



ALTERRA
WAGENINGEN UR

Een inventariserend onderzoek naar de ondergrondverdichting van zandgronden en lichte zaveln

J.J.H. van den Akker
W.J.M. de Groot

Alterra-rapport 1450, ISSN 1566-7197



Een inventariserend onderzoek naar de ondergrondverdichting van zandgronden en lichte zavel

Een inventariserend onderzoek naar de ondergrondverdichting van zandgronden en lichte zavel

**J.J.H. van den Akker
W.J.M. de Groot**

Alterra-rapport 1450

Alterra, Wageningen, 2008

REFERAAT

Akker, J.J.H. van den en W.J.M. de Groot, 2008. *Een inventariserend onderzoek naar ondergrondverdichting van zandgronden en lichte zavel*. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 1450. 77 blz.; 14 fig.; 6 tab.; 31 ref.

Bodemverdichting en met name ondergrondverdichting is in de Europese Bodemstrategie aangemerkt als één van de bedreigingen voor de bodem. Uit literatuuronderzoek en een analyse van bodemdata in BIS (Bodem Informatie Systeem) blijkt dat in Nederland vooral ondergronden van lichte zavel en zandgronden sterk zijn verdicht. Een nader inventariserend onderzoek is uitgevoerd naar de fysische bodemkwaliteiten van deze ondergronden en van een lössgrond en naar het effect van het losmaken van de ondergrond van een zware zavel. De ondergronden blijken sterk verdicht met slechte fysische bodemeigenschappen. Vergelijking van het middendeel van de percelen met de kopakkers leert dat de eigenschappen nog verder kunnen verslechteren. Uit een vergelijking met dichtheden van de percelen in het verleden blijkt dat de ondergrondverdichting is toegenomen. Het losmaken van de ondergrond van de zware zavel bleek geen verbetering van de bodemkwaliteiten op te leveren.

Trefwoorden: bodemverdichting, ondergrondverdichting, fysische bodemkwaliteit, infiltratiecapaciteit, poriëngehalte, verzadigde doorlatendheid, indringweerstand, bodemvruchtbaarheid.

ISSN 1566-7197

Dit rapport is digitaal beschikbaar via www.alterra.wur.nl. Een gedrukte versie van dit rapport, evenals van alle andere Alterra-rapporten, kunt u verkrijgen bij Uitgeverij Cereales te Wageningen (0317 46 66 66). Voor informatie over voorwaarden, prijzen en snelste bestelwijze zie www.boomblad.nl/rapportenservice

© 2008 Alterra

Postbus 47; 6700 AA Wageningen; Nederland

Tel.: (0317) 480700; fax: (0317) 419000; e-mail: info.alterra@wur.nl

Niets uit deze uitgave mag worden veeleelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Alterra.

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

Inhoud

Woord vooraf	7
Samenvatting	9
1 Inleiding	11
2 Drempelwaarden voor bodemfysische eigenschappen in verband met ondergrondverdichting	15
3 Metingen en lokaties	19
3.1 Metingen	19
3.2 Lokaties	20
3.3 Metingen en lokatie aanvullend onderzoek op een zware zavel	22
4 Resultaten	23
4.1 Dichtheid	24
4.2 Luchtgehalten in het natte traject	25
4.3 Indringweerstand	28
4.4 Bewortelingsdichtheden	29
4.5 Verzadigde waterdoorlatendheid	32
4.6 Resultaten aanvullend onderzoek op een zware zavel	32
5 Discussie	33
5.1 Fysische bodemkwaliteit van de perceelsmiddens	34
5.2 Fysische bodemkwaliteit van de kopakkers	35
5.3 Visuele beoordeling van de bodemverdichting	36
5.4 Vergelijking meetresultaten met vroegere metingen	37
5.5 Discussie aanvullend onderzoek op een zware zavel	40
6 Conclusies	41
Literatuur	45
Bijlage 1 Profiel- en structuurbeschrijvingen en worteltellingen	49
Bijlage 2 Codes en benamingen bij een profielbeschrijving	57
Bijlage 3 Verslag van de bodemfysische metingen bij de proef “Onderzoek naar de verbetering van de structuur van de ondergrond”.	61

Woord vooraf

Bodemverdichting en met name ondergrondverdichting is in de Europese Bodemstrategie aangemerkt als één van de bedreigingen voor de bodem. Deze bedreiging bestaat eruit dat door de verdichting van de ondergrond de fysische bodemkwaliteit sterk afneemt en resulteert in een sterke reductie van bewortelingsdiepten, infiltratiecapaciteit en omstandigheden voor bodemleven. Daardoor neemt de bodemvruchtbaarheid af en wordt bij perioden met veel neerslag de grond al snel te nat voor grondbewerking, berijden en oogstwerkzaamheden. Uit literatuuronderzoek en een analyse van bodemdata in BIS (Bodem Informatie Systeem) blijkt dat in Nederland vooral ondergronden van lichte zavel en zandgronden sterk zijn verdicht. Dit was reden om in het kader van het Beleidsondersteunend Onderzoek Vitaal Platteland – Bodem een oriënterend onderzoek te doen naar de verdichting van Nederlandse zandgronden en lichte zavel. Daarnaast is in aansluiting bij een lopend onderzoek van PPO – Wageningen UR aanvullend onderzoek verricht aan de fysische bodemkwaliteit van een verdichte en daarna losgemaakte ploegzool van een zware zavel. Het onderzoek is de eerste stap in de ontwikkeling van een systematiek voor de aanwijzing van prioriteitsgebieden voor verdichting in Nederland.

De rapportage is het eerste resultaat van het deelproject ‘systematiek aanwijzing prioriteitsgebieden – thema verdichting’ van het BO-project Europese Bodemstrategie, uitgevoerd in opdracht van het ministerie van LNV als onderdeel van het cluster Vitaal Landelijk Gebied, thema Bodem. Contactpersoon en opdrachtgever bij de directie Platteland van LNV hiervoor was mevrouw M. Hopman.

Het onderzoek heeft plaatsgevonden op acht proefboerderijen en bij één particulier. De auteurs zijn de bedrijfsleiders en medewerkers van de proefboerderijen en de heer Halsema te Kloosterburen erkentelijk voor de welwillende medewerking.

Samenvatting

Uit een eerdere literatuurstudie blijkt dat op basis van de uitkomsten van Nederlands onderzoek in het verleden op zandgronden en lichte zavel en recent onderzoek in Duitsland kan worden geconcludeerd dat het zeer waarschijnlijk is dat een belangrijk deel van de relatief lichte gronden te sterk verdichte ondergronden heeft. De ondergrond begint direct onder de ploegdiepte en de ploegzool wordt gedefinieerd als het bovenste deel van de ondergrond. Waarschijnlijk is in de afgelopen tientallen jaren het oppervlakte met te sterk verdichte ondergrond toegenomen en reikt de verdichting dieper in de ondergrond dan vroeger. Uit onderzoek in het buitenland blijkt dat voor lössgronden de situatie waarschijnlijk hetzelfde is. Om het vermoeden te onderzoeken dat de zandgronden en lichte zavel en wellicht ook lössgronden verdichtingsgevoelig zijn en bij deze gronden inderdaad de ondergrondverdichting is toegenomen, is een inventariserend onderzoek uitgevoerd op 8 ondergronden. Van deze ondergronden waren er vier zandgrond, drie lichte zavel en één een lössgrond. Door naast de bodemgesteldheid van het midden van de percelen ook de kopakkers te onderzoeken, kon een goede indruk worden verkregen van de toekomstverwachting. Daarbij wordt er van uitgegaan dat de intensievere berijding van de kopakker leidt tot een versnelde degradatie van de ondergrond door verdichting. Aan voornamelijk de ondergrond zijn dichtheden, luchtgehalten bij verschillende vochtspanningen tot -100 cm H₂O, indringweerstand en verzadigde doorlatendheden bepaald. Daarnaast zijn visueel de structuur en de beworteling beoordeeld. De gemeten grootheden zijn vergeleken met drempelwaarden die in het rapport zijn gegeven en zijn gebaseerd op literatuurstudie. Tot slot is de toestand van vier van de gronden vergeleken met de toestand in het verleden, zoals uit vroegere metingen kon worden bepaald. Aanvullend is bij een zware zavel in de Flevopolder waar problemen met wateroverlast optraden nader onderzocht. Het betrof een proefperceel van het PPO – Wageningen UR, waarbij het effect van losmaken van de ondergrond door middel van spitten, woelen en een woeler aan de ploeg werd onderzocht. Het onderzoek naar de fysische bodemeigenschappen van de al of niet losgemaakte ploegzool vond één jaar na het losmaken plaats.

De conclusie van het onderzoek is dat de literatuurstudie wordt bevestigd en dat een groot deel van de Nederlandse zandgronden en lichte zavel verdichtingsgevoelig zijn, voor een groot deel verdicht zijn en dat verdere verdichting dreigt. Ook het vermoeden dat deze conclusies ook gelden voor de Nederlandse lössgronden, wordt door het uitgevoerde onderzoek ondersteund. Voor een nadere specificering welke zandgronden wellicht minder verdichtingsgevoelig zijn, is verder onderzoek nodig. Uit het onderzoek aan de zware zavel bleek dat het losmaken van de ploegzool geen verbetering van de fysische bodemkwaliteit had opgeleverd. Een kanttekening hierbij is dat 2007 een vrij nat jaar was, waardoor het effect van natuurlijk herstel door krimpen zeer beperkt is geweest.

Tot slot worden nog een aantal aanbevelingen voor verder onderzoek gedaan.

1 Inleiding

Bodemverdichting wordt gedefinieerd als verdichting en vervorming van de bodemstructuur, gewoonlijk als gevolg van mechanische spanningen. Verdichting veroorzaakt een afname van de totale en luchtgevulde porositeit en van de indringingsweerstand van grond. Verdichting verlaagt tevens de productiviteit en biologische activiteit van de bodem. Verder is het zo dat er vanwege de afgenomen infiltratiecapaciteit en doorlatendheid voor water een verhoogd risico bestaat voor bodemerosie en verlies van voedingsstoffen als gevolg van afstroming en denitrificatie. Natte gronden zijn zwakker en gevoeliger voor verdichting dan droge gronden. In natte perioden zijn deze gronden eerder te nat voor grondbewerking en berijding dan bodems met een goede infiltratiecapaciteit.

Verdichting wordt een probleem als de bodemstructuur zodanig is verslechterd dat gewasopbrengsten en de waterinfiltratiecapaciteit aanzienlijk worden verlaagd. Problemen met verdichting komen overal ter wereld voor, maar zijn het meest frequent op plaatsen waar bij land- of bosbouw zware machines worden ingezet. Uit voorlopige schattingen uit 1991 blijkt dat in Europa een gebied van rond de 33 Mha of meer kan zijn aangetast door bodemverdichting (Oldeman et al., 1991). Recent onderzoek heeft aangetoond dat in Centraal en Oost-Europa verdichting de meest wijdverspreide vorm van fysieke bodemaantasting is (Batjes, 2001). In dit gebied bleek circa 25 Mha licht en circa 36 Mha matig te zijn verdicht.

Het grote belang van de fysische bodemkwaliteit in zowel de landbouwproductiviteit als milieuaspecten zoals biodiversiteit, erosie en afstroming van nutriënten en agrochemicaliën en overstromingsgevaar door beperking van de infiltratiecapaciteit was reden om bodemverdichting op te nemen in de lijst met bodembedreigingen in de EU nota COM(2002) 179 "Naar een thematische strategie inzake bodembescherming".

Als vervolg op deze nota zijn werkgroepen in het leven geroepen die wat betreft bodemverdichting aangaven dat vooral ondergrondverdichting een probleem is. Sterk samengevat werden o.a. de volgende aanbevelingen betreffende bodemverdichting gegeven (Van Camp et al., 2004):

1. Aanvullende informatie verzamelen over de werkelijke verdichtingstoestand, kwantificeren van de effecten van verdichting; een inventarisatie van huidige machinepark en trends daarin.
2. Maatregelen baseren op preventie van verdichting
3. Maatregelen in samenwerking met alle stakeholders (overheid, boeren, industrie) ontwerpen.
4. Ontwikkelen en verbeteren van modellen en een handleiding voor preventie van verdichting maken.

Dit rapport gaat met name in op punt 1 van de aanbevelingen betreffende de vaststelling van de werkelijke verdichtingstoestand op dit moment.

Het rapport is ook van belang met betrekking tot de in 2006 uitgekomen Voorstel voor een Kaderrichtlijn Bodem (EC, 2006a, 2006b, 2006c), waarin gevraagd wordt om Risco Gebieden (Risk Areas) te identificeren voor onder andere Bodemverdichting. In een later stadium is de term Risico Gebieden vervangen door Prioriteits Gebieden (Priority Areas).

Verdichting van de ondergrond is een bekend probleem bij zandgronden en lichte zavelgronden (Boels, 1982). In het bijzonder de zandgronden met een hoog gehalte aan fijn zand en lichte zavelgronden met een laag kleigehalte kunnen worden verdicht tot compacte homogene grond zonder macroporiën en met zeer beperkte mogelijkheden voor beworteling. Sommige zandondergronden in Nederland (eerdgronden) hebben een hoog gehalte aan organische stof (> 3%). Deze zandgronden zijn minder kwetsbaar voor verdichting dan zandgronden met een laag gehalte aan organische stof, aangezien de organische stof deze gronden elastischer en beter doordringbaar voor beworteling maakt. Er is nooit een onderzoek uitgevoerd naar de staat van verdichting van gronden in Nederland. Daarom is onbekend hoe groot de oppervlakte van zandgronden en lichte zavelgronden met te sterk verdichte ondergrond is. Oorspronkelijk hadden vele zandgronden natuurlijk verdichte ondergronden, die werden losgemaakt om ze geschikter te maken voor landbouwgebruik. Losgemaakte ondergrond is echter kwetsbaar voor herverdichting en de structuur en de fysieke bodemeigenschappen van herverdichte grond zijn vaak slechter dan die van de oorspronkelijke te sterk verdichte grond. De verslechtering van de structuur en de bijbehorende aantasting van de fysieke en biologische eigenschappen van de ondergrond als gevolg van herverdichting is door Kooistra et al. (1984) en Kooistra & Boersma (1994) duidelijk aangetoond voor lichte zavelgronden in Nederland. Het éénmaal woelen van deze gronden heeft ertoe geleid dat nu elke drie tot vier jaar moet worden gewoeld.

Op basis van het Nederlands onderzoek in het verleden op zandgronden en lichte zavelgronden (Boels, 1982) kan worden geconcludeerd dat een groot deel van de zandgronden en lichte zavelgronden (ca 340.000 ha) gevoelig is voor verdichting. Van de zandgronden lopen vooral de fijnzandige gronden met een hoog leemgehalte gevaar (150 – 200.000 ha). Recent onderzoek in Duitsland geeft aan dat ook lössgronden zeer gevoelig zijn voor ondergrondverdichting (ca 170.000 ha). Gebaseerd op literatuurstudie geven Van den Akker et al., (2006) aan dat waarschijnlijk in de afgelopen tientallen jaren het gedeelte met te sterk verdichte ondergrond is toegenomen en de verdichting dieper in de ondergrond reikt. Niet elke ondergrondverdichting leidt tot een zodanig verslechtering van de bodemkwaliteiten, dat al de ondergrenzen voor bijvoorbeeld de verzadigde doorlatendheid en de bewortelbaarheid worden overschreden. Wel zorgen de verminderde bodemkwaliteiten voor beperkingen in de worteldiepte en kan bij zeer natte perioden de infiltratiecapaciteit en de aëratiemogelijkheden in gevaar komen. Daarnaast zijn de natte gronden dan ongeschikt voor grondbewerking en berijding.

Het onderzoek in dit rapport is vooral een steekproef en heeft zich beperkt tot 3 lichte zavelgronden, 4 zandgronden en 1 lössgrond. Een groot deel van de Nederlandse landbouwgronden valt dus buiten het onderzoek. Aanvullend is een

proefperceel van het PPO – Wageningen UR in de Flevopolder met een zware zavel nader onderzocht. Het betrof een perceel waar problemen met wateroverlast optraden, waarbij het effect van losmaken van de ondergrond door middel van spitten, woelen en een woeler aan de ploeg werd onderzocht. Het onderzoek naar de fysische bodemeigenschappen van de al of niet losgemaakte ploegzool vond één jaar na het losmaken plaats. In dit rapport wordt eerst een overzicht gegeven van de minimum eisen die aan een aantal bodemfysische eigenschappen aan de ondergrond worden gesteld. Daarna worden de 8 steekproeven gerapporteerd met achtereenvolgend een beschrijving van de lokaties, de resultaten van de bemonstering, een vergelijking van de gemeten en de minimaal gewenste bodemeigenschappen en de conclusies.

Het onderzoek aan de zware zavel wordt vooral in een bijlage gepresenteerd. Wel zijn de conclusies in de hoofdtekst opgenomen.

2 Drempelwaarden voor bodemfysische eigenschappen in verband met ondergrondverdichting

In dit hoofdstuk worden een aantal drempelwaarden voor bodemfysische eigenschappen gegeven die essentieel zijn voor twee hoofdfuncties van de ondergrond: de bewortelbaarheid en de infiltratiecapaciteit van water. Selectiecriteria bij de keuze van de te beschouwen drempelwaarden zijn niet alleen in hoeverre de bodemeigenschap beperkend is voor de bewortelbaarheid en de waterinfiltratiecapaciteit, maar ook de beschikbaarheid in databases en in hoeverre de bodemeigenschap goed, eenvoudig en met lage kosten kan worden gemeten. Uiteraard moet in de literatuur ook een betrouwbare drempelwaarde voor de beschouwde bodemeigenschap te vinden zijn

Packing density

De Packing Density (PD) blijkt een bruikbare parameter te zijn voor de staat van verdichting van de grond (Jones et al, 2003). De Engelse term wordt gebruikt omdat de vertaling “pakkingsdichtheid” in Nederland wordt gebruikt voor een relatieve dichtheid ten opzichte van een maximale dichtheid. Indien de dichtheid bekend is kan de Packing Density worden berekend uit de vergelijking (1).

$$PD = Db + 0.009C \quad (1)$$

Waarin: Db = het droge volumegewicht in g cm^{-3}
 PD = de Packing Density in g cm^{-3}
 C = het kleigehalte (in gewichts %)

Er waren drie klassen Packing Density onderscheiden: laag <1.40 , medium 1.40 tot 1.75 en hoog $> 1.75 \text{ g cm}^{-3}$

Ten opzichte van de gewone dichtheid heeft de Packing Density het voordeel dat er rekening wordt gehouden met het kleigehalte. Een kleigrond met een hoge dichtheid is namelijk aanzienlijk massiever en ondoordringbaarder voor wortels dan een zandgrond met dezelfde dichtheid.

Poriënvolume

De meeste plantenwortels hebben moeite met de beworteling van bodems met een poriënvolume kleiner dan 40% (Hidding, 1961).

$$n > 40\% \quad (2)$$

Wortels van maïs en bollen zijn dikker en kwetsbaarder dan fijnere wortels van andere planten, zoals bijvoorbeeld van granen en hebben zeker hogere poriënvolumes nodig dan 40%. Niet alleen is de indringweerstand van een grond met dit lage poriëngehalte te hoog, maar ook zijn er problemen met de zuurstofvoorziening naar de wortels (Bakker et al.1987, Tacket and Pearson, 1964). Poriënvolumes van 40% zijn in Nederland gekoppeld aan zandgronden en lichte

zavels (kleigehalten < 17.5%). In Nederland hebben kleigronden bijna altijd een poriëngehalte groter dan 40%.

Droog volumegewicht (Db)

De Packing Density drempelwaarde van 1.75 g cm^{-3} kan eenvoudig worden omgezet in een droog volumegewicht drempelwaarde door vergelijking (1) om te zetten:

$$Db < 1.75 - 0.009C \text{ g cm}^{-3} \quad (3)$$

Voor zandgronden met een laag organisch stofgehalte (zoals in het algemeen het geval is bij een zandondergrond) kan de drempelwaarde van 40% van het poriëngehalte worden omgezet in een drempelwaarde voor het volumegewicht::

$$Db < 1.6 \text{ g cm}^{-3} \quad (4)$$

Net als de drempelwaarde van 40% voor het poriënvolume is de drempelwaarde van 1.6 g cm^{-3} voor het droog volumegewicht alleen relevant voor zandgronden en lichte zavels ($C < 17,5\%$). Merk op dat de drempelwaarde (4) voor het droog volumegewicht lager is dan de drempelwaarde berekend met vergelijking (3) gebaseerd op de Packing Density voor een kleigehalte C tussen 0 en 17,5 %.

Luchtgepulde poriëngehalte (n_g)

Bakker et al., (1987) hebben voor een serie Nederlandse landbouwgronden de relatie vastgesteld tussen het luchtgepulde poriëngehalte n_g en de diffusie coëfficiënt D_s . De relaties zijn sterk afhankelijk van de structuur van de grond. Volgens Bakker et al. (1987) hebben plantenwortels nooit aëratie problemen indien $D_s > 30 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ en hebben ernstige aëratie problemen indien $D_s < 1.5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. De relaties van Bakker et al (1987) zijn gebruikt om deze limieten om te zetten naar drempelwaarden voor het luchtgepulde poriëngehalte n_g in Tabel 1.

Tabel 1. Het vastgestelde minimum en voorkeur van het luchtgepulde poriëngehalte om (ernstige) anaërobe condities voor plantenwortels te voorkomen.

Bodemstructuur Het luchtgepulde poriëngehalte n_g moet zijn:		
	<u>Ten minste</u>	<u>Bij voorkeur</u>
Zeër goed	> 2 %	> 14 %
Goed	> 5 %	> 15 %
Matig	> 8 %	> 17 %
Niet, Slecht	> 12 %	> 21 %

In het algemeen is de kwaliteit van de structuur van de ondergrond slechts matig. Van zandgronden en lichte zavels ligt de kwaliteit van de structuur van de ondergrond tussen de kwalificaties matig en slecht. Voor deze gronden nemen we daarom als drempelwaarde dat het luchtgepulde poriëngehalte minimaal 10% moet zijn. Bij een drempelwaarde voor het luchtgepulde poriëngehalte hoort een vochttoestand, die het beste kan worden uitgedrukt in een vochtspanning. Uitgegaan wordt van wat nattere omstandigheden, zoals in het voorjaar of in de herfst kunnen optreden. Een goede maat is dan de veldcapaciteit, die voor de meeste gronden gedefinieerd wordt als het vochtgehalte bij een vochtspanning van -50 cm waterdruk

(ten Cate et al., 1995). Voor goed doorlatende en niet opdrachtige hangwaterprofielen zou -100 cm waterdruk kunnen worden aangehouden (ten Cate et al., 1995), echter, bij een verdichte ondergrond wordt de doorlatendheid juist slechter en kan de opdrachtigheid groter worden. Daarom wordt voor de drempelwaarde van minimaal 10% luchtgevulde poriën uitgegaan van een vochtspanning van -50 cm waterdruk.

Verzadigde waterdoorlatendheid (K_{sat})

Volgens Lebert et al. (2003) is voor een ondergrond een verzadigde waterdoorlatendheid van $K_{sat} = 10 \text{ cm.d}^{-1}$ een goede drempelwaarde. Deze drempelwaarde van 10 cm.d^{-1} voor de verzadigde waterdoorlatendheid komt in Nederland overeen met de klassificatie “slecht” (Cultuurtechnische Vereniging, 1988).

$$K_{sat} > 10 \text{ cm dag}^{-1} \quad (5)$$

De verzadigde doorlatendheid van een grond kan worden beschouwd als één van de beste indicatoren voor de fysische kwaliteit van een grond, omdat het een directe relatie heeft met de kwaliteit van de structuur en de aanwezigheid van continue macroporiën. Het grootste deel van de afname van de poriën bij verdichting gaat ten koste van de macroporiën. Door de vervorming van de grond tijdens verdichting neemt de continuïteit van de macroporiën af. Zowel de afname van het volume aan macroporiën als de onderbreking van de continuïteit van de macroporiën resulteren in een sterke afname van de verzadigde waterdoorlatendheid en van de diffusie van zuurstof in de grond.

