en nutriëntenvoorziening, waardoor de groei van gewas en beworteling weer worden bevorderd. In deze wisselwerking is beworteling dus van cruciale betekenis voor de agrarische productie.

Bij suboptimale groei-omstandigheden van de ondergrond kan de groei van gras stagneren. Er ontstaat dan een neerwaartse spiraal. Slechte beworteling beperkt de opname van nutriënten en geeft meer kans op verdroging, waardoor gewasgroei bovengronds en ondergronds afneemt.

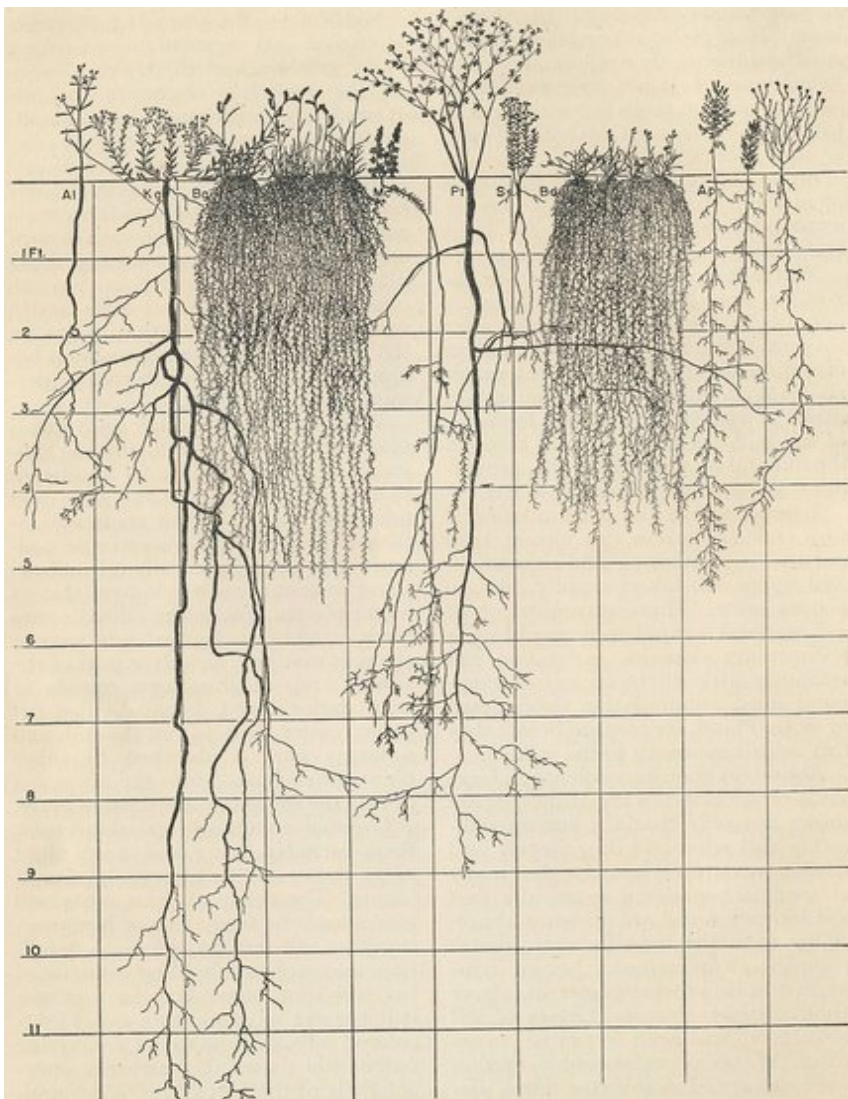
Grassen hebben zoals alle eenzaadlobbigen een typische vezelige wortelstructuur: dunne vezelige wortels met of zonder minimale secundaire diktegroei en vertakkingen (Figuur 8, Figuur 9). Dit in tegenstelling tot tweezaadlobbigen die over het algemeen een wortelstructuur hebben met een hoofdwortel, diktegroei en vertakkingen. Hiermee heeft gras een relatief zeer uitgebreid en fijnmazig wortelstelsel (Tabel 9).

Wortelbiomassa, wortel-lengtedichtheid en wortel-harenoppervlakte zijn bij grassen soms vele malen hoger dan bij tweezaadlobbigen. Het aandeel wortels in de bovengrond is daarbij groter dan van eenjarige landbouwgewassen (83% in de bovenste 30 cm versus 70% bij akkerbouwgewassen) (Jackson et al., 1996).



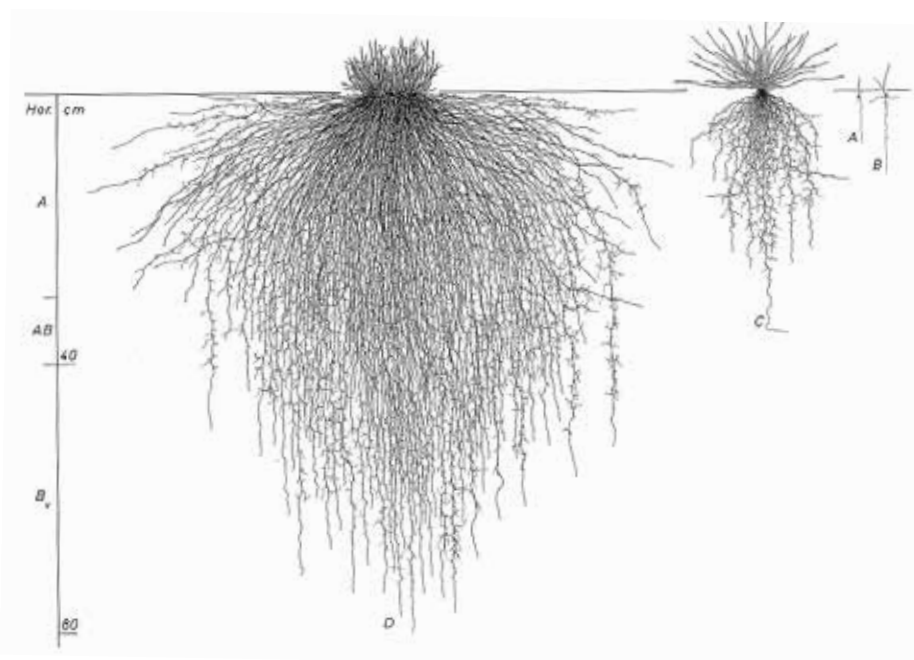
Figuur 7

De wisselwerking tussen gewasgroei, bodemleven en beworteling (Van Eekeren et al., 2007).



Figuur 8

Wortelstelsels van verschillende plantensoorten in de staat Kansas, USA, waarvan Bg en Bd grassoorten zijn. Al = *Allionia linearis*; Kg = *Kuhnia gultinosa*; Bg = *Bouteloua gracilis*; Mc = *Malvastrum coccineum*; Pt = *Psoralea tenuiflora*; Ss = *Sideranthus spinulosis*; Bd = *Buchloe dactyloides*; Ap = *Ambrosia psilostachya*; Lj = *Lygodesmia juncea* (Weaver en Albertson, 1943).



Figuur 9

Wortelstelsel van Engels raaigras in verschillende groeistadia, gezaaid begin maart. A: twee weken na zaaien; B: vier weken na zaaien; C: tien weken na zaaien; D: 61 weken na zaaien (14 maanden) (Kutschera en Lichtenegger, 1982).

Tabel 9

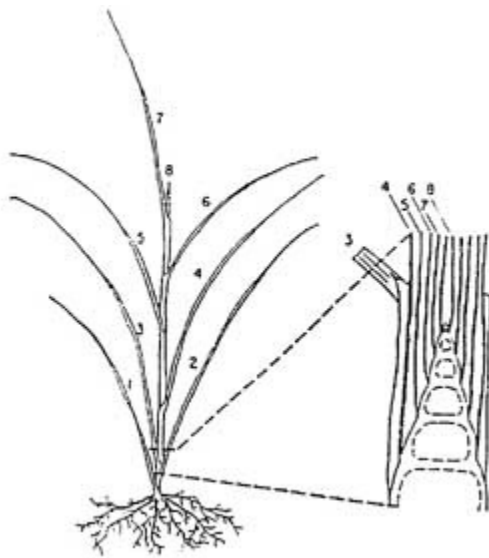
Verskillende parameters van de beworteling van gras vergeleken met die van een tweezaadlobbige plant als Witte klaver. Metingen uit proeven beschreven in wetenschappelijke literatuur.

Parameter	Gras	Witte klaver	Referentie
Wortel-biomassa (t/ha)	7,7	0,3	Young (1958)
Wortel-lengtedichtheid (cm/cm ³ grond) (bij 1,3 g/cm ³)	14,3-18,8	1,7-4,3	Tisdall en Oates (1979) Evans (1978)
Wortel diameter (mm)	0,19	0,26	Evans (1977)
Wortelharen lengte (mm)	0,23	0,55	Evans (1977)
Wortelharen oppervlakte (mm ²)	1230	490	Evans (1977)
Macroporiën (%)	24	45	Mytton et al. (1993)

Groeiwijze van graswortels

Meerjarige grassen hebben zich in de evolutie op twee manieren aangepast aan begrazing:

1. de groeipunten zitten laag bij de grond (Figuur 10)
2. in het wortelstelsel kunnen energiereserves opgeslagen worden die snelle hergroei na begrazing mogelijk maken.



Figuur 10.

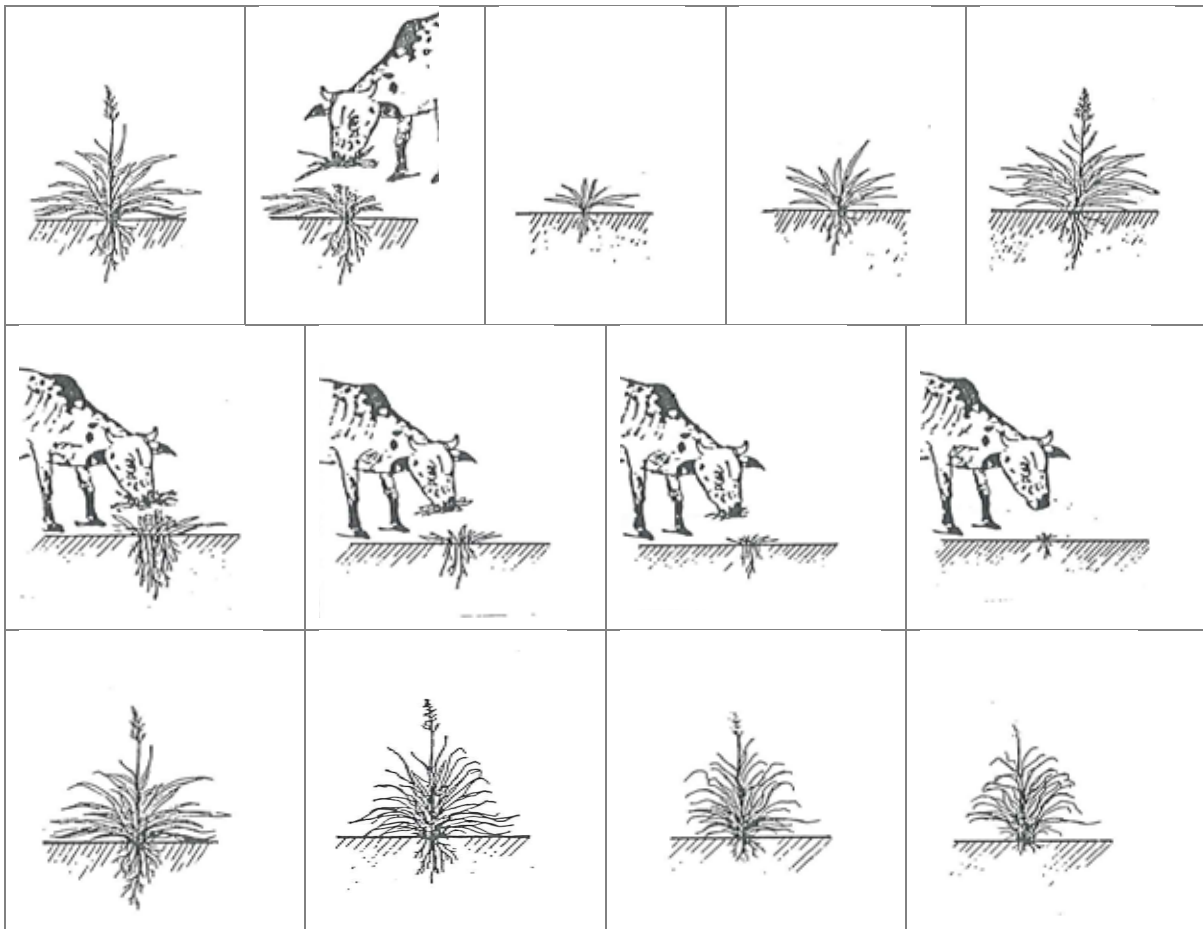
De groeipunten van gras zitten laag bij de grond.

Onder normale graasdruk zijn er bij beweiden vier groeifasen te onderscheiden (Bingham et al., 1984; Savory, 1988; Figuur 11 boven):

- Fase 1 Als een graspol wordt begraasd of gemaaid, loopt deze na drie dagen weer uit. Dit kost energie, waarvoor wortelreserves worden aangesproken. Daarbij sterft het wortelstelsel gedeeltelijk af.
- Fase 2 Het jonge blad heeft een klein bladoppervlak, met weinig capaciteit voor fotosynthese zodat weinig energie wordt vastgelegd. De eerste grasgroei is dan traag en komt voor een groot deel nog steeds voort uit de wortelreserves.
- Fase 3 Het bladoppervlak breidt uit. De bladassimilatie neemt de energietoevoer vanuit de wortels geleidelijk over. Er is een snellere groei van de plant zichtbaar.
- Fase 4 Het bladoppervlak is zo groot, dat er meer energie wordt gevormd dan er gebruikt wordt voor bovengrondse blad- en stengelgroei. Deze energie wordt opgeslagen in de wortels.

Op begraasd of gemaaid grasland is dus sprake van bruto en netto groei van het wortelstelsel. Onder- en overbegrazing hebben hun specifieke weerslag op het wortelstelsel (Figuur 11, midden en onder).

NB: Vanwege de voortdurende groei en afbraak van graswortels, die ook nog eens varieert met het seizoen (Schaffers et al., 2010), zijn onderzoeksresultaten niet altijd goed vergelijkbaar. De totale seizoensproductie (*root turnover* of bruto wortelgroei) van Engels raaigras kan veel hoger liggen dan er op een bepaald moment gemeten wordt (Stewart en Frank, 2008; Steingrobe et al., 2001; Gibbs en Reis, 1992).



Figuur 11

Boven- en ondergrondse groei van gras na begrazing, bij gemiddelde begrazing (bovenste rij), overbegrazing (midden) en onderbegrazing (onder) (Van Eekeren, 1993).

5.2 Maatregelen voor betere beworteling

Deze paragraaf geeft een overzicht van literatuur en langjarige proeven waarin de samenhang is onderzocht tussen omgevingsfactoren en beworteling. Op basis van dit overzicht worden maatregelen voorgesteld die beworteling van grasland stimuleren.

5.2.1 Bodem

Wortelgroei is voor een groot deel afhankelijk van de biologische-, fysische- en chemische bodemvruchtbaarheid. Een deel van deze factoren is inherent aan de grondsoort of kan alleen op lange termijn met gerichte maatregelen worden beïnvloed.

5.2.1.1 Bodemfysisch: bodemstructuur, water en zuurstof

Een maatregel om een goede beworteling te behouden is preventie van bodemverdichting.

Bodemverdichting zorgt direct voor een beperking van de beworteling. Uit onderzoek is gebleken dat bodemverdichting ook op de langere termijn de beworteling van grasland kan beperken (Douglas et al., 1991) en zorgt voor een verlaging van de bovengrondse opbrengst (Houlbrooke et al., 1997). Volgens Kutschera et al. (2009) vormt bodemverdichting, naast de fysieke weerstandstoename, een beperking voor beworteling (Figuur 12) door de afname van de grootte van de poriën. Dit beperkt de beschikbaarheid van vocht en lucht in de bodem. Bij een tekort aan water probeert het wortelstelsel de natte delen van de bodem te doorwortelen, wanneer de bodemstructuur dit toelaat. Deze investering in wortelstelsel kost echter zelf water. Onder te natte omstandigheden kan het wortelstelsel door zuurstoftekort afsterven (Van Eekeren et al., 2003).

Beweiden onder slechte omstandigheden kan door vertrapping leiden tot bodemverdichting en daardoor tot afname van het wortelstelsel. Dit effect is sterker bij grasklaver dan bij puur gras, vanwege de dikkere wortels van klaver (Vertes et al., 1988). In Engels onderzoek met grasklaver werd bij begrazing met schapen onder slechte omstandigheden 47% minder wortelmasa gevonden (Curll en Wilkins, 1983).



Figuur 12.

Maiswortels en verdichting. Links: normale dichtheid; rechts: verdichte grond (Kutschera et al., 2009).

5.2.1.2 Bodemfysisch: Organische stof

In de relatie tussen bodem en beworteling speelt organische stof een belangrijke rol. Organische stof biedt namelijk op meerdere vlakken goede omstandigheden voor beworteling. Organische stof heeft een groot watervasthoudend vermogen en een lage weerstand voor beworteling. Daarnaast biedt organische stof via mineralisatie voldoende nutriënten voor gras om te groeien. Er lijkt dan ook een sterke relatie te zijn tussen beworteling en de diepte van de zwarte laag (Van Eekeren en Bokhorst, 2009). Dit heeft te maken met de positieve terugkoppeling die bestaat tussen wortelgroei en organische stof, via de afgifte van energierijke wortellexudaten door de worteltoppen. Er ontstaat een verhoging van de microbiële activiteit rondom die wortel.

In bewortelde grond is de afbraak van bodemorganische stof tijdens het groeiseizoen sneller dan in niet bewortelde grond. De microbiële groei en de hoge C/N ratio van exudaten veroorzaken een nutriëntentekort (bijvoorbeeld van N). Hierdoor breken microben de omgevende organische stof versneld af, om daaruit nutriënten te halen. Netto komen door die afbraak en bij afsterven van de microben nutriënten vrij voor de plant. Fotosynthese-intensiteit en wortelgroei zijn de belangrijkste factoren die invloed hebben op de afgifte van exudaten en zorgen indirect voor de mobilisatie van nutriënten (Kuzyakov, 2002).

De samenstelling en verdeling van de organische stof blijkt ook effect te hebben op beworteling van gras. Organische stof met een lage C:N-verhouding geeft snellere wortelgroei (Hodge et al., 2000). Ook lijkt een concentratie van organische stof in één laag een grotere wortelbiomassa te veroorzaken van gras-klaver (Kreuzer et al., 2004).

Een maatregel om het organische stofgehalte hoog te houden zal bijdragen aan een lagere indringingsweerstand, en een afgestemde nutriëntenlevering via wortel-exudaten en gunstige vochthuishouding van de bodem. Een hoog organische stofgehalte is ook gunstig voor de aantallen regenwormen (zie 5.2.1.3). Dit kan worden bereikt met aanvoer van organische stof.

5.2.1.3 Bodemchemisch: Zuurgraad

Het op peil houden van de pH is een maatregel die de beworteling vergroot.

Een lage pH heeft een negatieve invloed op beworteling. Door toevoeging van kalk, rockfosfaat of bijproducten van kolen-verbranding aan een zeer zure leemgrond (pH 3,9) nam de wortelmasse van Engels raaigras toe (He et al., 1999). Als gevolg van de pH-verhoging neemt de beschikbaarheid van Ca en Mg toe.

5.2.1.4 Bodemchemisch: Fosfaattoestand van de bodem

Onder een lage P-toestand kan een verhoging van de P-toestand een positief effect op de beworteling hebben. Wanneer de P-toestand ruim wordt groeit de bovengrondse massa relatief sneller dan de wortels, waardoor het relatieve aandeel van de beworteling kleiner wordt. Daarmee is een verhoging van de wortel-spruitverhouding een typische respons op P-tekort (Gales, 1979). Ook uit langjarige proeven met gerst is dit gebleken (Davidson, 1969a; Föhse et al., 1988; Steingrobe et al., 2001). De wortelomzet (bruto groei) neemt toe bij een tekort aan P. Echter, een direct verband met de fosfaattoestand in de bodem is gevonden; er zijn namelijk ook tegengestelde waarnemingen (Goedewagen, 1954). De mate van P-tekort is ook van invloed op de beworteling, de spruitgroei en de wortelmorfologie (Powell, 1977):

- Zeer lage P-toestand: het gras kan te weinig P opnemen waardoor groei van zowel wortel als spruit na een korte groeiperiode stopt.
- Lage P-toestand: het gras neemt genoeg P op om wortelgroei te handhaven, maar er is niet genoeg P over voor spruitgroei, waardoor deze stagneert.
- Normale P-toestand: er kan genoeg P worden opgenomen om zowel wortel als spruit door te laten groeien. Door de goede beworteling is de P-benutting hoger dan bij een lagere P-toestand.
- Bij een lage P-toestand worden de wortels kort en dik.
- Bij een normale P-toestand waren de wortels even dun als de wortels van de zode.
- Een zode neemt P sneller en meer op dan planten die alléén groeien.
- Zode heeft veel meer wortellengte, dunnere wortels, hogere opbrengst en P-opname dan planten die alleen groeien.

Blijkbaar heeft de P-toestand van de bodem een grote invloed op de beworteling, maar kan deze zowel negatief als positief uitpakken. Ook andere factoren zoals vochniveau (Davidson, 1969a; Gales, 1979), interacties met andere nutriënten (Forde en Lorenzo, 2001) en bodemtype zijn van invloed. Voor zandgronden blijkt de benodigde P-concentratie voor optimale plantengroei hoger te zijn (Pant et al., 2004).

Een potentiële maatregel in relatie tot bovenstaande zou kunnen zijn om een goede zodedichtheid handhaven.

5.2.1.5 Bodembologisch: Regenwormen

Een maatregel voor het stimuleren van de bewortelingsdiepte en het terugbrengen van bodemverdichting is het bevorderen van de aantallen en activiteit van regenwormen, vooral pendelaars.

Regenwormen beïnvloeden met de volgende activiteiten in de bodem direct en indirect de beworteling van gras (Scheu, 2003; Van Eekeren et al. 2003):

- transport en afbraak organisch materiaal
- beschikbaarheid van nutriënten vergroten door versnelling van de mineralisatie
- bodemstructuurverbetering en aggregaatvorming
- vergroten van poriënvolume, verbeteren van drainage
- verdeling van groeistimulerende organismen
- eten van wortels

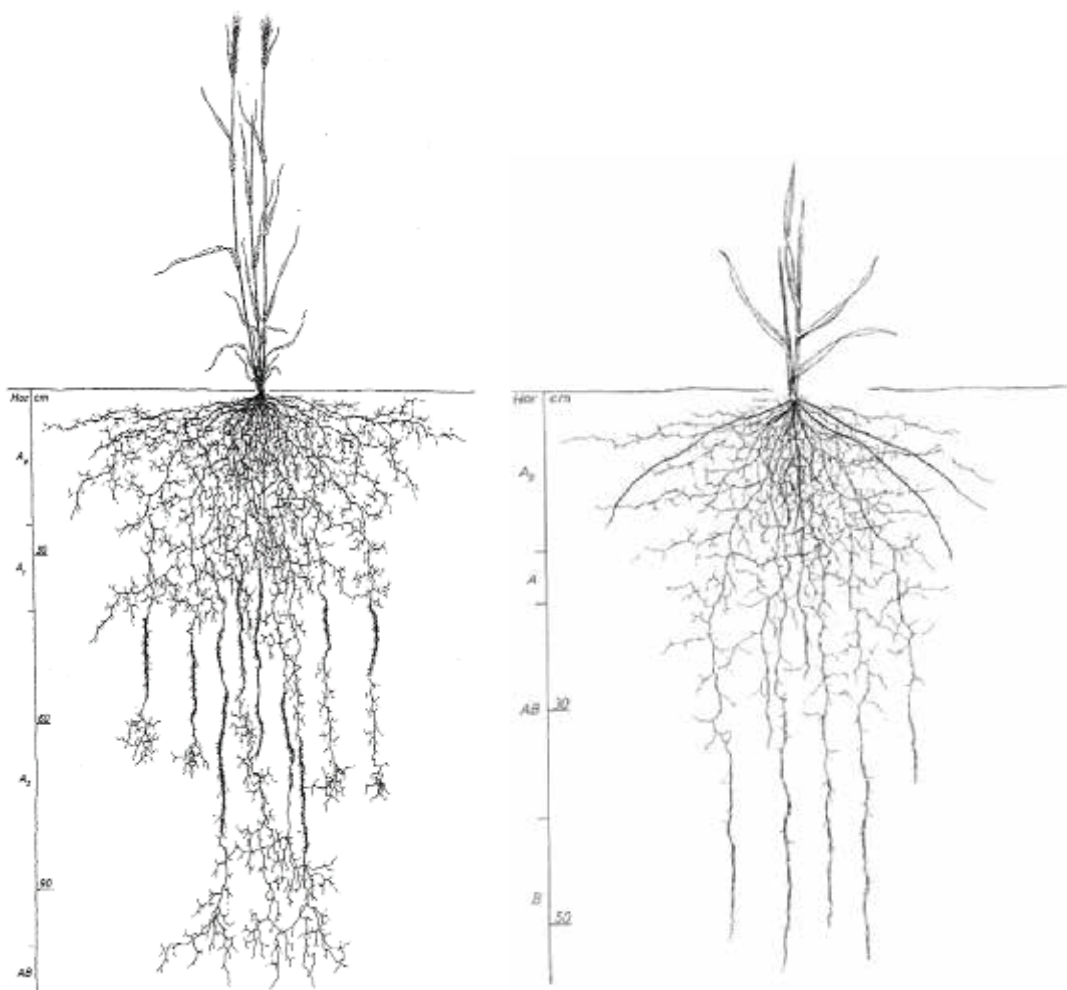
In de meeste literatuur is een positief effect gevonden van regenwormen op de beworteling van gras of gras-klover (Kreuzer et al., 2004; Scheu, 2003; Hoogerkamp, 1983; Tabel 10).

