



ALTERRA

WAGENINGEN UR



Basismateriaal voor eventuele prioritaire gebieden

Quick Scan voor Drenthe

Alterra-rapport 1964
ISSN 1566-7197

G. Bakker, M.J.D. Hack-ten Broeke, F. de Vries en J.J.H. van den Akker

Basismateriaal voor eventuele
prioritaire gebieden

Dit onderzoek is uitgevoerd in opdracht van de provincie Drenthe

Basismateriaal voor eventuele prioritaire gebieden

Quick Scan voor Drenthe

G. Bakker, M.J.D. Hack-ten Broeke, F. de Vries en J.J.H. van den Akker

Alterra-rapport 1964

Alterra Wageningen UR
Wageningen, 2010

Referaat

Bakker, G., M.J.D. Hack-ten Broeke, F. de Vries en J.H.H. van den Akker, 2010. *Basismateriaal voor eventuele prioritaire gebieden - Quick Scan voor Drenthe*. Wageningen, Alterra, rapport 1964, 88 blz., 25 fig., 16 tab., 25 ref.

In vervolg op een studie die op nationale schaal inzicht gaf in het mogelijke voorkomen van bodembedreigingen waarvoor in het kader van de Kaderrichtlijn Bodem prioritaire gebieden aangewezen moeten worden, is in dit rapport de aandacht gericht op de provincie Drenthe. Zowel in Nederland als in Drenthe zijn drie bodembedreigingen het meest relevant, namelijk winderosie, afname van de hoeveelheid organische stof in de (voormalige) veengebieden en verdichting. Er is onder andere een combinatiekaart gepresenteerd waar onder meer op te zien is waar meer of minder bodembedreigingen optreden. Vooral het oosten en noordoosten van Drenthe bevat delen met meer dan één bodembedreiging per gebiedsdeel.

Naar aanleiding van de verontrustende resultaten uit het landelijk onderzoek naar bodemverdichting is in dit rapport getracht inzicht te verschaffen in de data die aan de conclusies van dat rapport ten grondslag liggen en deze waar mogelijk voor Drenthe uit te breiden. De resultaten van het landelijk onderzoek zijn veelal gebaseerd op afgeleide gegevens uit textuuranalyses van soortgelijke gronden elders in Nederland. Werkelijke dichtheidsmetingen blijken op de onderzochte bodemlaag (30-80 cm min maaiveld) nauwelijks beschikbaar.

Het voorkómen van ondergrondverdichting blijkt in de literatuurstudie naar mogelijke maatregelen sterk te prevaleren boven herstel. Er ligt een grote uitdaging voor ontwerpers van machines, voor loonwerkers, overheden en de boeren zelf om geschikt materieel te ontwerpen en te gebruiken en om bewustwording van en interesse in de problematiek te creëren.

Om de werkelijke ernst van de ondergrondverdichting te kunnen inzien zijn gerichte meetcampagnes nodig.

Trefwoorden: prioritaire gebieden, Europese bodemstrategie, Kaderrichtlijn Bodem, bodembedreigingen, risicogebieden, verdichting, ondergrond verdichting, bodemgebruik, bodemstructuur.

ISSN 1566-7197

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

© 2010 Alterra Wageningen UR, Postbus 47; 6700 AA Wageningen; Nederland
Telefoon 0317 48 07 00; fax 0317 41 90 00; e-mail info.alterra@wur.nl

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

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

Alterra-rapport 1964

Wageningen, juni 2010

Inhoud

Woord vooraf	7
Samenvatting	9
1 Inleiding	11
1.1 Achtergrond	11
1.1.1 Kaderrichtlijn Bodem	11
1.1.2 Ecosysteemdiensten	12
1.2 Projectdoelstelling	12
1.3 Opbouw van het rapport	12
2 Regionale gegevens voor aanwijzen prioritaire gebieden	13
2.1 Erosie	13
2.1.1 Watererosie	14
2.1.2 Winderosie	16
2.2 Organische stof	18
2.3 Verdichting	21
2.4 Combinatiekaart bodembedreigingen	22
3 Gegevens voor verdichting	23
3.1 Gebruikte gegevens in landelijk onderzoek	23
3.2 Aanvullend beschikbare regionale gegevens voor Drenthe	25
3.3 Indicatoren voor bodemverdichting (ENVASSO)	26
3.3.1 CP01: Dichtheid	27
3.3.2 CP02: Luchtgevuld poriënvolume	29
3.3.3 CP06: Gevoeligheid en kwetsbaarheid voor verdichting	31
3.4 Gewenste aanvullende gegevens	32
3.4.1 Nulsituatie	32
3.4.2 Dichtheidsveranderingen	33
4 Risico per teelt	35
4.1 Gemeten dichtheden en landgebruik	35
4.2 Verwachte verdichting en landgebruik	37
4.3 Veenkoloniaal bouwplan	40
5 Maatregelen	47
5.1 Ontstaan van verdichting	47
5.2 Voorkoming en herstel van verdichting	48
5.3 Huidige landbouwpraktijk	61
5.4 Kosten van maatregelen	61
6 Conclusies en aanbevelingen	65

Literatuur		67
Bijlage 1	Gebruikte meetgegevens landelijk onderzoek	69
Bijlage 2	Aanvullende meetpunten met bulkdichtheden	71
Bijlage 3	Indicatoren bodemverdichting (ENVASSO)	73
Bijlage 4	Boorpunten in veengebieden t.b.v. nulmeting	77
Bijlage 5	Overzicht landgebruik	79
Bijlage 6	Overzicht dichtheden en overschrijdingspercentages	81
Bijlage 7	Textuur en PD versus gevoeligheid voor verdichting	83

Woord vooraf

Deze rapportage is het resultaat van het project 'Basismateriaal voor eventuele prioritaire gebieden; Quick Scan voor Drenthe' dat beschouwd kan worden als een vervolg op het 'basismateriaal' project dat is uitgevoerd in opdracht van het ministerie van LNV als onderdeel van het cluster Vitaal Landelijk Gebied, thema Bodem.

Dit rapport bevat verschillende figuren en kaarten die veelal door onszelf, maar in een aantal gevallen ook door andere collega's bij het Centrum Bodem van Alterra zijn gemaakt. Onze dank gaat daarvoor uit naar Fokke Brouwer.

Samenvatting

Eventuele prioritaire gebieden

In vervolg op een studie die op nationale schaal inzicht gaf in het mogelijke voorkomen van bodembedreigingen waarvoor in het kader van de concept Kaderrichtlijn Bodem prioritaire gebieden aangewezen moeten worden, is in dit rapport de aandacht gericht op de provincie Drenthe. Zowel in Nederland als in Drenthe zijn drie bodembedreigingen het meest relevant, namelijk erosie, afname van de hoeveelheid organische stof en verdichting. Bij erosie gaat het in de provincie Drenthe vooral over winderosie. Afname van organische stofhoeveelheden speelt vooral in de (voormalige) veengebieden.

Om een algemene indruk te geven waar in Drenthe voornamelijk de aanwijzing van prioritaire gebieden aan de orde kan zijn hebben we een combinatiekaart gemaakt waar onder meer op te zien is waar bodembedreigingen elkaar overlappen. Op de kaart is af te lezen in welke delen van Drenthe geen bodembedreigingen aan de orde zijn, waar één bedreiging speelt of waar twee of zelfs meer bodembedreigingen in overweging genomen zouden moeten worden als de Kaderrichtlijn Bodem van kracht wordt, gegeven de huidige kennis en beschikbaarheid van data.

Verdichting

Naar aanleiding van de verontrustende resultaten uit het landelijk onderzoek naar bodemverdichting is in dit rapport getracht inzicht te verschaffen in de data die aan de conclusies van dat rapport ten grondslag liggen en deze waar mogelijk uit te breiden. De resultaten van het landelijk onderzoek zijn veelal gebaseerd op afgeleide gegevens uit textuuranalyses van soortgelijke gronden elders in Nederland. Werkelijke dichtheidsmetingen blijken op de onderzochte bodemlaag (30-80 cm min maaiveld) nauwelijks beschikbaar: niet in ruimte, maar ook niet in de tijd. Dit maakt de voorspellingen onzeker.