Daarnaast is de verzadigde doorlatendheid niet alleen een belangrijke indicator voor de bodemkwaliteit voor beworteling, maar is ook op zichzelf al een essentiële bodemeigenschap cq bodemfunctie met een directe belang voor andere “soil threats”. Een slechte waterdoorlatendheid en daardoor lage infiltratiecapaciteit kan bij zware neerslag oppervlakkige afstroming en erosie veroorzaken en aanleiding geven voor overstromingen. De Technical Working Group "Erosion" van de Thematic Strategy for Soil Protection of the European Union klassificeerde de verzadigde waterdoorlatendheid als een belangrijke indicator voor de bodemkwaliteit (Van Camp et al., 2004). De verzadigde doorlatendheid is relatief eenvoudig te meten en is ook een belangrijke bodemeigenschap in de berekening en modellering van onder andere infiltratie van water, oppervlakkige afstroming, erosie, transport van nutriënten en stoffen.

Penetrometer indringweerstand (I_w)

De mechanische indringweerstand van een verdichte grond is voor wortels een belangrijke beperking om de ondergrond volledig en met name in de diepte te exploreren. Hierdoor kan het gewas minder profiteren van nutriënten en water in de ondergrond en wordt het veel droogtegevoeliger. De indringweerstand wordt in Nederland gemeten met een penetrometer waarbij een conus met een basisoppervlak van 1 cm^2 en een tophoek van 60° wordt gebruikt. Door de kracht waarmee de conus in de grond wordt geduwd te delen door het oppervlak van de basis van de conus wordt de indringweerstand I_w uitgedrukt in MegaPascal (MPa) verkregen. Bedacht

moet worden dat de grootte van de conus en de tophoek een grote invloed hebben op de indringweerstand uitgedrukt in MPa. Daarom kunnen indringweerstandsen verkregen met conusen die verschillen in grootte of tophoek niet zonder meer met elkaar worden vergeleken zonder omrekeningsfactoren te gebruiken. Omdat de indringweerstand sterk afhankelijk is van de vochttoestand van de grond moeten indringweerstandsen worden gemeten als de grond vochtig is, bijvoorbeeld als de grond min of meer op veldcapaciteit is. De kritische grens voor beworteling ligt bij een indringweerstand van 2,5 à 3,0 MPa (ten Cate et al., 1995). Als er een stelsel van voldoende grote poriën aanwezig is, verschuift de kritische grens naar 3 – 5 MPa voor zandgronden (ten Cate et al., 1995). Als een soort gemiddelde wordt in dit rapport een drempelwaarde van de indringweerstand genomen ter grootte van:

$$I_w = 3 \text{ MPa} \quad (6)$$

De indringweerstand moet dan zijn bepaald met een conus met een basisoppervlak van 1 cm^2 en een tophoek van 60° op vochtige grond.

3 Metingen en lokaties

3.1 Metingen

Per lokatie zijn voor zowel de kopakker als het midden de volgende metingen verricht:

A. Op een plek in het midden en op de kopakker:

1. Een profiel- en structuurbeschrijving en worteltelling tot ca 1 m diepte
2. Een bepaling van de dikte van de bouwvoor en bepaling van de dichtheid van de bouwvoor met behulp van ringmonsters in drievoud
3. Een bepaling in drievoud van de dichtheid en luchtgevulde poriëngehalte bij -30, -50, -60 en -100 cm waterdruk, van de laag direct onder de bouwvoor (in de ploegzool), 10 cm daaronder en 10 cm daar weer onder met behulp van ringen met een hoogte van 5 cm.
4. Een bepaling in drievoud van de verzadigde doorlatendheid van de laag direct onder de bouwvoor met behulp van ringen met een hoogte van 10 cm en een diameter van ca 19 cm.
5. Textuurbepaling en bepaling van organisch stofgehalte en kalkgehalte van de bouwvoor en de ploegzool in het midden van het veld en alleen van de ploegzool van de kopakker

B. In een raai dwars op het veld door het midden en door de kopakker:

6. Bepaling van de indringweerstand in 25-voud in een raai dwars op het veld, waarbij in 5 clusters van 5 prikken de indringweerstand tot 80 cm diepte werd gemeten.
7. Een bepaling in vijfvoud van de dichtheid van de ploegzool in een raai dwars op het veld. Ter plekke van de clusters met 5 penetrometerwaarnemingen werd een ring met een hoogte van 5 cm gestoken

Er is zoveel mogelijk gebruik gemaakt van bemonsterringen met een inwendige diameter van 7,65 of 8,0 cm en een hoogte van 5 cm om de nauwkeurigheid van de metingen te verhogen. In een aantal gevallen zijn de standaard 100 cc ringen met een hoogte van 5 cm gebruikt.

De monsters voor de bepaling van de gehalten aan luchtgevulde poriën zijn op een zandbak (een bak gevuld met fijn zand ter bepaling van p^F curve tot ca -150 cm waterdruk) geplaatst en daarop verzadigd. Vervolgens zijn in stappen de vochtspanning verlaagd tot -5, -30, -50, -60 en -100 cm waterdruk. Na elke stap is enkele dagen gewacht tot de monsters in evenwicht waren, waarna deze werden gewogen.

Voor de meting van de verzadigde doorlatendheid worden de monsters eerst volledig verzadigd. Daarna worden de monsters op de apparatuur gezet. Bij de meting van de verzadigde doorlatendheid staat er een laagje water op het monster en is de ruimte in het apparaat onder het monster volledig met water gevuld. Op deze wijze worden overgangen lucht – monster voorkomen, die de verzadigde doorlatendheid kunnen beperken (waardoor dus te lage waarden worden gemeten).

Opgemerkt moet worden dat de diameter van de monsters (ca 19 cm) groter is dan vroeger of in veel andere landen gebruikelijk is. Bij Alterra is al enige tijd geleden besloten om met grotere monsters te werken om de macroporiën goed mee te nemen. Bij kleinere monsters worden deze bij de monsternamen vaak gemist of opzettelijk vermeden. Bij kleinere monsters worden daarom vaak (veel) lagere doorlatendheden gemeten dan bij monsters met een diameter van ca 19 cm. Dit heeft zijn consequenties bij de interpretatie van de meetresultaten.

Alle labbepalingen zijn gedaan in een geconditioneerd lab bij 16° C.

Het bleek dat het bovenste deel (ca 5 cm) van de ploegzool in de praktijk af en toe los wordt gemaakt, waardoor enige menging van onder- en bovengrond optreedt.

3.2 Lokaties

Er is op 8 lokaties gemeten en bemonsterd, waarvan 4 lokaties op een zandgrond, 3 lokaties op een lichte zavel en 1 lokatie op een lössgrond. De lokaties zijn aangegeven in Figuur 1. De textuur van de ploegzool is aangegeven in Tabel 2. Kenmerkend is dat bij alle meetlokaties het lutumgehalte lager is dan 17,5 %. Structuurherstel door krimp is bij deze gronden afwezig of zeer beperkt.

Tabel 2. Textuur bovengrond en ploegzool meetlokaties verdichtingsonderzoek.

Lokatie	Perceel	Plek	Diepte	OS	CaCO3	Lutum	Silt	Zand	Afslib- baar	Leem	M50
			cm	% grond	% grond	% min. delen	% min. delen	% min. delen	% min. d.	% min. d.	zand
Heino	Berkendijk	Midden	30 – 40	1,48	0,19	0,58	1,19	98,24	0,65	1,76	212,33
Heino	Berkendijk	Kop	30 – 40	2,34	0,25	0,59	2,62	96,79	1,18	3,21	223,20
Cranendonk	perceel 32	Midden	0 – 27	3,53	0,35	1,91	5,24	92,85	3,24	7,15	220,99
Cranendonk	perceel 32	Midden	27 – 37	2,32	0,21	1,43	4,28	94,29	2,71	5,71	249,48
Cranendonk	perceel 32	Kop	25 – 35	3,26	0,30	3,87	7,03	89,11	6,02	10,89	224,60
Hengelo	Marke 21	Midden	30 – 40	3,64	0,36	1,81	5,72	92,47	2,95	7,53	188,91
Hengelo	Marke 21	Kop	33 – 40	1,46	0,34	3,33	6,90	89,77	4,92	10,23	192,41
Wijnandsrade	0	Midden	0 – 23	3,49	1,10	15,02	64,04	20,94	26,64	79,06	64,02
Wijnandsrade	0	Midden	23 – 33	2,82	1,08	16,02	65,63	18,36	28,05	81,64	61,75
Wijnandsrade	0	Kop	28 – 33	2,63	1,11	16,81	62,23	20,95	28,61	79,05	65,24
Vredepeel	Perc.18.2	Midden	0 – 31	3,74	0,29	1,88	4,67	93,44	3,24	6,56	201,35
Vredepeel	Perc. 18.3	Midden	34 – 41	2,69	0,27	1,90	4,61	93,49	3,45	6,51	202,91
Vredepeel	Perc.18.1	Kop	39 – 42	1,80	0,27	0,91	2,82	96,27	1,63	3,73	204,58
Westmaas	0	Midden	0 – 27	3,36	9,19	15,61	34,23	50,16	22,45	49,84	83,41
Westmaas	0	Midden	32 – 37	1,75	13,38	11,10	27,77	61,13	15,63	38,87	86,79
Westmaas	0	Kop	34 – 37	2,02	13,38	15,58	32,76	51,66	21,82	48,34	84,53
Slootdorp	Oostwaard	Midden	0 – 25	5,46	6,32	11,68	23,83	64,49	16,25	35,51	92,05
Slootdorp	Oostwaard	Midden	31 – 35	4,14	6,57	6,84	21,64	71,52	9,80	28,48	93,15
Slootdorp	Oostwaard	Kop	32 – 35	2,88	4,93	6,37	12,76	80,87	8,84	19,13	97,84
Kloosterburen	Halsema	Midden	0 – 27	2,41	0,64	12,83	20,93	66,23	17,76	33,77	96,24
Kloosterburen	Halsema	Midden	27 – 32	2,33	2,58	11,34	22,24	66,41	16,03	33,59	92,48
Kloosterburen	Halsema	Kop	27 – 32	2,47	2,06	11,08	18,66	70,26	15,30	29,74	98,60



Figuur 1. Meetlocaties verdichtingsonderzoek en lokatie aanvullend onderzoek op een zware zavel (Lelystad).

Alle lokaties behalve Kloosterburen zijn proefboerderijen. Dit biedt de mogelijkheid om vroegere bemonsteringen en resultaten te vergelijken met de resultaten die nu worden gevonden. Voor de lokaties Cranendonk, Vredepeel, Westmaas en Kloosterburen is het gelukt om oude meetresultaten te vinden waarmee deze vergelijking kon worden uitgevoerd.

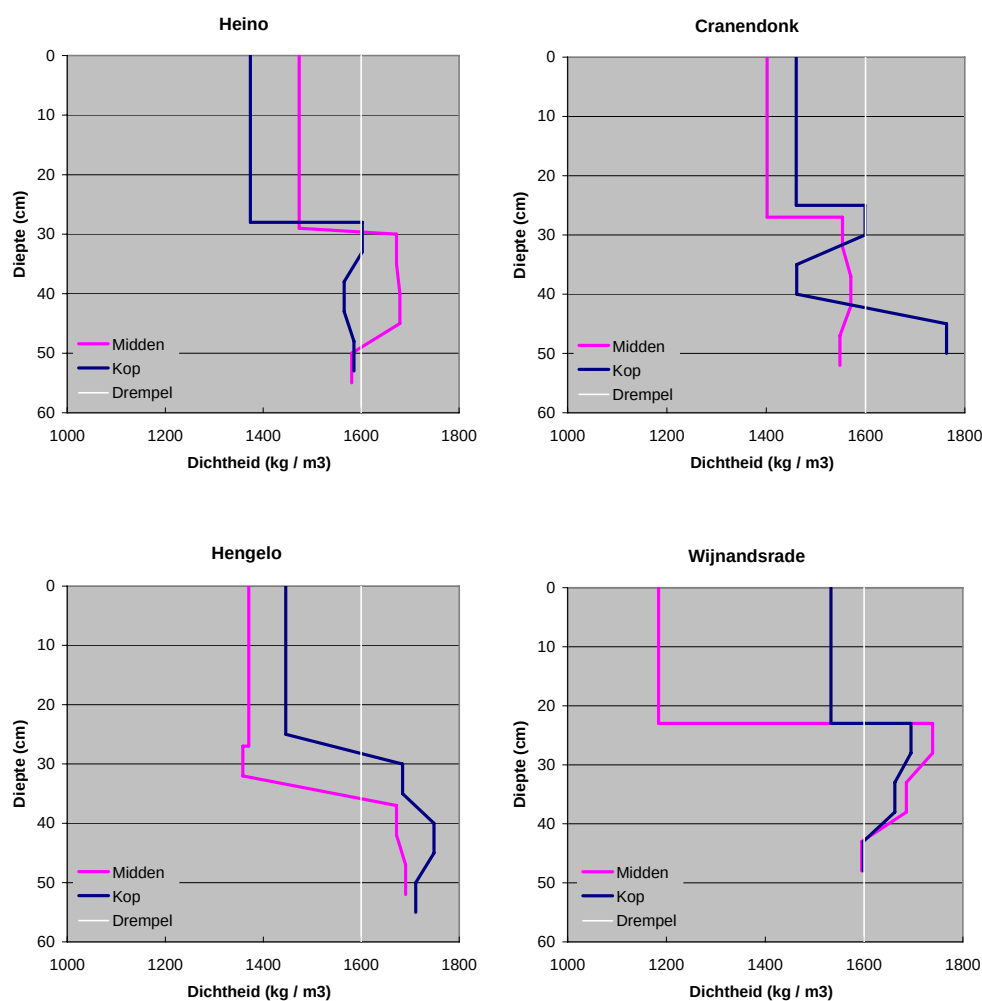
Een aantal basisgegevens zoals coördinaten, soort grond, grondwatertrap en grondgebruik zijn bij de profielbeschrijving vermeld. De profiel- en structuurbeschrijving en worteltellingen zijn bijeengebracht in Bijlage 1.

3.3 Metingen en lokatie aanvullend onderzoek op een zware zavel

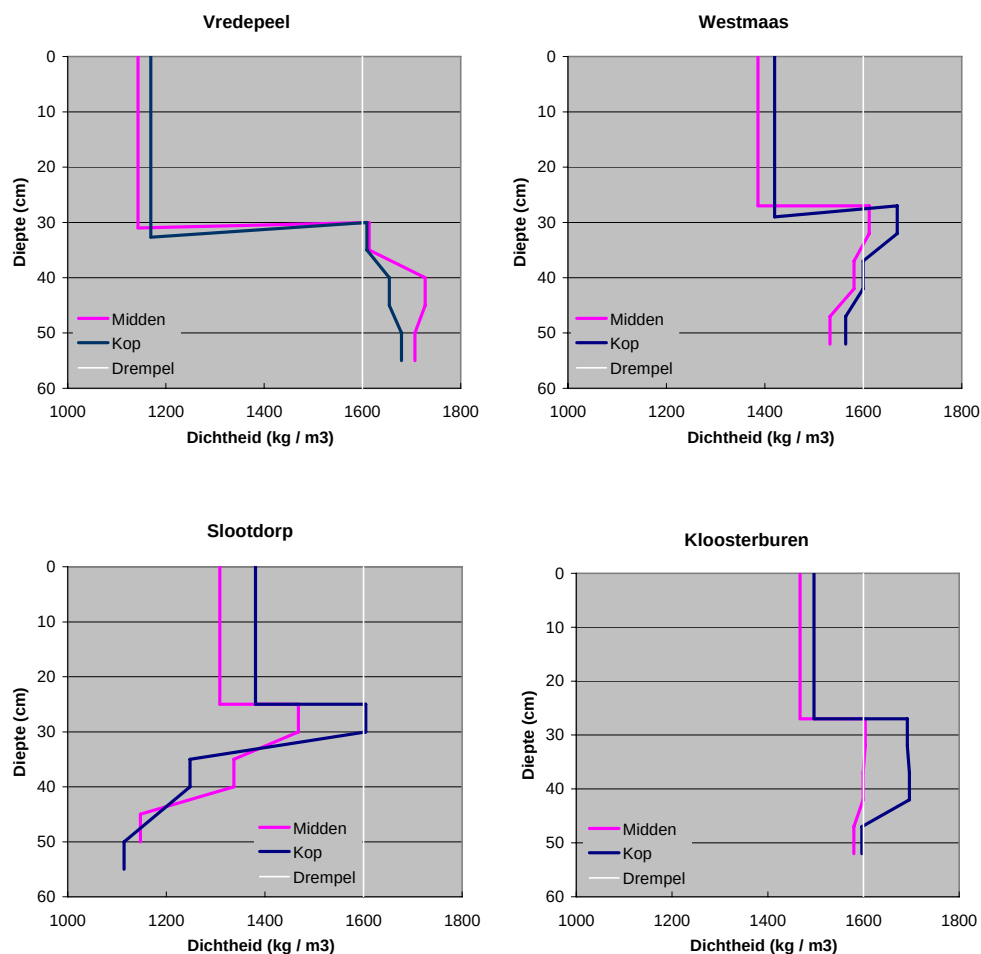
De metingen en lokatie van het aanvullend onderzoek op een zware zavel bij Lelystad, waarbij ook het effect van diepe grondbewerking is onderzocht, zijn aangegeven in Bijlage 3.

4 Resultaten

De resultaten zijn bijeengebracht in figuren en tabellen. In de figuren zijn de drempelwaarden uit Hoofdstuk 2 aangegeven, zodat in een oogopslag kan worden gezien of aan de drempelwaarden wordt voldaan. In de figuren worden de resultaten van de kopakker en van het middengedeelte met elkaar vergeleken. In het algemeen worden kopakkers zwaarder en intensiever bereiden en wordt er ook op gekeerd. Dit heeft tot gevolg dat de bodemstructuur van de kopakker vaak slechter is dan van het middengedeelte van het perceel.



Figuur 2. Gemeten volumegewichten op de locaties Heino, Cranendonk, Hengelo en Wijnandsrade

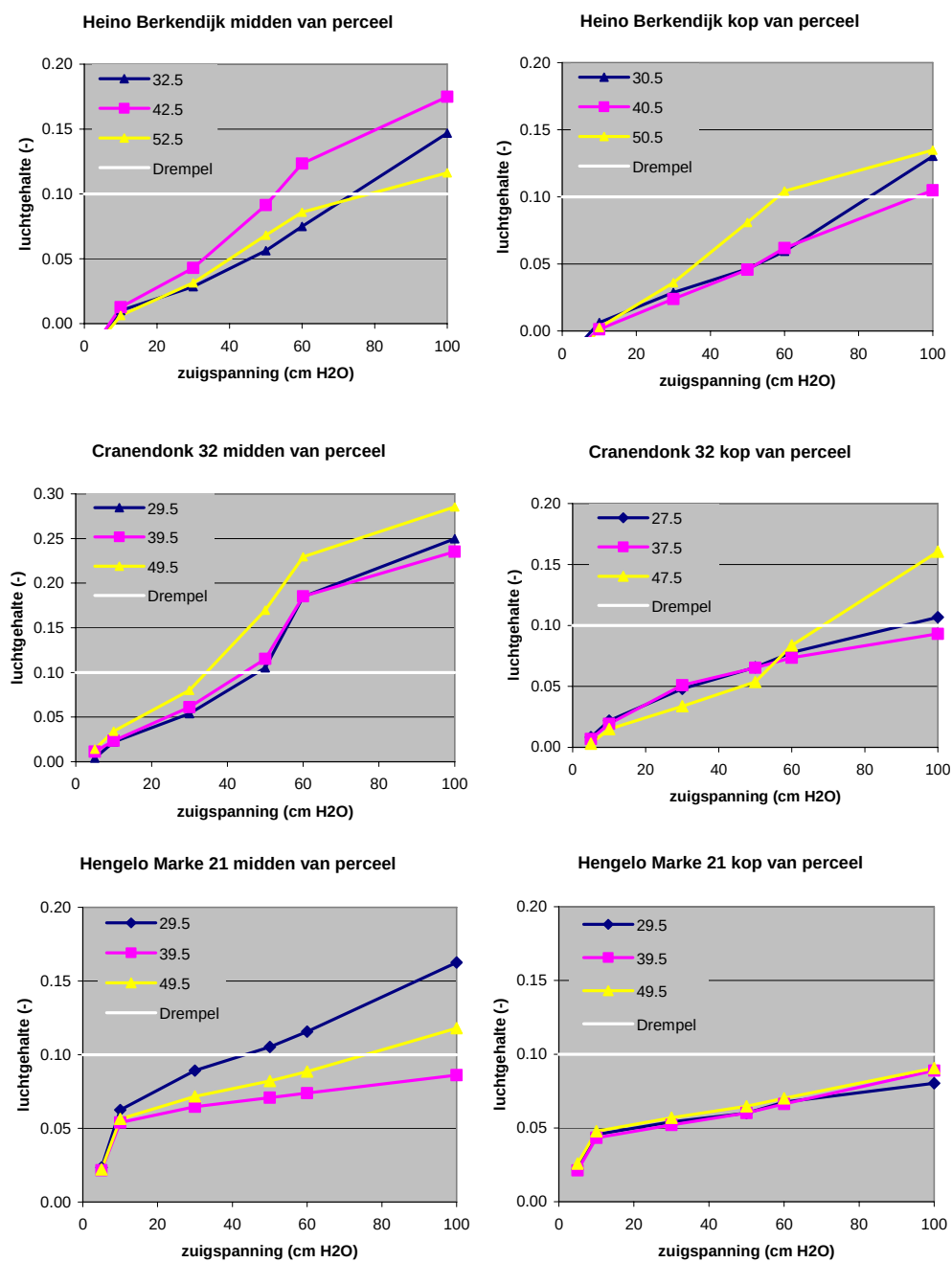


Figuur 3. Gemeten volumegewichten op de lokaties Vredepeel, Westmaas, Slootdorp en Kloosterburen

4.1 Dichtheid

In de figuren 2 en 3 zijn de dichtheden gegeven van de kopakker en van het middengedeelte van het perceel. In de grafieken is de drempelwaarde van 1600 kg.m^{-3} aangegeven. N.B. bij deze gronden hoeft alleen deze drempelwaarde voor het droog volumegewicht worden beschouwd, omdat de droge volumegewichten die uit de drempelwaarde voor de Paking Density volgen bij de lutumgehalten van de beschouwde gronden allemaal hoger zijn dan 1600 kg. m^{-3} .