Tabel 10

Verloop van oppervlakkige beworteling van grasland na introductie van regenwormen in de polder bij Biddinghuizen (Hoogerkamp, 1983).

Jaar na introductie van regenwormen	Beworteling gras in de laag 0-15 cm (kg ds/ha)
0	570
1	570
2	750
3	1875
4	1965

Een algemeen verschijnsel is dat regenwormen uit de groep van de pendelaars (in Nederland: *Lumbricus terrestris*) met hun diepe verticale gangen verdichte lagen in de bodem kunnen doorbreken, en dat plantenwortels vervolgens via die wormgangen makkelijk toegang hebben tot bodemlagen onder de verdichting (figuur 13, links) (Kutschera et al., 2009, eigen observatie). Eenzelfde mechanisme is waargenomen bij haverplanten waarvan de wortels de gangen volgen van afgestorven wortels van Heermoes (*Equisetum arvense*).



Figuur 13

Wortels passeren verdichte lagen door verticale gangen van regenwormen (links: Gerst) en van afgestorven wortels van Heermoes (rechts: Haver, onderste verticale wortels van jonge plant) (Kutschera et al., 2009). Let op verschillende schaalverdeling.

5.2.2 Gewas

5.2.2.1 Maatregelen bij inzaai: Gerst meezaaien

Wortels gebruiken gangen van afgestorven wortels en kunnen hierdoor dieper komen (figuur 7, rechts). Dit mechanisme wordt in bepaalde landbouwsectoren toegepast om een snellere beworteling of bedekking in de eerste fase van de gewasgroei te bereiken door het meezaaien van onder andere gerst of haver. Er zijn geen metingen bekend van het effect van deze maatregel op de wortelgroei van gras. Wel is de veronderstelling dat graswortels de gangen van de graanwortels volgen. Hier volgen enkele voorbeelden van de toepassing:

- Bij teelt voor grasdrogerijen wordt haver of Alexandrijnse klaver samen met luzerne gezaaid om sneller een gesloten zode te bereiken en onkruidgroei tegen te gaan.
- In de teelt van wortels wordt gerst meegezaaid tegen verstuing.
- Graan (haver of gerst) wordt meegezaaid als dekvruucht bij voorjaarsinzaai van gras om een snellere bodembedekking te krijgen en de wortels zorgen ervoor dat de losgemaakte bodem minder snel inzakt.

Wanneer deze maatregel bodemverdichting na herinzaai voorkomt of vertraagt kan het een positief effect op de wortelgroei hebben (zie 5.3.1). Gerst mee zaaien is dan een potentiële maatregel.

5.2.2.2 Maatregelen bij inzaai: Plantdichtheid

De plantdichtheid heeft een duidelijk positieve invloed op de wortelmasse van gras (Troughton, 1956; Berendse, 1981; Powell, 1977), maar niet zozeer op de bewortelingsdiepte (Powell, 1977). In een dichte zode kan voor mobiele nutriënten als nitraat wortelconcurrentie optreden, terwijl een dichte zode wel positief lijkt te werken voor een goede P-opname (zie 5.3.1.2).

Een potentiële maatregel voor het verbeteren van de bewortelingsdiepte door een bepaalde plantdichtheid kan hiermee dus niet worden afgeleid. Bij een uitstoelend en meerjarig gewas als grasland heeft de oorspronkelijke zaaidichtheid minder invloed op de spruitdichtheid in de jaren na het zaaien dan andere managementfactoren als maai- en beweidingsregimes (zie paragraaf 5.2.3).

5.2.2.3 Maatregelen bij inzaai: Grassoortenmengsels en gras-klover

Er is geen eenduidig advies voor een maatregel voor het verbeteren van de bewortelingsdiepte door gebruik van bepaalde grassoortenmengsels of gras-klavermengsels.

Uit verschillende potonderzoeken werd geconcludeerd dat concurrentie tussen soorten leidt tot een hogere wortelmasse (Hutchings en John, 2004; Mommer et al., 2010), maar geen effect heeft op bewortelingsdiepte (Mommer et al., 2010). In de meeste veldproeven is er geen verband gevonden tussen plantdiversiteit en wortelmasse (Troughton, 1956; Van Eekeren et al., 2010). Mogelijk heeft dit te maken met de grote variatie in het veld waardoor verschillen moeilijk meetbaar zijn.

5.2.2.4 Maatregelen bij inzaai: Zaaizaadbehandeling

Het effect van zaaizaadbehandeling op bewortelingsdiepte zou positief kunnen zijn, maar meer onderzoek is nodig.

Uit de schaarse literatuur over effecten van zaaizaadbehandelingen op beworteling valt op te maken dat het een positieve invloed kan hebben, maar meer onderzoek is nodig om dit met zekerheid vast te stellen.

- Snijmaiszaad behandeld met de schimmel *Trichoderma* leidde in een proef tot een uitgebreider wortelstelsel (Van der Schoot en Van Dijk, 2002).
- Graszaad gecoat met N- en P-kunstmest zorgt mogelijk voor een snellere startontwikkeling met langere en meer vertakte wortels dan onbehandeld zaaizaad (Hogenkamp, 2008).
- Granen waarvan het zaaizaad een hittebehandeling met stoom heeft ondergaan lijken een beter wortelstelsel te ontwikkelen dan onbehandeld graan (Anonymus, 2010).

5.2.2.5 Zaadmengsel: Grassoorten, rassen en veredeling

Het overgaan op andere grassoorten (bijvoorbeeld Rietzwenkgras in plaats van Engels raaigras) is een potentiële maatregel om de bewortelingsdiepte van grasland te vergroten.

Er zijn veel studies gedaan naar verschillen in beworteling tussen soorten en rassen. Grassoorten uit verschillende habitats verschillen in beworteling. Grassoorten uit nutriëntrijke habitats (zoals raaigrassen en kroppaar) lijken afhankelijk te zijn van een hogere wortelproductie en wortelomzet (*root turnover*) voor een snelle opname van nutriënten, dan soorten uit nutriëntarme habitats (Fransen et al., 1999; Van der Krift en Berendse, 2002). Het was al bekend dat Rietzwenkgras dieper wortelt dan Kroppaar of Engels raaigras (Deru et al., 2011; Garwood et al., 1979; Garwood en Sinclair, 1979; Tabel 11) en daardoor waarschijnlijk beter groeit onder droge omstandigheden. De wortels van Rietzwenkgras zijn relatief dik en taai (ook onderin het profiel) en zijn minder afhankelijk van bemesting dan Engels raaigras (Deru et al., 2011).

Tabel 11

Opbrengst, wateronttrekkingsdiepte en gemiddelde wortelparameters van vijf grassen bij een maalfrequentie van zes weken (Garwood et al., 1979; Garwood en Sinclair, 1979).

Grassoort	Bovengrondse opbrengst (t ds/ha) 27 mei - 18 aug	Effectieve diepte wateronttrekking (cm)	Wortellengte-dichtheid (cm/cm ³) op 30-60 cm diepte	Specifieke wortellengte (cm/g) op 30-60 cm diepte
Ruw beemdgras	0,1	40	-	-
Timotheegras	1,1	70	3,4	4,3
Kroppaar	2,0	70	2,7	3,2
Engels raaigras	2,3	80	4,9	3,6
Rietzwenkgras	3,3	>100	6,3	2,1

Wortellengtedichtheid (WLD), wortellengte per volume grond [cm/cm³]; een maat voor bewortelingsintensiteit op gegeven diepte in het bodemprofiel.

Specifieke wortellengte (SWL), de totale lengte/gewicht wortel [cm/gram]; een maat voor worteldikte.

WLD/SWL geeft de wortelbiomassa (g/cm³) in de gegeven bodemlaag. De wortelbiomassa van Rietzwenkgras is verreweg het grootst.

5.2.2.6 Zaadmengsel: Veredeling

Een potentiële maatregel voor de langere termijn is de veredeling van grassoorten gericht op diepere beworteling.

Gezien de genotypische variatie in wortelgroei binnen soorten en de belangrijke rol die de wortelarchitectuur (de verdeling in ruimte en tijd van de wortels in de bodem) speelt voor de opname van nutriënten is, wordt de wortelarchitectuur als kenmerk meegenomen in de biologische veredeling (Messmer et al., 2012). De variatie in worteldiepte tussen genotypen van dezelfde soort is relatief klein in vergelijking met de variatie tussen soorten (Messmer et al., 2012). Toch laten verschillende onderzoeken zien dat het bij gras mogelijk is om wortelkenmerken via de veredeling te beïnvloeden. Met experimenten is het gelukt om door veredeling de wortelintensiteit van raaigras in diepere bodemlagen te vergroten (Crush et al., 2010). Totaal wortelgewicht heeft een betere erfelijkheid in Raaigras (Crush et al., 2006) en Rietzwenkgras (Bonos et al., 2004). Onderzoek aan de hybride grassoort *Festulium* (*Lolium perenne* x *Festuca pratensis*) laat zien dat deze hybridesoort een ander wortelstelsel heeft dan de ouderplanten. De maximum worteldiepte is kleiner (Tabel 12) en de levensduur van de wortels is korter (snellere aangroei en afvoer van wortels) (Humpreys et al., 2010).

Tabel 12

Worteleigenschappen van de hybride soort Festulolium en de ouderplanten (Humpreys et al., 2010).

Eigenschap	<i>L. perenne</i>	<i>F. pratensis</i>	<i>Festulolium</i>
Maximum worteldiepte (mm)	940	735	604
Wortelsterfte (%)	28 (hele zone)	44 (bovenste zone)	47 (diepere zone)

5.2.2.7 Zaadmengsel: Rassen

Rassenkeuze binnen grassoorten is een makkelijk uitvoerbare maatregel om aan bewortelingsintensiteit en -diepte te werken.

Ook binnen grassoorten zijn genotypische verschillen in beworteling. Zo lijken raaigrassoorten die geselecteerd zijn op een hoge N-benutting een grotere wortelgroei te hebben bij een lage N-gift dan bij een hoge N-gift. Raaigrassoorten geselecteerd op een lage N-benutting reageren niet op de N-gift (Van Loo et al., 2003). Verschillende raaigras rassen laten een grote variatie zien in wortelmassa ($\pm 50\%$; Ennik, 1981) en de wortelmorfologie (vertakkingen en dikte van de wortels) kan ook verschillen tussen cultivars (Macdonald et al., 2006). Deru et al. (2012) vonden bij diploïde Engelse raaigrasrassen een grotere wortelmassa dan bij tetraploïde rassen.

5.2.3 Management

5.2.3.1 Bemesting: Effect van nutriëntenvoorziening

De nutriëntenstatus van de bodem kan de ontwikkeling van plantenwortels beïnvloeden (Forde en Lorenzo, 2001):

- groei en -vertakking
- diameter
- lengte en dichtheid van wortelharen

De invloed van voedingsstoffen op deze kenmerken wordt hieronder beschreven.

Wortelgroei en -vertakking

Een potentiële maatregel voor het verbeteren van de bewortelingsdiepte is het verlagen van de N-bemesting (al dan niet in combinatie met het gebruik van andere grassoorten).

Verschillende onderzoeken geven aan dat N-bemesting een negatief effect heeft op de doorworteling (Frissel et al., 2005; Fairly, 1985; Ennik, 1981; Robinson et al., 1994; Goedewagen, 1954). Bij beperkende groeifactoren, waaronder weinig nutriënten als N, P of S gaat de plant investeren in het wortelstelsel waardoor de wortel-spruitverhouding toeneemt (Davidson, 1969a; Forde en Lorenzo, 2001; Kuzyakov, 2002; Troughton, 1956; Boot en Mensink, 1990). Het is algemeen bekend dat dit effect sterker is bij (gras)soorten die aangepast zijn aan een hoge bodemvruchtbaarheid (Van Loo et al., 2003).

Grassoorten kunnen op verschillende manieren reageren op bemesting. Bij een hoge N-bemesting concentreert de beworteling van Engels raaigras zich verder in de bovenste 8 cm ten koste van de diepere beworteling. Rietzwenkgras laat juist een betere beworteling zien in de laag van 24-32 cm, Kropaar zit daar tussenin (Deru et al., 2011).

Voor K is geen effect gevonden op de beworteling (Goedewagen, 1954; Drew, 1975). Een verhoogde P-beschikbaarheid in de bovenlaag bevorderde de algehele beworteling (zie paragraaf 5.2.1.2). Bij een hoge P-toestand neemt de wortelmasse relatief af, omdat de bovengrondse groei sterker toeneemt.

Naast een algemene negatieve invloed van de aanwezigheid van voedingsstoffen op de beworteling, kan pleksgewijze toediening tot een sterke plaatselijke wortelgroei en -vertakking leiden (Robinson et al., 1994).

Worteldiameter

Maatregelen die de beworteling bevorderen hebben ook invloed op de dikte van de wortels. Daarnaast is de worteldikte soortafhankelijk (tabel 3). Uit verschillende onderzoeken is gebleken dat bij grassen dunnere wortels ontwikkelen bij deficiënte nutriëntenomstandigheden (Fitter, 1985; Kutschera, 2009). Wat het effect hiervan is op de droogtetolerantie is niet helemaal duidelijk en moet nog verder worden onderzocht.

Lengte en dichtheid van de wortelharen

Het verlagen van de stikstofgift is een potentiële maatregel die ervoor kan zorgen dat grassen het worteloppervlak vergroten en minder snel verdrogen.

Wortelharen spelen een belangrijke rol voor de opname van nutriënten. Wortelharen vergroten het worteloppervlak, waarmee opname kan plaatsvinden door hun kleine diameter. Zowel de lengte van wortelharen als de dichtheid op de worteloppervlak kan beïnvloed worden door de nutriëntenstatus (figuur 10). Over het algemeen wordt bij planten een toename van wortelharen gevonden bij P- en N-tekort. Bij grassen lijkt de groei van wortelharen echter niet gevoelig te zijn voor N in de vorm van nitraat (Forde en Lorenzo, 2001). Soorten afkomstig uit nutriëntarme omstandigheden ontwikkelen langere en meer wortelharen (Boot en Mensink, 1990).

5.2.3.2 Bemesting: Tijdstip van stikstofbemesting na maaien

Een mogelijke maatregel voor het stimuleren van de beworteling zou kunnen zijn om de bemesting (stikstofgift) na het maaien met 7-10 dagen uit te stellen.

Verschuiven van de bemesting naar na het maaien geeft indicaties dat het uitstellen van stikstofbemesting de beworteling stimuleert (Ennik, 1981; Jarvis en Macduff, 1989; Van Eekeren et al., 2009; Sheldrick et al., 1994).

Stikstoftoediening onder het maaiveld

Een mogelijke bemestingsmaatregel zou kunnen zijn om de kunstmest in vloeibare vorm onder de zode (5 cm diepte) toe te dienen.

Het injecteren van vloeibare stikstofbemesting (waarbij N dieper en lokaal geconcentreerd toegediend wordt) zou kunnen leiden tot meer wortelmasse en een diepere beworteling vergeleken met oppervlakkige toediening (Laine et al., 1998; Murphy en Zaurov, 1994).

Toedienen van humuszuren

De toediening van humuszuren lijkt een positief effect te hebben op wortellengte en opname van nutriënten (Verlinden et al., 2010; Cooper et al., 1998).

5.2.3.3 Maaien en beweiden

Resultaten van een langlopend onderzoek naar de doorworteling van dijkgraslanden laat zien dat beweiden met schapen vooral een positief effect op de doorworteling in de bovenste bodemlagen, terwijl hooibeheer de doorworteling op de diepere bodemlagen bevordert (Frissel et al., 2005).

Beweiding en berijden van grasland kunnen onder natte omstandigheden negatieve gevolgen hebben voor de bodemstructuur, waardoor een goede beworteling geremd wordt (zie paragraaf 3.1). De beworteling wordt naast deze fysieke beperking ook sterk beïnvloed door fysiologische veranderingen in de plant na maaien of afgrazen.

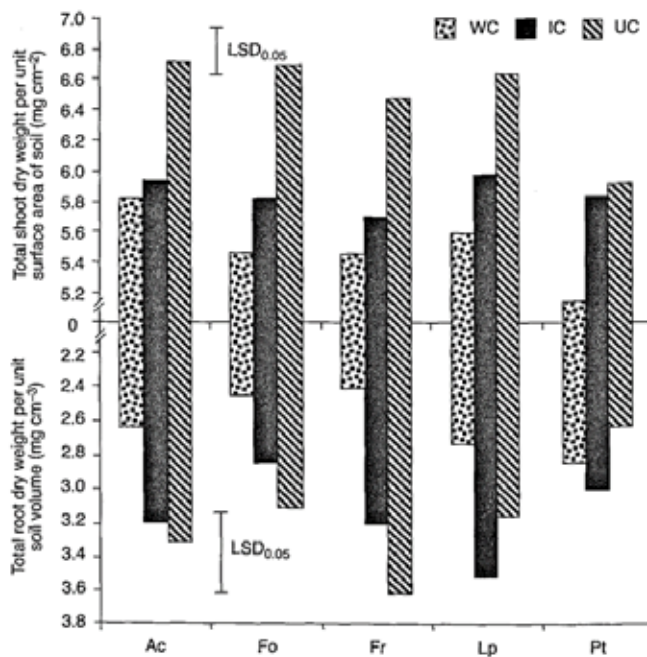
Wortelreserves en hergroei na maaien of begrazen

Minder frequent maaien, dus zwaardere snedes oogsten (maar niet te kort maaien), zou een maatregel kunnen zijn om een diepere wortelgroei te bereiken.

In de inleiding van deze paragraaf is kort beschreven hoe grassen aangepast zijn door de manier van reserveopbouw in de wortels en hergroei na begrazing. De mobilisatie van suikers en aminozuren uit de wortels en stoppels speelt daarbij een belangrijke rol (Ourry et al., 1989; Sullivan en Sprague, 1949).

Het effect van management, zoals de frequentie van maaien of weiden, op de beworteling hangt sterk af van de aanspraak die dat management doet op wortelreserves en de mogelijkheid om wortelreserves weer te herstellen. Bij een te hoge maaifrequentie neemt de beworteling af (Schuurmans, 1954; Ennik, 1981). Veel onderzoek bevestigt dat zowel wortelmasse als wortellengte en -groei bij gras geremd worden door het verwijderen van de bovengrondse delen (Dawson, 2000; Dawson et al., 2003; Evans, 1971 en 1972; Jarvis en Macduff, 1989; Macdonald et al. 2006; Mackie-Dawson, 1999). Figuur 14 geeft duidelijk weer dat vaker maaien in het algemeen een negatief effect heeft op de bovengrondse opbrengst en beworteling. Engels raigras en ruw beemdgras hebben een optimum voor de beworteling bij 8 weken maaien. Kort en frequent maaien heeft over het algemeen tijdelijk een lagere wortelgroei tot gevolg (Evans, 1971). Er lijkt wel een optimum te zijn in de combinatie van maaifrequentie en maaihoogte (~ veebezetting versus beweidingensysteem). Wanneer maaien tot een hogere spruit- en plantdichtheid in de zode leidt, kan dit over een heel seizoen de wortelgroei bevorderen.

Er is geen verband aangetoond tussen maai-interval en wortellengte bij Rietzwenkgras (Beyrouy et al., 1990).



Figuur 14

Bovengrondse biomassa (mg/cm²) en wortelbiomassa (mg/cm³) bij vijf grassoorten. De planten zijn na zaai gedurende één jaar wekelijks gemaaid (WC), gemaaid om de acht weken (IC) en niet gemaaid (UC) (Uit: Dawson, 2000). Ac, *Agrostis capillaris* (Gewoon struisgras); Fo, *Festuca ovina* (Schapengras); Fr, *Festuca rubra* (Rood zwenkgras); Lp, *Lolium perenne* (Engels raaigras); Pt, *Poa trivialis* (Ruw beemdgras)

Soortspecifieke reacties op N-niveau

Een potentiële maatregel is moeilijk af te leiden vanwege controversiële resultaten in de literatuur.

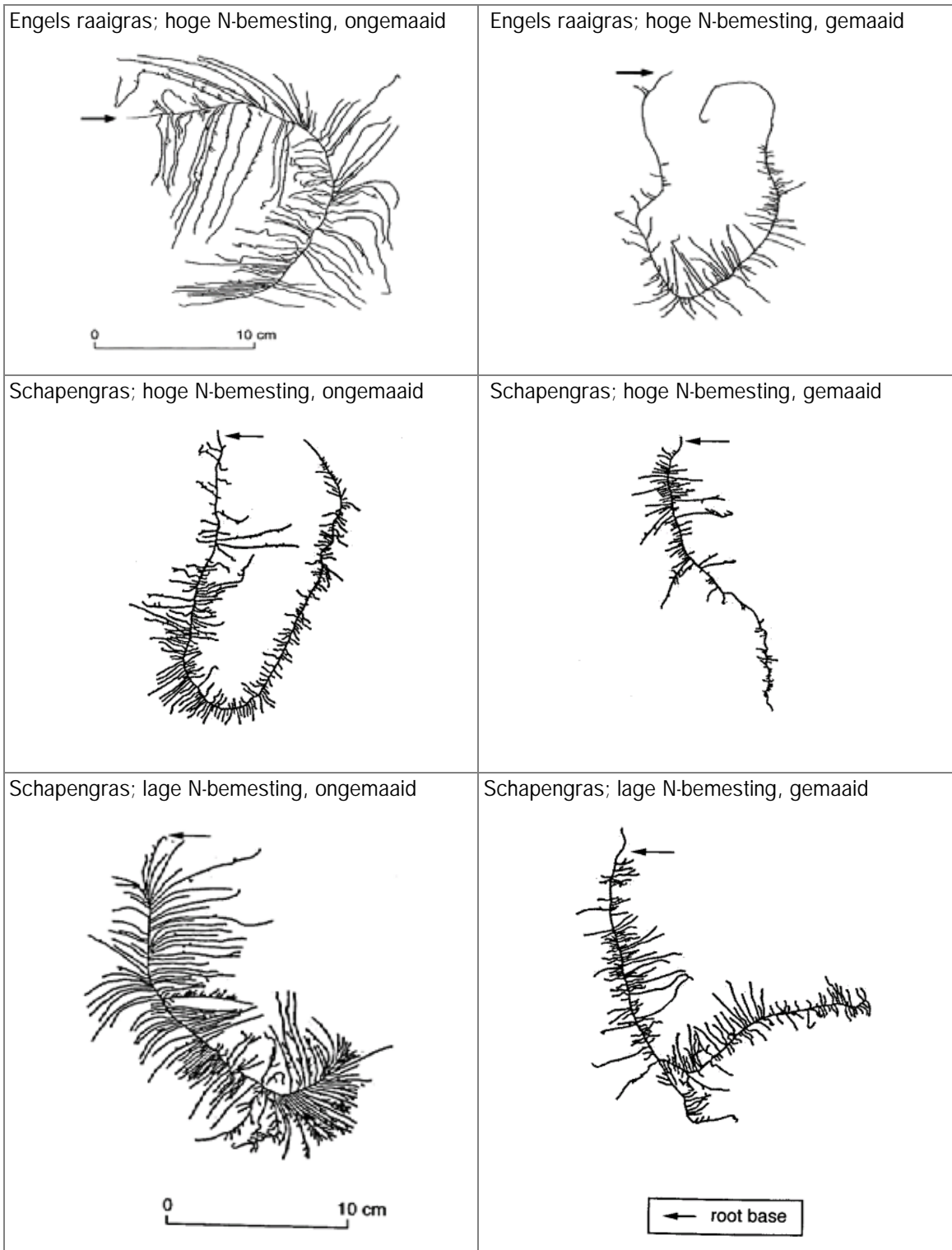
Gegeven dat beweiden en maaien de wortelgroei negatief beïnvloeden, wijzen meerdere auteurs er op dat de reactie kan verschillen per grassoort en genotype, en afhankelijk is van het bemestingsniveau (Mackie-Dawson, 1999; Macdonald et al., 2006; Dawson, 2000; Dawson et al., 2003; Arredondo en Johnson, 1999)(Figuur 15).