In dit rapport is daarom getracht de hoeveelheid concrete metingen uit te breiden op basis van separate onderzoeken in het verleden en op basis van het 'verschuiven' van ondergronden naar de bovengrond door oxidatie van moerige lagen in de bovengrond. Het aantal geschikte metingen is desondanks nog steeds erg laag.

In dit rapport is daarom relatief veel aandacht geschonken aan de wijze waarop aanvullende geschikte metingen zouden moeten worden uitgevoerd en welke prioritering daarbij het beste kan worden gehanteerd.

Verder is veel aandacht besteed aan de literatuurstudie waarin het bestrijden, maar vooral ook aan het voorkomen van ondergrondverdichting is onderzocht. Herstellende maatregelen resulteren namelijk meestal niet in de effecten die ervan worden verwacht. Voorkomen is in het geval van ondergrondverdichting sterk te prevaleren boven herstel. Er ligt een grote uitdaging voor ontwerpers van machines, voor loonwerkers, overheden en de boeren zelf om geschikt materieel te ontwerpen en te gebruiken en om bewustwording van de problematiek te creëren.

Om de werkelijke ernst van de ondergrondverdichting te kunnen inzien zijn gerichte meetcampagnes nodig.

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

1.1.1 Kaderrichtlijn Bodem

Eén van de vier pijlers van de Europese Bodemstrategie is kaderwetgeving. In deze kaderwetgeving heeft de Europese Commissie in september 2006 een voorstel gedaan voor een richtlijn tot vaststelling van een kader voor de bescherming van de bodem (Kaderrichtlijn Bodem).

De kaderrichtlijn spreekt van een aantal bodembedreigingen en op termijn van de aanwijzing van risico-gebieden of prioritaire gebieden voor een aantal van die bedreigingen en het nemen van maatregelen in die gebieden. Voor het aanwijzen van prioritaire gebieden gaat het over:

1. erosie
2. afname organische stof
3. verdichting
4. verzilting
5. aardverschuivingen
6. en waarschijnlijk wordt verzuring toegevoegd

In de recente conceptteksten is bovendien toegevoegd dat bij het aanwijzen van prioritaire gebieden niet alleen rekening moet worden gehouden met woestijnvorming en klimaat, maar ook met bodembiodiversiteit. Wat is het probleem en wat zijn de gevolgen (van het voortbestaan) ervan?

In een verwant onderzoek 'Basismateriaal voor eventuele prioritaire gebieden' (Hack-ten Broeke et al., 2009) dat bij Alterra is uitgevoerd, is zoveel mogelijk basismateriaal voor nader aan te wijzen prioritaire gebieden in Nederland bijeen gebracht. Het gaat in dat rapport nadrukkelijk niet om aanwijzing van prioritaire gebieden, maar om het aandragen van informatie en wellicht een verkenning over welke gebieden het zou kunnen gaan. Het kaartmateriaal bestaat in ieder geval uit beschikbare kaarten per bodembedreiging, maar er zijn ook nieuwe kaarten gegenereerd, bijvoorbeeld een combinatie van erosiegevoeligheid en landgebruik. En bijvoorbeeld voor verdichting worden verschillende verkenningen gepresenteerd op basis van beschikbare suggesties voor criteria en normen. Een belangrijke conclusie is dat voor Nederland erosie, afname van organische stof en verdichting de belangrijkste bodembedreigingen zijn waarvoor sprake is van aanwijzing van prioritaire gebieden.

Het onderzoek komt eveneens tot een overzicht van de hiaten in de gegevens in relatie tot de gegevensbehoefte. Het onderzoek maakt gebruik van verschillende bronnen op vooral de Europese en nationale schaal en betreft veelal datasets van tenminste enkele tientallen jaren oud.

Drenthe heeft een relatief groot areaal veengrond dat in de loop der jaren aanzienlijk is geslonken. Verder blijkt uit het landelijke onderzoek dat vooral verdichting in Drenthe een grote potentiële bodembedreiging vormt. De metingen hiervoor zijn geconcentreerd in een korte periode, waardoor een goede uitspraak over risico's moeilijk te maken is.

De provincie wil graag via een quickscan het landelijke onderzoek uitbreiden met regionale data toegespitst op de bodembedreigingen binnen Drenthe. Daarnaast is er vanuit de provincie behoefte om meer inzicht te krijgen

in wat de verdichtingproblematiek gaat betekenen voor het eventueel uit te voeren maatregelenpakket en welke consequenties dat heeft voor de landbouw in relatie tot het milieu.

1.1.2 Ecosysteemdiensten

In de ontwerp tekst voor de Kaderrichtlijn Bodem wordt eerst ingegaan op de functies van de bodem voordat gesproken wordt over de bodembedreigingen. Over die functies van de bodem wordt steeds vaker gesproken in de context van ecosysteemdiensten, om te beginnen in het kader van het Millennium Ecosystem Assessment uit 2005. De relatie tussen ecosysteemdiensten en erosie, afname van organische stof en verdichting is nog nergens expliciet vastgesteld, maar in verschillende rapporten (o.a. Faber et al., 2009; Rutgers et al., 2009) wordt wel ingegaan op bijvoorbeeld de relatie tussen ecosysteemdiensten en organische stof. Bij ecosysteemdiensten wordt onderscheid gemaakt in a) producerende diensten, zoals voedsel of drinkwater, b) regulerende diensten, zoals ziektevermindering of waterzuivering, c) culturele diensten, zoals recreatie of aardkundige waarden en d) ondersteunende diensten, zoals bodemvorming en nutriëntenhuishouding. In algemene zin geldt dat organische stof een positief effect heeft op nagenoeg alle ecosysteemdiensten. Faber et al. (2009) geven zelfs aan dat organische stof van cruciale betekenis is voor alle ecosysteemdiensten. Erosie en verdichting doen afbreuk aan de ecosysteemdiensten. Rutgers e.a (2009) hebben geprobeerd om op basis van expert-kennis een inschatting te maken van de gevoeligheid van enkele ecosysteemdiensten voor afname van organische stof of verdichting. De meest gevoelige ecosysteemdienst blijkt bodemstructuur te zijn. Deze is gevoelig voor afname van organische stof én verdichting. Afname van de hoeveelheid organische stof zal volgens de experts daarnaast vooral effect hebben op organischestofhuishouding, waterhuishouding en klimaatregulatie. Ook verdichting wordt geacht een groot effect te hebben op de waterhuishouding (Rutgers et al., 2009).

1.2 Projectdoelstelling

Het project heeft ten doel het landelijk onderzoek (Hack-ten Broeke et al., 2009) uit te breiden met recentere regionale gegevens toegespitst op de provincie Drenthe, waardoor de betrouwbaarheid van de verwachtingen ten aanzien van de potentiële bodembedreigingen worden vergroot. Verder heeft het tot doel om inzicht te krijgen in de werkelijke risico's en mogelijke maatregelen. Niet elke teelt loopt namelijk een gelijk verdichtingsrisico. In het lopende onderzoek zijn de verdichtingsbedreigingen gekoppeld aan de grondsoort, maar nog niet aan de teeltsoort.

1.3 Opbouw van het rapport

Het rapport bestaat feitelijk uit drie delen:

Deel 1 bestaat uit een overzicht van de aanvullende regionale gegevens met bijbehorende kaarten voor de bodembedreigingen water- en winderosie en afname van organische stof in de bodem. Deze gegevens zijn weergegeven in hoofdstuk 2.

Deel 2 richt zich op de bodembedreiging 'verdichting van de ondergrond'. Hoofdstuk 3 geeft daarbij een overzicht van de gegevens die ten grondslag liggen aan de bodembedreiging 'verdichting van de ondergrond'. Hoofdstuk 4 tracht deze gegevens te koppelen om te komen tot een risico per teelt. Hoofdstuk 5 geeft vervolgens door middel van een korte literatuurstudie inzicht in de mogelijke maatregelen die verdichting van de ondergrond kunnen voorkomen dan wel herstellen en wat daarvan de financiële consequenties van enkele van deze maatregelen kunnen zijn.

Deel 3 geeft tenslotte conclusies en aanbevelingen (hoofdstuk 6).