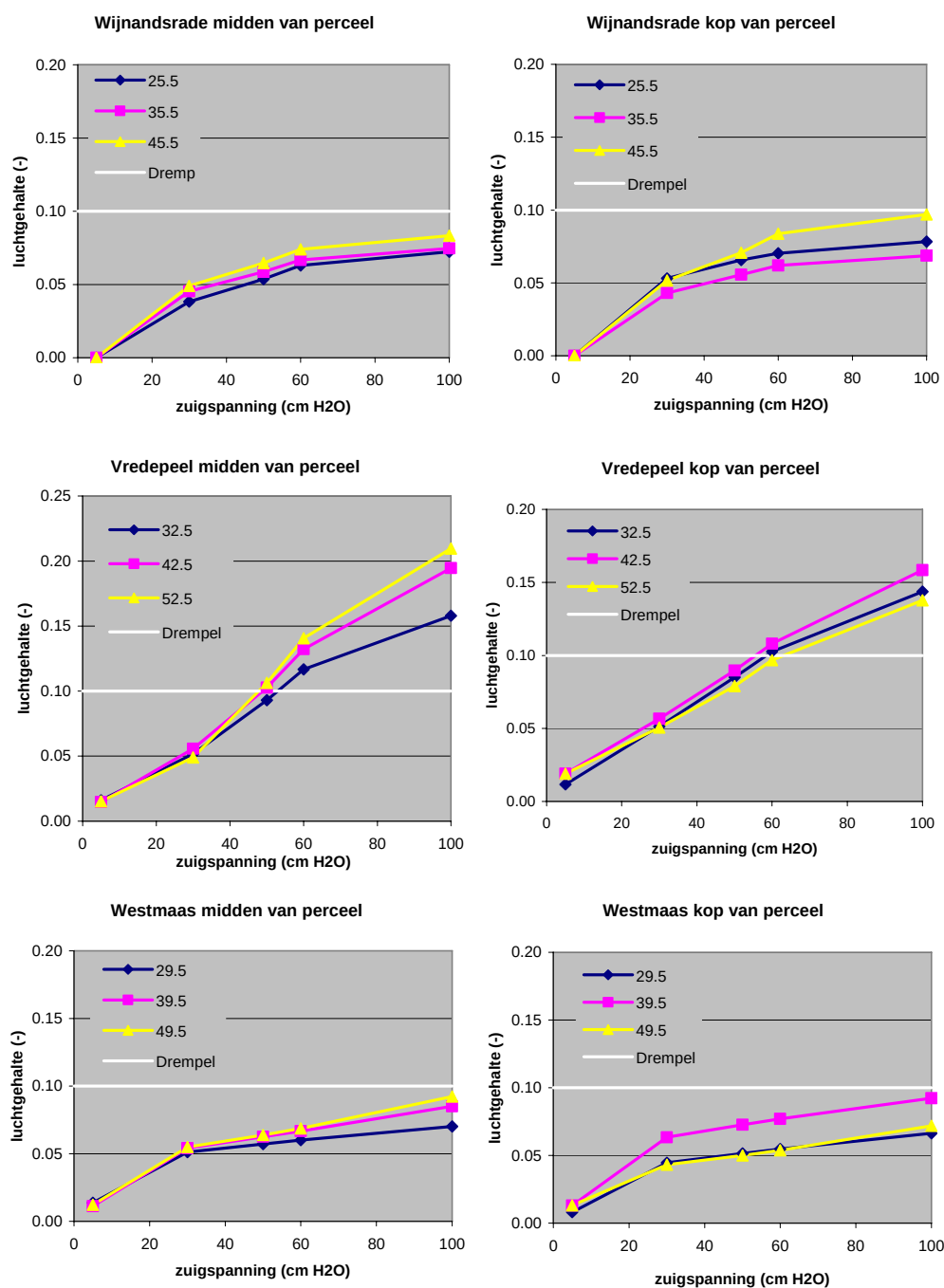
Uit een beschouwing van de figuren met betrekking tot de ploegzool en de ondergrond blijkt dat wat betreft het middengedeelte van het perceel alleen de lokaties Cranendonk en Slootdorp duidelijk niet te dicht zijn en onder de drempelwaarde te blijven. Bij de lokaties Westmaas en Kloosterburen komt de dichtheid van de ploegzool ongeveer overeen met de drempelwaarde. Bij de kopakkers zijn de dichtheden van alle ploegzolen of groter dan of gelijk aan de drempelwaarden (Heino, Cranendonk, Slootdorp).



Figuur 4. Luchtgehalten bij vochtspanningen in het natte traject voor de lokaties Heino, Cranendonk en Hengelo op 3 diepten: in de ploegzool en 10 respectievelijk 20 cm daaronder.

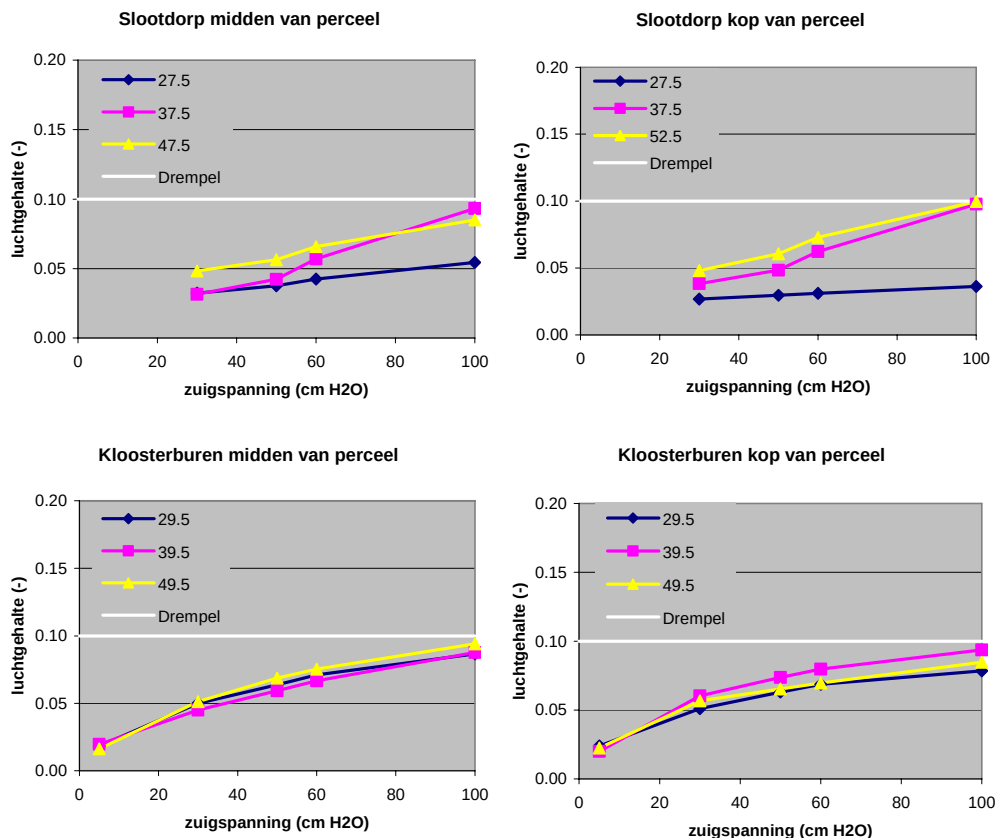
4.2 Luchtgehalten in het natte traject

In de figuren 4, 5 en 6 zijn de luchtgehalten oftewel het luchtgepulde poriëngehalte (n_v) in het natte traject gegeven. Met het natte traject worden zuigspanningen lager dan 100 cm waterkolom bedoeld.



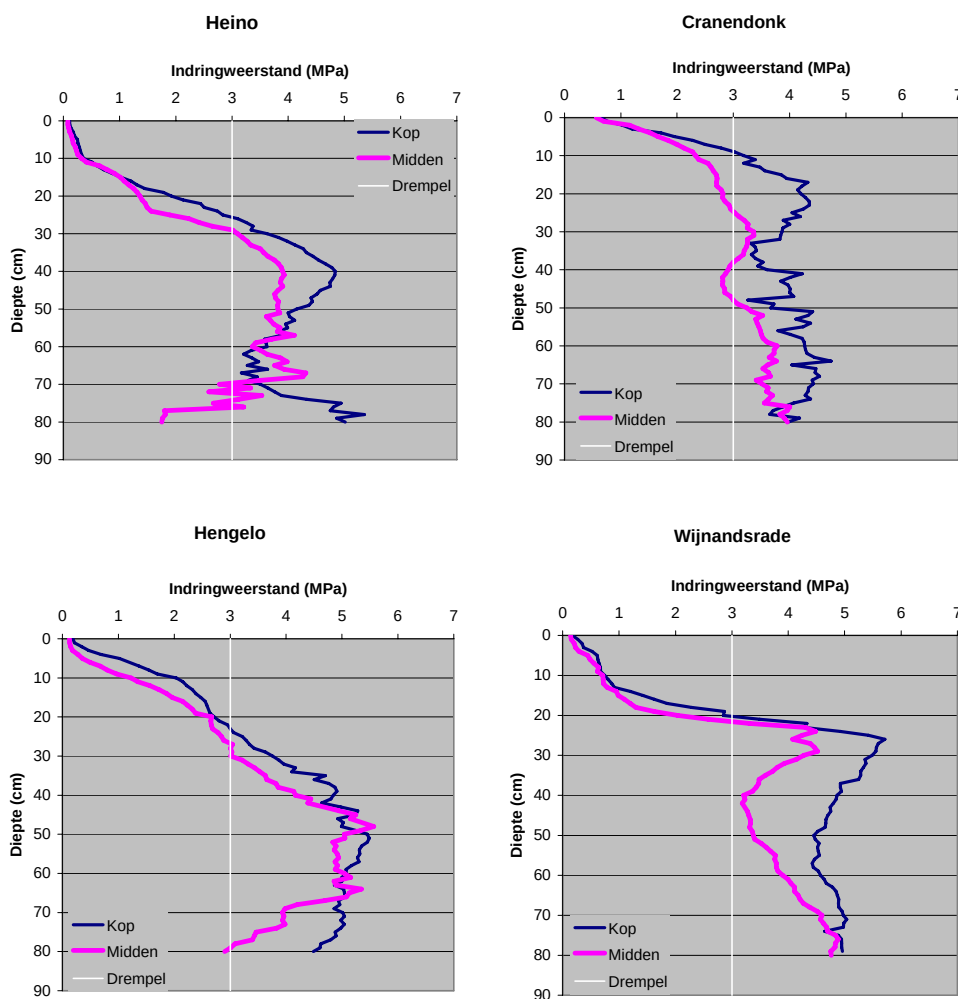
Figuur 5. Luchtgehalten bij vochtspanningen in het natte traject voor de lokaties Wijnandsrade, Vredepeel en Westmaas op 3 diepten: in de ploegzool en 10 respectievelijk 20 cm daaronder.

De resultaten voor de kopakker en het middengedeelte zijn apart in een eigen figuur weergegeven. De drempelwaarde van $n_g = 0.1$ geldt alleen voor het gedeelte met een zuigspanning van 50 tot 100 cm waterkolom (zie hoofdstuk 2 betreffende de drempelwaarden).



Figuur 6. Luchtgehalten bij vochtspanningen in het natte traject voor de lokaties Sloodorp en Kloosterburen op 3 diepten: in de ploegzool en 10 respectievelijk 20 cm daaronder.

De luchtgehalten zijn op drie diepten bepaald: in de ploegzool en 10 respectievelijk 20 cm onder de ploegzool. Daarbij gaat het vooral om het luchtgehalte in de ploegzool, omdat dit vaak de bottleneck is voor de beworteling. Als eerste worden van het midden van het perceel de luchtgehalten bij een zuigspanning van 50 cm waterkolom beschouwd. Het blijkt dat bij de lokaties Heino, Wijnandsrade, Westmaas, Sloodorp en Kloosterburen het luchtgehalte duidelijk onder de drempelwaarde valt. Bij de lokaties Cranendonk, Hengelo en Vredepeel komt het luchtgehalte bij een zuigspanning van 50 cm waterkolom ongeveer overeen met de drempelwaarde. Bij dezelfde zuigspanning van 50 cm waterkolom blijken bij alle lokaties behalve bij Vredepeel de luchtgehalten onder de drempelwaarde uit te komen. Bij een zuigspanning van 100 cm waterkolom is de situatie duidelijk gunstiger. Wat betreft het midden van het perceel voldoen dan de ploegzolen van Heino, Cranendonk, Hengelo en Vredepeel ruim. De resterende ploegzolen (Wijnandsrade, Westmaas, Sloodorp en Kloosterburen) voldoen duidelijk niet. Ook in dit geval zijn de kopakker duidelijk slechter. Alleen bij de lokaties Heino en Vredepeel voldoen de luchtgehalten goed en bij Cranendonk nog net.

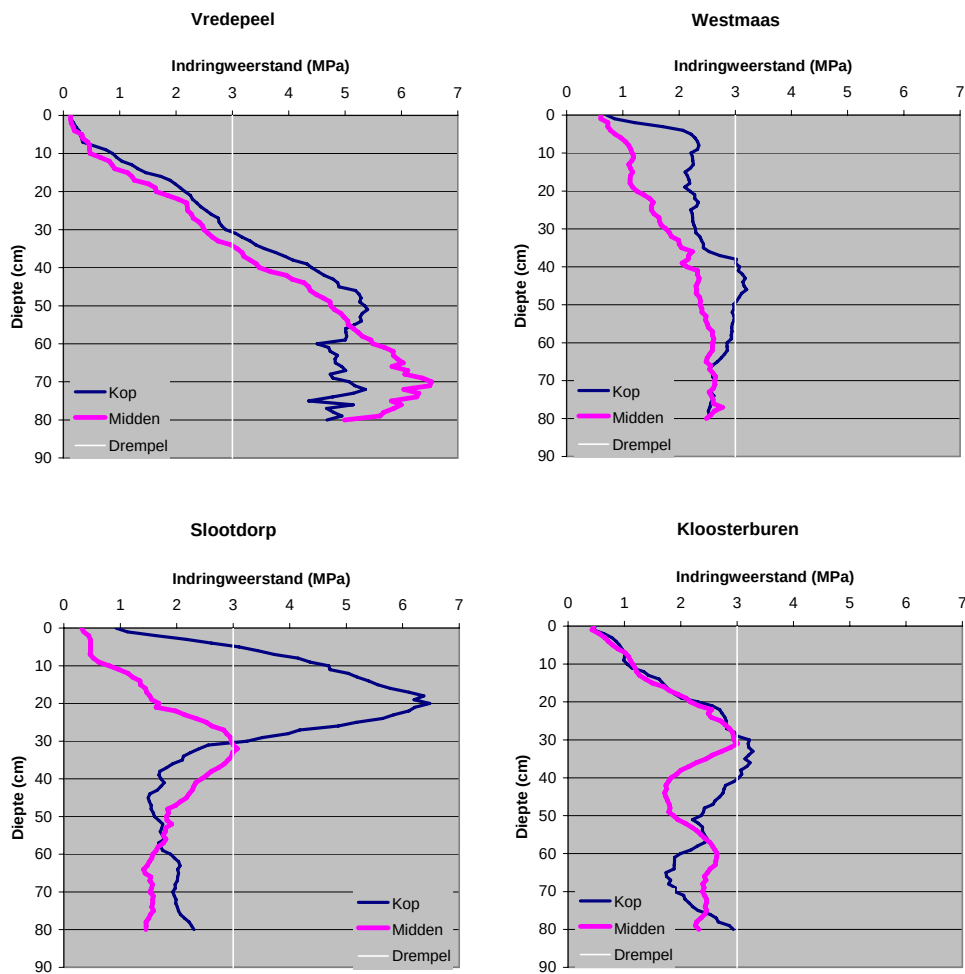


Figuur 7. Gemeten indringweerstand op de locaties Heino, Cranendonk, Hengelo en Wijnandsrade

4.3 Indringweerstand

In de figuren 7 en 8 zijn de gemiddelde gemeten indringweerstand op de kopakker en het midden van het perceel weergegeven. De drempelwaarde van de indringweerstand is 3 MPa en is aangegeven in de figuren. Bij gestructureerde gronden kunnen wortels via scheuren en grote poriën hun weg door verdichte lagen vinden. In dergelijke gevallen wordt wel een indringweerstand van maximaal 5 MPa aangehouden (ten Cate et al., 1995). Bij zandgronden en lichte zavelen kan men echter in het algemeen niet spreken van gestructureerde gronden. Wel kunnen wormgangen en oude wortelgangen beworteling mogelijk maken.

Wat betreft het midden van het perceel worden bij de locaties Heino, Hengelo, Wijnandsrade en Vredepeel indringweerstand gemeten die duidelijk hoger zijn dan 3 MPa. Bij Hengelo en Vredepeel zijn de indringweerstand ook gelijk of groter dan 5 MPa. Bij de locaties Cranendonk, Slootdorp en Kloosterburen ligt de indringweerstand rond de 3 MPa en alleen bij Westmaas onder deze drempelwaarde.

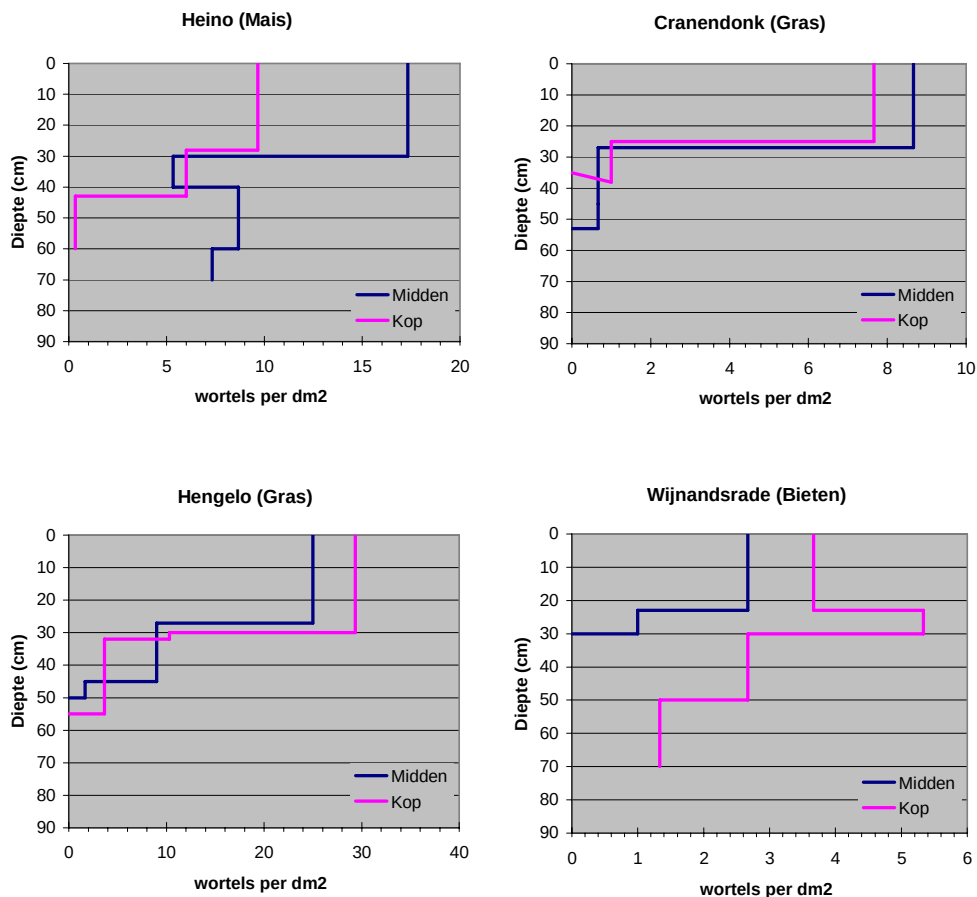


Figuur 8. Gemeten indringweerstand op de locaties Vredepeel, Westmaas, Slootdorp en Kloosterburen

Bij de kopakkers zijn de indringweerstand in het algemeen duidelijk hoger en overschrijden bij alle locaties de drempelwaarde van 3 MPa. Bij Westmaas is de overschijding echter beperkt. Vooral bij Slootdorp, maar ook bij Cranendonk en Wijnandsrade is de indringweerstand bij de kopakker meer dan 1 MPa hoger dan in het midden van het perceel. Bij de kopakkers worden de indringweerstand bij de locaties Hengelo, Wijnandsrade, Vredepeel en Slootdorp zelfs groter dan 5 MPa.

4.4 Bewortelingsdichtheden

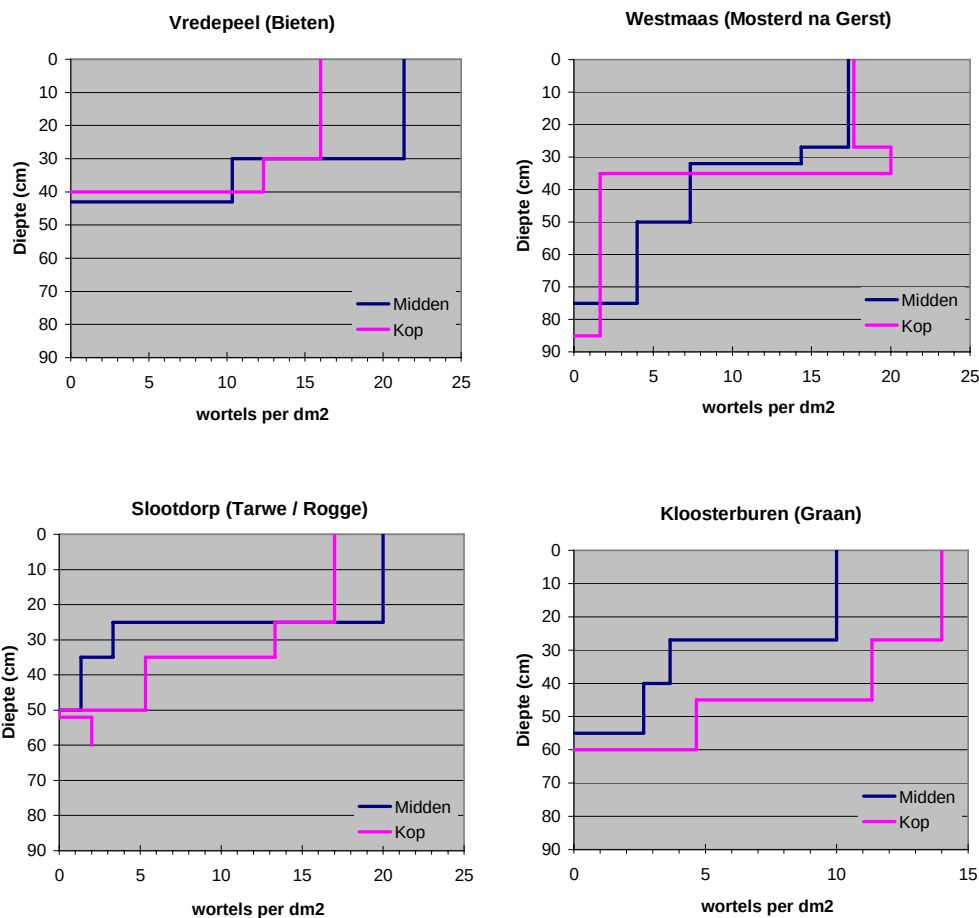
In de figuren 9 en 10 zijn de bewortelingsdichtheden bij de 8 locaties gegeven. Per figuur zijn de bewortelingsdichtheden bij de kopakkers en in het midden van het perceel gepresenteerd. Uit de bewortelingsdichtheden volgt direct wat de bewortelingsmogelijkheden zijn. Omdat de bewortelingsmogelijkheid één van de belangrijkste functies is van de bodem, ligt het voor de hand om aan bewortelingsdichtheden veel waarde te hechten. Naast de bodemkwaliteiten bepalen echter ook zaken als het soort plant en het soort wortels, grondwaterstanden, het weer van dat jaar, het opnametijdstip in het seizoen etc de bewortelingsdichtheid.



Figuur 9. Bewortelingsdichtheden op de locaties Heino, Cranendonk, Hengelo en Wijnandsrade

Rekening houdende met al deze aspecten kan de bewortelingsdichtheid wel enig inzicht geven of er een verdichtingsprobleem is. Dit geldt zeker als naast de bewortelingsdichtheid ook naar bodemstructuurkenmerken wordt gekeken. Door ten Cate et al. (1995) wordt onder een 'juist voldoende aantal' wortels circa 4 wortels per dm^2 verstaan. Deze waarde is niet als drempelwaarde in de figuren opgenomen omdat ten Cate et al. (1995) zelf al aangeven dat dit een betrekkelijk arbitrair getal is. Omdat de beworteling sterk afhankelijk is van het soort gewas worden de resultaten per gewas besproken. In Heino werd snijmaïs verbouwd. Snijmaïs heeft vrij dikke wortels en is gevoelig voor verdichting. Indien de ondergrond niet verdicht is en de grondwaterstand niet te hoog, dan kan maïs tot meer dan een meter wortelen (Alblas et al., 1994). In Heino wordt de beworteling op de kopakker sterk beperkt. Op het midden van het perceel lijkt de maïs alleen hinder te hebben van de ploegzool, waar het aantal wortels terugvalt naar 5 per dm^2 , daaronder neemt het aantal wortels weer toe.

De locatie Cranendonk en Hengelo liggen in gras. De bewortelingsdiepte van 'oud' gras is beperkt tot de bovenste 20 – 30 cm. Het is daarmee geen goede indicator voor een verdichte ondergrond.