Raaigras

Over het algemeen is er door maaien een vermindering van wortelgroei. Volgens Mackie-Dawson (1999) bestaat dit verband onder alle N-bemestingsniveaus. Volgens Macdonald et al.(2006) is er echter alleen verminderde wortelgroei wanneer er geen N-bemesting wordt gegeven. Volgens Dawson (2000) en Dawson et al. (2003) reageert raaigras sterker op begrazing bij een hoog N-niveau dan bij een laag N-niveau door meer te vertakkingen te vormen.

Schapengras

Schapengras vertoont grote wortelplasticiteit bij een laag N-niveau, geen verminderde wortelgroei door begrazing (Dawson, 2000; Dawson et al., 2003).



Figuur 15

Effect van maaien en stikstofbemesting op de lengte van wortelharen (Dawson, 2000 en Dawson et al., 2003).

Naast verschillen tussen soorten zijn ook tegenovergestelde reacties op maaifrequentie bij verschillende genotypen van eenzelfde soort gemeten (Dawson, 2000).

Beweidingsstelsel en worteling

Standweiden kan tot een hogere wortelmassa leiden dan omweiden, wanneer de optimale veebezetting niet wordt overschreden (Deinum, 1985). Bij standweiden wordt het gras op een constante lengte gehouden waardoor de fotosynthese ook relatief constant blijft. Er hoeft dan minder aanspraak te worden gemaakt op wortelreserves voor het opnieuw uitschieten van het gras, zoals bij omweiden het geval is.

Hier komt nog bij dat bij standweiden het gras minder kans krijgt om stengel en zaad te schieten waardoor er minder aanspraak wordt gemaakt op wortelreserves. Gras zal bij stengel- en aarvorming alle energie investeren in de zaadvorming (Parsons, 1981) en dit gaat ten koste van het wortelstelsel (Troughton, 1978b). Wanneer de veebezetting te hoog is en het bladoppervlak te klein, kan standweiden de groei van de wortels juist tegenwerken. Het bladoppervlak is dan niet groot genoeg om zonder wortelreserves uit te schieten. Hiermee kunnen wortelreserves worden uitgeput (Deinum, 1985) (Figuur 11).

Voor het benoemen van een maatregel voor toename van wortelgroei zou eerst het optimum gevonden moeten worden tussen beweidingsstelsel (~ maaifrequentie) en veebezetting (~ maaivoerhoogte).

5.2.3.4 Leeftijd grasland, grondbewerking en vruchtwisseling

Verschillende bronnen geven aan dat oude graslanden over het algemeen een oppervlakkiger worteling hebben dan jong grasland (persoonlijke communicatie J. Visscher, LBI; Van Eekeren et al., 2008).

Zoals in vorige paragrafen is besproken heeft management een groot effect op de worteling en dit zal uiteraard sterk verschillen tussen oude en jonge graslanden. Harde uitspraken over de maatregel graslandvernieuwing kunnen hier daarom niet worden gedaan. Temeer omdat graslandvernieuwing leidt tot een sterke verhoging van de nitraatgehalte in de bodem, dat afhankelijk van tijdstip, bodemsoort, neerslag etc. tot uitspoeling kan leiden (Hoving en Velthof, 2006). Daarnaast heeft het een negatieve invloed op het bodemleven, waaronder de hoeveelheid regenwormen (Van Eekeren et al., 2008). Graslandbeheer zou zich daarom meer moeten richten op behoud en bevorderen van diepe en intensieve worteling in blijvend grasland (waarvoor onderzoek nodig is), dan dat te bereiken door graslandvernieuwing.

5.2.4 Overige factoren

5.2.4.1 Vochtvoorziening

Sinds de jaren '60 is een aantal studies gedaan waarin het effect van verschillende vochttoestanden van de bodem op de wortelgroei van grassen werd onderzocht.

Over het algemeen kan er worden geconcludeerd dat droogte een negatief effect heeft op worteling (Troughton, 1978a). Beregening zorgt na droogte voor een snelle groei van wortels (Troughton, 1980), maar frequente beregening helpt niet. De behandeling waar maar één maal per seizoen was beregend had de grootste ondergrondse biomassa en de diepste worteling. Dit komt overeen met het feit dat bij frequente en oppervlakkige beregening de wortels boven in het profiel blijven, terwijl als het hele bodemprofiel vochtig is, de wortels gestimuleerd worden om dieper te groeien (Appadurai en Holmes, 1964).

De literatuur is niet eenduidig over droogtetolerantie en wortel-spruitverhouding. Waarschijnlijk heeft dit te maken met het feit dat vochtvoorziening veel invloed heeft op de beschikbaarheid van nutriënten, in het bijzonder van fosfaat. Wanneer P niet beperkend is en de plant ondanks droogte toch genoeg fosfaat kan opnemen, dan kan de bovengrondse groei zich beter doorzetten dan de wortelgroei. Onder een situatie van P-

tekort heeft droogte echter zoveel effect op de P-opname dat de bovengrondse groei achterblijft (Powell, 1977) en netto een verhoging van de wortel-spruitverhouding kan optreden (Gales, 1979).

De vochtvoorziening is een belangrijke factor voor wortelgroei. Droogte, zeker in combinatie met P-tekort, werkt negatief op de wortelgroei. Als er berekend moet worden is het beter voor de wortelontwikkeling om minder vaak en langer achter elkaar te beregenen.

5.2.4.2 Lichtintensiteit en temperatuur

Onderhoud van het wortelstelsel kost energie. Gras dat bijvoorbeeld in de schaduw groeit, probeert meer bladoppervlak te vormen om meer zonlicht op te vangen. Dit gaat ten koste van wortelenergie. Onderzoek in Nieuw-Zeeland heeft uitgewezen dat bij beschaduwden van Engels raaigras de wortels langer en dunner worden (hogere SWL). De wortellengtegroei nam na beschaduwden tijdens de opvolgende tien dagen af, maar nam vervolgens weer toe en bereikte rond dag 20 het niveau van vóór de start van het beschaduwden (Evans, 1971). De effecten waren sterker als meer werd beschaduwd.

Naast lichtintensiteit zijn bodem- en luchttemperatuur belangrijk voor een goede gras- en wortelgroei. Opwarmen van de bodem in het voorjaar gaat sneller als de grond minder water en meer humus en lucht bevat. Davidson (1969b) bestudeerde het effect van bodemtemperatuur op de wortel-spruitverhouding van verschillende grassoorten. Bij de temperatuur met de hoogste bovengrondse opbrengst (ca. 20°C voor soorten als Engels raaigras) was de wortel-spruitverhouding het laagst; bij afwijkende temperaturen steeg de verhouding.

5.2.5 Samenvattend overzicht

Tabel 13 geeft een overzicht van de factoren en potentiële maatregelen om de droogtetolerantie van graslanden te vergroten. In de tabel wordt ook het (mogelijk) achterliggende mechanisme beschreven.

Tabel 13

Factoren en potentiële maatregelen die de beworteling van grasland beïnvloeden (- negatief, + positief, ? literatuur niet eenduidig)

Overeenkomstige cellen in omliggende regels duiden op relatie tussen mechanisme en factor.

Categorie	Hoofdfactor	Deelfactor (en effect op beworteling)	Mechanisme	Potentiële maatregel of oplossingsrichting
Bodem	Fysische toestand	Bodemverdichting (-) Diepte zwarte laag / organische stof (+)	Fysieke hinder; teveel vocht en luchttekort Lagere indringingsweerstand; gunstige bodemstructuur; nutriëntenlevering via wortellexudaten; gunstige vochthuishouding	Voorkomen vertrapping en structuurschade Op peil houden van organisch stofgehalte
	Chemische toestand	pH (zure grond: -)	Beschikbaarheid Ca en Mg	pH op peil houden
		P-toestand (- en +)	Zowel verhoging als verlaging van het wortelaandeel gevonden bij lagere P-toestand; effect sterk afhankelijk van interactie met andere groeifactoren (N, vocht)	
	Bodembologisch	Regenwormen (+)	Doorwortelbare gangen; nutriëntenlevering	Bevorderen van regenwormen (aantallen, functionele diversiteit, activiteit)
Gewas	Maatregelen bij inzaai	Gerst meezaaien (+?)	Doorwortelbare gangen, voorkomen bodemverdichting	Snelgroeiend / diepwortelend gewas als dekvrucht gebruiken Hogere zaaidichtheid (?) Grassoortenmengsels, gras-klaver/kruiden
		Zaadbehandeling (+)	Bemesting, wortelziektepreventie	
		Zaaidichtheid (+?)	Concurrentie voor nutriënten en vocht	
		Soorten mengsels (+)	Concurrentie voor nutriënten en vocht	
	Rassen en veredeling	Rassen en soorten Veredeling	Genotypische verschillen Veredeling op beworteling mogelijk	Soorten en rassen kiezen met een diepe en intensieve beworteling
Management	Bemesting	Algemeen: (-) N: (-) P: (-/+) K: (0)	Algemeen: Tekort geeft hogere wortel-spruit-verhouding maar lagere wortelbiomassa Effect op wortelgroei en -vertakking, worteldiameter en wortelharen	Algemeen: N-niveau verlagen N-gift na maaien uitstellen N-gift toediening onder het maaiveld
		Humuszuren (+)	Humuszuren: verhoogde wortellengte, betere P-opname	Humuszuren aan bodem toedienen vóór het zaaien
	Maaien en beweiden	Maaihoogte (-/+) Maalfrequentie (-/+) Beweidingsstelsel (omweiden versus standweiden)	Fysiek: verdichting bodem door machines en vertrapping door vee Fysiologisch: fotosyntheseactiviteit, verdeling van suikers Effect op spruitdichtheid Interactie met bemesting, grassoort	Hoger maaien cq. lagere veebezetting Minder frequent maaien cq. minder frequent beweiden

Categorie	Hoofdfactor	Deelfactor (en effect op beworteling)	Mechanisme	Potentiële maatregel of oplossingsrichting
			Evenwicht tussen fotosynthese, bovengrondse groei, wortelgroei, aanspraak op reserves, nutriënt- en vochtopname bepaalt effect. korte termijn effect van maaien is negatief, maar wanneer de spruitdichtheid toeneemt neemt de beworteling van de zode toe	
	Leeftijd grasland	Leeftijd grasland (-) Grondbewerking (-/+) (scheuren en herinzaai)	Verdichting? Verdeling organische stof? Verdichting (-) / beluchting (+); verdeling organische stof (-/+); bodemleven (-)	Grasland vernieuwen?
Overige factoren		Vochtvoorziening (-/+)	Effect sterk afhankelijk van interactie met nutriëntenbeschikbaarheid. Verschillen tussen grassoorten.	Beregenen: minder vaak maar langer achter elkaar. Voorkomen droogtestress
		Lichtintensiteit (-/+) Bodemtemperatuur	Fotosyntheseactiviteit, dunnere wortels Wortel-spruitverhouding het hoogst buiten het temperatuuroptimum voor bovengrondse groei.	

5.3 Discussie en conclusie

In deze literatuurstudie is gebruik gemaakt van korte en langlopende onderzoeken om de factoren die de beworteling van graslanden beïnvloeden. De nadruk heeft gelegen op bewortelingsdiepte, omdat bij de eerder uitgevoerde veldstudie en modellenstudie deze factor de grootste van betekenis is gebleken voor de droogtetolerantie van grasland in de Gelderse Vallei. Op basis van de literatuur zijn potentiële maatregelen geïnventariseerd die in de agrarische praktijk zouden kunnen worden ingevoerd. In meerdere gevallen is echter nog onvoldoende ervaring opgedaan, en moet een voorstel eerder als oplossingsrichting worden beschouwd (bij toepassing als pilot in de praktijk te vergezellen van validerend onderzoek).

5.3.1 Maatregelen voor droogtetolerantie van grasland

Binnen de kaders die beworteling fysiek aan de bodem stelt is het mogelijk om grasland dieper en intensiever te laten bewortelen als gevolg van management. Maatregelen bij de inzaai, aangepaste bemesting, maai- en beweidingstrategieën zijn de belangrijkste instrumenten hiervoor. Uit de literatuur is gebleken dat er van sommige maatregelen een duidelijk effect verwacht kan worden, terwijl dat voor sommige niet eenduidig te zeggen is. De meest veelbelovende maatregelen voor de praktijk om de bewortelingsdiepte te vergroten zijn:

- Voorkomen van vertrapping, structuurschade, en werken aan de herstelcapaciteit van de bodem
 - Verhogen organische stof
 - pH op peil houden
 - Bevorderen van aantallen en activiteit van regenwormen, vooral pendelaars
- Bij inzaai
 - Snelgroeïende diepwortelende gewassen als dekvrucht gebruiken (bijvoorbeeld gerst)
 - Grassoorten kiezen met een diepe en intensieve beworteling zoals Rietzwenkgras
 - Grasrassen kiezen met een diepe en intensieve beworteling zoals diploïde rassen van Engels raigras
- Via bemesting
 - N-niveau verlagen
 - Uitstel van N-gift na maaien
 - N-gift toediening onder het maaiveld
- Maaien en beweiden
 - Hoger maaien cq. lagere veebezetting
 - Minder frequent maaien cq. minder frequent beweiden

6 Slotbeschouwing

Regionaal waterbeheer is er bij gebaat dat water beter wordt vastgehouden in agrarische percelen. Met een betere beworteling van grasland hoeft er minder beregend te worden omdat het wortelstelsel een groter ruimtelijk bereik heeft en het beschikbare water in de wortelzone daarmee groter is. Naast een groter bereik kan ook door intensievere beworteling een effectieve wateropname worden gerealiseerd. Door een voortdurende aangroei en afsterven van wortels zal op langere termijn ook het organisch stofgehalte toenemen. Dit is voedsel voor het bodemleven, dat zodoende wordt gestimuleerd. Zowel organische stof als bodemleven dragen bij aan buffering van pieken en dalen in neerslag.

Via beheersmaatregelen is het mogelijk graslanden droogteresistenter te maken. Dit kan deels door het peilbeheer aan te passen, en deels de ondergrondse ontwikkeling van grasland centraal te stellen. De uitkomsten van dit project zijn vernieuwend in zoverre dat de 'traditioneel' gangbare nadruk op organische stof als primair toetskenmerk voor goede bodemkwaliteit zou moeten worden verruild voor bewortelingsgraad en -diepte als belangrijkste stuurvariabelen voor beheer - althans in het kader van droogteproblematiek en *climate proofing* van de veehouderij op zandgrond.

6.1 Betekenis voor agrarische praktijk

Voor de agrarische praktijk zal klimaatadaptatie betekenen dat er minder uitsluitend naar bovengrondse opbrengst wordt gekeken, en vaker ook naar de effecten van management op de ondergrondse ontwikkeling van grasland, om perioden van droogte zonder schade te kunnen overbruggen.

De literatuurstudie laat zien dat er een breed scala aan maatregelen beschikbaar is om hiertoe in te zetten, gericht op bodem, bemesting en zaaigoed. Hoewel sommige maatregelen pas op de langere termijn effect sorteren, liggen er ook mogelijkheden op de korte termijn. Veehouders zouden vanaf vandaag rekening kunnen houden met beworteling door bijvoorbeeld de mengselkeuze aan te passen.

Tijdens de veldstudie fase van dit project werd al samengewerkt met agrariërs. De bemonstering heeft plaatsgevonden op twintig bedrijven in de Gelderse Vallei, die al actief bezig zijn met bodemvruchtbaarheid en droogtetolerantie van grasland. Om deze gedragsverandering in bredere kring navolging te doen vinden kan worden gedacht aan verschillende bestuurlijke en beleidsmatige benaderingen:

- Het verkrijgen van een vergunning voor beregening koppelen aan maatregelen voor het vergroten van de droogtetolerantie: een soort 'voor wat hoort wat' principe. Ook het waterschap zou hierbij betrokken kunnen worden in het uitwerken van een dergelijk raamwerk. In de zuidelijke provincies wordt er al gewerkt aan een dergelijk raamwerk door de ZLTO en betrokken partners.
- Het opnemen van deze maatregelen in een demoregeling zoals Bloeiend Bedrijf (zie www.bloeiendbedrijf.nl). Een demoregeling heeft als voordeel dat er veel praktijkkennis wordt opgedaan en dat agrariërs een vergoeding krijgen voor hun inzet. Dit zorgt voor een actieve participatie en veel uitwisseling van ervaringen.
- In het kader van de herziening van het Gemeenschappelijk Landbouwbeleid (GLB) kunnen bepaalde maatregelen ook gezien worden als groen-blauwe diensten. Bijvoorbeeld het werken met graslandmengsels is een maatregel voor een grotere droogtetolerantie, en geeft tegelijkertijd meer biodiversiteit.

Management maatregelen kunnen in de praktijk worden getoetst op inpasbaarheid door op experimentele basis met boeren samen te werken. Daarnaast is bewustwording en kennisoverdracht nodig, zodat veehouders beter beseffen welke mogelijkheden zij hebben om de droogtetolerantie van hun grasland te vergroten.

Om de maatregelen in de agrarische praktijk te brengen zijn verschillende benaderingen mogelijk. Samenwerking met agrariërs is belangrijk voor kennisoverdracht en bewustwording. Belangrijk is ook dat de maatregelen deel uit gaan maken van een structureel raamwerk, bijvoorbeeld gekoppeld worden aan het verstrekken van vergunningen voor beregening, onderdeel zijn van een demoregeling, of als groen-blauwe diensten in aanmerking komen voor financiële compensatie.

6.2 Betekenis voor waterbeheer

(Bijdrage van Dick van Pijkeren en Marinus van Dijk)

Kijk eens wat vaker onder de graszode! Wat moet het waterschap daar mee?

Het project 'Kijk eens wat vaker onder de graszode' heeft veel interessante resultaten opgeleverd. Het heeft meer inzicht gegeven in de potentie van maatregelen in de bodem als adaptatiemaatregel voor de verwachte klimaatverandering op hoge zandgronden. Door bodemstructuurverbetering worden gewassen minder afhankelijk van grondwater en beregening. Er wordt meer water vastgehouden in de bodem, waardoor droogteperioden beter overbrugd kunnen worden. In de onderzoeksresultaten zijn ook andere maatregelen benoemd die de waterhuishouding beïnvloeden. Met name het stimuleren van een grotere bewortelingsdiepte blijkt een erg effectieve maatregel te zijn in de bevordering van vochtresistentie.

De positieve effecten van de maatregelen hebben voor een groot deel te maken met bodemvocht en waterhuishouding. De link tussen deze effecten en het belang daarvan voor waterbeheerders is snel gelegd. Maar op welk vlak liggen die belangen dan concreet? En op welke manier wordt daar door maatregelen in de bodem invulling aan gegeven? Deze paragraaf gaat verder in op deze vragen, en kijkt alvast vooruit naar vervolgvragen en onderzoek.

Aanknopingspunten

Dit project haakt op meerdere punten aan op het beleid en/of belang van het waterschap:

- Zoetwatervoorziening/klimaatadaptatie

In het Deltaprogramma Zoetwatervoorziening wordt in beeld gebracht wat de gevolgen kunnen zijn van klimaatverandering op de (zoet)watervoorziening van Nederland. Voor de hoge zandgronden is geconcludeerd dat klimaatverandering kan leiden tot dieper wegzakkende grondwaterstanden en dat deze perioden van droogte langer kunnen gaan duren. Omdat er in deze gebieden geen water van elders kan worden ingelaten, zijn maatregelen om deze effecten te compenseren altijd gericht op het efficiënter benutten van het gebiedseigen water en de neerslag. Duurzaam bodembeheer past uitstekend in deze strategie en is daarom voor de hoge zandgronden één van de weinige kansrijke maatregelen.

- Wateroverlast

Door het toepassen van duurzaam bodembeheer neemt niet alleen het organische stofgehalte in de bodem toe, met de hiervoor beschreven positieve effecten op uitspoeling en vochthuishouding, maar ook de bodemstructuur verbetert, waardoor de infiltratiecapaciteit van de bodem toeneemt. Er vindt met andere woorden minder snel verdichting/verslemping plaats, zodat oppervlakkige afvoer vermindert. Oppervlakkige afvoer - het direct afstromen van neerslag over het maaiveld, zonder eerst in de bodem te zijn geïnfiltrerd, is in de Gelderse Vallei en de meeste (zand)gronden de belangrijkste oorzaak van het ontstaan van afvoerpieken en daarmee hoogwatersituaties en wateroverlast. Duurzaam bodembeheer draagt bij aan het verminderen van afvoerpieken, omdat de berging in de bodem

beter benut wordt, doordat er meer water kan infiltreren als gevolg van de verbeterde bodemstructuur. De gevallen neerslag blijft langer bovenstrooms in het stroomgebied, waardoor benedenstrooms wateroverlast vermindert.

- **Landbouw**

Achterblijvende gewasopbrengsten als gevolg van droogte zijn niet altijd merkbaar. Toch blijkt uit berekeningen dat in de Gelderse Vallei de gerealiseerde gewasopbrengst door droogte zo'n 5-15% achterblijft bij de potentiële opbrengst. Deze droogteschade treedt vooral op in de hogere en drogere delen van het watersysteem, waar voor het waterschap minder stuurmogelijkheden zijn met bijvoorbeeld kunstwerken. Beregening uit oppervlaktewater is in deze gebieden vaak niet mogelijk. Maatregelen op het gebied van bodembeheer en bodemstructuur zijn dan bij uitstek geschikt om droogteschade te verminderen.

- **KRW: stromend houden van beken**

In het gebied van waterschap Vallei en Veluwe zijn verreweg de meeste waterlichamen gekarakteriseerd als stromend water (R-type). Een belangrijke voorwaarde voor ecologisch herstel van deze waterlichamen is het te allen tijde of zo lang mogelijk behouden van stroming. Door de huidige, in algemene zin op landbouwkundig gebruik gerichte inrichting van het watersysteem - diepe beken, intensieve detailontwatering, wordt de meeste neerslag snel afgevoerd. Als gevolg hiervan vallen bij droogte de beken relatief snel stil of zelfs droog. In stroomgebieden als bijvoorbeeld de Schuitenbeek werkt dit direct door in de KRW-resultaten. Door het verbeteren van het vochtvasthoudend vermogen van percelen wordt de sponswerking gedeeltelijk hersteld. Bij grootschalig toepassen heeft dit naar verwachting een positief effect op de watervoerendheid van de beken en daarmee op de haalbaarheid van de KRW-doelen in deze waterlichamen.

- **KRW: nutriëntenbelasting**

Het verbeteren van de waterkwaliteit is een noodzakelijke voorwaarde voor het behalen van de KRW-doelen in de waterlichamen. Duurzaam bodembeheer kan leiden tot een efficiëntere omzetting van nutriënten - stikstof en fosfor - in de bodem, zodat er minder mest hoeft te worden toegepast en er minder uit- en afspoeling plaatsvindt naar het oppervlaktewater. In veel gevallen zorgt een betere vochtuithouding in de bodem voor een effectiever opname van meststoffen door het gewas.

Strategisch

Naast de inhoudelijke aanknopingspunten zijn er ook nog enkele andere redenen die het voor het waterschap aantrekkelijk maken tijd en aandacht te besteden aan duurzaam bodembeheer:

- Het past in een streven om actief bij te willen dragen aan een duurzame leefomgeving. Het past ook in het huidige politieke klimaat van ondernemerszin en een faciliterende overheid.
- De hoge zandgronden, waaruit het gebied van Vallei en Veluwe grotendeels bestaat, hebben in het Deltaprogramma zoetwatervoorziening een andere plaats dan de lage delen van Nederland. De focus in het programma richt zich op verzilting en de interactie hoofdwatersysteem - regionaal systeem. Dit betekent dat de partijen in Brabant, Overijssel en Gelderland meer dan de rest van Nederland zelf oplossingen zullen moeten uitwerken en implementeren.
- Duurzaam bodembeheer valt precies in de niche van waterschappen: het is de link tussen landelijke en Europese doelen enerzijds en concrete gebieden, met al zijn mitsen en maren, anderzijds. Een waterschap heeft meerwaarde, omdat het hogere overheden kan helpen hun doelen te realiseren. Gebiedskennis, praktische watersysteemkennis, watersysteemmodellen, monitoringsgegevens e.d. zijn een ideale mix om effecten van duurzaam bodembeheer te kwantificeren en onderbouwen.