2 Regionale gegevens voor aanwijzen prioritaire gebieden

Zoals is geconcludeerd voor het project 'basismateriaal voor eventuele prioritaire gebieden' op nationale schaal (Hack-ten Broeke et al., 2009), zijn voor Nederland alleen de bodembedreigingen erosie, afname van de hoeveelheid organische stof en verdichting relevant. Verzilting en aardverschuivingen komen volgens de gehanteerde definities in de ontwerptekst voor de Kaderrichtlijn Bodem niet voor in ons land. Voor verzuring is aangegeven dat het alleen als probleem of risico moet worden gezien voor productiegronden, dus gronden in gebruik voor landbouw en bosbouw. In Nederland is verzuring vooral een probleem in natuurgebieden. Daarom is ook verzuring in die zin als bodembedreiging voor Nederland buiten beschouwing gebleven.

Dit hoofdstuk geeft zodoende een overzicht van het mogelijke voorkomen van de bodembedreigingen erosie en afname van organische stof voor Nederland en voor Drenthe op basis van de beschikbare meest recente regionale gegevens van de provincie. Met deze gegevens, die een aanvulling vormen op de landelijke en Europese gegevens, zijn deels nieuwe regionale kaarten gemaakt van de mogelijke bodembedreigingen zoals bedoeld in de Kaderrichtlijn Bodem. Door de aanvullende regionale gegevens wordt de betrouwbaarheid van de verwachtingen ten aanzien van de potentiële bodembedreigingen vergroot ten opzichte van de kaarten die op landelijk schaalniveau zijn vervaardigd (Hack-ten Broeke et al., 2009). In het hierop volgende hoofdstuk 3 gaat het over verdichting.

2.1 Erosie

De ontwerptekst voor de Kaderrichtlijn Bodem spreekt over erosie door water en wind. Daarbij wordt bodemverlies door erosie gekenmerkt als een natuurlijk proces dat echter door menselijk handelen behoorlijk kan worden versneld. Erosie wordt gezien als een probleem voor heel Europa, maar vooral voor de Mediterrane landen. Daarnaast is er sprake van erosie onder invloed van smeltend ijs (voornamelijk in Scandinavië en de Alpen) en van winderosie in Centraal- en West-Europa.

Watererosie kan resulteren in verlies van vruchtbare bovengrond en heeft daarmee direct invloed op de productiefunctie van de bodem. In het ergste geval is er sprake van onomkeerbaar verlies van landbouwgrond. Dit kan gepaard gaan met erosiekanalen en 'gullies'. Ook het door erosie weggespoelde bodemmateriaal veroorzaakt problemen als het heuvelafwaarts de waterafvoer (drainage, sloten of kanalen) of soms zelfs wegen blokkeert.

2.1.1 Watererosie

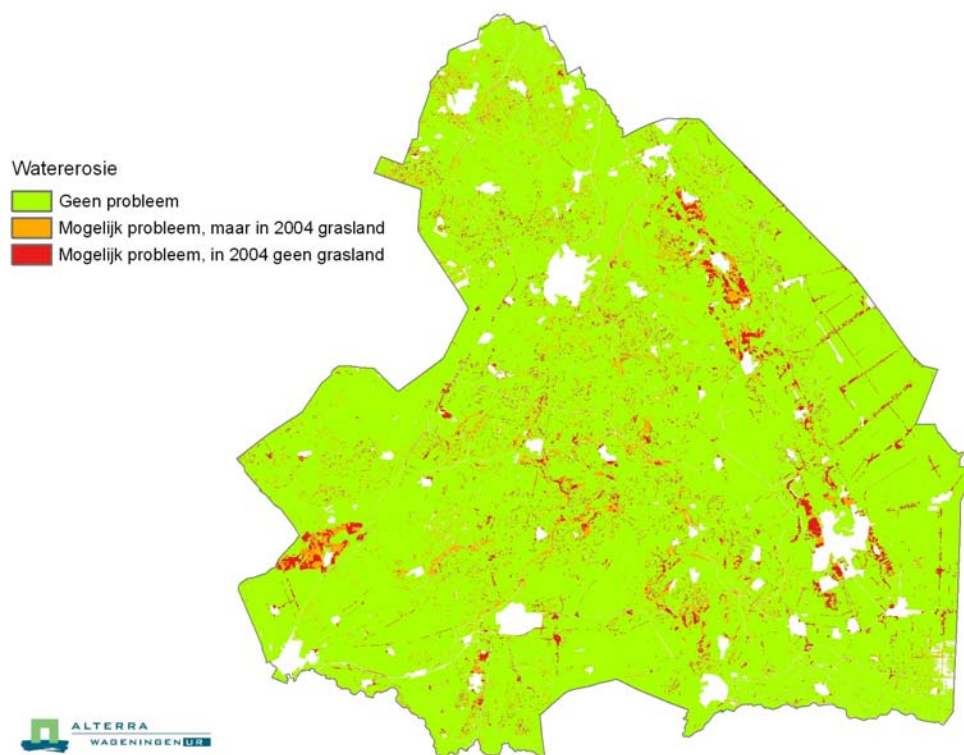


Figuur 2.1

Verspreiding van hellingen in Nederland volgens de hoogtekaart AHN, gecombineerd met bodemgebruik.

In Nederland liggen alleen in Zuid-Limburg en op de heuvels rond Groesbeek landbouwgronden op zodanig grote hellingen dat er sprake kan zijn van erosie onder invloed van water. Weliswaar zijn alle gronden met hellingen van meer dan 2% in principe gevoelig voor erosie, maar veel van deze gronden liggen in natuurgebieden (bijvoorbeeld duinen, stuwwallen). Voor natuurgebieden is erosie niet een bedreiging, maar juist een natuurlijk proces dat geen probleem vormt of soms zelfs wenselijk is (bijvoorbeeld in stuifzandgebieden). Als erosie door de mens wordt veroorzaakt kan er wel sprake zijn van een bodembedreiging of -degradatie. De kaart in figuur 2.1 toont daarom een combinatie van het bodemgebruik in Nederland en de verspreiding van hellende gebieden. De gegevens over het bodemgebruik zijn afkomstig van de landgebruikskaart LGN5. De informatie over het reliëf is afgeleid uit het hoogtebestand AHN. Het meest gevoelig voor watererosie zijn de akkerbouwgebieden.