Figuur 10. Bewortelingsdichtheden op de locaties Vredepeel, Westmaas, Slootdorp en Kloosterburen

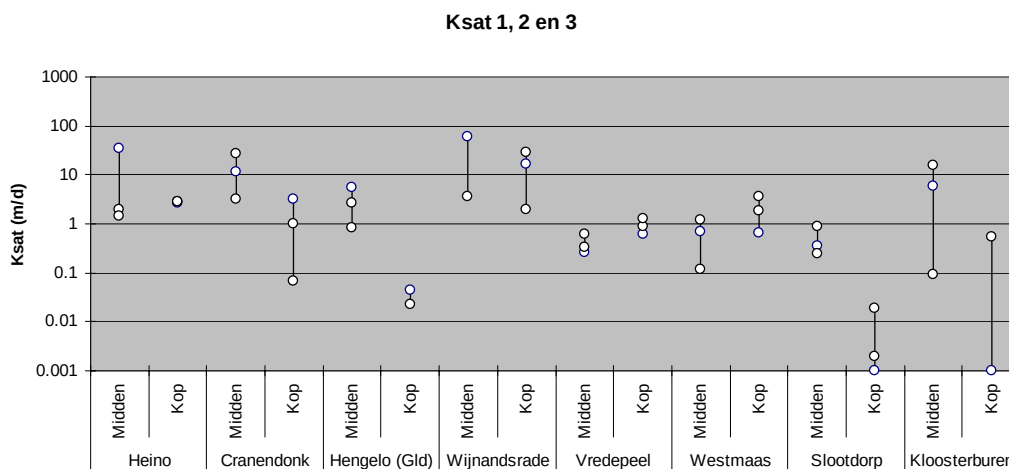
Bij de locaties Wijnandsrade en Vredepeel zijn bieten verbouwd. Bieten zijn op zich verdichtingsgevoelig. De biet en de penwortel moeten ruimte voor zichzelf creëren en daarbij de grond opzij duwen. Bij Wijnandsrade zijn de bewortelingsdichtheden bij de kopakker groter dan in het midden van het perceel. In beide gevallen zijn de bewortelingsdichtheden erg laag. Bij Vredepeel zijn voor zowel de kopakker als het midden van het perceel de bewortelingsdiepten beperkt tot 40 cm.

Bij de lokatie Westmaas is mosterd verbouwd na gerst. De beworteling op de kopakker komt niet door de ploegzool. In het midden van het perceel wordt de ondergrond wel beworteld.

In Slootdorp en Kloosterburen zijn granen verbouwd. Granen hebben fijne wortels en hebben wat minder last van bodemverdichting. In onverdichte bodems kunnen de wortels 1 to 1,5 m diep wortelen. Deze diepten worden in beide locaties niet bereikt. De bewortelingsdichtheden zijn bij beide locaties bij de kopakkers hoger dan in het midden van het perceel. Daarbij moet worden bedacht dat in beide gevallen het aantal wortels per dm^2 in de ondergrond beperkt is.

4.5 Verzadigde waterdoorlatendheid

In figuur 11 zijn de verzadigde waterdoorlatendheden van de ploegzool gegeven. Per lokatie zijn voor zowel het midden als voor de kopakker drie metingen gedaan die alle drie in de figuur zijn weergegeven. De drempelwaarde is 0,1 m/dag. In het algemeen zijn de verzadigde waterdoorlatendheden van de kopakkers slechter dan van het perceelsmidden. Bij de lokaties Hengelo (Gld) en Slootdorp zijn bij de kopakker alle gemeten waterdoorlatendheden lager dan de drempelwaarde van 0,1 m/dag. Bij kopakkers van de lokaties Cranendonk en Kloosterburen geldt dat voor één meetwaarde. Bij de lokaties Heino, Vredepeel en Westmaas zijn de waterdoorlatendheden van de ploegzool van de kopakker niet lager of niet wezenlijk verschillend van de waterdoorlatendheden van het perceelsmidden. Van alle waterdoorlatendheden in het perceelsmidden ligt bij de lokaties Westmaas en Kloosterburen één van de meetwaarden op of rond de drempelwaarde. Alle andere meetwaarden voor de perceelsmiddens blijven boven de drempelwaarde, hoewel dit bij de lokaties Vredepeel en Westmaas niet erg ruim is. Bij de doorlatendheidsmetingen is waargenomen dat doorlatendheden groter dan 1 m/dag bijna altijd te danken zijn aan één of meer grote doorgaande macroporiën. Dit zijn bijna altijd wormgangen. Bij de lössgrond bij de lokatie Wijnandsrade waren deze wormgangen opvallend in aantal en hoe diep ze gingen. Ondanks de zeer hoge dichtheid bleek deze grond daardoor sterk doorlatend. NB: bij een aantal monsters met een zeer lage doorlatendheid werden toch wormgangen geconstateerd, die blijkbaar niet doorliepen.



Figuur. 11. Verzadigde waterdoorlatendheid ploegzool (3 monsters per lokatie). Drempelwaarde 0,1 m/dag.

4.6 Resultaten aanvullend onderzoek op een zware zavel

De resultaten van het aanvullend onderzoek op een zware zavel bij Lelystad zijn aangegeven in Bijlage 3.

5 Discussie

Voor de discussie zijn de resultaten bijeengebracht in een kruistabel voor het perceelsmiddens (tabel 3) en een tabel voor de kopakkers (tabel 4). In de tabellen is per lokatie voor de ploegzool aangegeven of de dichtheden, luchtgehalten bij zuigspanningen van 50 en 100 cm H₂O, verzadigde waterdoorlatendheden en indringweerstand, groter (+ en groen), rondom (0 en oranje) of kleiner (- en rood) zijn dan de respectievelijke drempelwaarden.

Tabel 3. Fysische bodemkwaliteit van de ploegzool in het perceelsmiddens. Aangegeven wordt of de meetwaarden groter (+ en groen), rondom (0 en oranje) of kleiner (- en rood) zijn dan de respectievelijke drempelwaarden.

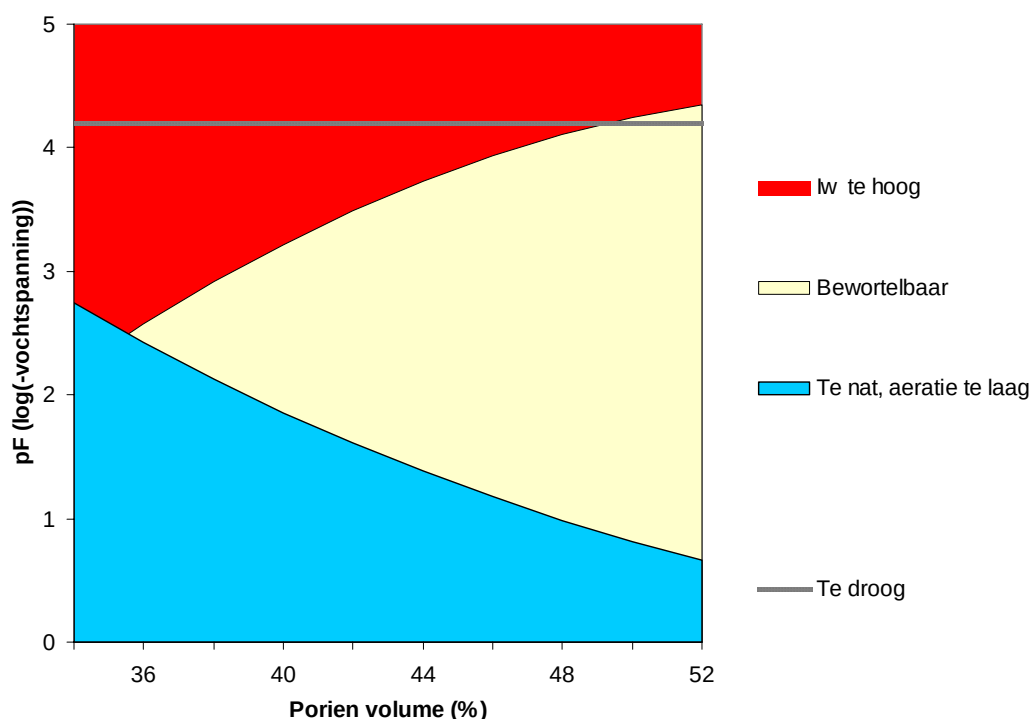
Lokatie	Grondsoort	Dichtheid	Luchtgehalte (-50 cm H ₂ O)	Luchtgehalte (-100 cm H ₂ O)	Verzadigde waterdoorlatendheid	Indringweerstand
Heino	Matig grof zand	-	-	+	+	-
Cranendonk	Matig grof zand	+	0	+	+	-
Hengelo (Gld)	Matig fijn zand	-	0	+	+	-
Wijnandsrade	Löss	-	-	-	+	-
Vredepeel	Matig fijn zand	-	0	+	+	-
Westmaas	Matig lichte zavel	0	-	-	0	+
Slootdorp	Zeer lichte zavel	+	-	-	+	0
Kloosterburen	Zeer lichte zavel	0	-	0	0	0

Tabel 4. Fysische bodemkwaliteit van de ploegzool bij de kopakkers. Aangegeven wordt of de meetwaarden groter (+ en groen), rondom (0 en oranje) of kleiner (- en rood) zijn dan de respectievelijke drempelwaarden.

Lokatie	Grondsoort	Dichtheid	Luchtgehalte (-50 cm H ₂ O)	Luchtgehalte (-100 cm H ₂ O)	Verzadigde waterdoorlatendheid	Indringweerstand
Heino	Matig grof zand	0	-	+	+	-
Cranendonk	Matig grof zand	0	-	0	0	-
Hengelo (Gld)	Matig fijn zand	-	-	0	-	-
Wijnandsrade	Löss	-	-	-	+	-
Vredepeel	Matig fijn zand	-	0	+	+	-
Westmaas	Matig lichte zavel	-	-	-	+	0
Slootdorp	Zeer lichte zavel	0	-	-	-	-
Kloosterburen	Zeer lichte zavel	-	-	0	0	0

5.1 Fysische bodemkwaliteit van de perceelsmiddens

Uit tabel 3 betreffende de ploegzool van de perceelsmiddens van de lokaties blijkt dat bij alle onderzochte gronden aan één of meer drempelwaarden niet wordt voldaan. Dat geldt ook als de dichtheid buiten beschouwing wordt gelaten, omdat die eigenlijk een grove indicator voor zowel het luchtgehalte in het natte vochttraject als voor de indringweerstand. Van de overgebleven eigenschappen kan het luchtgehalte bij een zuigspanning van 100 cm H₂O worden beschouwd als een vervolgstap in de beschouwing van het luchtgehalte bij een zuigspanning van 50 cm H₂O. In Figuur 12 wordt in concept aangegeven wanneer aeratie en wanneer de indringweerstand I_w beperkend zijn voor de beworteling. Hoge indringweerstand, lage luchtgehalten bij een zuigspanning van 50 cm H₂O en lage porositeit (dus hoge dichtheden) resulteren in een beperkt vochtspanningstraject waarin beworteling mogelijk is. Uit Tabel 3 volgt dat voor de perceelsmiddens bij alle zandgronden en de lössgrond de indringweerstand limiterend is. Voor de zandgrond te Heino en voor de lössgrond zijn bovendien ook aëratieproblemen te verwachten in natte omstandigheden. De resterende zandgronden voldoen nog net aan het aëratiecriterium. Bij de lichte zavel vormt vooral de aëratie een probleem. Daarnaast is bij de lichte zavel bij de lokaties bij Slootdorp en Kloosterburen de indringweerstand aan de grens van bewortelbaarheid. Ronduit positief is dat van alle zandgronden en de lössgrond de verzadigde waterdoorlatendheid voldoende is, ondanks de grote dichtheden. Uit de waarnemingen tijdens de metingen van de verzadigde doorlatendheid lijkt dit waarschijnlijk te danken te zijn aan vooral wormgangen en aan wortelkanalen.



Figuur 12. Conceptuele relatie tussen porositeit en vochtspanning, waarbij aëratie (onderste vlak) bij vochtige grond en de indringweerstand I_w (bovenste vlak) bij droge grond de beperkende factor is voor de beworteling. Boven een pF 4.2 is de grond te droog voor beworteling (naar Boone, 1988).

Deze wormgangen en wortelkanalen bieden nieuwe wortels ook de mogelijkheid om de verdichte ploegzool te passeren en in de minder dichte ondergrond te wortelen. Ook zijn deze macroporiën niet alleen hoofdroutes voor watertransport, maar ook voor de aëratie van de ondergrond. Hoge verzadigde waterdoorlatendheden vormen daarmee een indicatie dat verdichtingsproblemen door een te hoge indringweerstand of te slechte aëratie zich in mindere mate voordoen en de beworteling van de ondergrond maar ten dele beperken.

5.2 Fysische bodemkwaliteit van de kopakkers

Het onderzoek aan de kopakkers is vooral interessant omdat deze zwaarder worden belast doordat daar gekeerd wordt en meer bereden dan op het middendeel van het perceel. Daardoor geven de kopakkers inzicht in de potentiële achteruitgang van de bodemfysische kwaliteiten van de ondergrond. Bij niet-krimpende gronden, zoals zandgronden, lichte zaveln en lössgronden met een laag lutumgehalte, is krimp als één van de belangrijkste structuurherstellende mechanismen afwezig. Daardoor bestaat er bij deze gronden het gevaar van cumulatie van ondergrondverdichting waardoor de bodemkwaliteiten steeds verder afnemen. Omdat het landbouwverkeer op de kopakkers intensiever is dan op de rest van het perceel gaat deze cumulatie van verdichting op de kopakkers sneller en geeft op die manier inzicht in de toekomstverwachting voor de rest van het perceel. Dat dit niet alleen theorie is maar ook praktijk blijkt uit een onderzoek van Schwark en Isensee (2004). Daarin worden poriënvolumes en volumegewichten gemeten in 1986 en 2003 met elkaar vergeleken. Bij het praktijkveld komt het poriënvolume en volumegewicht van de ondergrond op 40 cm diepte gemeten bij de kopakker in 1986 overeen met dat van het perceelsmidden in 2003 (zie Tabel 5). Inmiddels is de kopakker in 2003 nog sterker verdicht en is het poriënvolume verder met 1 % afgenomen wat resulteert in een bijzonder laag poriënvolume. Het is niet te hopen dat dit de toekomstige dichtheid is van het gehele praktijkveld.

De tabel met bodemkwaliteiten voor de kopakkers (Tabel 4) is met opzet onder Tabel 3 voor de perceelsmiddens gezet, zodat een directe vergelijking mogelijk is. Daaruit volgt direct dat de bodemverdichting op de kopakkers ernstiger is dan op de perceelsmiddens. Bij de zandgronden hebben alle lokaties behalve Vredepeel op de kopakkers een te laag luchtgehalte bij een vochtspanning van -50 cm H₂O. Bij de lokatie Vredepeel ligt het luchtgehalte op de drempelwaarde. Deze trend zet zich voort in het luchtgehalte bij een vochtspanning van -100 cm H₂O. Hieruit volgt dat in de toekomst bij de zandgronden naast bewortelingsproblemen door een te hoge indringweerstand in droge tijden ook steeds meer bewortelingsproblemen zullen ontstaan door aëratieproblemen in natte perioden.

Tabel 5: Poriënvolume en volumegewicht van lichte gronden in praktijkgebruik versus een onbewerkt veld in 1986 en 2003 (naar Schwark & Isensee, 2004)

	Poriënvolume en volumegewicht bij 40 cm			
	1986		2003	
	%	g/cm ³	%	g/cm ³
Onbewerkt	40	1,59	40	1,59
Praktijkveld midden	39	1,62	38	1,64
Praktijkveld kopeinde	38	1,64	37	1,67

Bij de lichte zavel waren al problemen geconstateerd wat betreft het luchtgehalte bij een vochtspanning van -50 cm H₂O en zelfs bij -100 cm H₂O. Daarnaast beginnen ook de indringweerstand een probleem te vormen. Ook de ondergronden van de lichte zavel gaan dus duidelijk achteruit.

Zorgwekkend is dat ook de verzadigde waterdoorlatendheid achteruit gaat. De route voor wortels en lucht om via macroporiën de verdichte ploegzool te passeren wordt bij een aantal gronden afgesloten. Daarnaast zorgt de verslechterde doorlatendheid er ook voor dat het land langer nat blijft. Behalve dat dit de aeratieproblemen zal vergroten, wordt de (natte) grond ook gevoeliger voor verdergaande verdichting en structuurbederf en nemen bewerkbaarheid, bereikbaarheid en de oogstmogelijkheden af. De grootste bodemverdichtingsproblemen zijn te verwachten bij de lichte zavel bij Slootdorp en de matig fijne zandgrond bij Hengelo (Gld). De volgende gronden waar problemen zijn te verwachten zijn de lichte zavel bij Kloosterburen en de matig grove zandgrond bij Cranendonk.

5.3 Visuele beoordeling van de bodemverdichting

Een visuele beoordeling door een profielkuil te graven en de bodemstructuur en beworteling te beschrijven is altijd enigszins subjectief en moeilijk over te brengen. Een probleem daarbij is dat zelfs zeer goede foto's van het bodemprofiel de noodzakelijke details niet overbrengen. Een visuele beoordeling kan heel goed ernstige bodemverdichting (waarbij wortels een bodemlaag niet kunnen indringen en de structuur duidelijk platerig is) en een zeer goede structuur (goede en diepe beworteling en een losse structuur) onderscheiden. Het grote gebied daartussen blijft altijd een beetje arbitrair. Worteltellingen, zoals gepresenteerd in paragraaf 4.4, hebben als voordeel dat ze kwantitatief zijn en daardoor bruikbaar voor onderlinge vergelijking. Het moet dan wel beworteling van hetzelfde gewas zijn en liefst ook van een gewas dat verdichtingsgevoelig is, zoals bijvoorbeeld snijmaïs.

De profiel- en structuurbeschrijvingen in Bijlage 1 laten zien dat bij de visuele beoordeling de dichtheid van de ploegzool sterk wordt onderschat. De gemeten dichtheden zijn 0,1 – 0,25 g.cm⁻³ hoger dan de geschatte dichtheid. De ploegzolen worden in het algemeen goed herkend en als 'verdicht' of als 'vaste pakking' aangemerkt. Alleen de ploegzool bij Vredepeel wordt als 'los gepakt' gekenschetst terwijl uit de dichtheidsmetingen hoge waarden volgden (1,6 – 1,7 g.cm⁻³).

De bewortelbare diepte van alle onderzochte zandgronden is 40 tot maximaal 60 cm. Dit volgt uit structuurkenmerken en nieuwe en oude worteldiepten. Oude wortelgangen worden door nieuwe wortels gebruikt om diepten tot maximaal 60 cm te bereiken. Bij Heino en Hengelo (Gld) komen de wortels op de kopakkers voornamelijk niet dieper dan 43 respectievelijk 32 cm. Bij Vredepeel is de bewortelbare diepte bij zowel het perceelsmidden als de kopakker slechts 40 – 43 cm.

De lössgrond bij Wijnandsrade is sterk verdicht, maar heeft heel veel wormgangen. Tot op een diepte van meer dan 70 cm worden per dm² 2 - 3 wormgangen

aangetroffen met een diameter van 5 - 8 mm. De wormgangen zijn dicht beworteld. Tussen de wormgangen komen dunne worteltjes voor.

De lichte zavels zijn veel beter bewortelbaar dan de zandgronden. Bij de lokaties Westmaas en Kloosterburen is de bewortelbare diepte ongeveer 100 cm. Bij Slootdorp slechts 60 cm. De grond onder de 60 cm is daar niet volledig gerijpt. Ook bij de lichte zavels is de beworteling via wormgangen en oude wortelkanalen van belang. Daarnaast vinden bij de lichte zavels de wortels hun weg via breukvlakken en kleiige lagen. Er zijn meer fijne wortels te zien dan bij de zandgronden. De structuur van de ploegzolen is bij de lichte zavels slecht tot matig. Het is goed te zien dat rondom de macroporiën nog lucht in de ploegzool kan toetreden en de structuur enigszins verbeterd. Bij de kopakkers in Slootdorp en in Kloosterburen trad plasvorming op. Dit komt overeen met de lage verzadigde doorlatendheden die bij de ploegzool van de kopakkers bij deze lokaties werden gemeten (zie figuur 11). Bij Kloosterburen zijn van de ploegzool van de kopakker twee metingen gedaan aan de verzadigde doorlatendheid (een derde monster was mislukt). Bij één monster was de doorlatendheid onmeetbaar laag. Bij de andere ca 50 cm/dag. Dit werd veroorzaakt door een breukvlak in het monster.

De visuele beoordeling van het profiel, maar ook de visuele beschouwing van de monsters van de verzadigde waterdoorlatendheidsmeting laten zien dat macroporiën van zeer groot belang zijn voor de beworteling, aëratie en de waterdoorlatendheid van de grond. De macroporiën moeten wel doorlopend zijn en wat dieper de grond ingaan. Dit blijkt al uit een aantal verzadigde waterdoorlatendheidsmetingen, waarbij wel duidelijke wormgaten werden geconstateerd terwijl de gemeten doorlatendheden zeer laag waren. Daar staat tegenover dat in een aantal gevallen geen duidelijk aanwezige macroporiën werden geconstateerd terwijl hoge doorlatendheden werden gemeten.

5.4 Vergelijking meetresultaten met vroegere metingen

Van de lokaties Cranendonk, Vredepeel, Westmaas en Kloosterburen zijn rapportages van metingen van dichtheden en soms andere fysische grootheden gevonden die met de meetresultaten konden worden vergeleken.

Cranendonk

Door Wopereis (1991) zijn in april 1988 in het kader van berijdbaarheidsproeven dichtheidsmonsters gestoken en indringweerstand bepaald van perceel 26 van de proefboerderij Cranendonk. Daarbij is een perceel gekozen dat afliep naar een beek, waardoor de vochttoestand steeds natter werd hoe dichter (lager) men bij de beek kwam. Dit perceel is wat betreft ligging en gebruik vergelijkbaar met perceel 32, dat door ons in 2006 is bemonsterd. De resultaten zijn gegeven in tabel 6. Het blijkt dat in alle gevallen de dichtheid in 2006 soms gelijk, maar in de meeste gevallen hoger is dan in 1988.

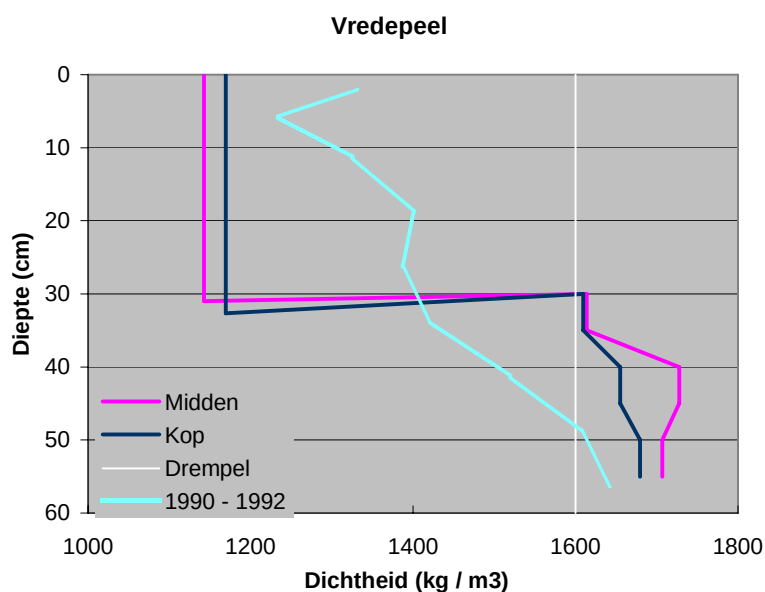
Tabel 6. Vergelijking dichtheden in 1988 van Cranendonk perceel 26 met de dichtheden in 2006 van Cranendonk perceel 32.