Aanbeveling

In deze notitie is een aantal inhoudelijke en strategische argumenten genoemd die aantonen dat het project duurzaam bodembeheer aansluit bij de doelen en opgaven van Waterschap Vallei en Veluwe. De meerwaarde voor het waterschap is echter alleen te halen als de principes van duurzaam bodembeheer op bovenlokale schaal toegepast worden. Een belangrijk onderdeel voor succes is gedragsverandering van individuele

agrariërs. Inzetten op het thema duurzaam bodembeheer zal daarom een lange adem vergen en een grootschalige aanpak. Desondanks blijft het een zeer aantrekkelijke optie voor het waterschap om dit op te pakken.

Voor het definiëren van de rol van het waterschap rond het onderwerp is inzicht nodig in taken, rollen en bevoegdheden van verschillende partijen/overheden die zich met het onderwerp klimaatadaptatie bezighouden. De opstelling van de waterschappen wordt voor een deel bepaald door de mogelijkheden en effecten van bodemmaatregelen. Die zullen nog concreter gemaakt moeten worden in watersysteemtermen. Hoeveel neemt de piekafvoer in natte omstandigheden af als de maatregelen op grote schaal worden toegepast? Waar en in welke mate worden KRW-doelstellingen daarmee gehaald? In hoeverre wordt hiermee invulling gegeven aan de trits vasthouden-bergen-afvoeren? Wat is de invloed op uitspoeling van fosfaat? Dragen maatregelen in de bodem bij aan het voldoen aan NBW-normen? De antwoorden op deze en andere vragen zijn essentieel voor de positiebepaling van de waterschappen.

Samenvattend kan een vervolg in een technisch spoor en in een beleidsmatig/strategisch spoor uitgewerkt worden:

- Effecten op regionaal niveau moeten met modelberekeningen bepaald en afgewogen worden. Verschillende (soorten) maatregelen kunnen daarmee 'objectief' vergeleken worden. Het kan daarvoor nodig zijn de bestaande modelschematisaties te verfijnen of aan te passen.
- Binnen het kader van de waterkwaliteit is het van belang om het verbeterde inzicht in het bodemsysteem te verwerken in waterkwaliteitsmodellen en uitspoelingsmodellen.
- Taken, rollen en bevoegdheden rond klimaatadaptatie en bodembeheer moeten verkend worden. Welke aanknopingspunten biedt huidig beleid? Welke schakels ontbreken? Op welke gebieden moet aanvullend beleid geformuleerd worden? Helderheid en duidelijkheid op dit gebied helpt bij het implementeren van beleid en technische maatregelen.
- Verdere communicatie met onder andere agrariërs. Van veel maatregelen in het (agrarisches) bodembeheer is al bekend dat ze verschillende positieve effecten hebben. Het uitdragen van deze boodschap hoeft niet te wachten op nog meer onderzoek of duidelijkheid in beleid. Daar waar kansen zich voordoen kan de theorie al omgezet worden in de praktijk.

Literatuur

- Akker, J.J.H. van den, 2001. Een inventarisatie van bodemfysische materiaalmodellen zoals toegepast in het landbouwkundig onderzoek. Rapport Delft Cluster samengesteld door Alterra, Wageningen, 47 pp.
- Anonymus, 2010. Het hoogste voersaldo per koe / Thermoseed in biologische graanteelt. In: Ekoland, januari 2010.
- Appadurai R.P. en W. Holmes, 1964 The influence of stage of growth, closeness of defoliation, and moisture on growth and productivity of a ryegrass-white clover sward. 1. Effect on herbage yield. J. Agric. Sci. 62: 327-332.
- Arredondo J.T. en D.A. Johnson, 1999. Root architecture and biomass allocation of three range grasses in response to nonuniform supply of nutrients and shoot defoliation. New. Phytol. 143: 373-385.
- Berendse, 1981. Competition between plant populations with different rooting depths. II. Pot experiments. Oecologia 48: 334-341.
- Beyrouy C.A., C.P. West en E.E. Gbur, 1990. Root development of bermudagrass and tall fescue as affected by cutting interval and growth regulators. Plant and Soil, 127: 23-30.
- Bingham, S., E. Lee, J. Rex Lee en the Rock Point Range Management Project, 1984. Living from livestock: Range management and ranch planning for Navajo Country.
- Bonos, S.A., D. Rush, K. Hignight en W.A. Meyer, 2004. Selection for deep root production in tall fescue and perennial Ryegrass. Crop Science 44:1770-1775.
- Boot, R.G.A. en M. Mensink, 1990. Size and morphology of root systems of perennial grasses from contrasting habitats as affected by nitrogen supply. Plant and Soil 129: 291-299.
- Braak, C.J.F. ter en P. Šmilauer, 2002. CANOCO Reference Manual and CanoDraw for Windows User's Guide: Software for Canonical Community Ordination (version 4.5). Ithaca, NY, USA (www.canoco.com): Microcomputer Power.
- Braak, C.J.F. ter en P. Šmilauer, 2002. CANOCO Reference Manual and CanoDraw for Windows User's Guide: Software for Canonical Community Ordination (version 4.5). Ithaca, NY, USA (www.canoco.com): Microcomputer Power.
- Canadell, J., R.B. Jackson en J.R. Ehleringer, 1996. Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale. Oecologia 108: 583-595.
- Cooper, R.J., Liu Chunhua en D.S. Fisher, 1998. Influence of Humic Substances on Rooting and Nutrient Content of Creeping Bentgrass. Crop Science 38: 1639-1644.
- Crush, J.R., H.S. Easton en J.E. Waller, 2006. Genetic variation in perennial ryegrass for root profile characteristics. In: Mercer C.F. (ed.) New Zealand Grassland Association Research and Practice Series No. 12, pp. 63 -65. Dunedin, New Zealand: New Zealand Grassland Association.
- Crush, J.R., S.N. Nichols en L. Ouyang, 2010. Adventitious root mass distribution in progeny of four perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) groups selected for root shape. New Zealand Journal of Agricultural Research 53: 193-200.
- Curll, M. en R.T. Wilkins, 1983. The comparative effects of defoliation, treading and excreta on a *Lolium perenne*-*Trifolium repens* pasture grazed by sheep. Journal of Agricultural Science 100, 451-460.
- Davidson, R.L., 1969a. Effects of soil nutrients and moisture on root/shoot ratios in *Lolium perenne* L and *Trifolium repens* L. Annals of Botany 33:571-577.
- Dawson, L.A., S.J. Grayston en E. Paterson, 2000. Effects of grazing on the roots and rhizosphere of grasses. Chapter 4 In: Lemaire G, Hodgson J, de Moraes A, de Carvalho FP, Nabinger C, eds. Grassland ecophysiology and grazing ecology. Wallingford, UK: CABI Publishing, 61-84.
- Dawson, L.A., B. Thornton, S.M. Pratt en E. Paterson, 2003. Morphological and topological responses of roots to defoliation and nitrogen supply in *Lolium perenne* and *Festuca ovina*. New Phytologist 161:811-818.

- Deinum, B., 1985. Root mass of grass swards in different grazing systems. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 33, 377-384.
- Deru, J., N. van Eekeren en H. de Boer, 2012. Rooting density of three grass species and eight *Lolium perenne* varieties. p. 604-606. In *Grassland - a European resource? 24th General Meeting of the European Grassland Federation*. Lublin, Poland. 3 -7 June 2012.
- Deru, J., N. Van Eekeren, J. de Wit en H. de Boer, 2011. Effect van grassoort en N bemestingsniveau op productie, beworteling en N-mineraal in de herfst. Veldproef op zandgrond met Engels Raaigras, Kroppaar en Rietzwenkgras. Louis Bolk Instituut, Driebergen en Wageningen UR.
- Douglas, J.T., A.J. Koppi en C.J. Moran, 1991. Changes in soil structure induced by wheel traffic and growth of perennial grass. *Soil and Tillage Research*, 23: 61-72.
- Drew, M.C., 1975. Comparison of the effects of a localised supply of phosphate, nitrate, ammonium and potassium on the growth of the seminal root system and the shoot in barley. *New Phytol.* 75, 479-490.
- Eekeren, N. van, 1993. Basis concepts of range management and the implications for Malakand Division. DHV Consultants, Amersfoort.
- Eekeren, N. van, Bommelé L., Bloem J., Schouten A.J., Rutgers M., De Goede R., Reheul D., Brussaard L. (2008) Soil Biological quality after 36 years of ley-arable cropping, permanent grassland and permanent arable cropping. *Applied Soil Ecology* 40: 432-446.
- Eekeren, N. van, M. Bos, J. de Wit, H. Keidel en J. Bloem, 2010. Effect of different grass species mixtures on soil quality in relation to root biomass and grass yield. *Applied Soil Ecology* 45: 275-283.
- Eekeren, N. van, H. de Boer, J. Bloem, T. Schouten, M. Rutgers, R. de Goede en L. Brussaard, 2009. Soil biological quality of grassland fertilized with adjusted cattle slurries in comparison with organic and inorganic fertilizers. *Biol Fertil Soils* 45: 595-608.
- Eekeren, N. van, E. Heeres en F. Smeding, 2003. Leven onder de graszode: discussiestuk over het beoordelen en beïnvloeden van bodemleven in de biologische melkveehouderij. LV 52, Louis Bolk Instituut, Driebergen.
- Eekeren, N. van, P.J. Murray en F.W. Smeding, 2007. Soil biota in grassland, its ecosystem services and the impact of management. In: De Vliegheer, A., Carlier, L. *Permanent and Temporary Grassland: Plant, Environment and Economy*. Grassland Science in Europe.
- Eekeren, N. en J. van Bokhorst, 2009. Beoordeling bodemkwaliteit zandgrond: een inventarisatie van bodemindicatoren voor de veehouderij. Zorg voor Zand rapport nr 7. Louis Bolk Instituut, Driebergen.
- Eekeren, N. van en J. Bokhorst, 2010. Bodemkwaliteit en klimaatadaptatie onder grasland op het Utrechtse Zand. Rapport Louis Bolk Instituut, Driebergen, Nr. 2010-031 LbD, 39 blz.
- Ennik, G.C., 1981. Grasgroei en beworteling. CABO-verslag nr. 38, Centrum voor Agro Biologisch Onderzoek, Wageningen.
- Ennik, G.C., M. Gillet en L. Sibma, 1980. Effect of high nitrogen supply on sward deterioration and root mass. The role of nitrogen in intensive grassland production. Prins W.H. & G.H. Arnol (ed.). Pudoc, Wageningen. pp 67-76.
- Evans, P.S., 1971. Root growth of *Lolium-perenne* L. 2. Effects of defoliation and shading. *New Zealand Journal of Agricultural Research* 14: 552-562.
- Evans, P.S., 1972. Root growth of *Lolium perenne* L. 3. Investigation of mechanism of defoliation-induced suppression of elongation. *New Zealand Journal of Agricultural Research* 15: 347-.
- Evans, P.S., 1977. Comparative root morphology of some pasture grasses and clovers. *N.Z. Journal Agricultural Research* 20, 331-335.
- Evans, P.S., 1978. Plant root distribution and water use patterns of some pasture and crop species. *N.Z. Journal of Agricultural Research* 21, 261-265.
- Faber, J.H., G.A.J.M. Jagers op Akkerhuis, J. Bloem, J. Lahr, W.H. Diemont en L.C. Braat, 2009. Ecosysteemdiensten en bodembeheer : maatregelen ter verbetering van biologische bodemkwaliteit. Alterra-rapport 1813, Alterra, Wageningen.

- Fairley, R.I., 1985. Grass root production in restored soil following opencast mining. In: Fitter A.H., Atkinson D., Read D.J., Usher M.B. (1985) Ecological Interactions in Soil. British Ecological Society, special publication 4: 81-85.
- Fitter, A.H., 1985. Functional significance of root morphology and root system architecture. In: Fitter A.H., Atkinson D., Read D.J., Usher M.B. (1985) Ecological Interactions in Soil. British Ecological Society, special publication 4: 81-85.
- Föhse, D., N. Claassen en A. Jungk, 1988. Phosphorus efficiency of plants I. External and internal P requirement an P uptake efficiency of different plant species. *Plant and Soil* 110, 101-109.
- Forde, B. en H. Lorenzo, 2001. The nutritional control of root development. *Plant and Soil* 232: 51-68.
- Fransen, B, H. de Kroon en F. Berendse, 1998. Root morphological plasticity and nutrient acquisition of perennial grass species from habitats of different availability. *Oecologia* 115: 351-358.
- Frissel, J.Y., E. Hazebroek en T.C.P. Melman, 2005. Extensief graslandbeheer op zeedijken. Effecten op de vegetatie, erosiebestendigheid en mogelijkheden voor exploitatie van aangepast beheer na een periode van 13 jaar. Wageningen, Alterra, Alterra rapport 1084, pp 52.
- Gales, K., 1979. Effects of water supply on partitioning of dry matter between roots and shoots in *Lolium perenne*. *Journal of Applied Ecology* 16: 863-877.
- Garwood, E.A. en J. Sinclair, 1979. Water-use and root distribution of grass species. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 29:834-834.
- Garwood, E.A., K.C. Tyson en J. Sinclair, 1979. Use of water by 6 grass species. 1. Dry-matter yields and response to irrigation *Journal of Agricultural Science* [0021-8596] / vol:93 iss:AUG pg:13 -24
- Genuchten, M. Th. Van, 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* 44(3): 892-898.
- Gibbs, R.J. en B. Reid, 1992. comparison between net and gross root production by winter-wheat and by perennial ryegrass. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science* 20: 483-487.
- Goedewagen, M.A.J., 1954. De oecologie van het wortelstelsel der gewassen. In: De plantenwortel in de landbouw. Voordrachten in het kader van het Nederlands Genootschap voor Landbouwwetenschap.
- Haans, J.C.F.M. 1979. De interpretatie van bodemkaarten: rapport van de Werkgroep interpretatie bodemkaarten, stadium C. Wageningen: Stichting voor Bodemkartering. Rapport / Stichting voor Bodemkartering (no. 1463). 221 pp.
- He, Z.L., V.C. Baligar, D.C. Martens, K.D. Ritchey en M.A. Elrashidi, 1999. Relationship of ryegrass growth to extractable phosphorus in acidic soil amended with phosphate rock, coal combustion by-products, limestone and cellulose. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 30 (3&4): 457-470.
- Hodge, A, J. Stewart, D. Robinson, B.S. Griffiths en A.H. Fitter, 2000. Competition between roots and soil micro-organisms for nutrients from nitrogen-rich patches of varying complexity. *Journal of Ecology* 88: 150-164.
- Hogenkamp, W., 2008. Graszaad met jasje van voedingsstoffen. In: *Boerderij* 93 nr 22 (26 februari 2008).
- Hoogerkamp, M., H. Rogaar en H.J.P. Eysackers, 1983. Effects of earthworms on grassland on recently reclaimed polder soils in the Netherlands. In: *Earthworm ecology: from Darwin to vermiculture*. Satchell, J.E (ed.). Chapman and Hall. London: pp 85-105.
- Houlbrooke, D.J., E.R. Thom, R. Chapman en C.D.A. McLay, 1997. A study of the effects of soil bulk density on root and shoot growth of different ryegrass lines. *New Zealand Journal of Agricultural Research* 40: 429-435.
- Hoving I., en G. Velthof, 2006. Landbouw- en milieukundige effecten van graslandvernieuwing op zand- en kleigrond. ASG / Alterra. Praktijkrapport Rundvee 83.
- Humphreys, M.W., L.B. Turner, S.A. O'Donovan, C.J.A. Macleod, I.P. King, W.R. Whalley en P.M. Haygarth, 2010. Grass root turn-over for improved soil hydrology to combat flooding. *Grassland Science in Europe*, Vol 15, Oral Presentation: Grassland in a changing world. Proceedings of the 23rd General meeting of the European Grassland Federation, Kiel, Germany, 29 August - 2 September 2010, Schnyder, H., Isselstein, J., Taube, F., Auerswald, K., Schelberg, J. et al. (Eds). European Grassland Federation, 764-766.

- Hutchings, M.J. en E.A. John, 2004. The effects of environmental heterogeneity on root growth and root/shoot partitioning. *Annals of Botany* 94: 1-8.
- Jackson, R.B., J. Canadell, J.R. Ehleringer, H.A. Mooney, O.E. Sala en E.D. Schulze, 1996. A global analysis of root distribution for terrestrial biomes. *Oecologia* 108: 389-411.
- Jarvis, S.C. en J.H. Macduff, 1989. Nitrate nutrition of grasses from steady-state supplies in flowing solution culture following nitrate deprivation and/or defoliation: I. Recovery of uptake and growth and their interactions. *Journal of Experimental Botany* 40, 965-976.
- Kreuzer, K., M. Bonkowski, R. Langel en S. Scheu, 2004. Decomposer animals (Lumbricidae, Collembola) and organic matter distribution affect the performance of *Lolium perenne* (Poaceae) and *Trifolium repens* (Fabaceae). *Soil Biology & Biochemistry* 36: 2005-2011.
- Kutschera, L. en E. Lichtenegger, 1982. *Wurzelatlas mitteleuropäischer Grünlandpflanzen. Band 1 Monocotyledoneae*. Stuttgart, Gustav Fischer Verlag.
- Kutschera, L., E. Lichtenegger en M. Sobotik, 2009. *Wurzelatlas der Kulturpflanzen gemässiger Gebiete mit Arten des Feldgemüsebaues. 7. Band*. Frankfurt am Main, DLG-Verlag.
- Kuzyakov, Y., 2002. Factors affecting rhizosphere priming effects. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 165: 382-396.
- Laine, P., A. Ourry, J. Boucaud en J. Salette, 1998. Effects of a localized supply of nitrate on NO₃⁻ uptake rate and growth of roots in *Lolium multifolium* Lam. *Plant and Soil* 202:61-67.
- Loo, E.N. van, O. Dolstra, M.O. Humphreys, L. Wolters, W. Luessink, J. de Riek en N. Bark, 2003. Lower nitrogen losses through marker assisted selection for nitrogen use efficiency and feeding value in ryegrass (Nimgrass). *Vortrage für Pflanzenzüchtung*, 59, 270–279. (in Crush, 2007)
- Macdonald, L.M., E. Paterson, L.A. Dawson, A.J.S. McDonald, 2006. Defoliation and fertiliser influences on the soil microbial community with two contrasting *Lolium perenne* cultivars. *Soil Biology and Chemistry* 38 (2006) 674-682.
- Mackie-Dawson, L.A., 1999. Nitrogen uptake and root morphological responses of defoliated *Lolium perenne* (L.) to a heterogeneous nitrogen supply. *Plant and Soil* 209: 111-118.
- Macklon, A.E.S., L.A. Mackie-Dawson, A. Sim, C.A. Shand en A. Lilly, 1994. Soil P resources, plant growth and rooting characteristics in nutrient poor upland grasslands. *Plant and Soil* 163: 257-266.
- MacQueen, J.B, 1967. Some Methods for classification and Analysis of Multivariate Observations. 1. Proceedings of 5th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability. University of California Press. pp. 281–297.
- Messmer, M. I. Hildermann, K. Thorup-Kristensen en Z. Rengel, 2012. Nutrient management in organic farming and consequences for direct and indirect selection strategies. In: Lammerts van Bueren E.T. en Myers J.R. (Eds). *Organic Crop Breeding*. John Wiley and Sons, UK.
- Mommer, L., J. van Ruijven, H. de Caluwe, A.E. Smit-Tiekstra, C.A.M. Wagemaker, N.J. Ouborg, G.M. Bogemann, G.M. van der Weerden, F. Berendse en H. de Kroon, 2010. Unveiling below-ground species abundance in a biodiversity experiment: a test of vertical niche differentiation among grassland species. *J. of Ecology* 98: 1117-1127.
- Murphy, J.A., Zaurov D.E. (1994) Shoot and root-growth response of perennial ryegrass to fertilizer placement depth. *Agronomy Journal* 86:828-832.
- Mytton, L.R., A. Cresswell en P. Colbourn, 1993. Improvement in soil structure associated with white clover. *Grass and Forage Science*, Volume 48, 84-90.
- Ourry, A., J. Bigot en J. Boucaud, 1989. Protein mobilization from stubble and roots, and proteolytic activities during post-clipping re-growth of perennial ryegrass. *Journal of Plant Physiology* 134:298-303.
- Pant, H.K., M.B. Adjei, J.M.S. Scholberg, C.G. Chambliss en J.E. Rechcigl, 2004. Forage production and phosphorus phytoremediation in manure-impacted soils. *Agronomy Journal* 96:1780-1786.
- Parsons, A.J. en M.J. Robson, 1981. Seasonal-changes in the physiology of S24-perennial ryegrass (*Lolium perenne* L) .3. partition of assimilates between root and shoot during the transition from vegetative to reproductive growth. *Annals of Botany* 48:733-744.
- Powell, C.L., 1977. Effect of phosphate fertilizer and plant density on phosphate inflow into ryegrass roots in soil. *Plant and Soil* 47:383-393.