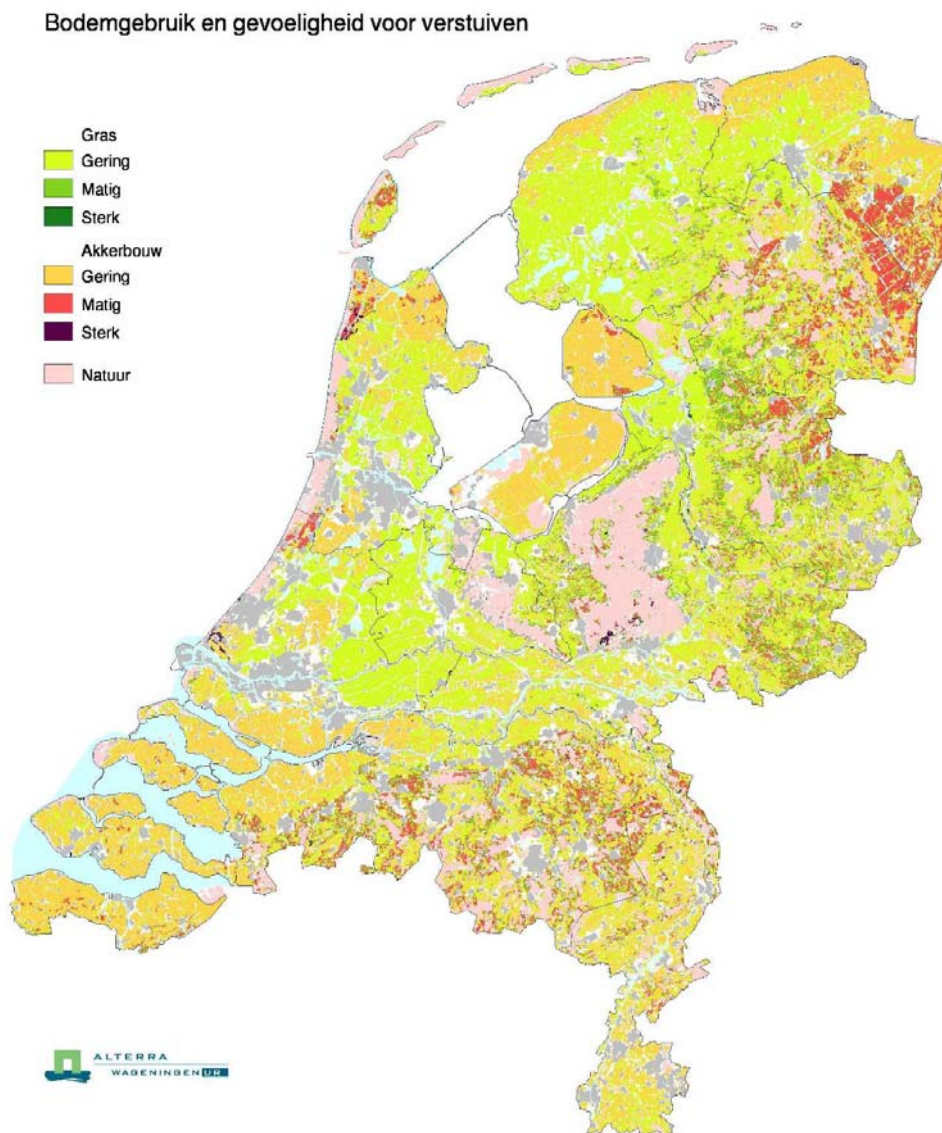
De Vries en Brouwer (2007) hebben al eens voor Drenthe een kaart gemaakt van het gevaar voor watererosie. Ook hierbij is gelet op landgebruik (zie figuur 2.2). Voor het samenstellen van figuur 2.2 is onder meer gebruik gemaakt van het AHN (Algemeen Hoogtebestand Nederland), de geomorfologische kaart van Nederland, het grondgebruiksbestand LGN5 en bodemgegevens, o.a. verzameld in 2006. De kwetsbare gebieden liggen vooral langs de hoge terreindelen van de Hondsrug en de Havelterberg.



Figuur 2.2

Gevaar voor watererosie, gecombineerd met al dan niet graslandgebruik volgens LGN5.

Sinds het verschijnen van het rapport van De Vries en Brouwer (2007) zijn aanvullende gegevens in de provincie verzameld. De veranderingen in bodemgesteldheid hebben geen effect op de gevoeligheid voor watererosie, omdat het reliëf de belangrijkste factor is bij watererosie is. Zodoende is er ook geen nieuwe kaart gemaakt.



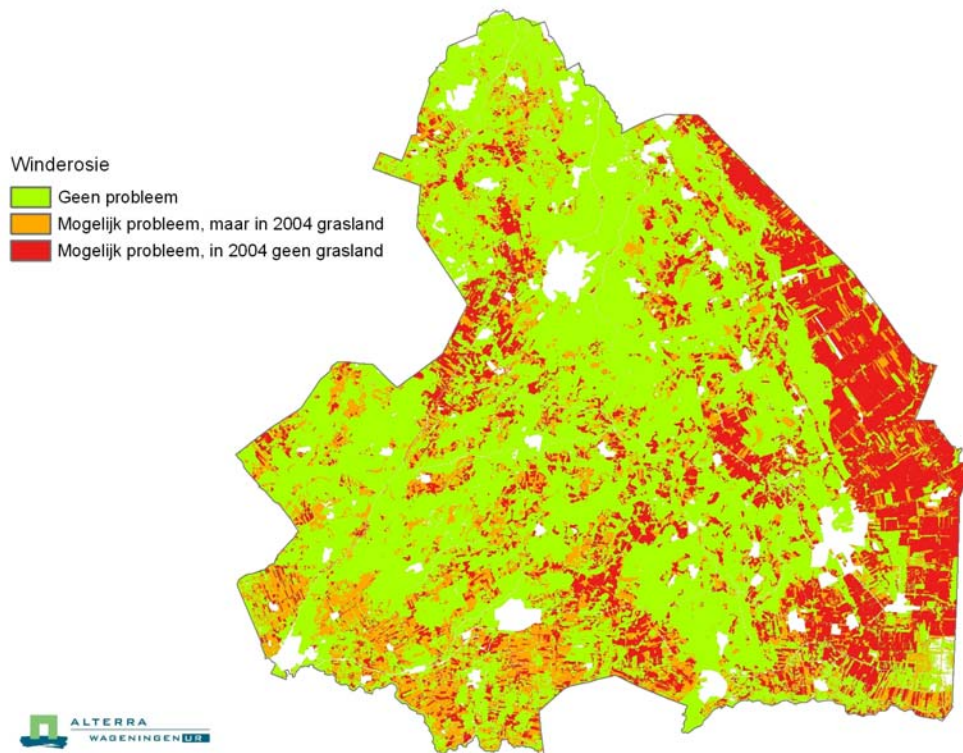
Figuur 2.3

Stuifgevoeligheid, bepaald op basis van de bodemkaart schaal 1:50.000, gecombineerd met bodemgebruik.

2.1.2 Winderosie

Stuifgevoeligheid geeft aan in hoeverre er een risico is voor winderosie. De gevoeligheid voor verstuiven kan worden bepaald volgens de methode die onderdeel uitmaakt van de bodemgeschiktheidsbeoordeling voor landbouwkundig gebruik (Ten Cate et al., 1995), mede gebaseerd op informatie van de Bodemkaart van Nederland, schaal 1 : 50 000. Deze methode baseert de gevoeligheid voor verstuiven op het lutum- en leemgehalte in de bouwvoor. Gronden met minder dan 3% lutum en minder dan 10% leem zijn gevoelig voor verstuiven. De gevoeligheid neemt af bij toenemend lutum- en leemgehalte. Figuur 2.3 combineert voor heel Nederland de informatie over stuifgevoeligheid met het bodemgebruik. De gegevens over het bodemgebruik zijn afkomstig van de landgebruikskaat LGN5. In Nederland zijn vooral de veenkoloniën in Groningen en Drenthe alsook de zandgebieden in het oostelijk deel van Noord-Brabant en Noord-Limburg gevoelig voor winderosie. Wat kleinere gebieden betreffen de bloembollengronden achter de duinen. Verstuiving treedt op bij een kale bodem. Zodoende speelt dit probleem geen rol bij grasland.

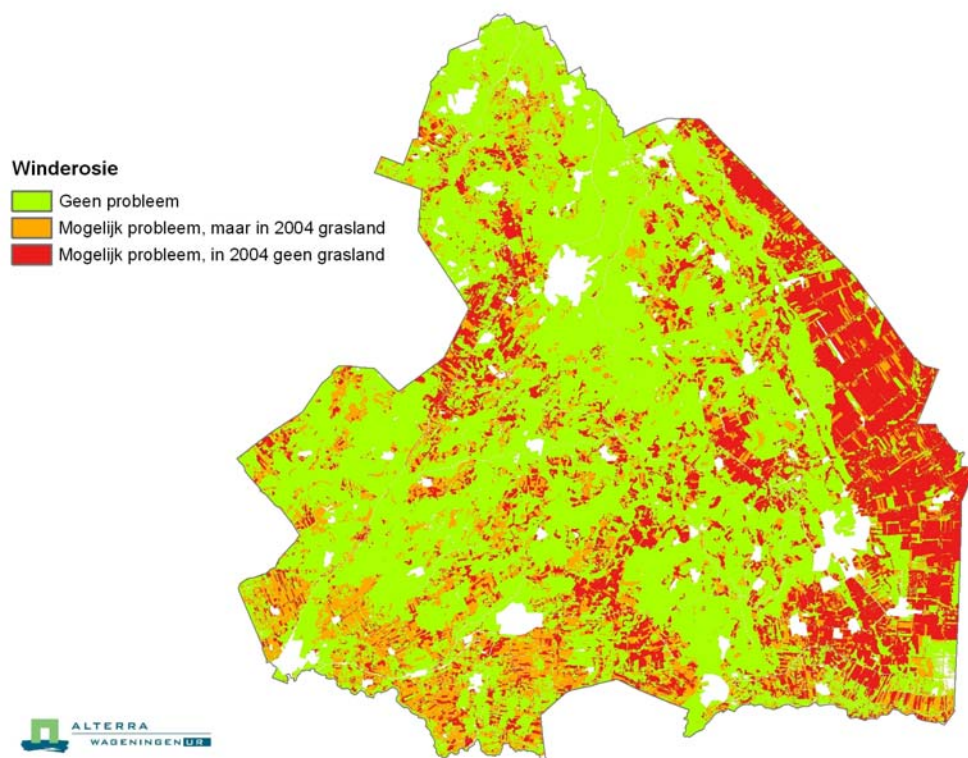
Evenals voor watererosie is er ook voor gevoeligheid voor winderosie in 2007 een kaart gemaakt voor de provincie (De Vries en Brouwer, 2007), gebaseerd op beschikbare gegevens voor de provincie tot en met 2006 (figuur 2.4).