Cranendonk perceel 26 (1988)						Cranendonk perceel 32 (2006)			
hoog		midden		laag		midden		kop	
Diepte	Dicht- heid	Diepte	Dicht- heid	Diepte	Dicht- heid	Diepte	Dicht- heid	Diepte	Dicht- heid
(cm)	(g/cm ³)	(cm)	(g/cm ³)	(cm)	(g/cm ³)	(cm)	(g/cm ³)	(cm)	(g/cm ³)
2 – 7	1,34	2 – 7	1,33	2 – 7	1,25	0 – 27	1,40	0 – 25	1,46
27 – 32	1,52	17 – 22	1,52	17 – 22	1,31	27 – 32	1,55	25 – 30	1,60
35 – 40	1,46	37 – 42	1,41	27 – 32	1,43	37 – 42	1,57	35 – 40	1,46
						47 – 52	1,55	45 – 50	1,76

Door Woperijs (1991) zijn ook indringweersanden bepaald. Ook deze zijn in alle gevallen lager dan de waarden die in 2006 zijn gemeten

Vredepeel

Door Hamminga et al (1994) zijn in de periode 1990 – 1992 op een bouwlandperceel van de proefboerderij Vredepeel proeven uitgevoerd naar het transport van water en bromide in een waterafstotende zandgrond. Daarbij is de periode van november 1990 tot maart 1992 de grond tot op een diepte van 1,35 meter zeven maal bemonsterd, waarbij ook de droge dichtheden werden bepaald. In het rapport staat niet vermeld welk perceel het precies betreft. Het gemiddelde van de zeven bemonsteringen is aangegeven in figuur 13 en vergeleken met de bemonstering in 2006. De ondergrond blijkt in 2006 dichter te zijn dan in 1990 – 1992.



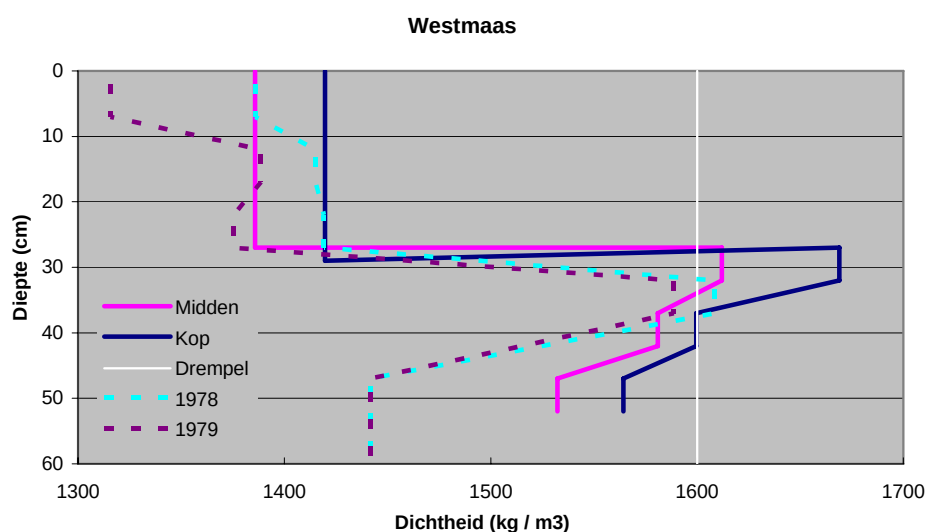
Figuur 13. Vergelijking van de dichtheden van een perceel van de proefboerderij Vredepeel zoals bepaald in 1990 – 1992 (Hamminga et al., 1994) met de dichtheden bepaald in 2006. NB De percelen zijn waarschijnlijk niet dezelfde.

Westmaas

Op de proefboerderij Westmaas zijn in de jaren zeventig drie teeltsystemen met elkaar vergeleken, waarbij ook bodemverdichting een belangrijk aspect van het

onderzoek was (Westmaas Research Group on New Tillage Systems, 1980, 1984). In een bijdrage van Boone et al (1984a, 1984b) aan het onderzoek zijn ook meetresultaten aan de ploegzool en ondergrond gegeven. We beschouwen alleen de resultaten die het conventionele teeltsysteem betreffen, waarbij tot ca 25 cm wordt geploegd. Deze resultaten worden vergeleken met de waarden gemeten in 2006. Bedacht moet worden dat de metingen in de jaren zeventig en de metingen in 2006 alleen toevallig op hetzelfde perceel hebben kunnen plaatsvinden.

In 1978 en 1979 zijn de poriënvolumes van de lagen op 2-7; 12-17; 22-27 en 32-37 cm diepte bepaald. De laagste poriëngehalten werden gevonden op een diepte van 32-37 cm diepte. Voor 1978 en 1979 waren deze voor percelen met gerst en suikerbieten respectievelijk 39.3 % en 40.1 %. De dichtheid is eenvoudig uit het poriënvolume te berekenen. De dichtheden in 1978 en 1979 zijn in figuur 14 met de dichtheden in 2006 vergeleken. Helaas is in 1978 en 1979 niet de laag op 27-32 cm diepte bemonsterd. In 2006 werd op deze diepte de ploegzool geconstateerd en bemonsterd. Doordat de bemonstering niet op dezelfde diepte heeft plaatsgevonden wordt een vergelijking tussen 1978/1979 en 2006 moeilijk, hoewel het er op lijkt dat sinds 1979 de dichtheid is toegenomen. In 2006 wordt voor de ondergrond een veel hogere dichtheid gemeten dan in 1978/1979. De constatering dat in de loop der tijd de dichtheid van de ondergrond is toegenomen komt overeen met de algemene indruk van boeren en draineurs die in de omgeving van Westmaas op dit soort gronden werken (Lerink, 2006)



Figuur 14. Vergelijking van de dichtheden van een perceel van de proefboerderij Westmaas zoals bepaald in 1978 en 1979 (Boone et al., 1984) met de dichtheden bepaald in 2006. NB De percelen zijn waarschijnlijk niet dezelfde.

In 1978 en 1979 zijn van de laag 32-37 ook de luchtgehalten bij een vochtspanning van -100 cm H₂O bepaald. In 1978 was deze bij percelen met gerst en suikerbieten gemiddeld 3,6 % en in 1979 3,5 %. In 2006 werd voor de laag 27-32 bij zowel de kopakker als het perceelsmidden een luchtgehalte van 7 % gemeten. Dit is dus beter

dan in 1978/1979, maar duidelijk onder de drempelwaarde van 10 % luchtgevulde poriën.

Boone et al (1984) hebben in 1978/1979 een verzadigde doorlatendheid van de ploegzool gemeten van 0,48 m/dag. In 2006 zijn verzadigde doorlatendheden van de ploegzool gemeten van gemiddeld 0,69 m/dag in het perceelsmidden en 2,02 m/dag in de kopakker. Het lagere gemiddelde bij de kopakker wordt veroorzaakt door een doorlatendheid van 0,11 cm per dag bij één monster. De variaties in doorlatendheden zijn vrij hoog. Gesteld kan worden dat de verzadigde doorlatendheden van de ploegzool niet zijn afgenomen sinds 1978/1979 en boven de drempelwaarde van 0,1 m/dag blijven.

Kloosterburen

De bemonstering in 2006 heeft plaats gehad op het bedrijf Halsema. Op dit bedrijf is in de periode 1970 t/m 1974 onderzoek gedaan naar onder andere bodemverdichting (Boels et al., 1981) als voorbereiding en demonstratie-object in de ruilverkaveling “De Marne”. Voorafgaande aan de werkzaamheden werden van onder andere de laag op een diepte van 25-50 cm de poriënvolumes bepaald op 42,1 % op de hogere delen en op 40,9 % op de gedeelten langs de sloten. Dit komt overeen met dichtheden van respectievelijk 1534 en 1566 kg.m⁻³. Op een aantal plekken komen op het bedrijf ploegzolen voor met dichtheden van 1600-1680 kg.m⁻³. Vervolgens zijn in het kader van een ruilverkaveling in 1973 sloten gedempt en het maaiveld ge-egaliseerd. Door de werkzaamheden werden de verdichte ploegzolen deels afgegraven, echter vervolgens veroorzaakten de werkzaamheden nog meer nieuwe ploegzolen. Deze zijn als sluitstuk van de herverkaveling door woelen weer opgeheven.

Uit de metingen in 2006 blijkt dat grond is herverdicht en ploegzolen met dezelfde dichtheden als in 1973 zijn ontstaan. De gemiddelde dichtheid van de laag op een diepte van 25-50 cm is in 2006 meer dan 1600 kg.m⁻³ en daarmee duidelijk dichter dan de gemiddelde dichtheid van deze laag in 1970.

5.5 Discussie aanvullend onderzoek op een zware zavel

De discussie betreffende het aanvullend onderzoek op een zware zavel bij Lelystad staat in Bijlage 3.

6 Conclusies

Uit literatuur onderzoek (Van den Akker et al., 2006) werd op basis van de uitkomsten van Nederlands onderzoek in het verleden op zandgronden en lichte zavel (Boels, 1982) en recent onderzoek in Duitsland (Ehlers et al., 2003, Schäfer-Landefeld et al., 2004, Schwark en Isensee, 2004), geconcludeerd dat het zeer waarschijnlijk is dat een belangrijk deel van de lichte gronden in Nederland te sterk verdichte ondergronden heeft. Voor lössgronden werd ingeschat dat de verslechterde situatie zoals deze door Ehlers et al. (2003) in Duitsland gevonden, ook voor Nederland zou kunnen gelden. Voor deze bewering is echter minder Nederlands bewijs dan voor de ondergrondverdichting van lichte gronden. De conclusie van het literatuuronderzoek (Van den Akker et al., 2006) was ook dat waarschijnlijk in de afgelopen tientallen jaren het gedeelte met te sterk verdichte ondergrond is toegenomen en de verdichting dieper in de ondergrond reikt dan vroeger.

Het inventariserende onderzoek op 8 lokaties aan ploegzolen op kopakkers en perceelsmiddens laat zien dat bij alle 8 lokaties van de ondergrond met name de ploegzool te sterk verdicht is. Bij alle onderzochte zandgronden en de lössgrond is de indringweerstand te hoog. Bij alle lichte zavel, de lössgrond en één van de vier zandgronden is de aëratie bij natte omstandigheden een probleem. Dit houdt in dat de omstandigheden voor beworteling voor alle gronden om één of meer redenen door verdichting wordt beperkt. De verzadigde doorlatendheid (een maat voor de infiltratiecapaciteit) is in het algemeen voldoende, hoewel er bij twee van de drie lichte zavelgronden eerste tekenen van problemen zijn.

Het onderzoek aan de kopakkers geeft inzicht in de verwachting voor de toekomst. De verdichting en de achteruitgang van de bodemkwaliteit van de kopakkers is duidelijk. Alle gronden krijgen problemen met de aëratie in natte omstandigheden. De indringweerstand wordt ook voor de lichte zavel een probleem. De verzadigde waterdoorlatendheid gaat achteruit en bij slechts twee zandgronden, de lössgrond en één lichte zavel is deze nog goed te noemen.

De vergelijking van de meetresultaten in 2006 met vroeger onderzoek laat zien dat in het algemeen de verdichtingstoestand is verslechterd. Dit geldt echter niet in alle gevallen en bedacht moet worden dat het vergelijkend onderzoek (te) beperkt van opzet was om echt harde uitspraken te doen. Waarschijnlijk is met meer onderzoek meer boven water te halen.

Hoewel het onderzoek beperkt van omvang is, bevestigt het de conclusies van het eerdere literatuuronderzoek (Van den Akker et al., 2006), namelijk dat een groot deel van de Nederlandse zandgronden en lichte zavel verdichtingsgevoelig zijn, voor een groot deel verdicht zijn en dat verdere verdichting dreigt. Ook het vermoeden dat deze conclusies ook gelden voor de Nederlandse lössgronden, wordt door het uitgevoerde onderzoek ondersteund.

De conclusies van het aanvullend onderzoek op een zware zavel bij Lelystad (zie Bijlage 3), waarbij ook het effect van diepe grondbewerking is onderzocht, zijn verontrustend. Hoewel de dichtheden van de ploegzool door de diepe grondbewerking iets lager zijn geworden blijven deze te hoog. Ondanks de diepe grondbewerkingen blijft het luchtgehalte bij vochtspanningen van 50 en 100 cm waterkolom te laag ($< 10\%$) en blijft de verzadigde waterdoorlatendheid in bijna alle gevallen slecht ($< 10 \text{ cm.d}^{-1}$). Het veldexperiment is nog niet afgelopen, maar de voorlopige conclusie kan alleen maar zijn dat het effect van de diepe grondbewerking erg weinig is en niet of nauwelijks een verbetering van de bodemkwaliteit teweegbrengt. Wel moet worden bedacht dat 2007 een nat jaar was, waardoor natuurlijk herstel van deze zware zavel door krimpscheuren weinig kans had.

Aanbevelingen voor nader onderzoek

Uiteraard is een onderzoek gebaseerd op 8 lokaties eerder een steekproef dan een inventarisatie. Het geeft wel een uitstekende basis voor bijvoorbeeld een opzet van een uitgebreidere inventarisatie of de opzet van een monitoring.

Bedacht moet worden dat door de beperkte opzet van het onderzoek niet alle zandgronden zijn onderzocht. De onderzochte zandgronden zijn relatief fijnzandig. Grovere zanden kunnen minder verdichtingsgevoelig zijn. Zandondergronden met een relatief hoog organisch stofgehalte hebben wellicht meer veerkracht en mogelijkheden om van ondergrondverdichting te herstellen. Voor een nadere specificering welke zandgronden wellicht minder verdichtingsgevoelig zijn, is daarom verder onderzoek nodig.

Van zavelen die zwaarder zijn dan lichte zavelen ($< 17,5 \%$ lutum) wordt aangenomen dat deze voldoende zelfherstellend vermogen door krimp hebben om verdichting op te heffen. Uit het aanvullende onderzoek aan een zware zavel blijkt dat losmaken van de ondergrond geen tot weinig verbetering van de bodemfysische kwaliteit van de ploegzool laat zien. Deze verbetering zal dus moeten komen van natuurlijk herstel door met name de vorming van krimpscheuren in droge jaren. Aanbevolen wordt om het onderzoek naar het herstel van zware zavelen met een verdichte ploegzool verder voort te zetten.

In het algemeen kan worden gesteld dat onderzoek naar het natuurlijk herstel van verdichte kleigronden van groot belang is, omdat daar nu veel te weinig van bekend is, terwijl het herstellervermogen cruciaal is bij de beoordeling of een grond wel of niet bedreigd wordt door bodemverdichting.

In Nederland is nog geen onderzoek verricht naar het effect van het overbelasten van gestructureerde klei-ondergronden met permanente scheuren die tot diep in de ondergrond doordringen. Deze diepe scheuren zijn bij het rijpingsproces van de jonge klei-ondergrond in de polders ontstaan. Het dichtsrukken van deze diepe permanente scheuren zal resulteren in een sterke afname van het drainagevermogen van deze gronden. Het is niet duidelijk in welke mate deze kleihoudende ondergronden kunnen herstellen en opnieuw een voldoende drainagevermogen kunnen verkrijgen. Een permanente verslechtering van het drainerend vermogen van

de vruchtbaarste gronden van Nederland zou een grote schadepost zijn. Uit de praktijk komen geluiden dat het drainerend vermogen van deze gronden afneemt. Een inventariserend onderzoek zou uitsluitsel kunnen geven of men zich hier werkelijk zorgen om moet maken.

Literatuur

Akker, J.J.H. van den, G.D. Vermeulen, P.H.M. Dekker en A.P. Phillipsen, 2006. Bodemverdichting. Leidraad Bodembescherming, onderdeel 5720. Sdu, Den Haag, 51 p

Alblas, J., F. Wanink, J.J.H. van den Akker & H.M.G. van der Werf, 1994. Impact of traffic-induced compaction of sandy soils on the yield of silage maize in The Netherlands. *Soil Tillage Res.* 29, 157-165.

Bakker, J.W., F.R. Boone & P. Boekel, 1987. Diffusie van gassen in grond en zuurstofdiffusiecoëfficiënten in Nederlandse akkerbouwgronden (Diffusion of gasses in soil and oxygen diffusion coefficients in Dutch arable soils). ICW rapport 20, Alterra Wageningen UR, Wageningen, 44 p

Batjes, N.H., 2001. Soil data resources for land suitability assessment and environmental protection in central and Eastern Europe: the 1:2,500,000 scale SOVEUR project. *The Land*, 5: 51-68

Boels, D., 1982. Physical soil degradation in the Netherlands. In: Boels, D., Davies, D.B., Johnston, A.E. (Eds.). *Soil degradation: proceedings of the land use seminar on soil degradation*, Wageningen, 13-15 October 1980, Balkema., Rotterdam, The Netherlands, pp. 47-65.

Boels, D., P. Boekel, A. Jongerius, L.A.H. de Smet & W. van der Meer, 1981. Inrichtings- en uitvoeringsaspecten van perceelsvergroting op lichte zavelgronden in het noordelijk mozaïekgebied. Landinrichtingsdienst, Mededelingen nr. 133, Utrecht. 90 p.

Boone, F.R., 1988. Weather and other environmental factors influencing crop responses to tillage and traffic. *Soil & Tillage Research* 11: 283-324.

Boone, F.R., B. Kroesbergen & A. Boers, 1984a. Soil conditions and growth of spring barley on a tilled and untilled marine loam soil. In: Westmaas Research Group on New Tillage Systems, 1984. Experiences with three tillage systems on a marine loam soil II: 1976-1979. Centre for Agricultural Publishing and Documents, Wageningen, The Netherlands, pp 124-166.

Boone, F.R., B. Kroesbergen & A. Boers, 1984b. Soil conditions and growth of sugar beet on a tilled and untilled marine loam soil. In: Westmaas Research Group on New Tillage Systems, 1984. Experiences with three tillage systems on a marine loam soil II: 1976-1979. Centre for Agricultural Publishing and Documents, Wageningen, The Netherlands, pp 167-167.

Cate, J.A.M. ten, A.F. van Holst, H. Kleijer & J. Stolp, 1995. Handleiding bodemgeografisch onderzoek. Richtlijnen en voorschriften. Deel D. Interpretatie van

bodemkundige gegevens voor diverse vormen van bodemgebruik. Technisch Document 19D. DLO-Staring Centrum, Wageningen, 135 p

Cultuurtechnische Vereniging, Werkgroep Herziening Cultuurtechnisch Vademecum, 1988. Cultuurtechnisch vademecum. Cultuurtechnische Vereniging, Utrecht

EC (2006a) Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council establishing a framework for the protection of soil and amending Directive 2004/35/EC. COM(2006) 232 final, Europese Commissie, Brussel.

EC (2006b). Thematic strategy for soil protection. COM(2006) 231 final, Europese Commissie, Brussel.

EC (2006c) Impact assessment of the thematic strategy on soil protection. SEC(2006) 620, Europese Commissie, Brussel.

Ehlers, W., Schmidke, K. & R. Rauber, 2003. Changes in the state of compaction and structural performance of loess-derived arable soils in the south of Lower Saxony (in German). Landnutzung und Landentwicklung 44, 9-18.

Hamminga, W., C.J. Ritsema & L.W. Dekker, 1994. Transport van water en bromide in waterafstotende zandgrond, onderzocht in een bouwlandperceel bij Vredepeel. Wageningen, DLO-Staring Centrum. Rapport 274. 110 p

Hidding, A.P., C. van den Berg, 1961. The relation between pore volume and the formation of root systems in soils with sandy layers. ICW technical bulletin 24, Wageningen.

Jones, R.J.A., G. Spoor & A.J Thomasson, 2003. Vulnerability of subsoils in Europe to compaction: a preliminary analysis. Soil & Tillage Research 73, 131-141

Kooistra, M.J. & O.H. Boersma, 1994. Subsoil compaction in Dutch marine sandy loams: loosening practices and effects. Soil Tillage Res. 29: 237-247.

Kooistra, M.J., J. Bouma, O.H. Boersma, A. Jager, 1984. Physical and morphological characterization of undisturbed and disturbed ploughpans in a sandy loam soil. Soil Tillage Res. 4, 405-417.

Lebert, M., J. Brunotte & C. Sommer, 2003. Ableitung von Kriterien zur Charakterisierung einer schädlichen Boden veränderung, entstanden durch nutzungsbedingte Verdichtung von Böden/Regelungen zur Gefahrenabwehr. Abschlussbericht Förderkennzeichen (UFOPLAN) 200 71 245, Umweltbundesamt, Berlin

Lerink, P., 2006. 'Bodemverdichting sluipmoordenaar' Verslag van discussie WTAG met bodemdeskundigen uit de Hoeksche Waard, PPO-Westmaas, 15 december 2006. Werkgroep Technische aspecten Grondbewerking. 5p

Oldeman, L.R., R.T.A. Hakkeling & W.G. Sombroek, 1991. World Map of the Status of Human-Induced Soil Degradation: An explanatory Note (rev. ed.), UNEP and ISRIC, Wageningen. 34pp. with maps

Schäfer-Landefeld, L., R. Brandhuber, S. Fenner, H.J. Koch, N. Stockfish, 2004. Effects of agricultural machinery with high axleload on soil properties of normally managed fields. Soil Till. Res. 75, 75-86.

Swark, A. & E. Isensee, 2004. Limitations on axle loads? Agriculture 4: 28-30

Tacket, J.L. & R.W. Pearson, 1964. Oxygen requirements of cotton seedling roots for penetration of compacted soil cores. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 28: 600-605

Van-Camp, Lieve; Benilde Bujarrabal; Anna Rita Gentile; Robert J. A. Jones; Luca Montanarella, Claudia Olazabal; Senthil-Kumar Selvaradjou (eds.), 2004. Reports of the technical Working Groups Established under the Thematic Strategy for Soil Protection. Volume I Introduction and Executive Summary.. EUR 21319 EN/1

Westmaas Research Group on New Tillage Systems, 1980. Experiences with three tillage systems on a marine loam soil I: 1972-1975. Centre for Agricultural Publishing and Documents, Wageningen, The Netherlands. 100 p

Westmaas Research Group on New Tillage Systems, 1984. Experiences with three tillage systems on a marine loam soil II: 1976-1979. Centre for Agricultural Publishing and Documents, Wageningen, The Netherlands. 263 p

Wösten, J.H.M., G.J. Veerman, W.J.M. de Groot & J. Stolte, 2001. Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks (Water retention and hydraulic conductivity characteristics of topsoils and subsoils in The Netherlands: the Staring series). Alterra rapport 153, Alterra, Wageningen, The Netherlands. 86 p

Wopereis, F.A., 1991. Bealing van de drempelwaarde voor de landhoedanigheid "berijdbaarheid" op zandbouwland. Wageningen, DLO-Staring Centrum. Rapport 196. 29 blz.