- Robinson, D., D. Linehan en D.C. Gordon, 1994. Capture of nitrate from soil by wheat in relation to root length, nitrogen inflow and availability. *New Phytol.*: 128, 297-305.
- Schaffers, A.P., J.Y. Frissel, M.H.C. van Adrichem en H.P.J. Huiskes, 2010. Seizoensverloop in de doorworteling van dijkgrasland. VTV toetsing buiten het winterseizoen nader bekeken. Alterra-rapport 2012. Alterra, Wageningen.
- Scheu, S., 2003. Effects of earthworms on plant growth: patterns and perspectives. *Pedobiologia* 47, 846–856, 2003.
- Schuermans, J.J., 1954. De bewortelingsproblemen op grasland. In: De plantenwortel in de landbouw. Voordrachten in het kader van het Nederlands Genootschap voor Landbouwwetenschap.
- Sexstone, A.J., N.P. Revsbech, T.P. Parkin en J.M. Tiedje, 1985. Direct measurement of oxygen profiles and denitrification rates in soil aggregates. *Soil Science Society of America Journal* 49: 645–651.
- Sheldrick, R.D., R.H. Lavender en T.M. Martyn, 1994. Effects of delay in reapplication of nitrogen fertiliser following cutting silage from a ryegrass sward. *Grass and Forage Science* 49: 369-371.
- Six, J., E.T. Elliott en K. Paustian, 2000. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology and Biochemistry* 32: 2099–2103.
- Six, J., H. Bossuyt, S. Degryzed en K. Denef, 2004. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and Tillage Research* 79:7–31.
- Soesbergen, G. van., C. van Wallenburg, K.R. van Lynden en H.A.J. van Lanen, 1986. De interpretatie van bodemkundige gegevens. Wageningen, STIBOKA. Rapport 1967.
- Steingrobe, B., H. Schmid en N. Claassen, 2001. Root production and root mortality of winter barley and its implication with regard to phosphate acquisition. *Plant and Soil* 237: 239-248
- Steur, G.G.L. en W. Heijink, 1991. Bodemkaart van Nederland, schaal 1 : 50 000; Algemene begrippen in indelingen. 4^euitgave. Wageningen, Staring Centrum.
- Stewart, A.M. en D.A. Frank, 2008. Short sampling intervals reveal very rapid root turnover in a temperate grassland. *Oecologia* 157:453-458.
- Stolp, J. en H.R.J. Vroon, 1990. Een snelle methode voor het berekenen van kritieke z-afstanden en verzadigingstekorten bij twee fluxen (2 en 1 mm/dag) in gelaagde bodemprofielen tijdens de veldopname. Wageningen, DLO-Staring Centrum. Interne mededeling 92.
- Sullivan J.T. en V.G. Sprague, 1949. The effect of temperature on the growth and composition of the stubble and roots of perennial ryegrass. *Plant Physiology* 24:706-719.
- Tisdall, J.M. en J.M. Oades, 1979. Stabilisation of soil aggregates by root systems of ryegrass. *Australian Journal of Soil Research* 17, 429-441.
- Troughton, A., 1956. Studies on the growth of young grass plants with special reference to the relationship between the shoot and root systems. *Journal of the British Grassland Society* 11: 56-65.
- Troughton, A., 1978a. The Effect of the Prevention of the Production of Additional Root Axes upon the Growth of Plants of *Lolium perenne*. *Annals of Botany* 42: 269-276.
- Troughton, A., 1978b. Influence of reproductive development upon root-system of perennial ryegrass and some effects upon herbage production. *Journal of Agricultural Science* 91: 427-431.
- Troughton, A., 1980. Production of root axes and leaf elongation in perennial ryegrass in relation to dryness of the upper soil layer. *Journal of Agricultural Science* 95: 533-538.
- Van der Krift, T.A.J. en F. Berendse, 2002. Root life spans of four grass species from habitats differing in nutrient availability. *Functional Ecology* 16, 198-203.
- Van der Schoot, J.R. en W. van Dijk, 2002. Zaadbehandeling van snijmaïs met *Trichoderma*. PPO-projectrapport nr 110156.
- Van der Sluijs, P., 1990. Hoofdstuk 11: Grondwatertrappen. In: W.P. Locher en H. de Bakker (red.), *Bodemkunde van Nederland. Deel 1 Algemene Bodemkunde*. Den Bosch, Malmberg.
- Vendramin, L., J.G.B. Ricardo, J.G. Campello, E.R. Hruschka, 2009. On the Comparison of Relative Clustering Validity Criteria. *Society for Industrial and Applied Mathematics*.
http://www.siam.org/proceedings/datamining/2009/dm09_067_vendraminl.pdf

- Verlinden, G., T. Coussens, A. De Vliegheer, G. Baert en G. Haesaert, 2010. Effect of humic substances on nutrient uptake by herbage and on production and nutritive value of herbage from sown grass pastures. *Grass and Forage Science* 65: 133-144.
- Vertes, F., L. Le Corre, J.C. Simon en J.M. Rivière, 1988. Effets du piétinement de printemps sur un peuplement de trèfle blanc pur ou en association. *Fourrages* 116, 347-366.
- Vosman, B. en J. Faber (eet.), 2011. Functionele Agrobiodiversiteit: van concept naar praktijk. Rapport Plant Research International en Alterra, Wageningen
- Vries, F. de, 1999. Karakterisering van Nederlandse gronden naar fysisch-chemische kenmerken. Wageningen, Alterra, rapport 654, 61 blz.
- Vries, F. de, P.J. Kuikman en C.M.A. Hendriks, 2008. De veengronden in Hoog-Nederland en verdwijnen. *Bodem 1*: 14-17.
- Weaver, J.E. en F.W. Albertson, 1943. Resurvey of Grasses, Forbs, and Underground Plant Parts at the End of the Great Drought. In: *Ecological Monographs*, Volume 13, Nr 1, pp 100.
- Wesseling, J.G. 2009. Soil physical data and modeling soil moisture flow. Ph.D.-thesis, Wageningen University and Research Centre, The Netherlands. Also published as *Alterra Scientific Contributions* 29, Alterra, Wageningen, The Netherlands. 178 p.
- Wesseling, J.G. en C.J. Ritsema et al., 2008. Describing the soil physical characteristics of soil samples with cubical splines. *Transport in Porous Media* 71(3): 289-309.
- Wesseling, J.G. en H.R.J. Vroon, 2011a. Het Titanen project. Deel 1: De databases. In voorbereiding.
- Wesseling, J.G. en H.R.J. Vroon, 2011b. Het Titanen project. Deel 4. Phoebe, een programma voor het berekenen van de kritieke z-afstand en het verzadigingstekort van profielen. In voorbereiding.
- Wesseling, J.G. en H.R.J. Vroon, 2011c. Het Titanen project. Deel 5. Leto, een programma voor het berekenen van de gemakkelijk en moeilijk beschikbare hoeveelheden vocht in de wortelzone en ondergrond van een bodemprofiel. In voorbereiding.
- Wesseling, J.G. en H.R.J. Vroon, 2011d. Het Titanen project. Deel 6. Dione, een programma voor het berekenen van de verticale weerstand c en de transmissiviteit kD van een bodemprofiel. In voorbereiding.
- Wesseling, J.G. en H.R.J. Vroon, 2011e. Het Titanen project. Crius, een programma voor het berekenen van het verloop van de bergingscoëfficiënt en het bergingsvolume van een bodemprofiel met de diepte. In voorbereiding.
- Wösten, J.H.M., F. de Vries, J. Denneboom en A.F. van Holst, 1988. Generalisatie en bodemfysische vertaling van de Bodemkaart van Nederland 1 : 250 000 ten behoeve van de PAWN-studie. *Stiboka rapport* 2055, 50 blz.
- Wösten, J.H.M., G.J. Veerman, W.J.M. de Groot en J. Stolte, 2001. Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks. Vernieuwde uitgave 2001. *Alterra-rapport* 153, Alterra, Wageningen, 86 pp.
- Young, D.J.B., 1958. A study of the influence of nitrogen on the root weight and nodulation of white clover in a mixed sward. *Grass and Forage Science* 13: 106-114

Appendix 1 Functionele kenmerken bodemprofielen

Stationaire grondwaterstroming

Stationaire grondwaterstroming (ofwel permanente stroming) is stroming waarbij gedurende de beschouwde periode de plaatselijke snelheid niet verandert. Met deze stationaire stroming als uitgangspunt wordt in deze paragraaf beschreven hoe bovengenoemde tien afgeleide, functionele kenmerken worden berekend. Hierbij wordt de stationaire stroming van water in de onverzadigde zone van de bodem beschreven volgens de Darcy-vergelijking:

$$q = -K(h) \left(\frac{dh}{dz} + 1 \right)$$

waarbij

- q = fluxdichtheid (cm d⁻¹), positief naar boven
- K(h) = hydraulisch geleidingsvermogen als functie van h (cm d⁻¹)
- h = drukhoogte (cm)
- z = plaats (cm, positief naar boven)

De relatie tussen het hydraulisch geleidingsvermogen en de drukhoogte is sterk niet-lineair en afhankelijk van de bodemlaag. Voor het bepalen van het vochtgehalte van de bodem is de zogenaamde waterretentiekarakteristiek of pF-curve van belang. Deze geeft de relatie tussen vochtgehalte en drukhoogte weer en is ook sterk niet-lineair. Om deze relaties te beschrijven worden in het algemeen de Mualem-Van Genuchten vergelijkingen gebruikt (Van Genuchten, 1980). Omdat deze vergelijkingen niet toereikend blijken om meer complexe relaties te beschrijven (Wesseling et al., 2008; Wesseling, 2009) is er bij dit onderzoek voor gekozen om de meer flexibele beschrijfwijze met 'cubical splines' te gebruiken. Zie Wesseling et al. (2008) of Wesseling (2009) voor meer details. De functionele kenmerken die vervolgens zijn berekend, worden hierna beschreven.

Kritieke afstand voor capillaire opstijging (z)

De kritieke z-afstand in cm is gedefinieerd als de afstand tussen de onderkant van de wortelzone en de grondwaterspiegel, waarover bij een vochtspanning van pF 4.2 aan de onderzijde van de wortelzone een capillaire opstijging van 2 mm per dag nog mogelijk is. Deze fluxwaarde van 2 mm/dag is gekozen als referentiewaarde omdat uit onderzoek is gebleken dat deze flux als aanvulling op de vochtvoorraad in de wortelzone meestal voldoende is om een gewas optimaal te laten groeien (Van Soesbergen et al., 1986; Van der Sluijs, 1990). De kritieke z-afstand bij 2 mm/dag wordt gebruikt voor alle gronden. Voor gronden die bestaan uit lichte klei, zavel, sterk lemig tot zeer sterk lemig zand, leem en löss continueert de capillaire opstijging rond 2mm/dag nog steeds als de kritieke z-afstand overschreden wordt, maar nu met een lagere fluxwaarde. Hierdoor wordt de vochtleverantie van deze gronden op basis van kritieke z-afstand bij 2 mm/d in meer of mindere mate onderschat. Daarom wordt voor deze gronden bij het beoordelen van de vochtleverantie niet alleen rekening gehouden met een capillaire opstijging bij een flux van 2 mm/dag, maar ook bij een flux van 1 mm/dag (Stolp en Vroon, 1990). Voor zandgronden gaat dit echter veel minder op en deze zullen dus eerder verdrogen als niet 2mm/dag capillair nageleverd kan worden. Waarden van de kritieke z-afstand voor meerdere Nederlandse gronden zijn beschikbaar in de literatuur (Van Soesbergen et al., 1986 en Haans, 1979).

De kritieke z-afstand kan worden berekend door de vergelijking voor fluxdichtheid (3.2.1) anders te schrijven. Er ontstaat zo een vergelijking die de relatie tussen de verandering in plaats aangeeft als functie van de verandering in drukhoogte:

$$dz = - \frac{dh}{1 + \frac{q}{K(h)}}$$

Het is bekend dat de drukhoogte h op het niveau van het grondwater 0 is. Als we aannemen dat de oorsprong van de verticale as (z=0) op het niveau van het grondwater ligt, dan kunnen we het (stationaire) drukhoogteprofiel (de relatie tussen z en h) berekenen door de vorige vergelijking te integreren:

$$\int_0^z dz = - \int_0^h \frac{dh}{1 + \frac{q}{K(h)}}$$

Ofwel

$$z(h) = - \int_0^h \frac{dh}{1 + \frac{q}{K(h)}}$$

Deze integraal kan voor positieve waarden van q numeriek worden berekend als

$$z(h) = - \sum_{i=1}^{N_h} \frac{\Delta h_i}{1 + \frac{q}{K\left(\frac{h_{i-1} + h_i}{2}\right)}}$$

In het algemeen wordt er gerekend tussen het grondwaterniveau en de onderzijde van de wortelzone. Als de waarde van z groter is dan deze afstand stopt de berekening. Ook wordt er gestopt als de waarde van h kleiner wordt dan -16000 cm (verwelkingspunt).

Verzadigingstekort (V_c)

Het verzadigingstekort is gedefinieerd als de hoeveelheid water (uitgedrukt in cm waterschijf) die nodig is om het deel van de bodem dat ligt tussen de onderzijde van de wortelzone en het grondwaterniveau bij kritieke z-afstand in verzadigde toestand te brengen. Hierbij wordt de waterinhoud bepaald uit het drukhoogteprofiel dat hoort bij een capillaire opstijging van 1 of 2 mm/dag en de $h(\theta)$ -relaties van de doorstroomde bodemlagen (Stolp en Vroon, 1990; Van der Gaast et al., in voorbereiding).

Als met bovenstaande formules de kritieke z-afstand is bepaald, dan is ook direct het verloop van de drukhoogte met de diepte bekend bij deze fluxdichtheid en grondwaterstand. Als nu het kritieke vochttekort V_c (cm) wordt gedefinieerd als die hoeveelheid water die het profiel kan bergen tot het volledig verzadigd is, dan kan dit worden geschreven als:

$$V_c = \int_0^{z_c} (\theta_s - \theta(z)) dz + \int_{z_c}^{z_c+z_r} (\theta_s - \theta_{4.2}) dz = \int_0^{z_c} (\theta_s - \theta(h(z))) dz + \int_{z_c}^{z_c+z_r} (\theta_s - \theta_{4.2}) dz$$

Hierbij is

- V_c = kritieke vochttekort (cm)
- θ = vochtgehalte ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)
- z = verticale positie (cm)

- z_c = kritieke afstand (cm)
- z_r = dikte wortelzone (cm)
- $\theta_{4.2}$ = vochtgehalte bij verwelkingspunt ($h=-16000$ cm)

De eerste term in deze vergelijking geeft de hoeveelheid die kan worden geborgen in het stuk tussen de wortelzone en het grondwater. De tweede term geeft de hoeveelheid in de wortelzone. Deze vergelijking kan eenvoudig worden gediscretiseerd, waarbij wel rekening moet worden gehouden met de verschillende bodemlagen. Op analoge wijze kan de berging in het profiel worden berekend.

Weerstand voor verticale verzadigde grondwaterstroming (C)

Een ander kenmerk van een profiel is de weerstand van het profiel (in dagen) voor verticale verzadigde grondwaterstroming, ofwel de C-waarde. De C-waarde kan worden berekend uit de dikte van de afzonderlijke profiellagen en hun verzadigde doorlatendheid:

$$C = \sum_{i=0}^{N_L} \frac{D_i}{K_i^s}$$

Hierbij is

- C = weerstand (d)
- D_i = dikte van laag i (cm)
- K_i^s = verzadigde doorlatendheid van laag i ($\text{cm}\cdot\text{d}^{-1}$)
- N_L = aantal bodemlagen in profiel

Transmissiviteit (kD)

Voor de horizontale stroming van water, bijvoorbeeld naar de drains of sloten, is de transmissiviteit van belang. Deze waarde kD wordt bepaald volgens

$$kD = \sum_{i=0}^{N_L} K_i^s D_i$$

Hierbij is

- kD = transmissiviteit ($\text{cm}^2\cdot\text{d}^{-1}$)
- D_i = dikte van laag i (cm)
- K_i^s = verzadigde doorlatendheid van laag i ($\text{cm}\cdot\text{d}^{-1}$)
- N_L = aantal bodemlagen in profiel

Hoeveelheid opneembaar vocht (Va)

De hoeveelheid water die planten kunnen opnemen wordt beperkt door de drukhoogte. De drukhoogte van het bodemvocht verschilt met de diepte in relatie tot het grondwater. In dit onderzoek is onderscheid gemaakt tussen de hoeveelheid water in de wortelzone en die in de ondergrond. Het is bekend dat planten in het algemeen probleemloos water kunnen opnemen tussen $h=-100$ en $h=-500$ cm. Beneden $h=-500$ cm is de wortelopname belemmerd totdat bij $h=-16000$ cm (verwelkingspunt) de planten geen water meer op kunnen nemen. De hoeveelheid beschikbaar water kan nu worden berekend als

$$V_a = \int_{z_0}^{z_1} (\theta(h_w) - \theta(h_d)) dz$$

Waarbij

- V_a = hoeveelheid beschikbaar vocht (cm)
- z_0 = onderzijde beschouwd profielsegment (cm)
- z_1 = bovenzijde beschouwd profielsegment (cm)
- h_w = drukhoogte grens nat (cm)
- h_d = drukhoogte grens droog (cm)

De gebruikte grenzen worden weergegeven in tabel 1.

Tabel 1

Gebruikte grenswaarden bij het berekenen van de beschikbare hoeveelheid vocht.

Segment	Type	Plaatsgrenzen (cm)		Drukhoogtegrenzen (cm)	
Segment	Opneembaar	z_0	z_1	h_w	h_d
Wortelzone	Gemakkelijk	Worteldiepte	Maaiveld	-100	-500
	Moeilijk	Worteldiepte	Maaiveld	-500	-16000
Ondergrond	Gemakkelijk	Onderzijde profiel	Onderzijde wortelzone	-100	-500
	Moeilijk	Onderzijde profiel	Onderzijde wortelzone	-500	-1000

Software

Voor het berekenen van de hierboven beschreven afgeleide waarden van bodemprofielen is gebruik gemaakt van software uit het Zeus-pakket (Wesseling en Vroon, 2012). De profielkenmerken zijn opgeslagen in de HeJa-database. Voor de bodemfysische kenmerken worden de gegevens uit de Priapus-database gebruikt, waarna de resultaten weer in HeJa worden opgeslagen. In tabel 2 worden de gebruikte elementen genoemd, samen met een literatuurverwijzing. Voor meer details kan de desbetreffende literatuur worden geraadpleegd.

Tabel 2

Elementen gebruikt bij de berekening van de afgeleide, functionele kenmerken.

Item	Beschrijving	Literatuur Wesseling en Vroon (2011)
Priapus	Database met bodemfysische kenmerken van bodemmonsters	a
HeJa	Database met profielgegevens en afgeleide kenmerken	a
Phoebe	Berekenen van kritieke waardes	b
Leto	Berekenen van beschikbare hoeveelheden vocht in wortelzone en ondergrond	c
Dione	Berekenen van c en kD-waarden	d
Crius	Berekenen van berging	e

Appendix 2 Lijst van grassoorten

Botanische naam	Nederlandse naam
<i>Agrostis capillaris</i> L.	Gewoon struisgras
<i>Agrostis tenuis</i>	Struisgras
<i>Anthoxanthum odoratum</i> L.	Gewoon reukgras
<i>Arrhenatherum elatius</i> L.	Glanshaver / frans raaigras
<i>Cynosurus cristatus</i> L.	Kamgras
<i>Dactylis glomerata</i> L.	Kropaar
<i>Festuca arundinacea</i> Schreber	Rietzwenkgras
<i>Festuca ovina</i> L.	Schapengras
<i>Festuca pratensis</i> Hudson	Beemdlangbloem
<i>Festuca rubra</i> L.	Roodzwenkgras
<i>Holcus lanatus</i> L.	Gestreepte Witbol
<i>Lolium multifolium</i> Lamk.	Italiaans raaigras
<i>Lolium perenne</i> L.	Engels raaigras
<i>Nardus stricta</i>	Borstelgras
<i>Phleum pratense</i> L.	Timoteegras
<i>Poa pratensis</i> L.	Veldbeemdgras
<i>Poa trivialis</i> L.	Ruw beemdgras

Bijlage 1 Geselecteerde locaties en bodemhorizonten

Perceel	Bodem- eenheid	Land- gebruik	GWT	Mean GLG	Horizont	Diepte bovenkant	Diepte onderkant	Staringcode	Bepaling						Opm
									Su	P	D	St	Z	G	
U14	cHn21	gras	VI	111.2	1Aap	0	25	B2		x	x	x	x	x	
					1Ahb	25	40	B2							
					1Bhb	40	60	O1							
					1BCb	60	75	O1		x	x	x	x		
					1Cu	75	120	O1							
U4	pZg23	gras	III	87.9	1Aap	0	20	B3		x	x	x	x	x	
					1ACg	20	30	B3							
					1Cg1	30	60	O3		x	x	x	x		
					1Cg2	60	120	O2		x	x	x	x		
U2	cHn23	akker	V	323.8	1Aap	0	25	B3		x	x	x	x	x	
					1Ahb	25	45	B3							
					1Bhb	45	60	O3		x	x	x	x		
					1BCb	60	75	O2		x	x	x	x		
					1Cu	75	120	O2							
U17/U18	pZn23	akker	VI	105.5	1Ap ?	0 ?	25 ?	B3 ?	x	x		x	x	x	*
					1BC ?	25 ?	40 ?	O3 ?	x	x		x	x	x	*
					1Cu ?	40 ?	120 ?	O3 ?							*
U10	pZg23	gras	III	101.7	1Aap	0	20	B3	x	x		x	x	x	
					1ACg	20	30	B3							
					1Cg1	30	60	O3	x	x		x	x	x	
					1Cg2	60	120	O2	x	x		x	x	x	
U12	pZg23	akker	III	123.3	1Aap	0	25	B3	x	x		x	x	x	
					1ACg	25	30	B3							
					1Cg1	30	60	O3	x	x		x	x	x	

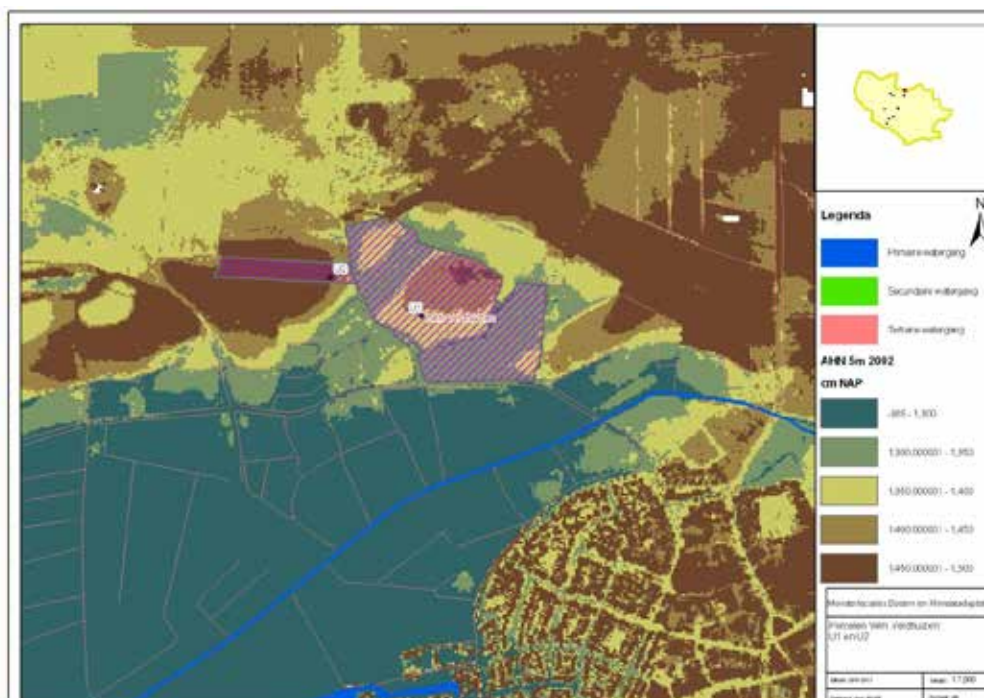
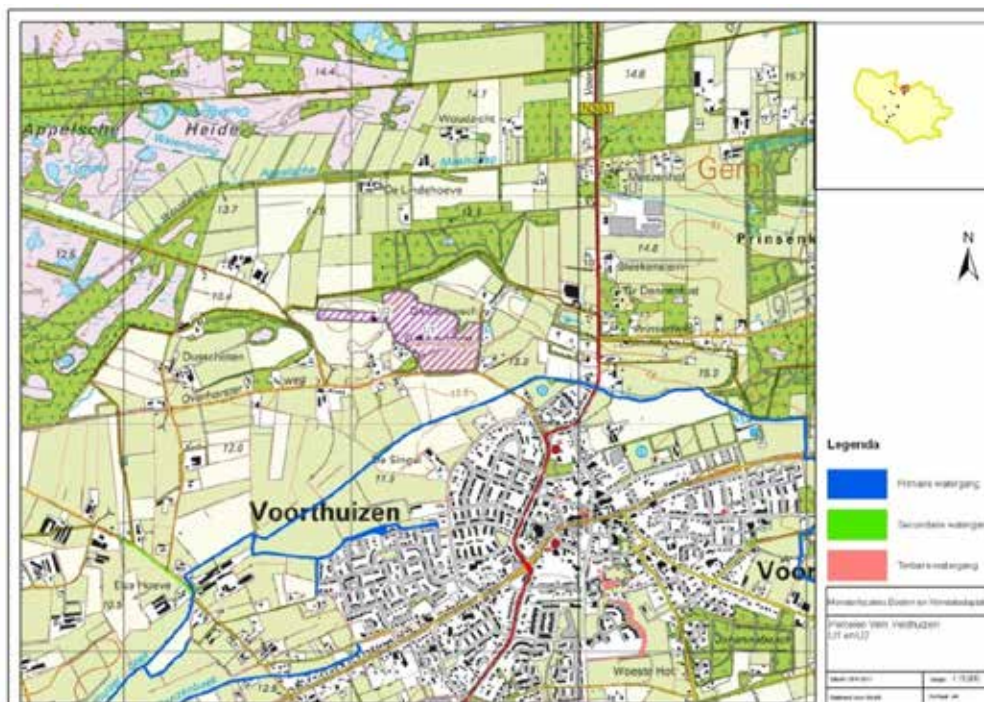
Perceel	Bodem- eenheid	Land- gebruik	GWT	Mean GLG	Horizont	Diepte bovenkant	Diepte onderkant	Staringcode	Bepaling						Opm
									Su	P	D	St	Z	G	
U5	cHn21	gras	VI	105.313	1Aap	0	25	B2	x	x	x	x	x		
					1Ahb	25	40	B2							
					1Bhb	40	60	01	x	x	x	x	x		
					1BCb	60	75	01							
					1Cu	75	120	01							

Su, Suction plate; P, Pressure plate; D, Doorlatendheid (onverzadigd); St, Stabiliteit aggregaat; Z, Aggregaten; G, Gloeiverlies