Figuur 2.4

Gevoeligheid voor winderosie in Drenthe.

Sinds het verschijnen van het rapport van De Vries en Brouwer (2007) zijn gedeelten van de bodemkaart geactualiseerd (zie figuur 2.8). Deze gegevens zijn gebruikt voor de kaart in figuur 2.5. De verschillen tussen de kaarten uit figuren 2.4 en 2.5 zijn bijzonder klein, omdat deze alleen betrekking hebben op de gebieden die in figuur 2.8 donkergroen zijn gemarkeerd. Er is vooralsnog geen gebruik gemaakt van LGN6 omdat dit extra kosten met zich meebrengt.



Figuur 2.5

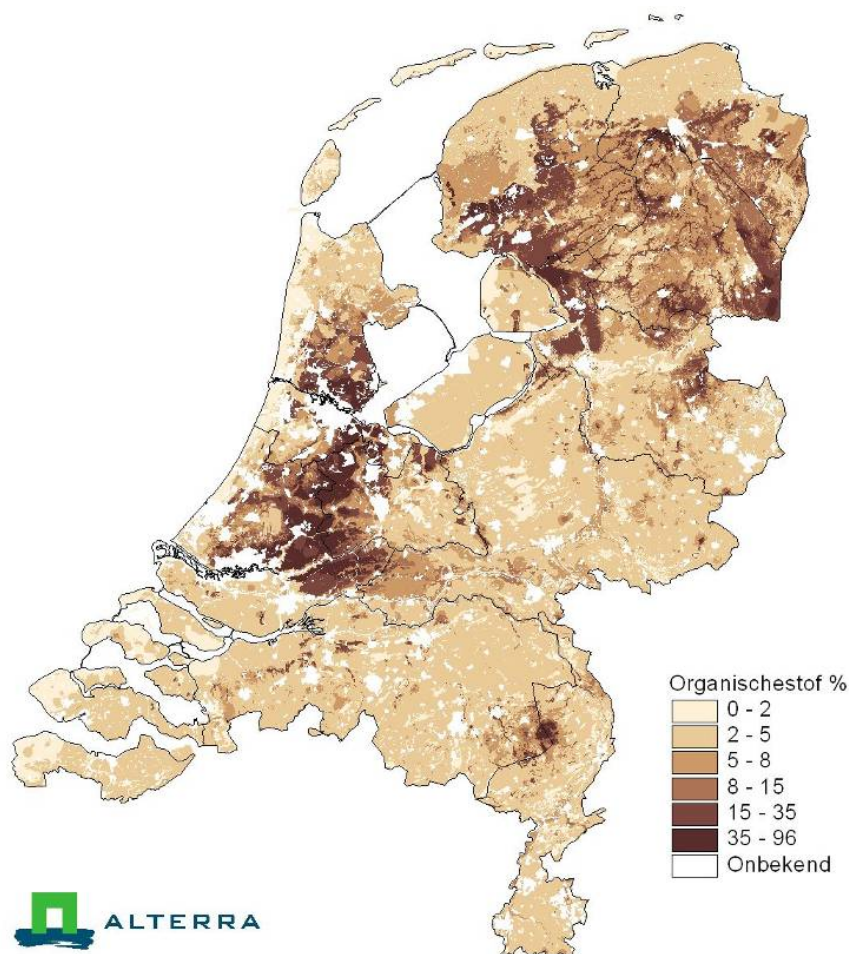
Gevoeligheid voor winderosie in Drenthe, gebaseerd op bodemkundige gegevens t/m 2009.

2.2 Organische stof

De bodembedreiging met betrekking tot organische stof wordt in het voorstel van de Europese Commissie (2006) gedefinieerd als verlies van organische stof veroorzaakt door een gestage afname van de hoeveelheid organische stof in de bodem. Daarvoor is informatie nodig over de hoeveelheid organische stof in de bodem, maar vooral ook over de veranderingen daarin.

De kaart in figuur 2.6 is in 2007 voor Nederland gemaakt in het kader van het BO-project Europese Bodemstrategie, als hulpmiddel bij de discussie of er in Nederland sprake is van afname van de hoeveelheid organische stof en of dat als risicovol moet worden bestempeld (Smit et al., 2007). De kaart is gemaakt op basis van de volgende data:

- Metingen van het organischestofgehalte (OS) voor bodemprofielen in de periode van 1980 tot heden op 3000 locaties uit het Bodemkundig Informatiesysteem (BIS).
- Metingen van C-totaal van de bovengrond uit het project 'Sturen op Nitraat' op 300 locaties.



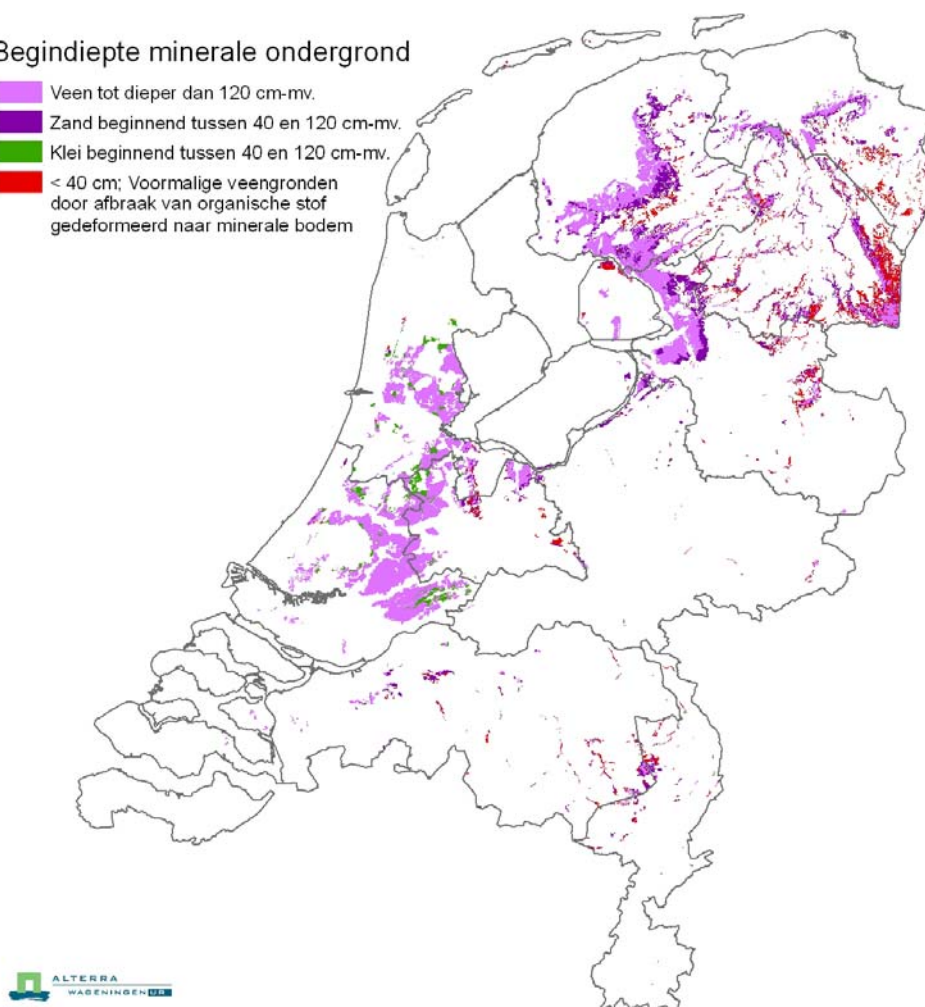
Figuur 2.6

Organischestofgehalte in de bovengrond (0-30cm) volgens gegevens uit BIS.