Bijlage 1 Profiel- en structuurbeschrijvingen en worteltellingen

Heino Midden			x	y						
Hn21	VI	mais	GPS 93 datum	215210	494008					
horizont	diepte	humus (%)	lutum (%)	leem (%)	M50	dichtheid (g/cm3)	beworteling(telling)/dm2			Opmerkingen
1Ap	0-30	3		10	140	1.4	13	22	17	losse structuur, weinig stabiliteit; 0-15 cm losgemaakt door schijfveneg verwerkt; wisselend vaste pakking, enige verdichting lossere pakking natuurlijke ligging
1Be/1Cg	30-40	2		10	140	1.55	3	7	6	
1BC	40-60	0		10	140	1.45	9	6	11	
1Cg	60-70			10	140	1.6	7	6	9	

Heino Kop			x	y						
Hn21	VI	mais	GPS 95 datum	215199 18-10-2006	494090					
horizont	diepte	humus (%)	lutum (%)	leem (%)	M50	dichtheid (g/cm3)	beworteling(telling)/dm2			Opmerkingen
1Ap	0-28	3		10	140	1.4	8	11	10	losse structuur, weinig stabiliteit; 0-15 cm losgemaakt door schijfveneg verwerkt; wisselend vaste pakking, enige verdichting
1A/Be/ 1Cg	28-43	2		10	140	1.55	5	7	6	
1BC	43-60	0		10	140	1.6	1	0	0	niet verwerkt; op 48 cm en fiberlaagje (lemig); vaste pakking

Opm.: Dit profiel is veel minder doorworteld dan Heino1. Oorzaak is vermoedelijk niet de verdichting, maar de ondiepere verwerking (43cm); tijdens de ontginning. De textuur van het profiel verschilt weinig, wel zijn er verschillen tussen de ringen op dezelfde hoogte; qua samenstelling is vooral de verwerkte laag daardoor erg wisselend. Enkele wortels tot max 53 cm)

Cranendonk				x	y						
Midden				GPS 106	169187	368512					
cHn21	VII	grasland	datum	31-10-2006							
horizont	diepte	humus	lutum	leem	M50	dichtheid	beworteling(telling)/dm2			Opmerkingen	
	(cm)	(%)	(%)	(%)		(g/cm3)	1	2	3		
1Ap1	0-27	4		12	140	1.3	7	3	16	los gepakt	
1Ap2	27-45	3.5		12	145	1.45	1	0	1	iets vaster	
1E	45-53	0		12	145	1.4	2	0	0	losse pakking, wit/grijs; enkele onkruidwortels	
1B	53-58	6		10	145	1.4	0	0	0	losse pakking, zwart, enkele onkruidwortels	
1BC	58-95	0		16	140	1.5				vaster, bruin	
1C	95-120			20	135					geel/grijsgeel	
Opm.:	lokaal penetrometerprikken van eerder onderzoek zichtbaar										

Cranendonk				x	y						
Kop				GPS108	169336	366433					
pZg23	III/V	grasland	datum	31-10-2006	bewortelbare diepte 55 cm; wel veel weerstand tussen 15-35 cm-mv.						
GHG	20-30	GLG 110-130 cm		gw1 90-100 cm-mv.							
horizont	diepte	humus	lutum	leem	M50	dichtheid	beworteling(telling)/dm2			Opmerkingen	
	(cm)	(%)	(%)	(%)		(g/cm3)	1	2	3		
1Apg	0-25	3		15	140	1.55	7	14	2	sterk verdicht (stinkt (H ₂ S)); wrede humus; veel scherven; weinig of geen blauwkleuring; 0-15 cm zode intensief beworteld; ook dode wortels	
1Ap2g	25-35/40			17	140	1.5	0	1	2	veel scherven, verdicht; minder homogeen	
1Cg1	35-42			22	140	1.5	0	0	0	lokaal veel porien in roestige laag; geel/bruingrijs; lokaal oude rietwortel	
1Cg2	42-50			16	140	1.6	0	0	0	vast; wit (met bovenaan groen en roestvlekken	
1Cg3	50-70			16	140					veel gley; bruingrijs	
1Cg4	70-100			16	140					weinig roest; grijs	
1Cr	100-120			16	140					wat houtresten	
Opm.:	Lokaal zeer natte plekken in Kopakker; lokale kwel of oude opge vulde kuil?; grondwater in boorgat aan maaiveld										

Hengelo Midden				x	y					
			GPS81	220322	450914					
pZg21	VI	grasland	datum	11-10-2006	bewortelbare diepte 40cm					
horizont	diepte (cm)	humus (%)	lutum (%)	leem (%)	M50	dichtheid (g/cm ³)	beworteling(telling)/dm ²			Opmerkingen
							1	2	3	
1Apg	0-27	4		16	145	1.4	31	22	22	bouwvoor; weinig structuur; enige roest; >5% porien; ijzerconcreties
1Ap/Cg	27-45	3		16	145	1.4	9	9	9	enige roest; >5% porien; ijzerconcreties, verwerkt
1Cg	45-50	1		15	140	1.5	3	2	0	structuurgraad 70%; enige roest; 2-5% porien; oude wortelgangen (bruin); verwerkt
1C2g	50-80			20	140	1.65				structuurgraad 50%; veel roest; 2-5% porien; oude wortelgangen (bruin); diepste wortels door oude wortelgangen tot max. 55 cm (enkele)
1Cg3	80-100			22	140					
1Cr	100-120			16	140					

Hengelo Kop				x	y					
			GPS82	220300	450913					
pZg21	VI	grasland	datum	11-10-2006	bewortelbare diepte 40cm					
horizont	diepte (cm)	humus (%)	lutum (%)	leem (%)	M50	dichtheid (g/cm ³)	beworteling(telling)/dm ²			Opmerkingen
							1	2	3	
1Apg	0-30	4		16	145		18	37	33	homogeen
1A/Cg	30-32	3		16	145		5	8	18	incidenteel geploegd; heterogeen beworteld
ACg	32-55	1		15	140		2	0	9	veel roest; 2-5% porien; verwerkt; lokaal lemig; beperkt beworteld
Cg	55-60			20	140					2-5% porien; nauwelijks wortels na 32 cm tot max 55 cm

Wijnandsrade				x	y					
Midden			GPS126	190259	323486		Opm.	Diep grondwater; helling 3-5%		
BLb6	bietenland (gerooid)		datum	8-11-2006	bewortelbare diepte 100cm					
horizont	diepte	humus	lutum	leem	M50	dichtheid	beworteling(telling)/dm2			Opmerkingen
	(cm)	(%)	(%)	(%)		(g/cm3)	1	2	3	
1Ap1	0-23	2	18	90		1.5	7	1	0	2-3% porien; matig vast, tot 20 cm gecultivatord
1Ap2	23-30	2	18	90		1.6	2	1	0	scherpblokkig (20% klein, 80% groot); 2-5% porien; zeer vast
1Be	30-50		18	90		1.5	0	0	0	veel roest; 10% porien (wormgangen van 5-8 mm dikte, zeer intensief, 2-3 per dm2; bruin; veel wormgangen: beworteld tot grote diepte
1C	50-70		19	90		1.4				10% porien (wormgangen van 5-8 mm dikte, zeer intensief, 2-3 per dm2; bruin; veel wormgangen: beworteld tot grote diepte > 70 cm
dunne worteltjes tussen de wormgangen; in wormgangen hele kluwen										

Wijnandsrade				x	y					
Kop			GPS120	190226	323428		Opm.	Diep grondwater; helling 3-5%		
BLb6	bietenland (gerooid)		datum	8-11-2006	bewortelbare diepte 100cm					
horizont	diepte	humus	lutum	leem	M50	dichtheid	beworteling(telling)/dm2			Opmerkingen
	(cm)	(%)	(%)	(%)		(g/cm3)	1	2	3	
1Ap1	0-23	2	18	90		1.5	2	3	6	2-3% porien; matig vast, tot 20 cm gecultivatord
1Ap2	23-30	2	18	90		1.6	3	3	10	scherpblokkig (20% klein, 80% groot); 2-5% porien; zeer vast
1Be	30-50		18	90		1.5	1	4	3	veel roest; 10% porien; bruin; veel wormgangen: beworteld tot grote diepte
1C	50-70		19	90		1.4	0	3	1	10% porien (wormgangen van 5-8 mm dikte, zeer intensief, 2-3 per dm2; bruin; veel wormgangen: beworteld tot grote diepte

Vredepeel			x	y						
Midden			GPS 137	186818	394716	Opm.	bieten pas geoogst (november) bietenblad ondergefreesd			
Hn21	VI	bieten	datum	15-11-2006		Opm.	bewortelbare diepte 43cm			
	GHG	50 -mv	GLG	150 -mv.						
horizont	diepte	humus	lutum	leem	M50	dichtheid	beworteling(telling)/dm2			Opmerkingen
	(cm)	(%)	(%)	(%)		(g/cm3)	1	2	3	
1Ap1	0-30	4		10	140	1.3	22	23	19	weinig stuctuur, zwartgrijs, 0-15 cm gefreesd; geen wortels geteld
1Ap/B/C	30-43	4/2/0 %		10	140	1.4	12	8	11	los gepakt zand; beworteling in A/B materiaal; soms diepere A (sterk beworteld)
1BC	43-50			10	140	1.4	0	0	0	los gepakt zand; roest; lokaal 2-5% poriën, verder weinig; geel
1Cg	50-110			10	140	1.5				
1CG	110-120			10	140					

Vredepeel			x	y						
Kop			GPS131	186822	394677	Opm.	bieten pas geoogst (november) bietenblad ondergefreesd			
Hn21	VI	bieten	datum	15-11-2006		Opm.	bewortelbare diepte 40cm			
	GHG	50 -mv	GLG	150 -mv.						
horizont	diepte	humus	lutum	leem	M50	dichtheid	beworteling(telling)/dm2			Opmerkingen
	(cm)	(%)	(%)	(%)		(g/cm3)	1	2	3	
1Ap1	0-30	4		10	140	1.3	15	14	19	weinig stuctuur, zwartgrijs, 0-15 cm gefreesd; geen wortels geteld
1Ap/B/C	30-40	4/2/0 %		10	140	1.4	10	9	18	los gepakt zand; beworteling in A/B materiaal
1C	40-50			10	140	1.4	0	0	0	los gepakt zand; roest; lokaal 2-5% poriën, verder weinig; geel
1Cg	50-110			10	140	1.5				
1CG	110-120			10	140					

Westmaas			x	y						
Midden			GPS7	89766	422423	Opm.:	gewas mosterdzaad (groenbemester) na gerst?			
Mn25A	VI		datum	27-11-2006			bewortelbare diepte 100 cm			
GHG	75	GLG	140 cm -mv.				beworteling tot min. 80 cm			
horizont	diepte	humus	lutum	kalk	rijpheid	dichtheid	beworteling(telling)/dm2			Opmerkingen
	(cm)	(%)	(%)	(%)	klasse	(g/cm3)	1	2	3	
1Ap1	0-27	2	16	3	5	1.4	18	16	18	scherpbl/afgerond; 40/60 elementen klein (1cm)/groot (5 a 10cm); poriën 1-5 %; donkergrijs; bouwvoor los, wat plastisch door hevige neerslag afgelopen week
1Ap2	27-32	2	16	3	5	1.4	15	16	12	Structuurgraad beperkt (langs wormgangen); roest; poriën 1-5%; donkergrijs; fijne wortels
1Cg1	32-50		12	3	5	1.3	4	10	8	Roest; poriën 5-10%; bruingrijs; veel fijne wortels; veel poriën
1Cg2	50-75		12	3	5	1.3	5	3	4	Roest; poriën 5-10%; bruingrijs; nog ruim beworteld

Westmaas			x	y							
Kop			GPS2	89754	422470	Opm.:	Op kopakker GEEN mosterdzaad (groenbemester) na gerst?				
Mn25A	VI		datum	27-11-2006			bewortelbare diepte 100 cm				
GHG	75	GLG	140 cm -mv.				beworteling tot min. 60 cm				
horizont	diepte	humus	lutum	kalk	rijpheid	dichtheid	beworteling(telling)/dm2			Opmerkingen	
	(cm)	(%)	(%)	(%)	klasse	(g/cm3)	1	2	3		
1Ap1	0-27	2	16	3	5	1.4	21	13	19	Scherpblokkig; structuurgraad 20/80 afgerond/scherpblokkig; poriën 1-5%; donkergrijs; veel fijne wortels, intensief; wormactiviteit behoorlijk groot	
1Ap2	27-35	2	16	3	5	1.4	25	15	20	Poriën 1-5%; donkergrijs; weinig tot veel porien	
1Cg1	35-85		12	3	5	1.3	2	1	2	Roest; poriën 5-10%; bruingrijs; lange wortels via wormgangen; veel porien	
1Cg2	85-110		14	3	5	1.3				Roest; poriën 5-10%; bruingrijs	
1CG	110-120	0.5	16	3	4	1.3				Roest; poriën 5-10%; bruingrijs; wat veenresten	
Opm.:	in Midden perceel wat meer wormactiviteit; hoger % afgerondblokkige kleinere structuurelementen in Ap: 40%; soms wat zandige bijmenging uit ondergrond en schelpen; oude gewas (mais) duidelijk zichtbaar op 25-30 cm (in ringen!!); door veel neerslag afgelopen week wat slappe bouwvoor: plastisch vervormbaar mn. in Midden; Ontstaanswijze: opwaspolder. Oude dijk aan oostkant, vanuit het westen opwas/aanwas: lichte zavel aan kant van nieuwe westelijke dijk; zware gronden aan oostkant										

Slootdorp			x	y						
Midden			GPS 19	122140	539141	gewas: uitgelopen tarwestoppel (en deel rogge)				
Mv15A	VI		datum	4-12-2006		bewortelbare diepte 60 cm				
GHG	70	GLG	130 cm -mv.			beworteling tot 60cm				
horizont	diepte	humus	lutum	kalk	rijpheid	dichtheid	beworteling(telling)/dm2			Opmerkingen
	(cm)	(%)	(%)	(%)	klasse	(g/cm3)	1	2	3	
1Ap1	0-25/28	2	10	3	5	1.5	16	27	17	scherpblokkig/afgegrond blokkig; 30/70 afger/scherp; poriën 2-5%; donkergrijs; schelpen
1Cg1	25-35	2	5	3	5	1.6	1	6	3	Poriën 2-5%; donkergrijs; schelpen, zandig en met enkele losgepakte bandjes
1Cg2	35-50		14	3	5	1.4	1	2	1	Roest; poriën 5-10%; bruigrijs; schelpen, zand soms gelaagd; beworteling langs breukvlakken
1Cg3	50-60	0.5	30	3	4	1.3	0	0	0	Roest; poriën <2%; bruigrijs; beworteling vooral via kleiige lagen
Opm.:	de profielkuil ligt vlak bij een drainsleuf (drain op 55 cm diepte; rode baksteen)									
Slootdorp			x	y	Plasvorming op kopakker					
Kop			GPS 12	122172	539099	gewas: uitgelopen tarwestoppel (en deel rogge)				
Mv15A	VI		datum	4-12-2006		bewortelbare diepte 60 cm				
GHG	70	GLG	130 cm -mv			beworteling tot 60cm				
horizont	diepte	humus	lutum	kalk	rijpheid	dichtheid	beworteling(telling)/dm2			Opmerkingen
	(cm)	(%)	(%)	(%)	klasse	(g/cm3)	1	2	3	
1Ap1	0-25/28	2	12	3	5	1.5	22	16	13	Scherpblokkig/afgegrond blokkig; 10/90 afger/scherp; poriën 1-2%; donkergrijs; schelpen, verdicht: soms blauwkleuring (stinkt) en ondergewerkte gewasresten (stroresten)
1Ap2	25-35	2	12	3	5	1.6	9	13	18	Breukvlakken herkenbare wortelgangen; poriën 1-2%; donkergrijs; schelpen, verdicht
1Cg1	35-50		6/22%	3	5	1.4	2	3	11	Roest; poriën 5-10%; bruigrijs; schelpen, zand soms gelaagd; beworteling langs breukvlakken
2C1	50-52	60	d			1.3				Zwart; onherkenbaar veen
3C1g	52-60	0.5	6/22%	3	4	1.3	0	0	6	Roest; poriën 5-10%; bruigrijs; beworteling vooral via kleiige lagen
4Cw	60-100	65	cb							Zwart; (Holland-) broekveen
5Ce	100-120		35	1	4					Slappe oude klei (Calais?)
Opm.:	In de profielkuil zit een geultje (foto) Dit is geen drainsleuf, maar ondiep opgevuld veenstroompje met zandiger materiaal; naast de opgepulde veenstroom zwaardere materiaal. Het dunne veelaagje komt alleen in de geul voor; weinig beworteling in veen en zand									

Kloosterburen				x	y					
Midden				GPS29	222449	601582	Opm.:	graanstoppel (weer groen)		
Mn15C	VII			datum	14-12-2006			bewortelbare diepte 100cm		
	GHG	90 -mv.	GLG	160 -mv.						
horizont	diepte	humus	lutum	kalk	rijpheid	dichtheid	beworteling(telling)/dm2			Opmerkingen
	(cm)	(%)	(%)	(%)	klasse	(g/cm3)	1	2	3	
1Ap1	0-27	1.5	10	1	5	1.4	10	8	12	Scherpblokkig/afgerond blokkig; plastisch; 70/30 afgerond/scherp; poriën 2-5%; donkergrijsbruin;
1AC	27-40	1	10	3	5	1.4	4	4	3	Scherpblokkig; plastisch; 80/20 afgerond/scherp; poriën 1-2%; donkergrijsbruin; iets verdicht
1Cg1	40-55	0.5	4	3	5	1.3	3	3	2	Granulair; 90/10 afgerond/scherp; poriën 5-10%; grijs; iets roest
1Cg2	55-85	0.3	11	3	5	1.3				Roest; poriën 5-10%; grijs; roestvlekken; iets gelaagd
1Cg3	85-120	0.2	20	3	5					Roest; grijs; roestvlekken; gelaagd
Opm.:	Betere structuur dan Kopakker; hoewel de bouwvoor ook verdicht is (lokaal blauwkleuring). De bouwvoor is wat minder dik. Er is dieper wel enige antropogene beïnvloeding (stenen, scherven) beneden de Ap. Er komen ook nogal veel wormen en wormgangen voor tot dieper dan 60cm (zie foto) De poriën zorgen voor een sponzige structuur. Het percentage poriën is hoog (Vaak ook wat grotere poriën tot 1-2 mm)									

Kloosterburen				x	y					
Kop				GPS24	222440	601524	Opm.:	graanstoppel (weer groen)		
Mn15C	VII			datum	14-12-2006			bewortelbare diepte 100cm		
	GHG	90 -mv.	GLG	160 -mv.	beworteld tot min. 60cm					
horizont	diepte	humus	lutum	kalk	rijpheid	dichtheid	beworteling(telling)/dm2			Opmerkingen
	(cm)	(%)	(%)	(%)	klasse	(g/cm3)	1	2	3	
1Ap1	0-27	1.5	11	2	5	1.5	11	19	12	Scherpblokkig; plastisch; 70/30 scherp/afgerond; donkergrijsbruin
1AC	27-45	1	11	3	5	1.5	12	12	10	Scherpblokkig; plastisch; 80/20 scherp/afgerond; donkergrijsbruin
1Cg1	45-60	0.4	11	3	5	1.4	7	4	3	Granulair; poriën 2-5%; grijs
1Cg2	60-80	0.4	24	3	5	1.3				Roest; poriën 2-5%; grijs; roest en mangaanvlekken
2Cg	80-120	0.2	6	3	5	1.3				Roest; grijs; roestvlekken
Opm.:	De bouwvoor van het profiel op de Kopakker is behoorlijk verzadigd. Hierdoor vervormt het soms nogal plastisch (20cm ring 1.2 is daardoor matig). Plassen langs profiel (zie foto) en opslag van graanstoppel veel minder ontwikkeld. Verdicht ; blauwkleuring in bouwvoor									

Bijlage 2 Codes en benamingen bij een profielbeschrijving

Legenda voor macrostructuren

Structuurtype		Grootte		Structuurgraad	
naam	code	naam	code	naam	code
<i>Structuurtypen met structuurelementen</i>					
granulair	gr	klein: < 2 mm	1	zwak	z
		vrij klein: 2- 5 mm	2	matig	m
				sterk	s
afgerond blokkig	ab	klein: <10 mm	1	zwak	z
scherp blokkig	sb	vrij groot ¹ : 10-20 mm	2	matig	m
		groot: >20 mm	3	sterk	s
ruw prisma samengesteld uit:	rpa	klein ¹ : <20 mm	1	zwak	z
— afgeronde blokken	rps	vrij groot ¹ : 20-50 mm	2	matig	m
— scherpe blokken	rpp	groot ¹ : >50 mm	3	sterk	s
— prisma's					
ruw prisma, enkelvoudig, niet gelaagd	rpe	klein ¹ : <20 mm	1	zwak	z
ruw prisma, enkelvoudig, gelaagd	rpg	vrij groot ¹ : 20-50 mm	2	matig	m
		groot ¹ : >50 mm	3	sterk	s
glad prisma samengesteld uit:	gpa	klein ¹ : <20 mm	1	zwak	z
— afgeronde blokken	gps	vrij groot ¹ : 20-50 mm	2	matig	m
— scherpe blokken	gpp	groot ¹ : >50 mm	3	sterk	s
— prisma's					
glad prisma, enkelvoudig, niet gelaagd	gpe	klein ¹ : <20 mm	1	zwak	z
glad prisma, enkelvoudig, gelaagd	gpg	vrij groot ¹ : 20-50 mm	2	matig	m
		groot ¹ : >50 mm	3	sterk	s
plaat	pl	dun: < 5 mm	1	zwak	z
		vrij dik: 5-10 mm	2	matig	m
		dik: >10 mm	3	sterk	s
<i>Structuurtypen zonder structuurelementen</i>					
sedimentair gelaagd (inclusief dunne zavel- of kleilagen, afgewisseld door zandlagen met enkelkorrelstructuur)	sg	MATE VAN VERSTORING	1	geen indeling	o
		— weinig verstoord: <10% van de grondmassa is verstoord	2		
		— matig verstoord: 10-70% van de grondmassa is verstoord	3		
		— sterk verstoord: >70% van de grondmassa is verstoord			
sponsstructuur	sp	geen indeling	0	geen indeling	o
gangenstructuur	ga	geen indeling	0	geen indeling	o
massief	mas	geen indeling	0	PAKKING	
				— dicht gepakt	d
				— half open	h
				gepakt	
enkel-korrelstructuur, gelaagd	ekg	geen indeling	0	PAKKING	
enkel-korrelstructuur, weinig of niet gelaagd	ekn			— dicht gepakt	d
				— half open	h
				gepakt	
micro-agregaatstructuur	mag	geen indeling	0	PAKKING	
				— dicht gepakt	d
				— half open	
				gepakt	

¹Grootte van de samenstellende delen of van de enkelvoudige prisma's.

Structuurgraad

De structuurgraad is een maat voor de ontwikkeling van de structuurelementen, uitgedrukt in drie klassen:

- zwak ontwikkeld: de grondmassa bestaat voor <30% uit structuurelementen, die zich slechts bij openbreken laten isoleren;
- matig ontwikkeld: de grondmassa bestaat voor 30-70% uit structuurelementen, die zich gedeeltelijk bij lossteken en verder bij openbreken laten isoleren;
- sterk ontwikkeld: de grondmassa bestaat voor >70% uit structuurelementen, die zich meestal bij lossteken laten isoleren.

Kalkklasse

- 1 = kalkloos; geen opbruising
- 2 = kalkarm; hoorbare opbruising
- 3 = kalkrijk; zichtbare opbruising

Rijpingsklasse

Geldt alleen voor niet-moerig materiaal met meer dan 8% lutum, dat bovendien niet-geoxideerd is.

- 1 = geheel ongerijpt: loopt tussen de vingers door
- 2 = bijna ongerijpt: loopt bij knijpen zeer gemakkelijk tussen de vingers door
- 3 = half gerijpt: loopt bij knijpen nog goed tussen de vingers door
- 4 = bijna gerijpt: kan met stevig knijpen nog juist tussen de vingers door worden geperst
- 5 = gerijpt: niet tussen de vingers door te persen

Zichtbare poriën

Zichtbare poriën zijn poriën > 100 µm. Er worden 3 klassen onderscheiden. De klassewaarde wordt bepaald aan de hand van zichtbare poriën op een horizontaal vlak van doorgebroken structuurelementen:

- 1 = weinig: <0,5%
- 2 = matig: 0,5-5%
- 3 = veel: >5%

Grondwatertrappenindeling aangevuld met kwantitatieve en kwalitatieve toevoegingen

Grondwatertrap			GHG (gemiddelde wintergrondwater- stand) (cm - mv.)	GLG (gemiddelde zomergrondwater- stand) (cm - mv.)	Kwalitatieve toevoe- gingen se- dert 1988
code 1966	code 1977	code 1988			
I	I	I	-(0-20) ¹	<50	w
II	II	II	-(0-30) ¹	50- 80	b, w
	II*	IIb	25-40	50- 80	
		IIc	>40	50- 80	
III	III	III	<40	80-120	b, w
	III*	IIIb	25-40	80-120	
IV	IV	IV	40-80	80-120	b
		IVc	>80	80-120	
V	V	V	<40	>120	b, s, w
	V*	Vb	25-40	>120	
VI	VI	VI	40-80	>120	b, s
VII	VII	VII	80-140	>120	b, s
	VII*	VIII	>140	>120 (<160)	

¹ (...) meest voorkomende waarden binnen een groter GHG- of GLG-traject.