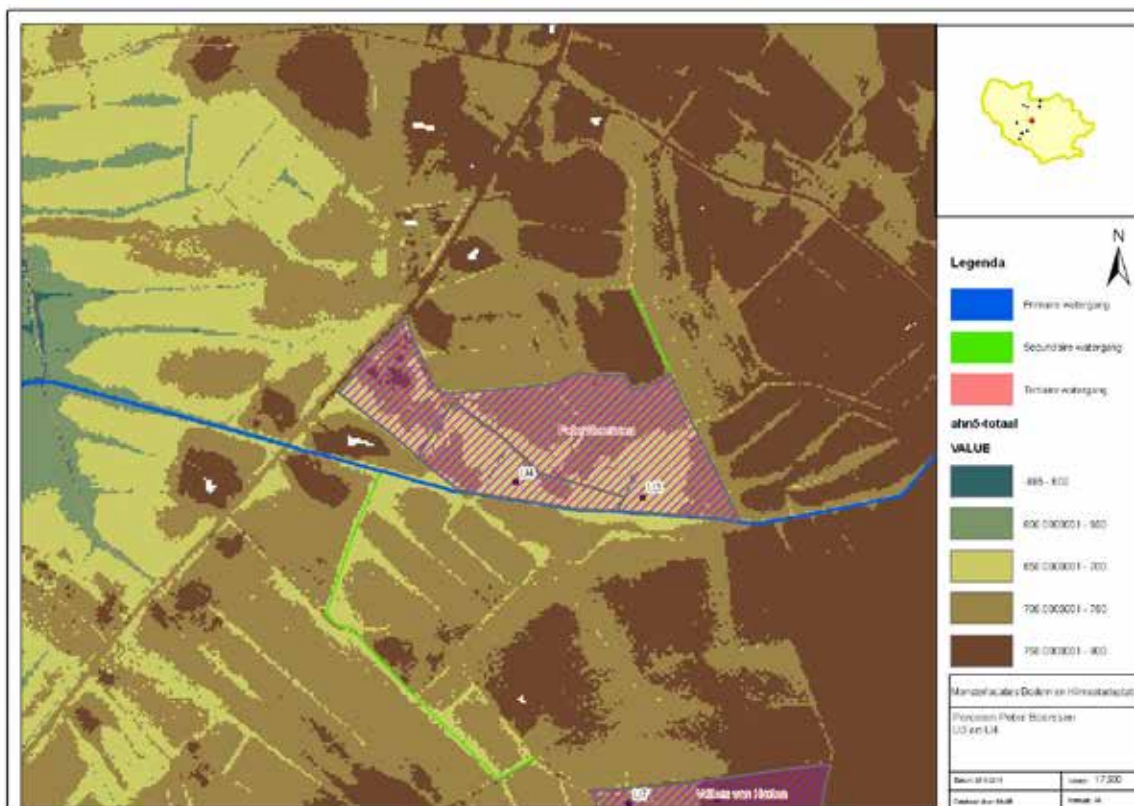
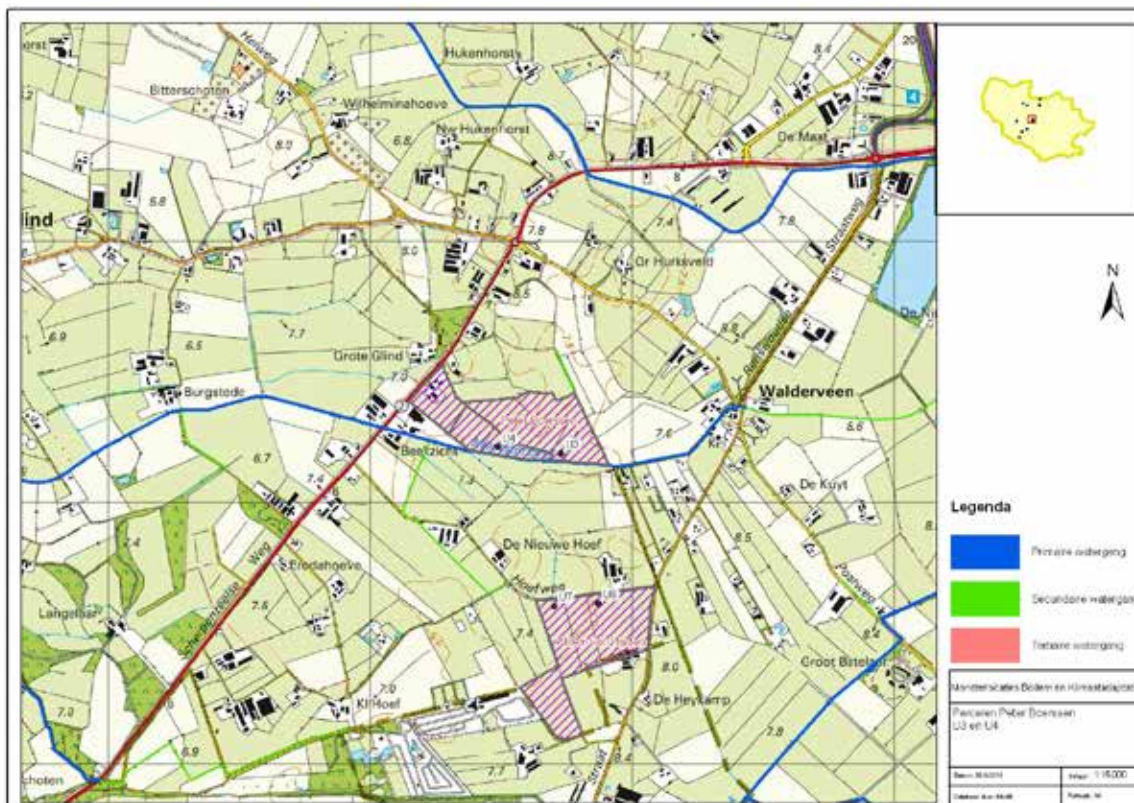
*) Eenheid/landgebruik komt niet voor, daarom is profiel op basis van bodemkaart onbekend.

Bijlage 2 Topografie en hoogteligging locaties

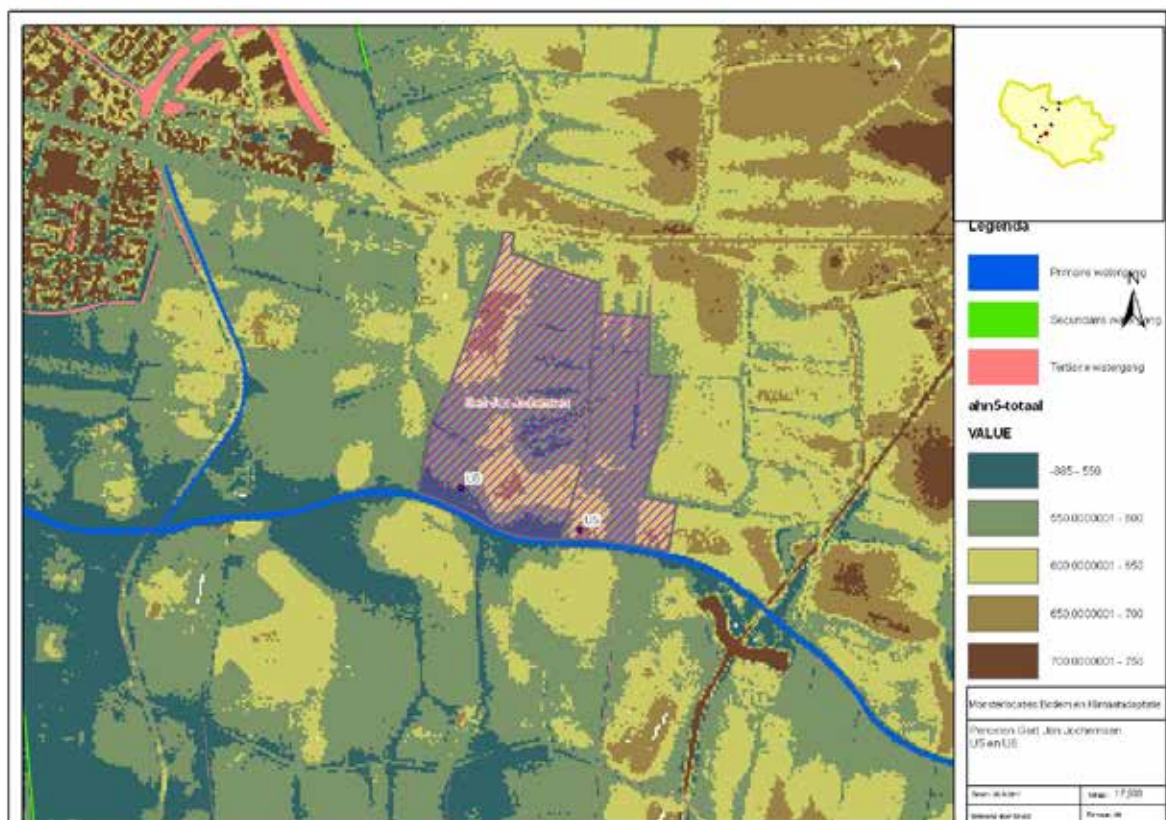
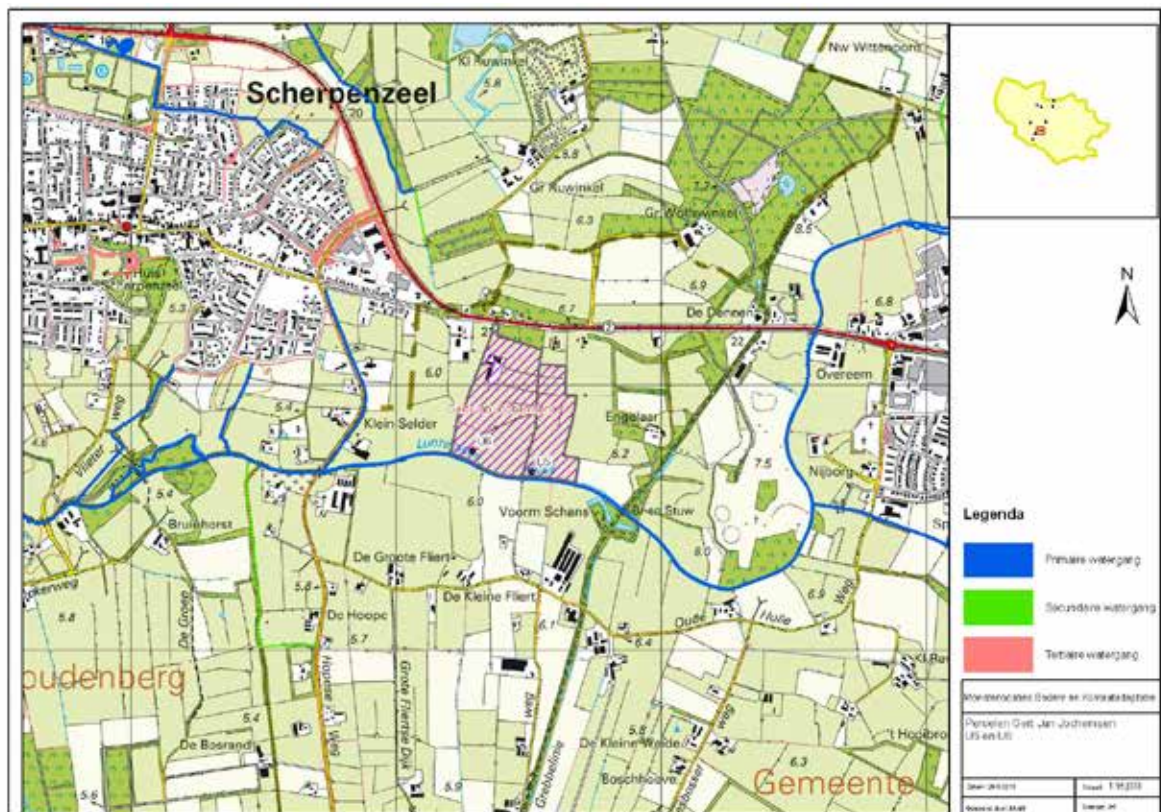
U2



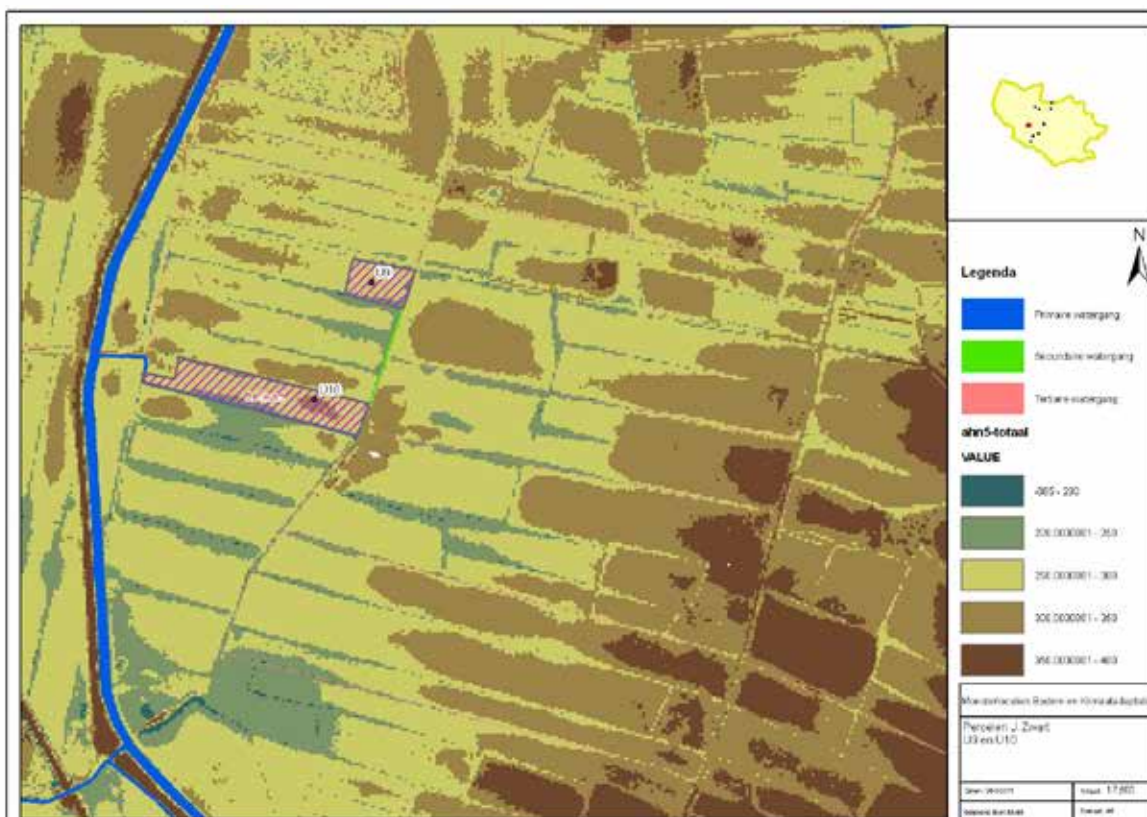
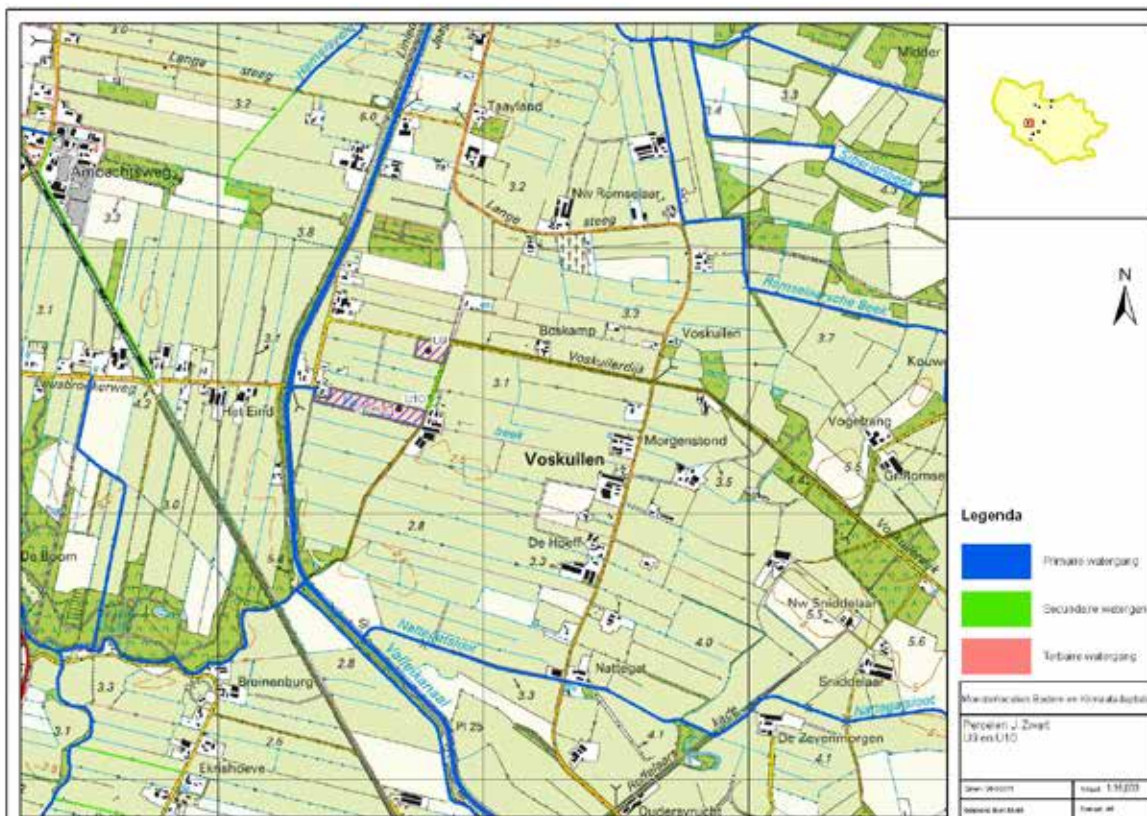
Topografie en hoogteligging U4



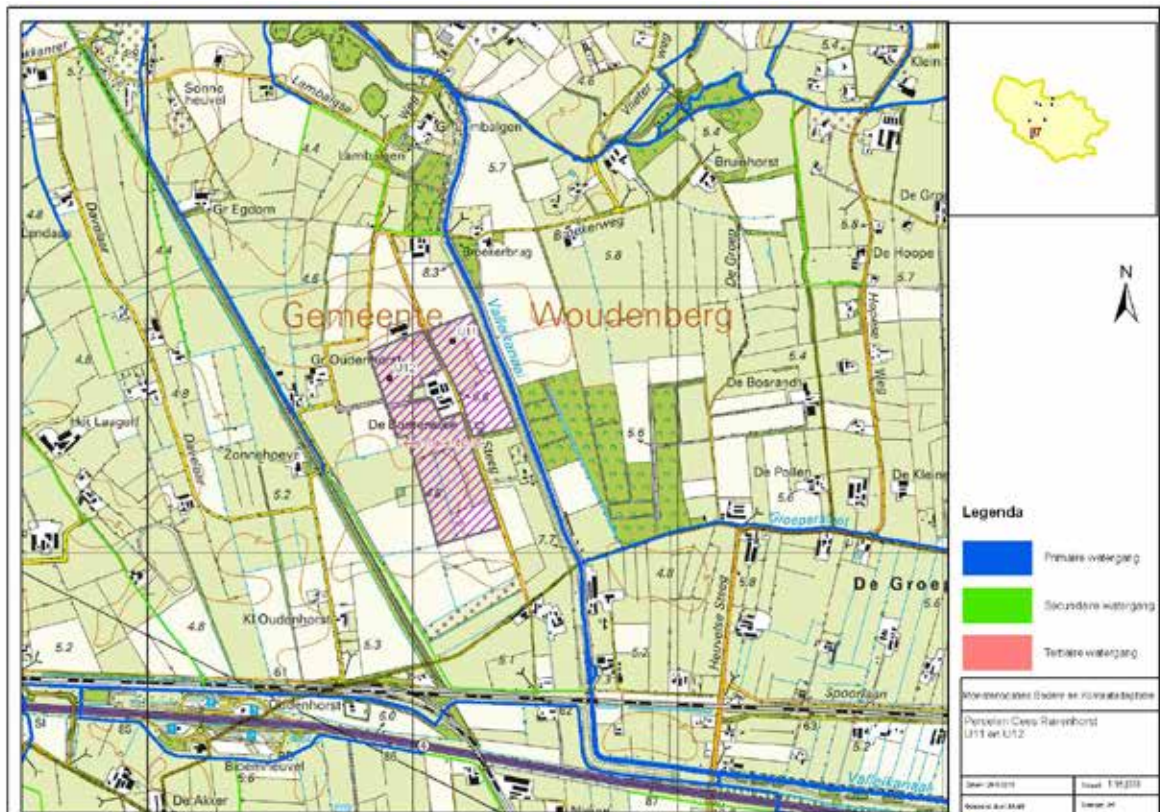
Topografie en hoogteligging U5



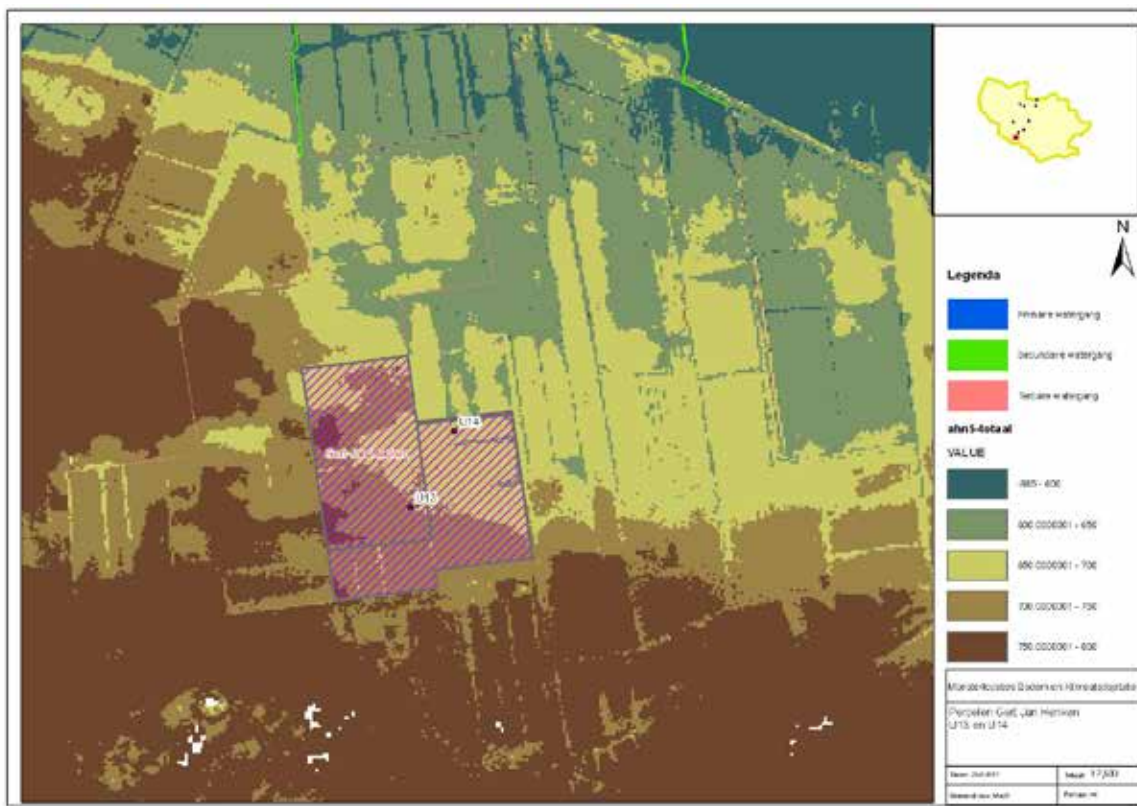
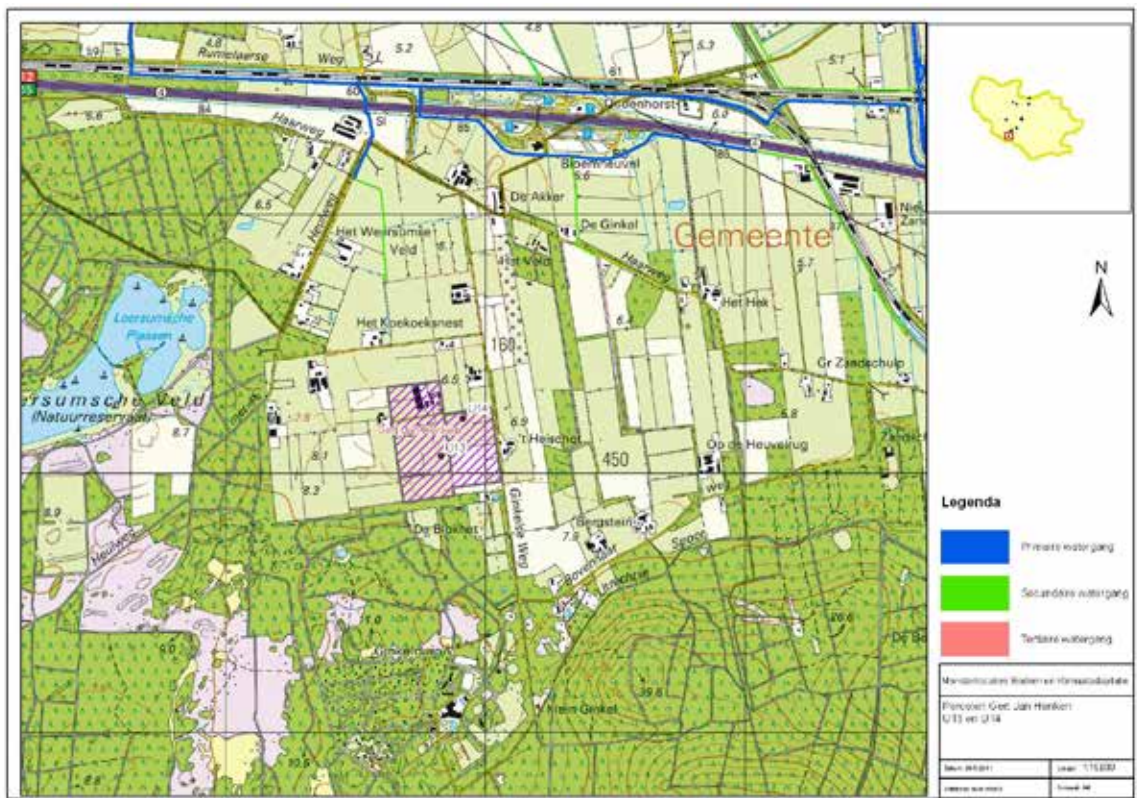
Topografie en hoogteligging U10