De kaart in figuur 2.6 is echter gebaseerd op verouderde gegevens. Bij veengronden en moerige gronden komen oppervlakkige veenlagen voor. Door toetreding van lucht oxideert het organische materiaal, waardoor deze lagen steeds dunner worden. Er is sprake van een sluipend proces van veenafbraak dat voornamelijk een gevolg is van ontwatering en grondgebruik. Doordat de veenlaag dunner wordt of verdwijnt, kunnen veengronden veranderen in moerige gronden en moerige gronden in minerale gronden. Dit speelt vooral bij de veengronden in Oost-Nederland, omdat de veenlagen daar relatief dun zijn. In 2004 is de zogenaamde 'veen-kartering' afgerond, een onderzoek naar de ligging van de huidige veengronden in Oost-Nederland (figuur 2.7). Uit dat onderzoek blijkt dat sinds de opname van de Bodemkaart van Nederland, schaal 1 : 50 000, in 1980-1985 het areaal veengronden met ca. 47% is verminderd.

Begindiepte minerale ondergrond

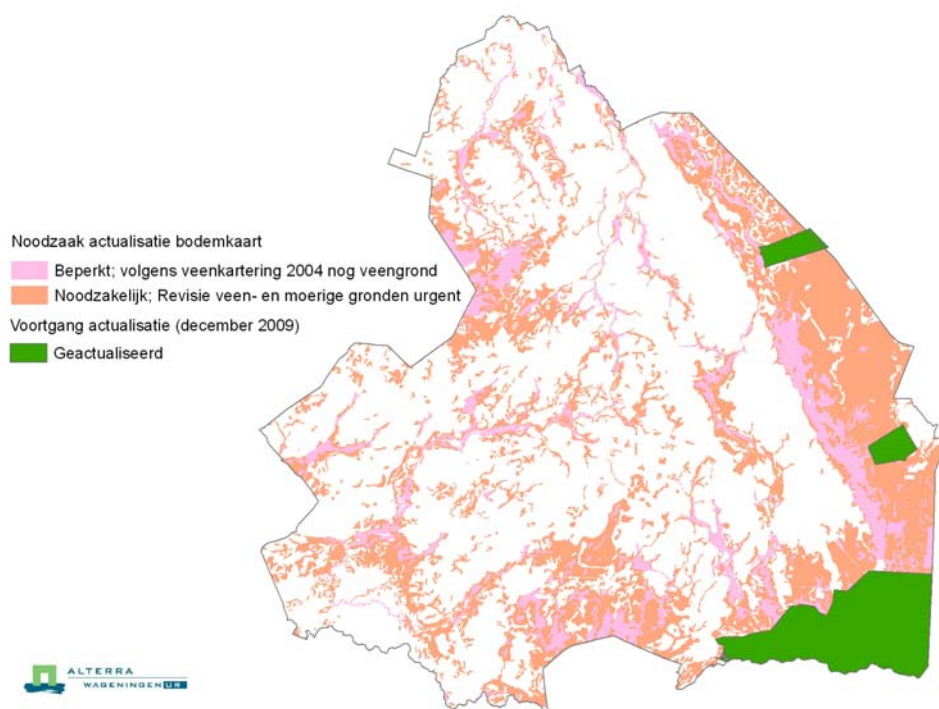
- Veen tot dieper dan 120 cm-mv.
- Zand beginnend tussen 40 en 120 cm-mv.
- Klei beginnend tussen 40 en 120 cm-mv.
- < 40 cm; Voormalige veengronden door afbraak van organische stof gedeformeerd naar minerale bodem



Figuur 2.7

Resultaat van de zogenaamde 'veenkartering' in 2004: begindiepte van minerale grond onder het veen.

De provincie Drenthe is zich terdege bewust van deze verdwijning van veengronden en heeft aan Alterra meerdere opdrachten verleend om hiernaar onderzoek te doen. Dit heeft intussen al geresulteerd in verschillende rapporten en verbetering van de data (zie o.a. De Vries et al., 2008 en De Vries en Brouwer, 2007). Ook wordt daarbij ingegaan op effecten van het verdwijnen van veengronden op broeikasgasemissies en op emissie van nutriënten naar grond- en oppervlaktewater. De stand van zaken van de actualisatie van de bodemkaart van Drenthe anno december 2009 is weergegeven in figuur 2.8. Het ministerie van LNV heeft voor verbetering van de bodemkaart budget beschikbaar gesteld.



Figuur 2.8

Noodzaak en voortgang van actualisatie van de veengronden in Drenthe in december 2009.

2.3 Verdichting

Uit het landelijke onderzoek (Hack-ten Broeke et al., 2009) blijkt dat verdichting een grote potentiële bodembedreiging vormt. Het blijkt echter ook dat er onvoldoende gegevens beschikbaar zijn om deze bodembedreiging goed in kaart te brengen. In dit rapport wordt voor Drenthe extra aandacht gegeven aan deze bodembedreiging. Daarbij wordt onderzocht welke gegevens gebruikt zijn bij het landelijke onderzoek, welke regionale gegevens aanvullend nog beschikbaar zijn en in hoeverre aanvullende informatie nog nodig is om een betrouwbare uitspraak te kunnen doen over de verdichtingrisico's.

In het landelijke onderzoek is een uitspraak gedaan over enerzijds de gevoeligheid voor verdichting op basis van textuurgegevens en anderzijds de kwetsbaarheid voor verdichting door behalve de textuurgegevens ook de klimatologische omstandigheden in de analyse te betrekken. De grond is kwetsbaarder naarmate deze vochtiger is. In voorliggend onderzoek wordt aanvullend op het landelijk onderzoek ook het landgebruik beschouwd.

Omdat de aspecten ten aanzien van verdichting in de volgende hoofdstukken uitgebreid aan de orde komen, zijn zij in deze paragraaf niet verder besproken.