Verklaring

Kwantitatieve toevoegingen:

...b =GHG tussen 25 en 40 cm - mv.

...c =GHG en GLG komen nagenoeg op gelijke diepte voor

Kwalitatieve toevoegingen:

b... =buiten de hoofdwatkerking gelegen gronden; periodiek overstroomd

s... =schijnspiegels; bij gronden met een fluctuatie (GLG-GHG) van meer dan 120 cm

w... =water boven maaiveld; aaneengesloten, langer dan 1 maand, 's winters; binnen hoofdwatkerking

Bijlage 3 Verslag van de bodemfysische metingen bij de proef “Onderzoek naar de verbetering van de structuur van de ondergrond”.

1. Inleiding

In het PPO project “Onderzoek naar de verbetering van de structuur van de ondergrond” is Alterra onderaannemer voor het doen van een aantal bodemfysische metingen. De probleemstelling bij het onderzoek is de vraag hoe bij een zavelgrond/lichte kleigrond de structuur van een verdichte ondergrond verbeterd kan worden. Gezocht wordt naar de meest aantrekkelijke methode(n) om op een perceel met een verdichte ondergrond de bodemkwaliteit te verbeteren. Het gaat om zowel de beoordeling van het effect van mechanische ingrepen (woelen met een traditonele woeler en de ‘combiplow’ en spitten) als om het effect van gewassenkeuze (wel/niet diepwortelende gewassen).

Het onderzoek wordt uitgevoerd op een perceel aan de Edelhertweg (achter de gebouwen van ASG, kavel 86) waarvan sinds 2005 het PPO-agv het beheer heeft. Daarvoor was de kavel lange tijd verhuurd. In 2005 is gebleken dat de ondergrond van dit perceel sterk verdicht is. Dit leidde in 2005 tot een hoog percentage verzopen aardappelen. Het betreft een 8 ha groot perceel waarvan de binnenste 6 ha geschikt is om daarop een vergelijkende proef uit te voeren.

In deze rapportage wordt alleen op het aandeel van Alterra in het onderzoek ingegaan.

2. Proefopzet en bodemfysische metingen

2.1. Proefopzet

Op drie blokken is in het vroege najaar van 2006 op droge grond een bodembewerkingsvariant uitgevoerd om de ondergrond tot 40 à 45 cm los te maken. Bij twee blokken zijn onbehandeld en is de ondergrond niet losgemaakt. In 2006 waren alle blokken ingezaaid met zomergerst. Voor 2007 zijn dwars op de 5 blokken met al of niet diepe grondbewerking drie bouwplannen met een verschillende gewasinvulling uitgezet. De drie bodembewerkingsvarianten zijn: woelen, spitten, en combiplow. De combiplow is anders dan de naam doet vermoeden een soort woeler (zie Figuur 1a), waarvan de onderkant is uitgerust met een voet, waarmee de verdichte laag wordt opgelicht en zo gebroken. Het woelen met de traditonele woeler (zie Figuur 1b) en de combiplow ging tot 45 cm –mv. Bij het woelen vindt nauwelijks menging van de grond plaats. Het spitten ging tot 43 cm diepte, waarbij de bouwvoor en de ondergrond worden vermengd. De droge grond kwam door het spitten zeer los te liggen. Bij het woelen kwam de grond nauwelijks omhoog. Het proefschema voor 2007 is aangegeven in Figuur 2. De eerste onbehandelde strook

(onbeh1) valt buiten het gebied dat in 2005 met plassen was bedekt. De strook met spitten was in 2005 niet zo nat als de binnenste drie stroken.



Fig 1a. Combiplow



Fig 1b. Woeler

De drie bouwplannen voor de jaren 2007 en 2008 zijn: bouwplan 1 (luzerne, luzerne), bouwplan 2 (wintertarwe, koolzaad of suikerbiet) en bouwplan 3 (aardappel, zaaiui). In 2006 en in het afsluitende jaar 2009 wordt op het gehele perceel zomergerst geteeld. De gewassen in bouwplan 1 en 2 zijn diepwortelende gewassen en die in bouwplan 3 zijn ondiep wortelend.

Rotatie 2007 / 2008	Onbeh1	Combiplow	Woelen	Onbeh2	Spitten
Luzerne / Luzerne					
Aardappelen / Zaaiui					
Wintertarwe / Suikerbiet					
Aardappelen / Zaaiui					
Wintertarwe / Suikerbiet					
Luzerne / Luzerne					

Figuur 2. Proefschema 2007/2008. De bemonstering heeft op het gedeelte met de aardappelen plaatsgevonden. De strook "Onbeh1" valt buiten het deel dat veel plasmavorming had in 2005. De lengte (in de figuur horizontaal) van de proefstroken is 80 m en de breedte 24 m.

2.2. Bodemfysische metingen

Op 30 mei 2007 zijn van alle proefvelden met de gewassen tarwe, aardappelen en luzerne indringingsweerstand gemeten met de Bush penetrometer (conus 1 cm²).

Bij alle behandelingen zijn diagonaal door het proefveld 10 metingen uitgevoerd.

Op 9 juli 2007 zijn infiltratiemetingen met de infiltrometer gedaan in de aardappelproefveldjes van de tweede herhaling (westelijk). De plekken zijn gekozen midden tussen de drains. De omstandigheden waren extreem nat. Er stond op veel plaatsen water tussen de aardappelruggen. Tevens zijn indien mogelijk op enkele plaatsen ringmonsters van 7,5 cm doorsnee genomen om volumieke massa en luchtgehalte van het natte pF traject te meten.

Op 22 augustus 2007 zijn profielkuilen gemaakt in de aardappelen, waarin een profielbeschrijving, een beoordeling van de beworteling, meting van worteldichtheid en ringmonsters van 7,5 cm zijn genomen op verschillende diepten om de volumieke massa, porienvolume en luchtgehalten bij 50 en 100 cm te bepalen. De profielkuilen lagen aan de andere kant van de aardappelproefvelden waar eerder de infiltratiemetingen zijn gedaan. Ze lagen daarmee wel weer midden tussen de drains.

Op 27 augustus 2007 zijn de penetrometerwaarnemingen herhaald in de aardappelen. De metingen zijn toen uitgevoerd in clusters van 5 * 5 metingen rond een plek waar ook een 100cc ringmonster op 27-32 cm –mv. is genomen. Ze lagen ook in een raai diagonaal door het proefveld. De ringmonsters zijn gebruikt om de volumieke massa te bepalen.

Op 17 en 22 oktober 2007 zijn met PVC-ringen van 20 cm doorsnede ringmonsters genomen. Ze zijn gebruikt om op het lab de verzadigde doorlatendheid vast te stellen. De bemonsteringsdiepte was 25 - 35cm. Er zijn 3 ringen per behandeling genomen.

3. Resultaten en discussie

3.1. Infiltratiesnelheid

In tabel 1 zijn gemeten infiltratiesnelheden weergegeven, zoals gemeten met de infiltrometer. De infiltratiesnelheden van de behandelingen 'Onb1' en 'combiplow' zijn aanzienlijk hoger dan de andere drie behandelingen. Dit komt goed overeen met de algemene indruk tijdens de metingen. Op de eerste twee behandelingsblokken (vooral het eerste blok was duidelijk droger) stonden veel minder plassen op het land dan de andere drie.

Over de meetresultaten is wel wat twijfel. De metingen van de eerste twee behandelingen zijn niet volledig in evenwicht. Bij herhaling van de metingen bleek de infiltratiesnelheid nog steeds te dalen. Vermoedelijk heeft de plasvorming bij de andere drie behandelingen de metingen ook beïnvloed. Door het geringe potentiaalverschil tussen de waterhoogte in de infiltratiering en de plassen tussen de aardappelrijen, kunnen de infiltratiesnelheden lager zijn ((bij sommige behandelingen stonden de infiltratieringen rondom in het water).

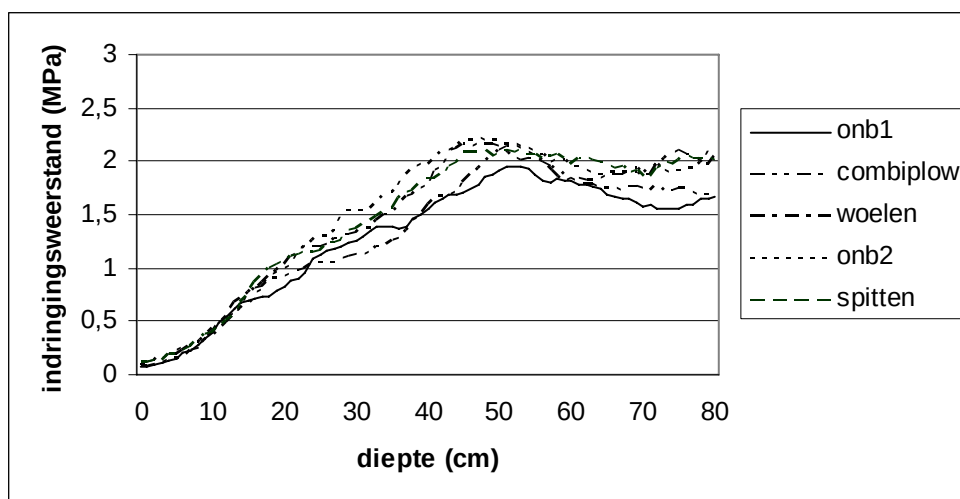
Tabel 1 infiltratiesnelheden (m/dag) bij een of meerdere metingen per behandeling (meerdere metingen zolang er nog geen constante stroming optrad).

Meting	1	2	3	4
Behandeling				
Onb1	33,41	20,16	19,20	12,67
combiplow	6,90	4,58		
woelen	0,11			
Onb2	0,56			
spitten	1,15			

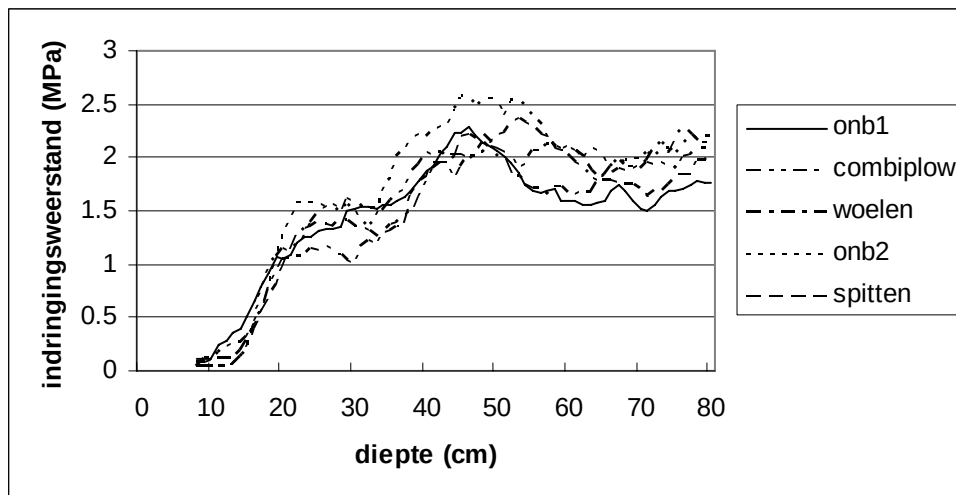
3.2. Indringweerstand

De indringweerstand zijn gemeten met de Bush penetrograaf (conus 1 cm², tophoek 60°) op 30 mei 2007 (Figuur 3) en 27 augustus 2007 (Figuur 4). De metingen zijn in 10 - voud gedaan en gemiddeld.

De indringweerstand geven geringe verschillen tussen de behandelingen te zien. De verschillen tussen de twee gedeelten die onbehandeld zijn, zijn minstens zo groot als de verschillen met behandelingen met grondbewerkingen. Dit geldt op beide tijdstippen.



Figuur 3. Indringingsweerstand in alle behandelingen op aardappelen, luzerne en tarwe op 30 mei 2007. Bij aardappelen zijn de metingen halverwege de flank van aardappelruggen gedaan (= mv.).



Figuur 4. Indringingsweerstand in alle behandelingen op aardappelen op 27 augustus 2007. De bodem was op veldcapaciteit. De metingen zijn gedaan tussen de aardappelruggen. Voor de juiste maaiveldshoogte is gecorrigeerd.

In de grafiek van 27 augustus (Figuur 4) lijkt de invloed van de ploegzool op de indringingsweerstand duidelijker zichtbaar dan op die van 30 mei 2007 (Figuur 3). Vanaf 30 cm neemt de weerstand sterker toe. Er is daarbij weinig verschil tussen de behandelingen. De omstandigheden waren in beide gevallen vochtig/nat. Geen enkele keer is een gemiddelde indringingsweerstand gemeten die boven de voor beworteling geldende grens van 3,0 MPa uitkomt.

3.3. Droge dichtheid

Uit tabellen 2 en 3 dat de behandelingen combi-plow, woelen en onb2 een vergelijkbare droge dichtheid hebben. De behandelingen onb1 en spitten hebben een vergelijkbare lagere droge dichtheid. Zij liggen op een hoger deel van het perceel met diepere GLG. Uitgaande van een maximale Packing Density (PD) van $1,75 \text{ g.cm}^{-3}$ en een lutumgehalte van 22% (zie tabel 5) is de drempelwaarde voor de dichtheid $1,55 \text{ g.cm}^{-3}$. Alleen Onb1 voldoet hier aan. De behandeling “spitten” zit op de grens. De twee groepen zijn significant verschillend van elkaar (zie arcering in tabel 3).

Tabel 2. Gemiddelde droge dichtheid op 27-32 cm –mv van de verschillende behandelingen in aardappelen op 27 augustus 2007.

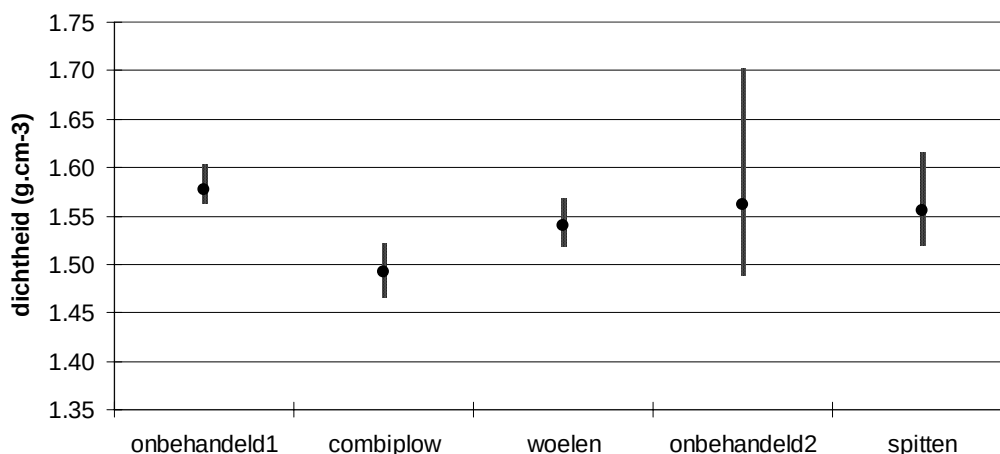
Behandeling	onb1	combi-plow	woelen	onb2	spitten
Droge dichtheid (gem) (g.cm^{-3})	1,525	1,584	1,611	1,598	1,550
Standaarddeviatie (n=5)	0,047	0,027	0,035	0,039	0,028
Sed	0,023				

Tabel 3. t-waarden van de volumieke massa verschillende behandelingen op 27-32 cm –mv. in aardappelen op 27 augustus 2007

significant verschillend zijn: >2,13 (t-tabel) (n=5)	behandeling				
behandeling	onb1	combi-plo	woelen	onb2	spitten
onb1		2,55	3,78	3,20	1,08
combiplow			1,22	0,65	-1,47
woelen				-0,58	-2,69
onb2					-2,69
spitten					

In 2006 is in het midden van het proefveld boven de drains en tussen de drains de dichtheid van de toen nog onbehandelde grond op 25 – 30 cm en op 30 – 35 cm bepaald. Boven de drain was de dichtheid respectievelijk 1,62 en 1,63 g.cm⁻³. Tussen de drains was de dichtheid respectievelijk 1,48 en 1,62 g.cm⁻³. De dichtheden van de ploegzool op het middenste deel van het proefveld waren in 2006 dus iets hoger dan in 2007, maar het verschil is niet groot.

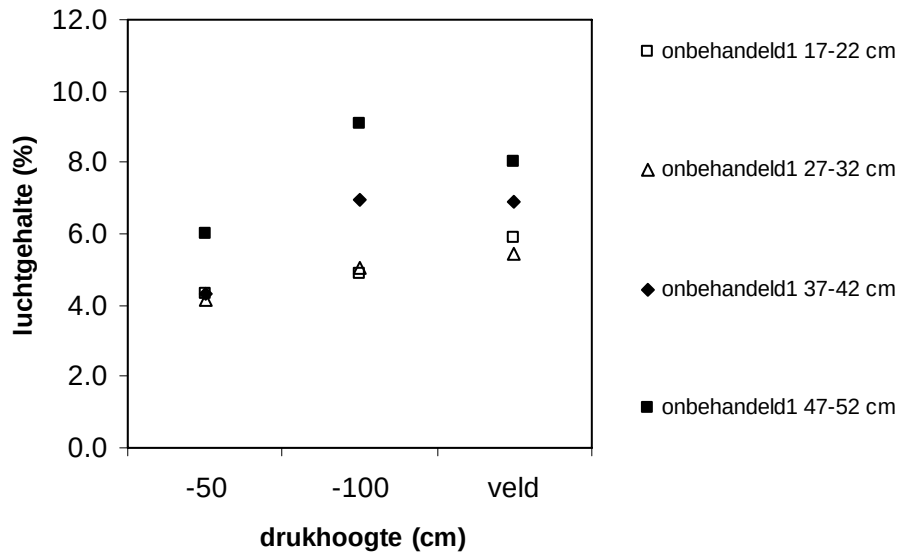
In figuur 5 zijn de dichtheden van de ringmonsters uit de profielkuilen op 27-32 cm –mv. weergegeven. Hieruit blijkt dat de profielkuilen een wat afwijkend beeld geven van dat van de ringmonsters die verspreid over het proefveld zijn genomen en door het minder aantal waarnemingen (n=3) op korte afstand minder representatief zijn voor de behandeling. De ringmonsters zijn op onderlinge afstand van 20 - 30 cm genomen. Verwacht werd dat de behandelingen combiplow en woelen een grotere variabiliteit in de volumieke massa zouden hebben. Dit is niet het geval. De spreiding bij onbeh2 is groter. In de profielkuilen waren ook weinig aanwijzingen voor de grondbewerkingen zichtbaar.



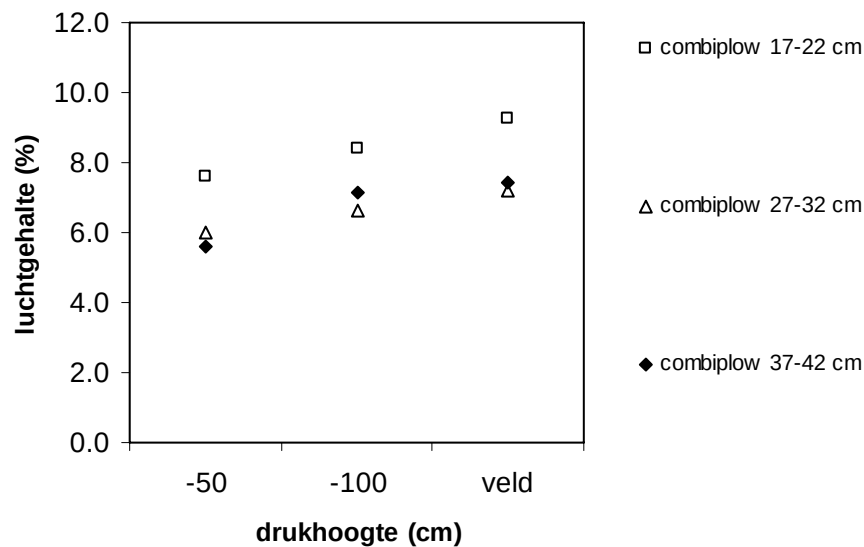
Figuur 5. Droge dichtheid en spreiding bij de profielkuilen op een diepte van 27-32 cm –mv.

3.4. Luchtgehalten en poriënvolume

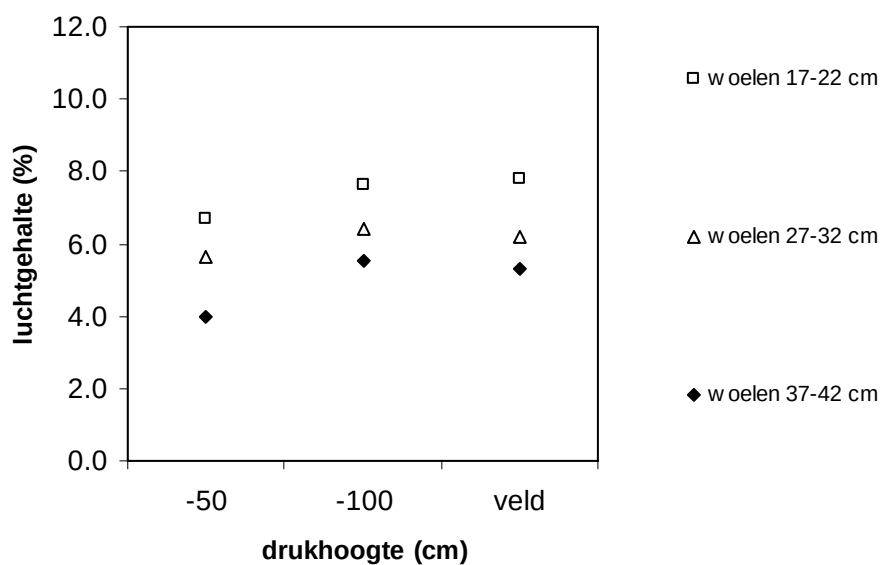
In figuur 6a t/m 6e zijn de luchtgehalten bij drukhoogten -50, -100 en de veldsituatie per behandeling uitgezet. De ondergrond op 47-52 cm bevat de hoogste luchtgehalten. Op veel diepten en bij veel behandelingen blijven de luchtgehalten ook bij een drukhoogte van -100 cm beneden 10% (=bewortelingscriterium).



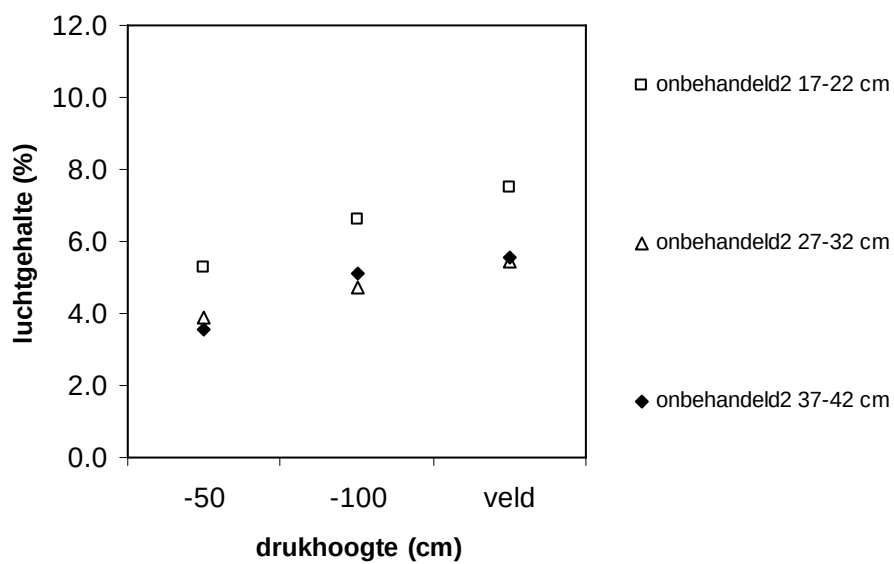
Figuur 6a. Luchtgehalten bij drukhoogten -50, -100 cm en de veldsituatie van behandeling onbeh1 op 4 diepten.