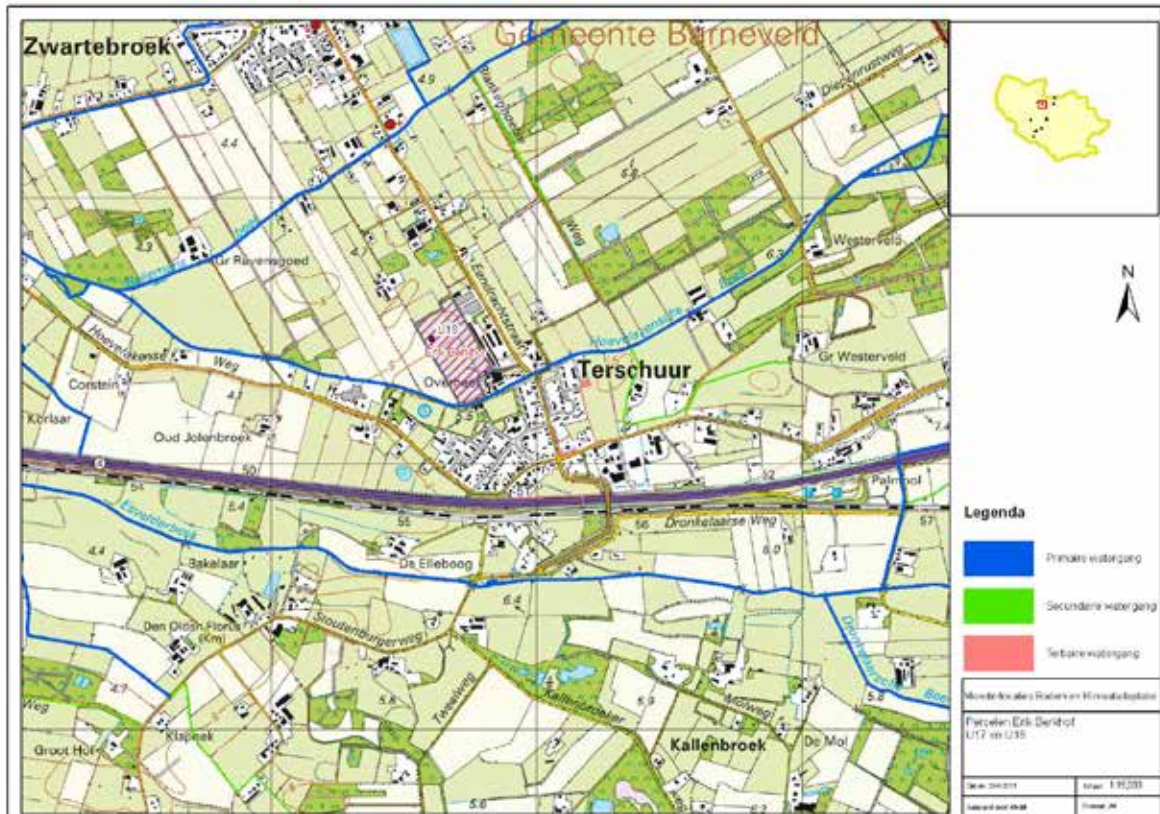
Topografie en hoogteligging U12



Topografie en hoogteligging U14



Topografie en hoogteligging U18



Bijlage 3 Profielbeschrijvingen

Nummer	Beschrijving kort	Opmerkingen	Naam	Bodemeenheid
U1	donkere laag dikker dan 50 cm	Klassieke enkeerdgrond, ook wat landschappelijke ligging betreft	Enkeerdgrond	zEZ21
U2		Bijlage 3a		
U3	0-41 cm donkere bovengrond 41-100 lemige humusrijke laag Roest vanaf 20 cm	Geëgaliseerd, opgehoogd en vergraven tot 41 cm	Beekeerdgrond	pZg23
U4		Bijlage 3b		
U5		Bijlage 3c		
U6	0-41 cm donker, 39-55 cm roest, >55 cm geel zand zonder roest.		Beekeerdgrond	pZg23
U7	0-58 cm donker, 0-60 cm roest, >60 cm geel zand zonder roest.	Geëgaliseerd, opgehoogd en vergraven	Lage enkeerdgrond	EZg23
U8	0-36 cm donker op podzol B		Laarpodzolgrond	cHn21
U9	Sterk vergraven en opgehoogde grond, zie foto Geen roest binnen 50 cm	Geëgaliseerd, opgehoogd en vergraven	Gooreerdgrond?	pZn21
U10		Bijlage 3d		
U11	0-35 cm donker, roest binnen 30 cm		beekeerdgrond	pZg23
U12		Bijlage 3e		
U13	0-28 cm donker op B		veldpodzolgrond	Hn21
U14		Bijlage 3f		
U15	0-44 cm donker, geen roest binnen 50 cm	vergraven	gooreerdgrond	pZn21
U16	0-46 cm donker, roest binnen 35 cm	Geëgaliseerd, opgehoogd en vergraven	beekeerdgrond	pZg23
U17	0-28 donker, geen roest binnen 35 cm	vergraven	gooreerdgrond	pZn21
U18		Bijlage 3g		
U19	0-54 cm donker, roest binnen 40 cm	opgehoogd	Lage enkeerdgrond	EZg21
U20	0-55 cm donker, roest dieper dan 50 cm		enkeerdgrond	zEZ21

Profielbeschrijving U2

Nummer	U2	
Datum	04-08-2011	
Bodemprofiel		
Horizont	Diepte (cm)	Opmerking
Aanp	0-30	zwart
Aan2	30-65	
Bb	65-73	
C	73->120	
% droge stof grondmonster 0-10 cm	84,1	
Grondwaterstand (cm)	> 120	
Aantal wortels 10 cm (20x20 cm)	161	
Aantal wortels 20 cm (20x20 cm)	155	
Aantal macroporiën 10 cm (20x20 cm)	1	
Aantal macroporiën 20 cm (20x20 cm)	0	
Maximale bewortelingsdiepte (cm)	65	
Eerste roest (cm)	n.a.	
Naam	zEZ21	
Opmerkingen		
<p>Grauwe wormen in de laag 0-10 cm. Perceel is mogelijk niet zo lang geleden geploegd tot ca 30 cm. De laag 0-30 cm is nu goed doorworteld, maar toch vrij vast en gaat mogelijk verder verdichten, mede door ontbreken van wormgangen.</p>		



Profielbeschrijving U4

Nummer	U4	
Datum	6 juni 2011	
Bodemprofiel		
Horizont	Diepte	Opmerking
A p	0-5	
A/C	5-43	Laag voornamelijk C materiaal met plaatselijke resten Ap
C	43 cm - >80 cm	
% droge stof grondmonster 0-10 cm	90,3	
Grondwaterstand (cm)	102	
Aantal wortels 10 cm (20x20 cm)	63	Streefwaarde 200
Aantal wortels 20 cm (20x20 cm)	20	Streefwaarde 100
Aantal macroporiën 10 cm (20x20 cm)	2	
Aantal, macroporiën 20 cm (20x20 cm)	2	Streefwaarde 4
Maximale bewortelingsdiepte (cm)	27	
Eerste roest (cm)	41	
Naam	duinvaaggrond Zd21	
Naam volgens kaart 1:50000	beekeerdgrond pZg23	
Opmerkingen	Oorspronkelijk een beekeerdgrond, maar door recente vermenging en egalisatie sterk veranderd. Deel oorspronkelijke zwarte bovengrond waarschijnlijk naar ander deel perceel afgevoerd. Grond is bewerkt tot 43 cm. Hieronder ongestoorde C.	



Profielbeschrijving U5

Nummer	U5	
Datum	20-07-2011	
Bodemprofiel		
Horizont	Diepte (cm)	Opmerking
Ap	0-27	bruin
B vergraven	27-36	
C	36-> 100	Bovenin extreem ijzerrijk en verkit
% droge stof grondmonster 0-10 cm	76,1	
Grondwaterstand (cm)	> 120	
Aantal wortels 10 cm (20x20 cm)	33	
Aantal wortels 20 cm (20x20 cm)	30	
Aantal macroporiën 10 cm (20x20 cm)	3	
Aantal macroporiën 20 cm (20x20 cm)	3	
Maximale bewortelingsdiepte (cm)	35	
Eerste roest (cm)	30	
Naam	Hn21 of pZg21	
Opmerkingen	<p>Bodem ligt op een hoger gedeelte omgeven door een wat lager gelegen gedeelte Profiel is een beekerdgrond, maar laag 27-36 cm is een vergraven podzol B. Mag ook podzol genoemd worden? Bovenin enkele rode en grauwe wormen.</p>	



Profielbeschrijving U10

Nummer	U10	
Datum	20-07-2011	
Bodemprofiel		
Horizont	Diepte (cm)	
Ap	0-22	
ACg	22-31	
C	31-> 100	
% droge stof grondmonster 0-10 cm	76,2	
Grondwaterstand (cm)	135	
Aantal wortels 10 cm (20x20 cm)	112	
Aantal wortels 20 cm (20x20 cm)	23	
Aantal macroporiën 10 cm (20x20 cm)	3	
Aantal macroporiën 20 cm (20x20 cm)	0	
Maximale bewortelingsdiepte (cm)	31	
Eerste roest (cm)	22	
Naam	PZg23	
Opmerkingen	Enkele wormen rood en grauw bovenin Ap Gehele profiel vochtig	



Profielbeschrijving U12

Nummer	U12	
Datum	20-07-2011	
Bodemprofiel		
Horizont	Diepte (cm)	
Ap	0-42	
C	42-> 100	
% droge stof grondmonster 0-10 cm	78,6	
Grondwaterstand (cm)	60	
Aantal wortels 10 cm (20x20 cm)	84	
Aantal wortels 20 cm (20x20 cm)	33	
Aantal macroporiën 10 cm (20x20 cm)	1	
Aantal macroporiën 20 cm (20x20 cm)	4	
Maximale bewortelingsdiepte (cm)	36	
Eerste roest (cm)	31	
Naam	pZg23	
Opmerkingen	Bovenin enkele rode en grauwe wormen	



Profielbeschrijving U14

Nummer	U14	
Datum	6 juni 2011	
Bodemprofiel		
Horizont	Diepte (cm)	Opmerking
A p	0-54	
B 2	54-66	B geheel bewerkt
C	66- >100 cm	
% droge stof grondmonster 0-10 cm	80,7	
Grondwaterstand (cm)	105	
Aantal wortels 10 cm (20x20 cm)	166	Streefwaarde 200
Aantal wortels 20 cm (20x20 cm)	82	Streefwaarde 100
Aantal macroporiën 10 cm (20x20 cm)	8	
Aantal macroporiën 20 cm (20x20 cm)	6	Streefwaarde 4
Maximale bewortelingsdiepte (cm)	59	
Eerste roest (cm)	55	
Naam	Enkeerdgrond zEZ21	
Naam volgens kaart 1:50000	Assoc cHn21/vW/pZg 23	
Opmerkingen	<p>Ap is zo dik, mogelijk door opgebrachte grond. Perceel is begin 20e eeuw ontgonnen uit natte heide. Gebruik grasland. Gras is negentien jaar niet gescheurd. Zeer veel mollen dit voorjaar. Grond over hele profiel nog vochtig. Door combinatie van hoge grondwaterstand met diepe beworteling geen problemen met droogte. Veehouder geeft ook aan dat hij het liefste een droog voorjaar heeft.</p>	



Profielbeschrijving U18

Nummer	U18	
Datum	20-07-2011	
Bodemprofiel		
Horizont	Diepte (cm)	Opmerking
Ap	0-34	donkerbruin
C	34-> 100	
% droge stof grondmonster 0-10 cm	75,9	
Grondwaterstand (cm)	86	
Aantal wortels 10 cm (20x20 cm)	16	
Aantal wortels 20 cm (20x20 cm)	11	
Aantal macroporiën 10 cm (20x20 cm)	3	
Aantal macroporiën 20 cm (20x20 cm)	0	
Maximale bewortelingsdiepte (cm)	34	
Eerste roest (cm)	34	
Naam	PZg23	
Opmerkingen	<p>Waarschijnlijk recent tot 34 cm geploegd. Enkele wormen rood en groen bovenin Ap Gehele profiel vochtig</p>	



Bijlage 4 Monsternummers

U2

Perceel

U2

Coördinaten (hddd(gr)mm.mmm')

N52 11.705

E005 35.607

Datum

4-8-2011

Weer

Bewolking 0%

Wind 2

22 GrC

Na 2 mm neerslag

Door

Eduard Hummelink

Alterra

Jan Bokhorst

Louis Bolk Instituut

Onverstoorde 700cc monsters:

Diepte (cm)

nummer	bovenkant	onderkant
V11, V12	5	15
V21, V22	45	55
V31, V32	60	70

Onverstoorde 100cc monsters:

Diepte (cm)

nummer	bovenkant	onderkant
921-926	5	10
927-932	45	50
933-938	60	65

U4

Perceel

Coördinaten (hddd(gr)mm.mmm')

U4

N52 06.725

E005 32.416

Datum	7-7-2011	
Weer	Bewolking 100%	Wind 4BF
	22GrC	Droog
Door	Gerben Bakker	Alterra
	Jan Bokhorst	Louis Bolk Instituut
	Nick van Eekeren	Louis Bolk Instituut

Onverstoorde 700cc monsters:

Diepte (cm)

nummer	bovenkant	onderkant
B11	5	15
B12	5	15
B21	60	70
B22	60	70

Onverstoorde 100cc monsters:

Diepte (cm)

nummer	bovenkant	onderkant
15	5	10
21	5	10
29	5	10
30	5	10
37	5	10
38	5	10
4	60	65
5	60	65
13	60	65
14	60	65
20	60	65
28	60	65

U5

Perceel

U5

Coördinaten (hddd(gr)mm.mmm')

N52 04.277

E005 30.679

Datum

20-7-2011

Weer

Bewolking 90%

Wind 2BF

21GrC

Droog

Door

Gerben Bakker

Alterra

Jan Bokhorst

Louis Bolk Instituut

Onverstoorde 700cc monsters:

Diepte (cm)

nummer	bovenkant	onderkant
--------	-----------	-----------

-

-

-

Onverstoorde 100cc monsters:

Diepte (cm)

nummer	bovenkant	onderkant
--------	-----------	-----------

44

10

15

52

10

15

53

10

15

60

10

15

61

10

15

68

10

15

69

10

15

77

10

15

45

30

45

78

30

45

46

82

87

55

82

87

62N

82

87

63

82

87

70

82

87

71

82

87

79

82

87

U10

Perceel

U10

Coördinaten (hddd(gr)mm.mmm')

N52 06.286

E005 26.456

Datum

20-7-2011

Weer

Bewolking 90%

Wind 2BF

21GrC

Droog

Door

Gerben Bakker

Alterra

Jan Bokhorst

Louis Bolk Instituut

Onverstoorde 700cc monsters:

Diepte (cm)

nummer	bovenkant	onderkant
-	-	-

Onverstoorde 100cc monsters:

Diepte (cm)

nummer	bovenkant	onderkant
47	10	15
48	10	15
54	10	15
56	10	15
64	10	15
72	10	15
80	10	15
513	10	15
481	27	32
482	27	32
489	27	32
490	27	32
497	27	32
498	27	32
505	27	32
506	27	32
483	46	51
491	46	51
499	46	51
507	46	51
508	46	51
514	46	51
515	46	51
516	46	51

U12

Perceel

U12

Coördinaten (hddd(gr)mm.mmm')

N52 03.733

E005 28.404

Datum	20-7-2011	
Weer	Bewolking 90%	Wind 2BF
	21GrC	Droog
Door	Gerben Bakker	Alterra
	Jan Bokhorst	Louis Bolk Instituut

Onverstoorde 700cc monsters:

Diepte (cm)

nummer	bovenkant	onderkant
-	-	-

Onverstoorde 100cc monsters:

Diepte (cm)

nummer	bovenkant	onderkant
41	5	10
49	5	10
57	5	10
58	5	10
65	5	10
66	5	10
73	5	10
74	5	10
42	54	59
43	54	59
50	54	59
51	54	59
59	54	59
67	54	59
75	54	59
76	54	59

U14

Perceel

U14

Coördinaten (hddd(gr)mm.mmm) N52 02.411

E5 27.535

Datum	7-7-2011	
Weer	Bewolking 100%	Wind 4BF
	22GrC	Droog
Door	Gerben Bakker	Alterra

Onverstoorde 700cc monsters:

Diepte (cm)

nummer	bovenkant	onderkant
H11	5	15
H12	5	15
H21	60	70
H22	60	70

Onverstoorde 100cc monsters:

Diepte (cm)

nummer	bovenkant	onderkant
1	5	10
2	5	10
9	5	10
10	5	10
17	5	10
18	5	10
7	67	72
16	67	72
22	67	72
23	67	72
31	67	72
39	67	72

U18

Perceel

(U17/)U18

Coördinaten (hddd(gr)mm.mmm')

N52 10.114

E005 30.807

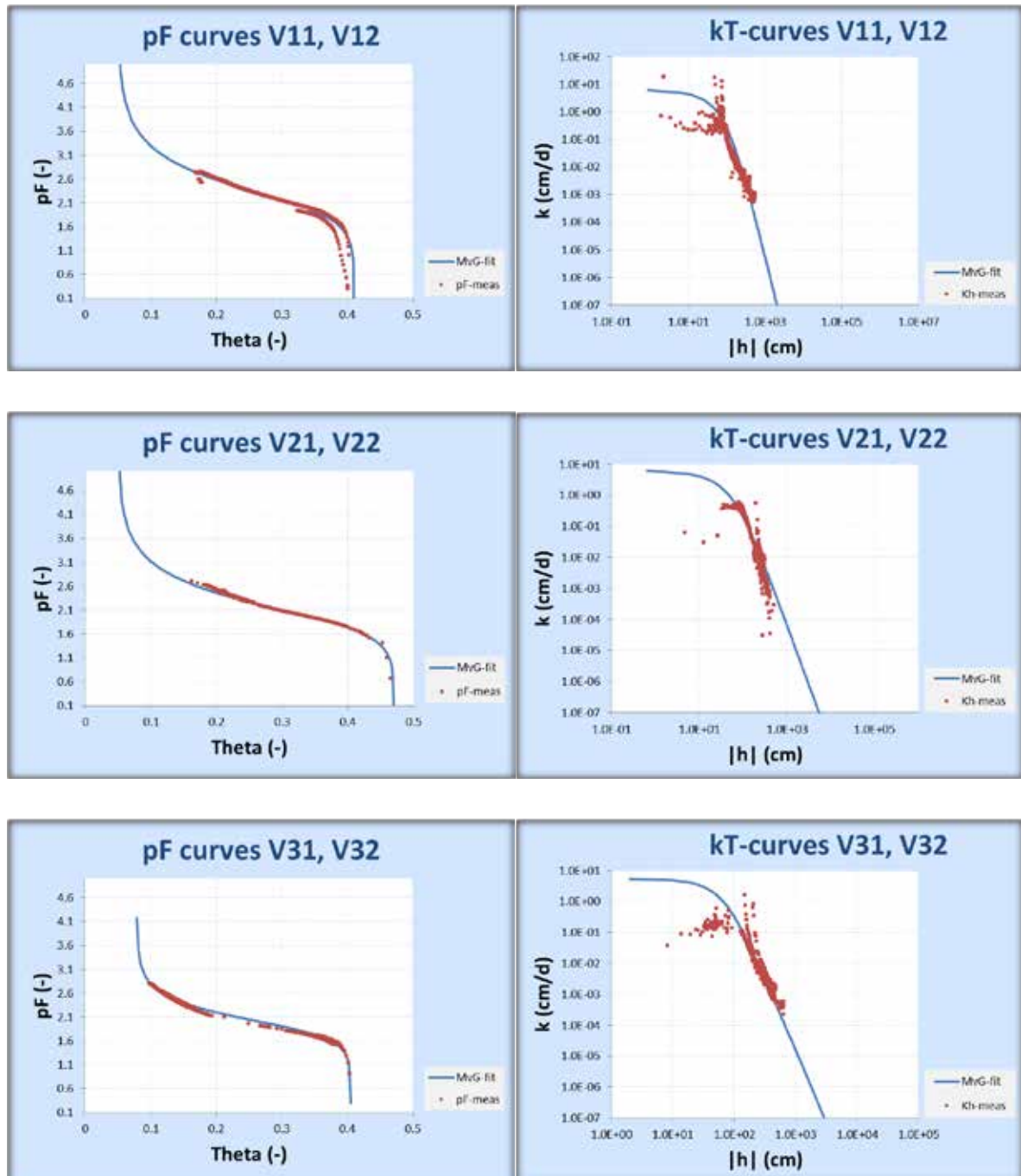
Datum	20-7-2011	
Weer	Bewolking 90%	Wind 2BF
	21GrC	Droog
Door	Gerben Bakker	Alterra
	Jan Bokhorst	Louis Bolk Instituut

nummer	Diepte (cm)	
	bovenkant	onderkant
-	-	-

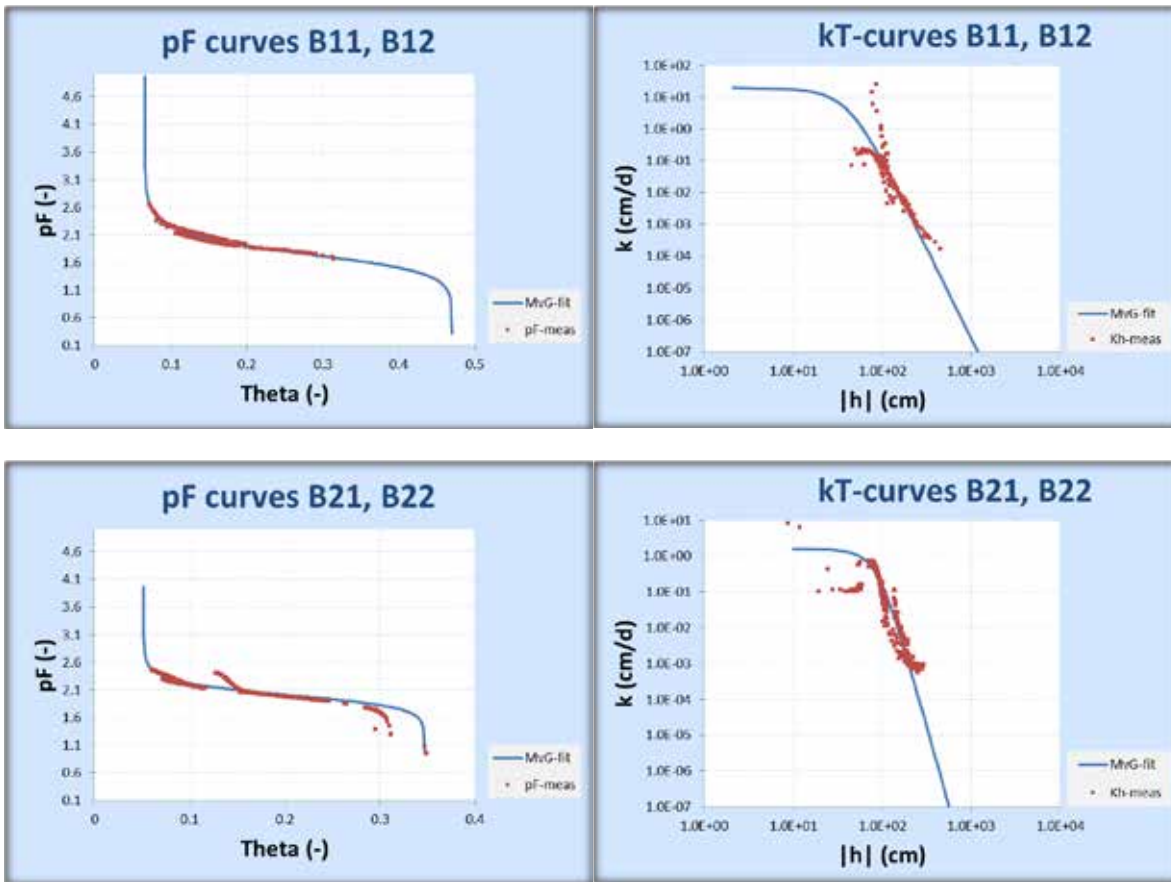
nummer	Diepte (cm)	
	bovenkant	onderkant
484	5	10
485	5	10
492	5	10
493	5	10
500	5	10
501	5	10
509	5	10
517	5	10
486	47	52
487	47	52
494	47	52
495	47	52
502	47	52
503	47	52
510	47	52
518	47	52