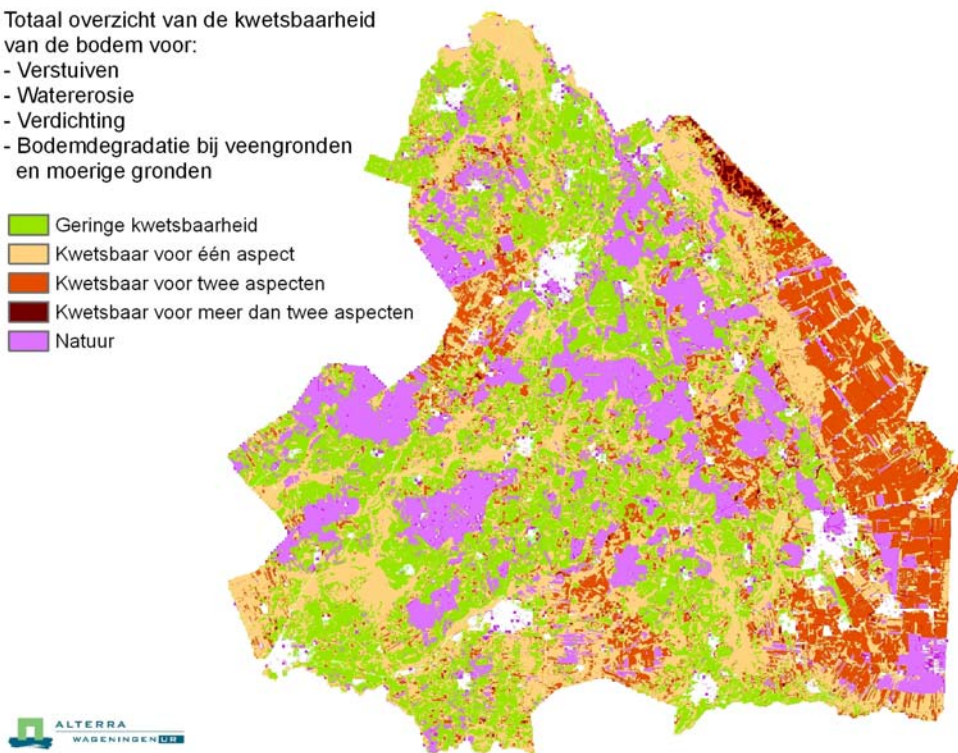
2.4 Combinatiekaart bodembedreigingen

Gegeven de belangrijkste bodembedreigingen erosie, afname van de hoeveelheid organische stof en verdichting is in figuur 2.9 een combinatie van deze bodembedreigingen voor de provincie Drenthe weer-gegeven. Hiertoe hebben we de kaarten uit figuren 2.2, 2.5, 2.7 en 4.5 over elkaar gelegd en weergegeven waar gevoeligheden voor bodembedreigingen elkaar overlappen. In de oranje gebieden op de kaart spelen dus mogelijk-erwijs twee bodembedreigingen een rol. In het oostelijk deel van Drenthe, de veenkoloniën, is bijvoor-beeld sprake van sterke gevoeligheid voor winderosie (figuur 2.5) én afname van organische stof (figuur 2.7).

Totaal overzicht van de kwetsbaarheid van de bodem voor:

- Verstuiven
- Watererosie
- Verdichting
- Bodemdegradatie bij veengronden en moerige gronden

- Geringe kwetsbaarheid
- Kwetsbaar voor één aspect
- Kwetsbaar voor twee aspecten
- Kwetsbaar voor meer dan twee aspecten
- Natuur



Figuur 2.9

Gevoeligheid voor de bodembedreigingen erosie, afname van organische stof en verdichting in de provincie Drenthe: overzichtskaart van voorkomen van hoogste kwetsbaarheid voor één of meer bodembedreigingen.

3 Gegevens voor verdichting

3.1 Gebruikte gegevens in landelijk onderzoek

De gegevens die in het landelijk onderzoek (Hack-ten Broeke et al., 2009) voor verdichting in Drenthe zijn gebruikt, zijn voornamelijk afgeleide bodemdichtheden die met pedotransferfuncties uit profielbeschrijvingen zijn samengesteld.

In dat onderzoek zijn vier verschillende manieren gebruikt om de ondergrondverdichting in kaart te brengen:

1. *Sidass methodiek.*

Deze methode doet uitspraken over de draagkracht van de bodem op basis van textuurgegevens. Aan de hand van deze resultaten is een kaart gemaakt die aangeeft wat de maximale toelaatbare wiellasten (in kN) zijn voor een bepaald bandtype met bepaalde bandendruk en vochtgehalte van de bodem.

2. *Packing Density methodiek (Jones et al.) - Gevoeligheid.*

Deze methode doet uitspraken over de gevoeligheid (Eng: vulnerability) voor verdichting op basis van textuurgegevens. Deze textuurgegevens worden met behulp van pedotransferfuncties omgerekend naar bulkdichtheden die vervolgens worden gebruikt in de formule voor de Packing Density wat een directe maat is voor de gevoeligheid voor compactie. De gevoeligheid is alleen gebaseerd op de grondsoort en is dus niet gekoppeld aan het landgebruik. Zodra het landgebruik wordt toegevoegd kan een uitspraak worden gedaan over de verdichtingskans. Dat is in de hier beschreven methodiek dus niet het geval.

3. *Packing Density methodiek (Jones et al.) - Kwetsbaarheid.*

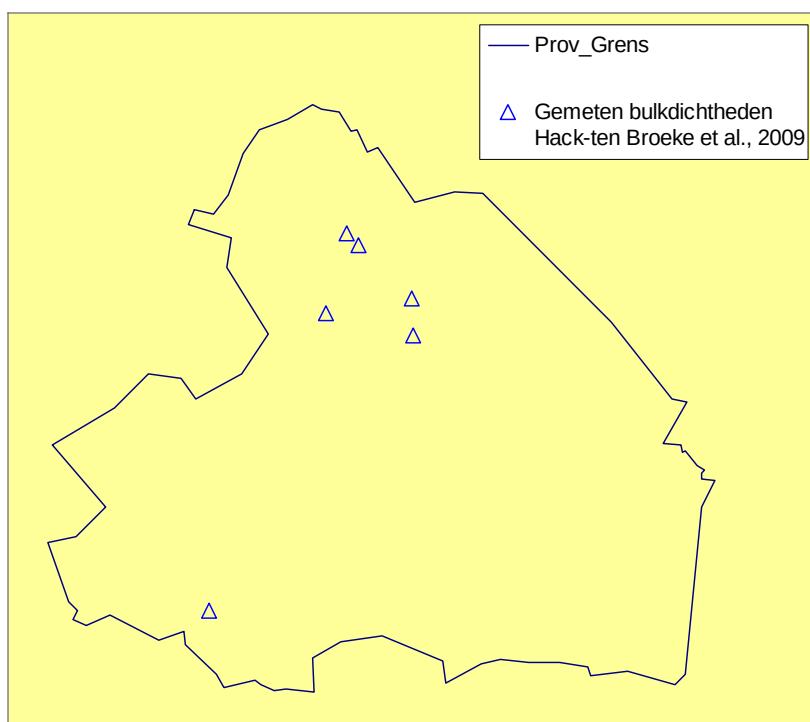
Deze methode is identiek aan de vorige, maar voegt hieraan het vochtgehalte toe. De grond is kwetsbaarder naarmate deze vochtiger is.

4. *Gemeten bulkdichtheden en temporele en ruimtelijke statistische analyse.*

Deze methode is de meest directe en is gebaseerd op werkelijk gemeten dichtheden. Door het geringe aantal meetpunten in ruimte en vooral ook tijd is nauwelijks informatie beschikbaar over veranderingen van de dichtheden in de tijd. Daarom zijn de gemeten dichtheden vergeleken met een grenswaarde, die is afgeleid van de dichtheid van soortgelijke gronden waarboven problemen met beworteling en waterdoorlatendheden zijn te verwachten. Is de gemeten dichtheid van een ander bodemonmonster hoger dan deze grenswaarde, dan wordt de grond als 'te dicht' aangemerkt. Dit is een statisch gegeven. Of de grond in de loop ter tijd ook werkelijk verdicht is door machinegebruik of andere antropogene invloeden, is niet met zekerheid te zeggen. Het kan namelijk ook zijn dat de grond van nature een hoge dichtheid heeft. Met statistische technieken is getracht extrapolaties van de gemeten dichtheden te verrichten naar andere locaties en andere momenten.

Samenvattend blijkt dat van de gebruikte gegevens voor geheel Drenthe slechts zes werkelijk gemeten bulkdichtheden van de bodem beschikbaar en gebruikt zijn in het landelijk onderzoek. De overige gegevens zijn afgeleid uit textuuranalyses die gemeten dan wel geschat zijn op basis van bodemprofielbeschrijvingen. Dit betreffen geen werkelijk gemeten dichtheden en zijn daardoor minder betrouwbaar.

Figuur 3.1 laat zien dat deze meetpunten van de bulkdichtheden geconcentreerd zijn in voornamelijk het noordelijk deel van Drenthe. De meetgegevens zijn van sterk- tot zwaklemige fijne zandgronden. De gemeten gegevens zijn eveneens in bijlage 1 opgenomen.



Figuur 3.1

Overzicht van de locaties met de gebruikte werkelijke gemeten bulkdichtheden (Hack-ten Broeke et al., 2009).