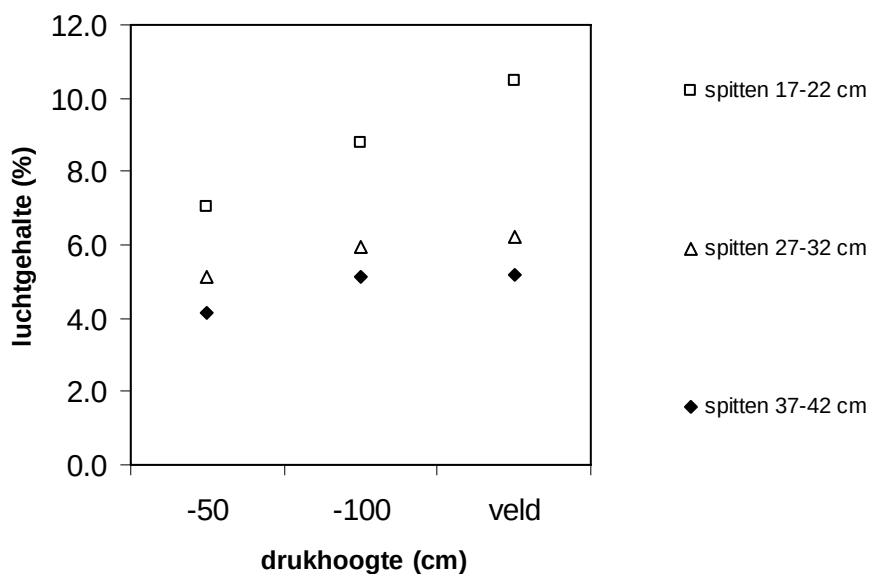
Figuur 6b. Luchtgehalten bij drukhoogten -50, -100 cm en de veldsituatie van behandeling combiplow op 3 diepten.



Figuur 6c. Luchtgehalten bij drukhoogten -50, -100 cm en de veldsituatie van behandeling woelen op 3 diepten.



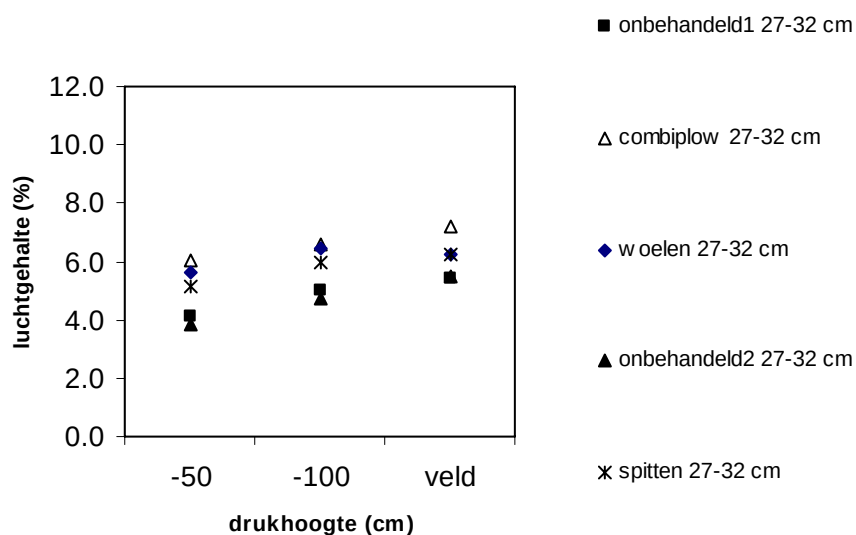
Figuur 6d. Luchtgehalten bij drukhoogten -50, -100 cm en de veldsituatie van behandeling onbeh2 op 3 diepten.



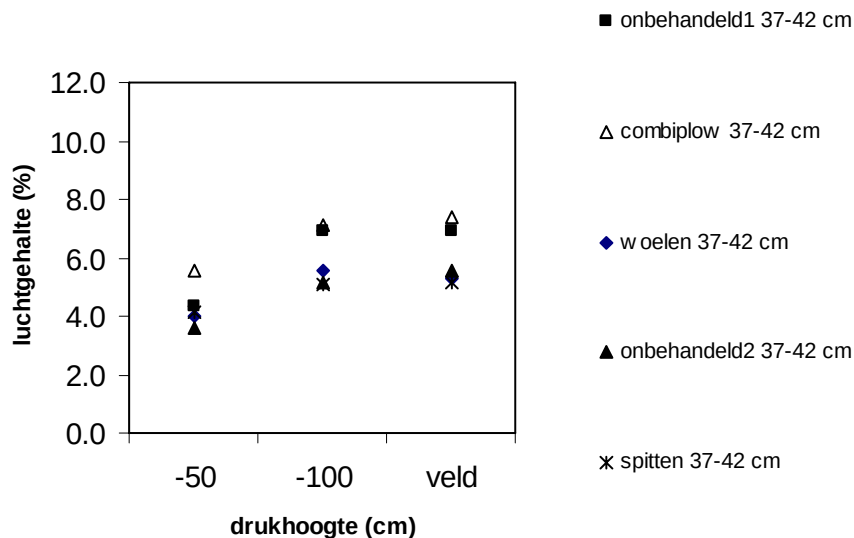
Figuur 6e. Luchtgehalten bij drukhoogten -50, -100 cm en de veldsituatie van behandeling spitten op 3 diepten.

De veldsituatie komt er meestal aardig mee overeen. In de onbeh1-lokatie zijn ook ringmonsters op 17 -22 cm genomen. Ook op die diepte zijn de luchtgehalten te laag.

In Figuur 7a en b zijn de luchtgehalten van behandelingen bij elkaar gezet op een bepaalde diepte.



Figuur 7a. Luchtgehalten bij drukhoogten -50, -100 cm en de veldsituatie van alle behandelingen op 27-32 cm - mv.



Figuur 7b. Luchtgehalten bij drukhoogten -50, -100 cm en de veldsituatie van alle behandelingen op 37-42 cm -mv.

De verschillen zijn niet erg groot. De luchtgehalten van de twee onbehandelde objecten zijn tussen 27-32 cm het laagst. Blijkbaar heeft diepere grondbewerking dan ploegen tot 27 cm wel enig effect gehad. Het heeft er echter niet voor gezorgd dat deze laag een voldoende hoog luchtgehalte bij lage drukhoogten heeft verkregen.

Op grotere diepte (37-42 cm -mv) is er een minder goed verband met de uitgevoerde grondbewerkingen. Blijkbaar hebben grondbewerkingen op die diepte weinig verbetering opgeleverd. Het object onb1 ligt wat hoger en heeft bij aanvang al een beter luchtgehalte. De combiplot heeft op deze diepte een beter resultaat dan woelen of spitten.

Alle luchtgehalten zijn op beide diepten lager dan 8%, ook bij een drukhoogte van 100 cm. De conclusie is dat de behandelingen weinig effect hebben gehad op de waterretentiekarakteristiek (pF-curve) in dit traject.

3.5. Verzadigde doorlatendheid

De verzadigde doorlatendheid van de laag net beneden de gangbare ploegdiepte van 25 cm is in tabel 4 weergegeven. De doorlatendheid is in bijna alle gevallen laag. Alleen bij de behandeling 'spitten' is in een van de drie ringen een hoge verzadigde doorlatendheid van 589 cm/dag gemeten.

Dit beeld komt deels overeen met gemeten infiltratiesnelheden en doorlatendheden van juli 2007 (gemeten met de infiltrometer) in tabel 1. Opvallend is dat bij de behandeling 'onbehandeld' en 'combiplot' nu veel lagere doorlatendheden zijn gemeten. Ze zijn gemiddeld wel hoger dan de Ksat van de andere drie behandelingen. Ook hier is geen duidelijk behandelingseffect zichtbaar.

Tabel 4 Verzadigde doorlatendheid (cm.d^{-1}) van de 10 cm dikke laag net beneden de ploegdiepte (plm. 25-35 cm –mv.)

Ksat (cm.d^{-1})	Monster 1	Monster 2	Monster 3
Behandeling			
Onbehandeld 1	9,2	0,36	0,8
Combiplow	0,08	10,1	29,4
Woelen	0,14	0,33	0,2 ¹
Onbehandeld 2	3,6	²	0,03
Spitten	0,2	589	6,7

¹ Na dichtstoppen “gat”.

² Monster afgekeurd

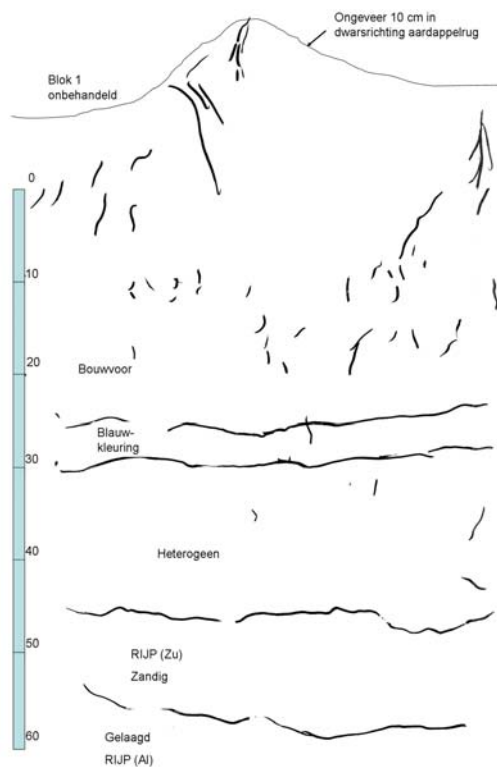
3.6. Profielbeschrijvingen en beworteling

In tabel 5 zijn textuuranalyses van een aantal lagen weergegeven. De in paragraaf 3.5 beschreven verzadigde doorlatendheden zijn gemeten in lagen die in tabel 5 terugkomen. De laag net onder de bouwvoor van het proefveld (25–35 cm diepte) blijkt ondanks vermenging met de eronder liggende zandiger laag (vergelijk met de twee diepere lagen op 35–45 en 45–55 cm diepte) nog steeds uit zware zavel te bestaan.

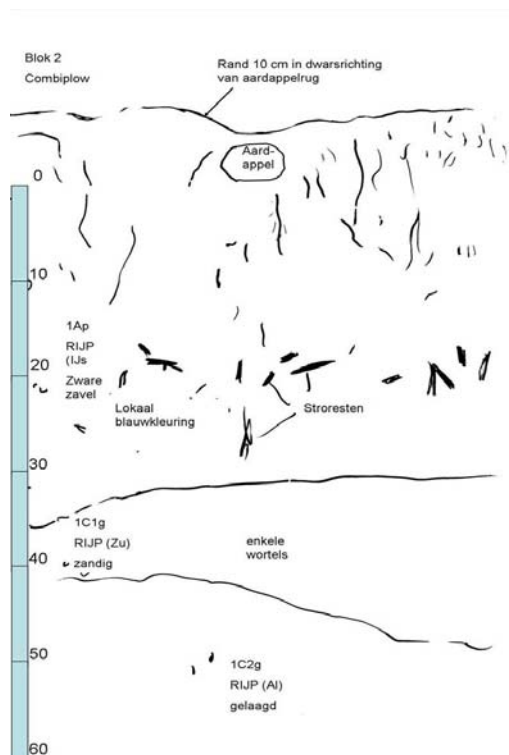
Tabel 5 De textuur (% van de minerale delen) van monsters genomen bij de plekken waar de monsters voor de verzadigde doorlatendheidsmetingen zijn genomen.

Textuur	Diepte	Lutum	Silt	Zand	Afslib- baar	Leem	M50
Behandeling	(cm)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Onbehandeld1	25 -35	23,8	28,2	48,1	34,9	51,9	92
Onbehandeld1	35 -45	12,8	21,9	65,3	20,4	34,7	97
Combiplow	25 -35	23,6	22,0	54,4	32,6	45,6	98
Woelen	25 -35	23,6	22,0	54,4	32,6	45,6	98
Onbehandeld2	25 -35	21,9	25,1	53,0	32,0	47,0	96
Spitten	25 -35	21,5	27,9	50,7	33,1	49,3	98
Spitten	45 -55	13,1	29,2	57,7	22,2	42,3	94

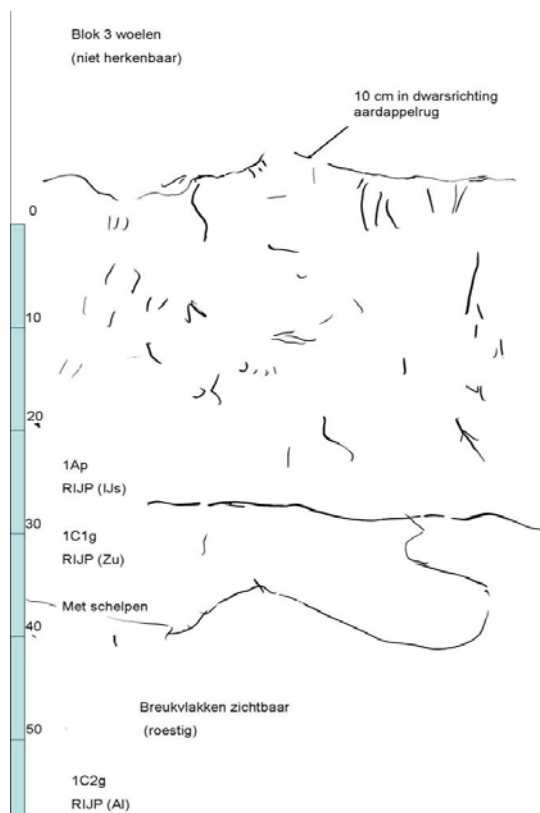
In figuur 8 a t/m e staat de beworteling weergegeven van de behandelingen (blokken) in het aardappelproefveld. De wortelbeelden zijn genomen op 10 cm in de richting van de aardappelrug. Daardoor ligt het maaiveld lager dan de bovenkant van de beelden.



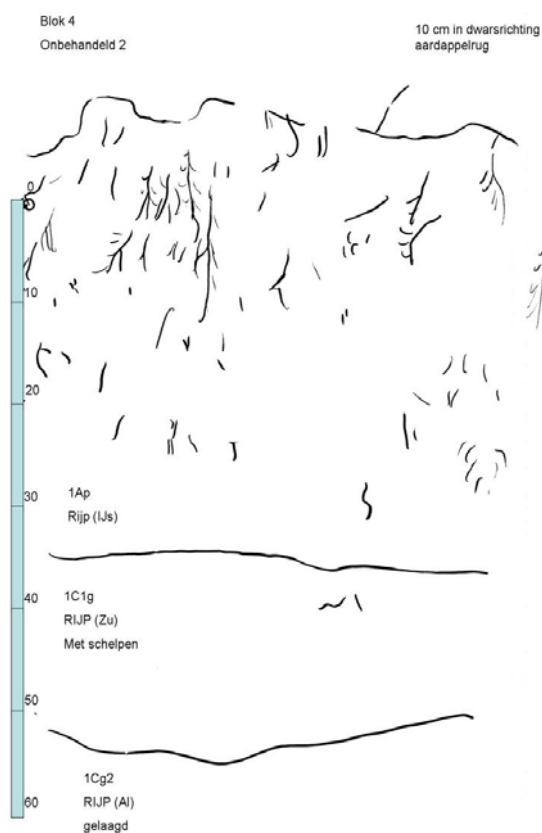
Figuur 8a. Beworteling in blok 1 (onbehandeld) van het aardappelproefveld.



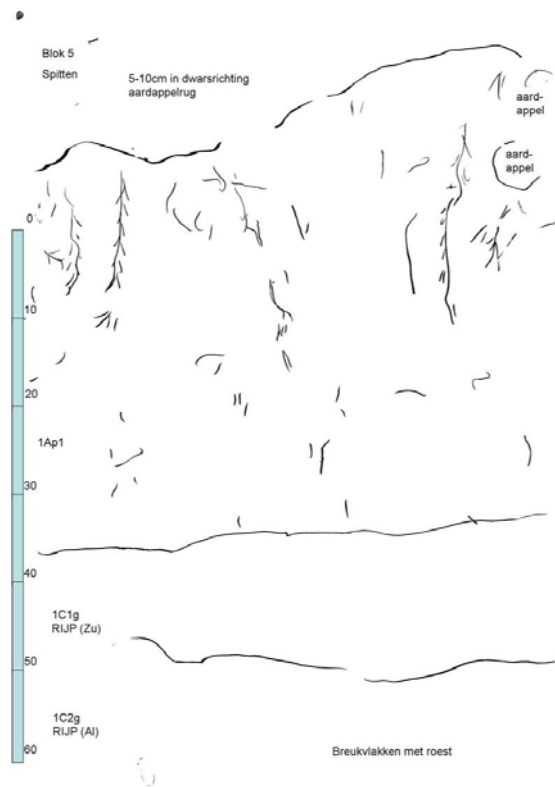
Figuur 8b. Beworteling in blok 2 (combiplow) van het aardappelproefveld.



Figuur 8c. Beworteling in blok 3 (woelen) van het aardappelproefveld.



Figuur 8d. Beworteling in blok 4 (onbehandeld 2) van het aardappelproefveld



Figuur 8e. Beworteling in blok 5 (spitten) van het aardappelproefveld

Tabel 6. Profielbeschrijvingen: Bodemgebruik akkerland, gewas aardappelen.

Alle profielen hebben een grondwatertrap VI met een Gemiddeld Hoogste Grondwaterstand (GHG) van 70 cm en een Gemiddeld Laagste Grondwaterstand (GLG) van 130 cm. De bewortelbare diepte is geschat op 1 m.

blok1 onbehandeld 1

Opmerkingen beworteling tot max. 45 cm;
dwars op profiel (in richting aardappelrij) veel variatie in dikte bovengrond (Ap) oorzaak :
diepe grondbewerking?

Laag no	Horizont code	Laag (cm)	Org. stof (%)	Lutum (%)	Wortels aantal/dm ²	Opmerkingen
1	1Ap1	0-10	2.5	19	6,11,7	los (spoordiepte aardappelruggen_ afgerond blokkig
1	1Ap1	10-27	2.5	19	3,5,3	vast; veel org. gewasresten; weinig kruimelig scherp afgerond (>70%); grote kluiten bonkig; met beworteling op de breukvlakken (glanzend)
2	1Ap2/C	27-30	2	19	3,5,3	vast; blauw (ploegzool); massieve structuur (scherp=100%)
3	1Ap3/Cg	30-45	1	16	0,0,3	heterogeen; gemengd A/C 1:1
4	1Cg2	45-55		4		zandige schelprijke laag; losgepakt; geen structuurelementen
5	1Cg3	55-65		12		breukvlakken roestig; roestige vert. wortelgangen

blok2 combiplow

Opmerkingen beworteling tot max. 60 cm

werking combiplot niet zichtbaar in profiel

Laag no	Horizont code	Laag (cm)	Org. stof (%)	Lutum (%)	Wortels aantal/dm ²	Opmerkingen
1	1Ap1	0-10	2.5	19	15,13,10	los, kruimelig; aardappelrug
1	1Ap1	10-27	2.5	19	6,4,5	vast; veel org. gewasresten; weinig kruimelig scherp afgerond (>70%); grote kluiten bonkig; met beworteling op de breukvlakken (glanzend)
2	1Ap2/C	27-30	2	19	3,3,2	vast; blauw (ploegzool); massieve structuur (scherp=100%)
3	1Ap3/Cg	30-45	1	16	3,1,2	heterogeen; gemengd A/C 1:1
4	1Cg2	45-55		4	0,2,0	zandige schelprijke laag; losgepakt; geen structuurelementen
5	1Cg3	55-65		12	3,2,0	breukvlakken roestig; roestige vert. wortelgangen

blok3 woelen

Opmerkingen beworteling tot max. 60 cm
werking woelen niet zichtbaar in profiel

Laag no	Horizont code	Laag (cm)	Org. stof (%)	Lutum (%)	Wortels aantal/dm ²	Opmerkingen
1	1Ap1	0-10	2.5	19	12,13,18	los, kruimelig; afgeronde structuur, aardappelrug
1	1Ap2	10-25	2.5	19	9,15,13	de breukvlakken langs scheuren zijn glad en glanzend door waterverzadiging/doorstroming; 70% grote kluiten/30% verkruimeld
2	1Ap3	25-30		19	1,5,5	vast; geen tot weinig wortels
3	1C1g	30-40		4	4,1,2	schelpen; lokaal afwezige laag (verwerkt?)
4	1Cg2	40-60		16	0,1,4	soms fraaie breukvlakken, vanaf 50cm met verticale fossiele wortelgangen (roestig)

blok4 onbehandeld 2

Opmerkingen beworteling tot max. 48 cm

Laag no	Horizont code	Laag (cm)	Org. stof (%)	Lutum (%)	Wortels aantal/dm ²	Opmerkingen
1	1Ap1	0-10	2.5	19	21,19,15	veel wortels tot 10 cm
1	1Ap2	10-26	2.5	19	8,6,16	veel stroresten op 17-22 cm
2	1Ap3	26-33		19	3,5,2	weinig beworteling; dooie structuur; vast; blauwkleuring
3	1C1g	33-48		4	1,0,0	zandig, schelpen
4	1Cg2	48-60		16	0, 0,0	

blok5 spitten

Opmerkingen beworteling tot max. 38 cm

Laag no	Horizont code	Laag (cm)	Org. stof (%)	Lutum (%)	Wortels aantal/dm ²	Opmerkingen
1	1Ap1	0-10	2.5	19	12,9,9	los, veel wortels, aardappelrug
1	1Ap2	10-20	2.5	19	8,8,6	veel wortels, poreus
2	1Ap3	20-38	2	19	7,6,3	massief; bijna geen wortels
3	1C1g	38-55		4	0,0,0	zandig, schelpen
4	1Cg2	55-70		16		gelaagd

4. Discussie en conclusies

De dichtheden van de ploegzool lijken door de diepe grondbewerking iets lager te zijn geworden. Dit is echter nihil en de dichtheden zijn nog steeds hoog. Belangrijker is dat het luchtgehalte bij vochtspanningen van 50 en 100 cm waterkolom in alle gevallen onder de 10% blijft. In natte omstandigheden, zoals in 2007 veelvuldig zijn opgetreden zijn grote problemen met de luchtvoorziening van wortels te verwachten. De verzadigde waterdoorlatendheid was in bijna alle gevallen slecht ($< 10 \text{ cm.d}^{-1}$), waardoor de grond lang nat blijft en de omstandigheden voor berijding, grondbewerking en oogsten lang slecht blijven. Alleen bij de de combi-plow bleek bij twee van de drie monsters de doorlatendheid voldoende te zijn. Bij één van de drie monsters bij de behandeling “spitten” was de doorlatendheid groot.

Het veldexperiment is nog niet afgelopen, maar de voorlopige conclusie kan alleen maar zijn dat het effect van de diepe grondbewerking erg weinig is en niet of nauwelijks een verbetering van de bodemkwaliteit teweegbrengt.

Bij deze voorlopige conclusie moet ook worden bedacht dat in 2007 de bodemfysische bepalingen alleen zijn gedaan op de blokken met aardappelen. Dit is een ondiep wortelend gewas, dat bovendien op ruggen wordt geteeld. Daarnaast zijn aardappelen gevoelig voor wateroverlast, zodat in een nat jaar als 2007 geen goede beworteling in de ondergrond en specifiek de al of niet losgemaakte ploegzool is te verwachten. Een goede beworteling is essentieel om de bodemkwaliteit te verbeteren. Wat dat betreft is van de blokken met luzerne en in mindere mate van de blokken met tarwe veel eerder een verbetering van de fysische bodemkwaliteit te verwachten.

Aanbevolen wordt om in 2008 opnieuw de fysische bodemkwaliteit te gaan meten en deze metingen ook uit te voeren bij de blokken met luzerne en zo mogelijk bij die met tarwe. Daarmee wordt informatie verkregen over de mogelijkheden van verbetering van de bodemkwaliteit door de combinatie van losmaken en beworteling en door de verbetering door alléén beworteling bij de onbehandelde blokken.