Bijlage 5 Meetresultaten en MvG-curve fitting

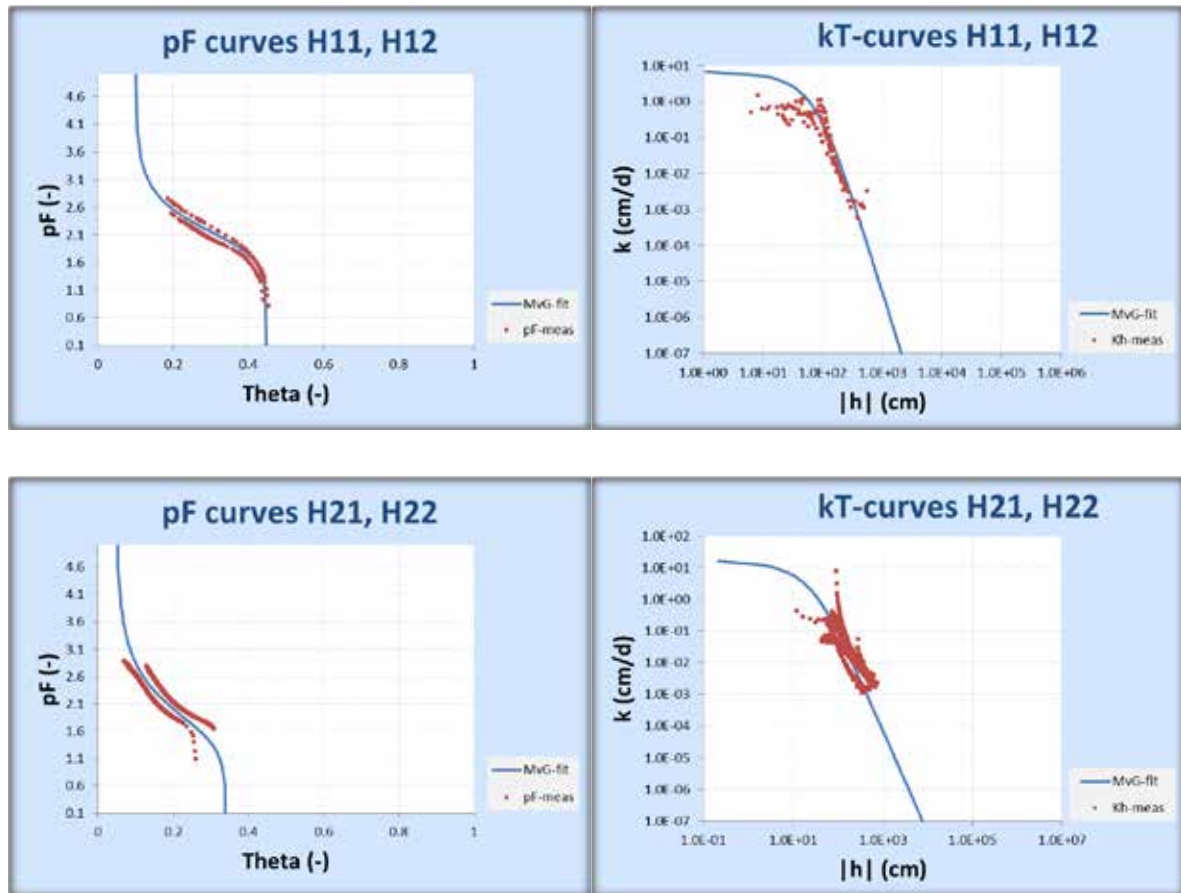
U2



U4

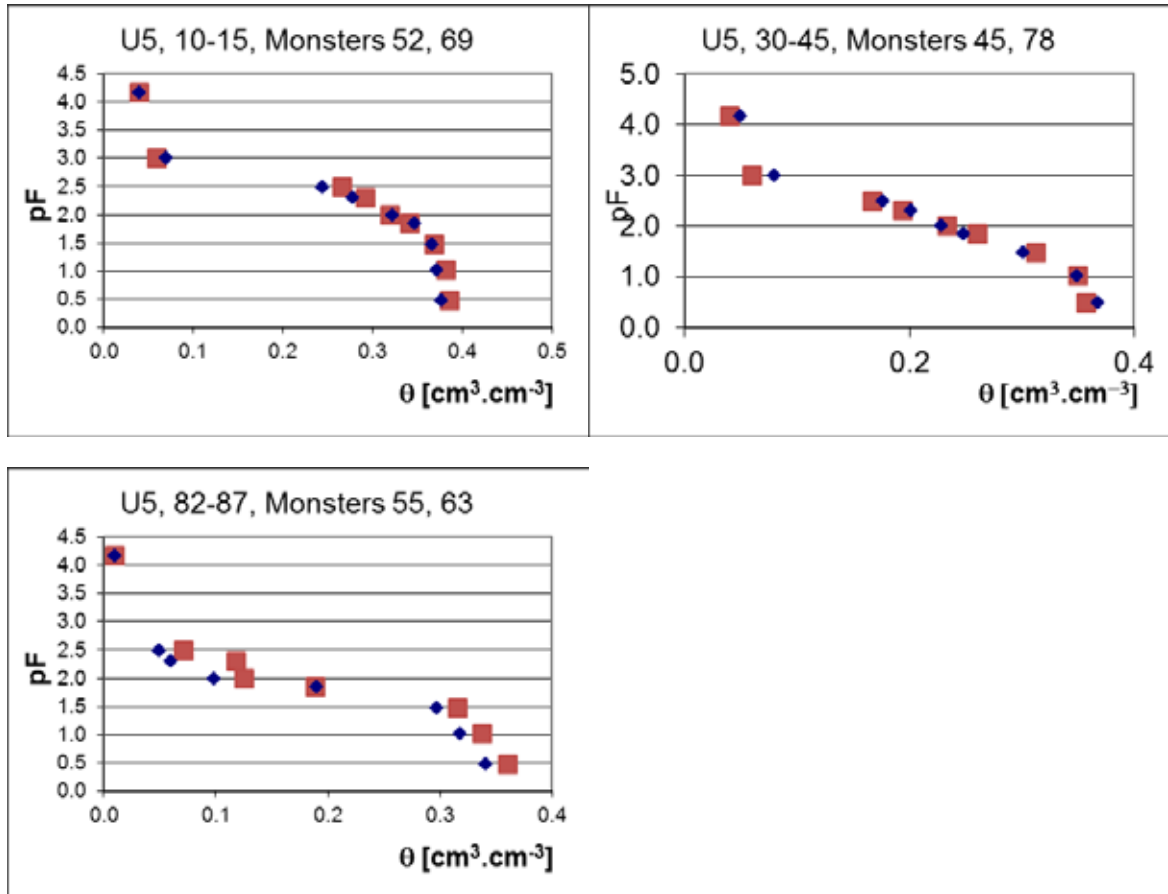


U14

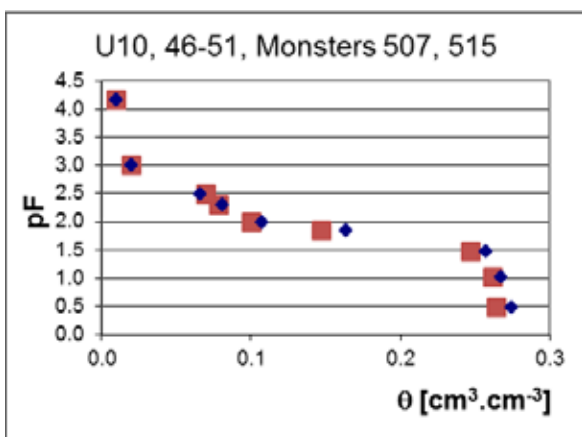
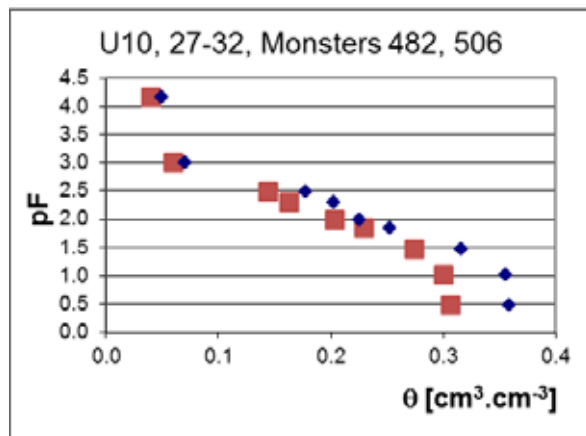
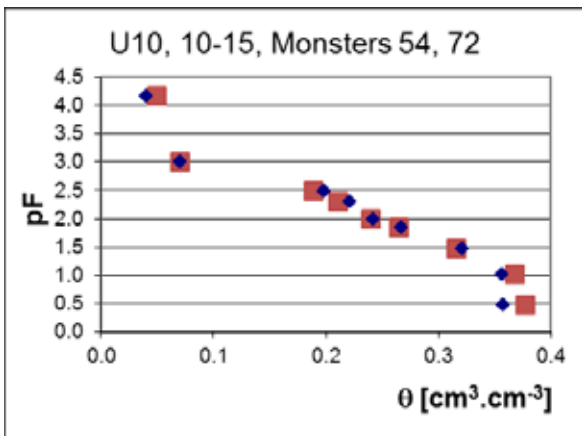


Bijlage 6 Retentiekaracteristieken

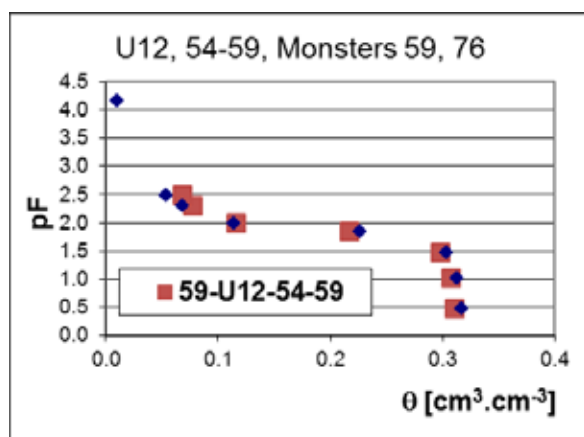
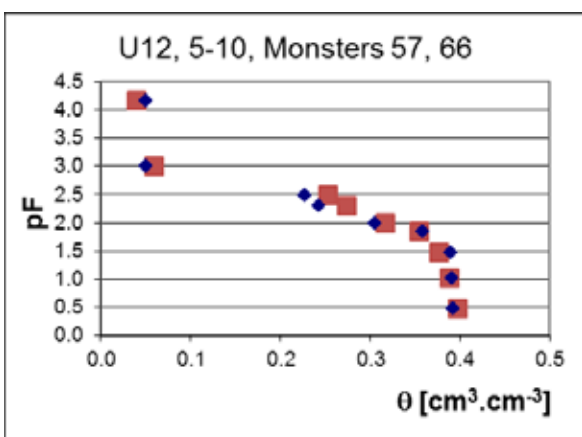
U5



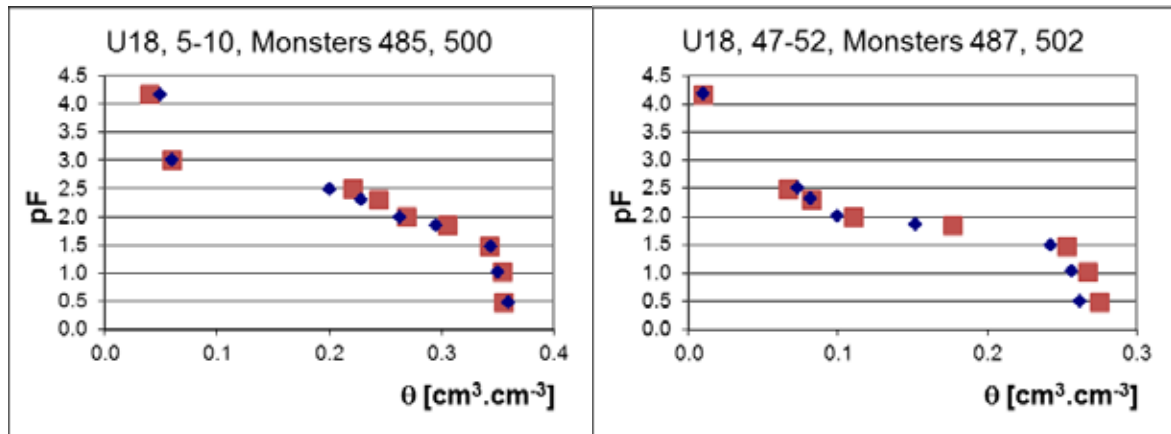
U10



U12



U18



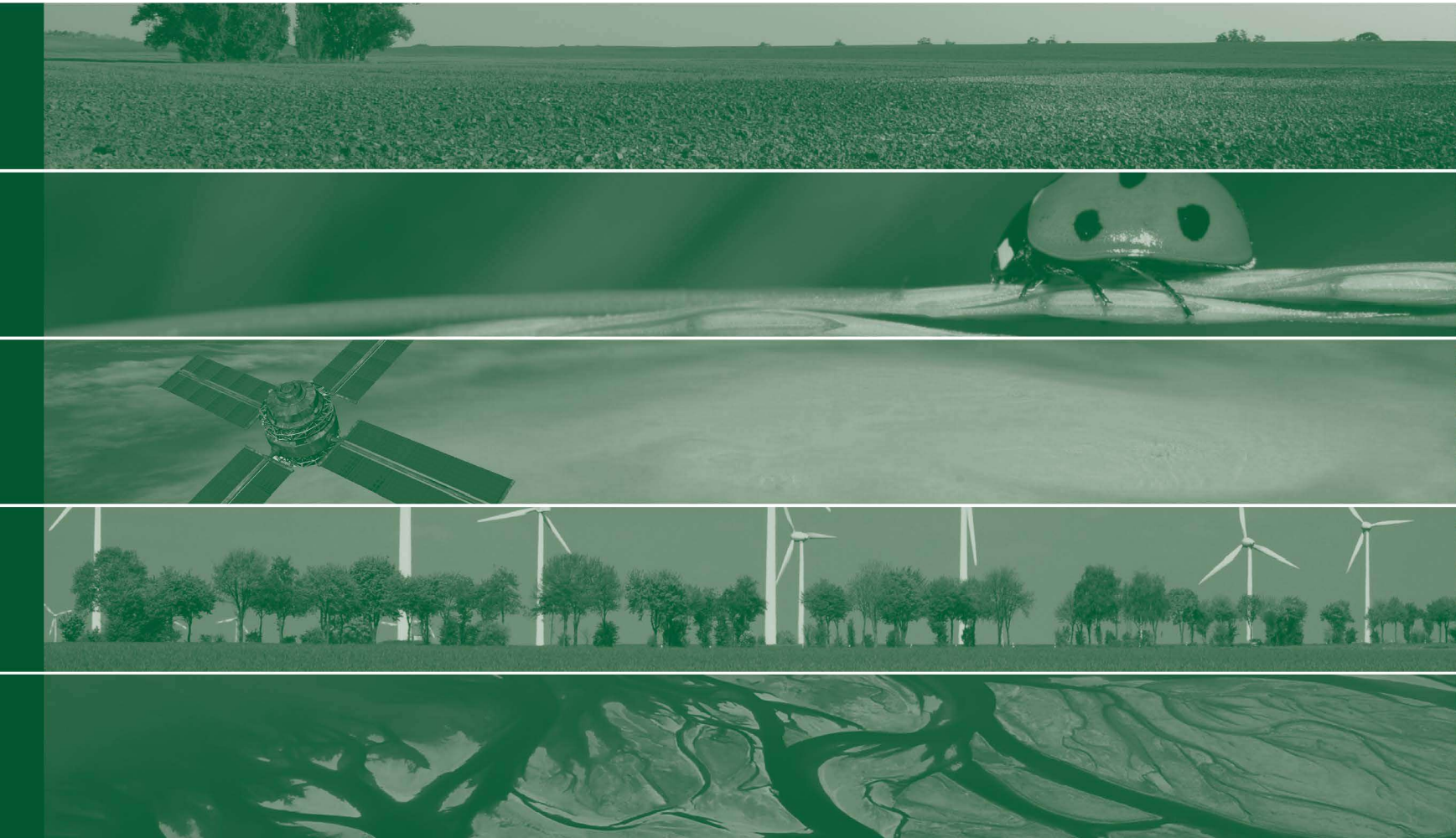
Bijlage 7 Gehalten organische stof en aggregaten in geselecteerde horizonten

Perceel	Horizont	Diepte (cm -mv)	Staring eenheid	%OS		Aggregaat gewichtsfractie			
				mean	sd	< 1.0 mm	1 - 2 mm	2 - 4 mm	4 - 8 mm
U2	1Aap	5-10	B3	4.86	0.02	0.24	0.12	0.21	0.43
	1Bhb	45-50	O3	6.94	0.05	0.37	0.11	0.16	0.36
	1BCb	60-65	O2	2.76	0.11	0.45	0.08	0.14	0.32
U4	1Aap	5-10	B3	1.03	0.01	0.47	0.07	0.14	0.32
	1Cg2	60-65	O2	0.31	0.05	0.44	0.12	0.17	0.27
U5	Ap	10-15		5.09	0.11	0.22	0.09	0.18	0.51
	C	82-87		0.30	0.06	0.56	0.06	0.11	0.27
U10	1Aap	10-15	B3	3.34	0.06	0.40	0.09	0.17	0.34
	1ACg-1C1	27-32	B3-O3	1.77	0.18	0.25	0.12	0.21	0.42
	1Cg1	46-51	O3	0.36	0.03	0.37	0.11	0.16	0.36
U12	1Aap	5-10	B3	5.79	0.14	0.20	0.11	0.20	0.49
	1Cg1	54-59	O3	0.19	enkelvoud	0.92	0.00	0.01	0.07
U14	1Aap	5-10	B2	10.02	0.01	0.29	0.08	0.17	0.47
	1BCb	67-72	O1	0.83	0.05	0.19	0.11	0.21	0.50
U18 (U17)	1Ap	5-10	B3 ?	3.28	0.01	0.29	0.09	0.19	0.42
	C	47-52	O3 ?	0.49	0.03	0.29	0.10	0.20	0.41

Bijlage 8 Overzicht bodemfysische bouwstenen voor modelering

Locatie	Bovenkant (cm -mv)	Onderkant (cm -mv)	Code	θ_r	θ_s	α	n	l	K_s	m
U1	0	90	RB2	0.030	0.400	0.0150	1.700	0.000	7.884	0.412
	90	105	O2	0.020	0.38	0.0213	1.951	0.168	12.68	0.487
	105	120	RO1	0.039	0.325	0.0103	3.500	0.000	1.656	0.714
U2	0	30	V1x	0.050	0.410	0.0085	1.698	3.284	6.622	0.411
	30	65	V2x	0.050	0.470	0.0130	1.750	0.443	6.603	0.429
	65	73	V3x	0.079	0.405	0.0123	2.327	0.000	5.518	0.570
	73	120	O2	0.020	0.38	0.0213	1.951	0.168	12.68	0.487
U3	0	41	B3	0.020	0.46	0.0144	1.534	-0.215	15.42	0.348
	41	100	O2	0.020	0.38	0.0213	1.951	0.168	12.68	0.487
U4	0	5	B1	0.02	0.43	0.0234	1.801	0.000	23.41	0.445
	5	43	B1x	0.066	0.470	0.0213	2.816	0.000	19.98	0.645
	43	>80	B2x	0.052	0.347	0.0108	4.009	0.274	1.563	0.751
U5	0	27	RB2	0.030	0.400	0.0150	1.700	0.000	7.884	0.412
	27	36	O2	0.020	0.38	0.0213	1.951	0.168	12.68	0.487
	36	100	RO1	0.039	0.325	0.0103	3.500	0.000	1.656	0.714
U6	0	41	B3	0.020	0.46	0.0144	1.534	-0.215	15.42	0.348
	39	55	O3	0.010	0.34	0.0170	1,717	0.000	10.87	0.999
	>55		O2	0.020	0.38	0.0213	1.951	0.168	12.68	0.487
U7	0	60	B3	0.020	0.46	0.0144	1.534	-0.215	15.42	0.348
	>60		O3	0.010	0.34	0.0170	1,717	0.000	10.87	0.999
U8	0	36	RB2	0.030	0.400	0.0150	1.700	0.000	7.884	0.412
	36	120	RO1	0.039	0.325	0.0103	3.500	0.000	1.656	0.714
U9	0	25	RB2	0.030	0.400	0.0150	1.700	0.000	7.884	0.412
	25	50	O2	0.020	0.38	0.0213	1.951	0.168	12.68	0.487
	50	120	RO1	0.039	0.325	0.0103	3.500	0.000	1.656	0.714
U10	0	31	B3	0.020	0.46	0.0144	1.534	-0.215	15.42	0.348
	31	100	O2	0.020	0.38	0.0213	1.951	0.168	12.68	0.487
U11	0	30	B3	0.020	0.46	0.0144	1.534	-0.215	15.42	0.348
	30	60	O3	0.010	0.34	0.0170	1,717	0.000	10.87	0.999
	60	120	O2	0.020	0.38	0.0213	1.951	0.168	12.68	0.487
U12	0	42	B3	0.020	0.46	0.0144	1.534	-0.215	15.42	0.348
	42	100	O2	0.020	0.38	0.0213	1.951	0.168	12.68	0.487
U13	0	28	RB2	0.030	0.400	0.0150	1.700	0.000	7.884	0.412
	28	60	O2	0.020	0.38	0.0213	1.951	0.168	12.68	0.487

Locatie	Bovenkant (cm -mv)	Onderkant (cm -mv)	Code	θ_r	θ_s	α	n	l	K_s	m
	60	120	R01	0.039	0.325	0.0103	3.500	0.000	1.656	0.714
U14	0	54	H1x	0.100	0.447	0.0105	1.900	1.722	6.860	0.474
	54	>100	H2x	0.050	0.340	0.0260	1.600	0.000	17.621	0.375
U15	0	44	RB2	0.030	0.400	0.0150	1.700	0.000	7.884	0.412
	44	120	R01	0.039	0.325	0.0103	3.500	0.000	1.656	0.714
U16	0	46	B3	0.020	0.46	0.0144	1.534	-0.215	15.42	0.348
	46	60	O3	0.010	0.34	0.0170	1,717	0.000	10.87	0.999
	60	120	O2	0.020	0.38	0.0213	1.951	0.168	12.68	0.487
U17	0	28	RB2	0.030	0.400	0.0150	1.700	0.000	7.884	0.412
	28	50	O2	0.020	0.38	0.0213	1.951	0.168	12.68	0.487
	50	120	R01	0.039	0.325	0.0103	3.500	0.000	1.656	0.714
U18	0	34	B3	0.020	0.46	0.0144	1.534	-0.215	15.42	0.348
	34	100	O2	0.020	0.38	0.0213	1.951	0.168	12.68	0.487
U19	0	70	RB2	0.030	0.400	0.0150	1.700	0.000	7.884	0.412
	70	120	R01	0.039	0.325	0.0103	3.500	0.000	1.656	0.714
U20	0	90	RB2	0.030	0.400	0.0150	1.700	0.000	7.884	0.412
	90	105	O2	0.020	0.38	0.0213	1.951	0.168	12.68	0.487
	105	120	R01	0.039	0.325	0.0103	3.500	0.000	1.656	0.714



Alterra is onderdeel van de internationale kennisorganisatie Wageningen UR (University & Research centre). De missie is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen UR bundelen negen gespecialiseerde en meer toegepaste onderzoeksinstituten, Wageningen University en hogeschool Van Hall Larenstein hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 40 vestigingen (in Nederland, Brazilië en China), 6.500 medewerkers en 10.000 studenten behoort Wageningen UR wereldwijd tot de vooraanstaande kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen natuurwetenschappelijke, technologische en maatschappijwetenschappelijke disciplines vormen het hart van de Wageningen Aanpak.

Alterra Wageningen UR is het 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.

Meer informatie: www.alterra.wur.nl