De bulkdichtheidsbepalingen zijn uitgevoerd aan monsters uit de laag 20 tot 38 cm onder maaiveld. Het geringe aantal gebruikte meetgegevens komt voort uit de selectie die op het grotere bestand meetpunten heeft moeten plaats vinden. Bij de keuze van de beoordelingsdiepte is er rekening mee gehouden dat verdichting vooral optreedt in het bovenste gedeelte van de ondergrond. Vaak bevindt zich op deze hoogte ook een zogenaamde ploegzool (zie definitie hieronder). Bij kleigronden begint de ondergrond rond de 22 cm onder maaiveld, bij kleiige leemgronden op 27 cm onder maaiveld en bij zand- en zandige leemgronden op 32 cm onder maaiveld. De verdichtingseffecten nemen dieper in het profiel af. Daarom is alleen de meetdiepte tussen 20 en 38 cm onder maaiveld beschouwd. Verder zijn alleen de minerale gronden in beschouwing genomen. De gegevens van de nog niet geactualiseerde veenkoloniën zijn buiten beschouwing gebleven omdat ervan is uitgegaan dat deze veengronden een dusdanige veerkracht bezitten dat zij niet verdichtinggevoelig zijn. De veengebieden zijn echter door oxidatie van het veen de laatste decennia sterk veranderd waardoor de gegevens zijn gedateerd. Een update van de veenkartering is daarom ook voor de bodembedreiging 'verdichting' van groot belang. De gebruikte gegevens komen uit het BIS-databestand.

Een **ploegzool** is in een profielkuil duidelijk visueel herkenbaar als een verdichte dan wel versmeerde bodemlaag die meestal tussen 22 en 32 centimeter onder het maaiveld begint en een dikte heeft van 10 tot 20 cm. Een ploegzool is tot op heden nog niet op basis van fysisch meetbare eigenschappen gedefinieerd. De ploegzool begint direct onder de onderzijde van de ploeg en is dus afhankelijk van de ploegdiepte. De belangrijkste oorzaak voor de vorming van een ploegzool is het rijden van de trekker met één voor- en achterband in de open voor tijdens het ploegen. Daarnaast wordt door toepassing van ruggen, bij bijvoorbeeld aardappelteelt, eerder op of dicht op de ondergrond gereden. Op zwaardere gronden zijn de gevolgen minder ernstig omdat deze door het grotere aandeel kleideeltjes het vermogen bezitten om scheuren te vormen waardoor de wortels en het water toch toegang tot de ondergrond kunnen krijgen en de zuurstofvoorziening tot op grote diepte plaats kan vinden. De **ondergrond** begint ter hoogte van de onderkant van de ploeg en kan tot ongeveer 80 cm onder het maaiveld doorlopen. Een eventuele ploegzool bevindt zich dus bovenin de ondergrond.

Op basis van de gemeten bulkdichtheden zijn geen dekkende kaartvlakken te maken. Daarom zijn in figuur 3.1 alleen de puntgegevens weergegeven.

Om toch een kaart van de verdichtinggevoeligheid te kunnen maken is in het landelijk onderzoek (Hack-ten Broeke et al., 2009) op basis van BIS (meet)gegevens en enkele niet in BIS opgenomen textuurgegevens een statistisch onderzoek uitgevoerd naar de aanwezigheid van ondergrondverdichting. De bulk van de gegevens dateert uit 1985. De uit de textuurgegevens met pedotransferfuncties berekende dichtheden betreffen dus niet werkelijk gemeten dichtheden.

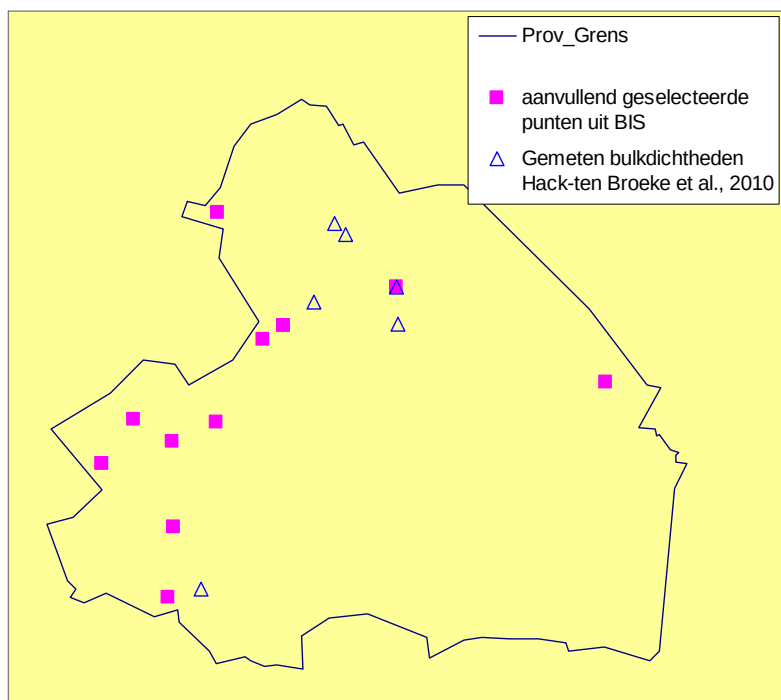
De niet gemeten dichtheidsbepalingen zijn afkomstig uit

- de Staringreeks. De grondtypen uit de Staringreeks zijn gekoppeld aan de grondtypen van de Nederlandse gronden en dus niet op basis van wat er werkelijk in Drenthe is gemeten ten behoeve van de Staringreeks. De oorspronkelijke data die ten grondslag liggen aan de Staringreeks zijn wel deels opgenomen in BIS, maar kan dus van een andere locatie afkomstig zijn.
- steekproefsgewijze bodemprofielbeschrijvingen uit 2003. Uit deze (visuele) bodemprofielbeschrijvingen zijn gegevens afgeleid over dichtheden en andere bodemeigenschappen. Ook hier betreffen het dus geen directe metingen.

3.2 Aanvullend beschikbare regionale gegevens voor Drenthe

Er is onderzocht welke aanvullende gegevens voor Drenthe nog niet zijn gebruikt in het landelijk onderzoek, maar elders nog wel beschikbaar zijn. Een aantal opties zijn onderzocht:

1. In BIS zijn nog een aantal gronden geselecteerd die niet in het landelijk onderzoek zijn gebruikt. Deze punten zijn weergegeven in figuur 3.2 en in bijlage 2. Deze gegevens bevatten geen lutumfractie-metingen. De Packing Density is hiermee dus niet te bepalen.
2. De veenkoloniale gebieden in Drenthe bevatten meetpunten die in het landelijk onderzoek niet zijn gebruikt. Om te bepalen of (ondiepe) veengronden door oxidatie misschien zijn veranderd in moerige (veendikte < 40 cm) of minerale gronden, zijn in 2003 in o.a. Drenthe steekproefsgewijze boorprofielbeschrijvingen verricht. De plekken waar de steekproeven zijn genomen, komen overeen met plekken waar vroeger ook al metingen zijn gedaan. Dit is in Drenthe later nog eens uitgebreid met een aantal steekproeven in 2008 of 2009. Door een eventuele maaiveld daling schuiven de gemeten bulkdichtheden naar de oppervlakte. Als deze gronden door de maaiveld daling zijn veranderd in minerale gronden vormen zij een goede nulmeting voor eventuele verdichting. Omdat ook hier geen tijdreeks per punt aanwezig is, worden zij gebruikt om een relatie te vinden tussen de gemeten dichtheid en een gemiddelde dichtheid voor een soortgelijke grond in Nederland. In bijlage 4 is aangegeven welke meetpunten aanvullend beschikbaar zijn voor eventuele nulpuntsbepalingen. In paragraaf 3.4.1 wordt hier uitgebreider op ingegaan.



Figuur 3.2

Overzicht van de locaties met de in het landelijk onderzoek gebruikte werkelijke gemeten bulkdichtheden aangevuld met nog enkele resterende gemeten punten uit de BIS database.

1. Recentere data van labproeven al dan niet gebruikt voor de Staringreeks zou meegenomen kunnen worden. Hiervan zijn geen geschikte data gevonden die voor de ondergrond van belang zijn. De meeste gegevens betreffen metingen uit de bouwvoor.
2. Het landgebruik is gekoppeld aan de aanwezige meetpunten. Met behulp van deze informatie kan een uitspraak per punt worden gedaan over de verdichtingskans. De kans op verdichting is in het landelijk onderzoek nog niet aan de orde geweest. In bijlage 5 is een overzicht gegeven van het landgebruik per punt. Het landgebruik kan in de loop van de tijd wijzigen. Daarom zijn in de tabellen van bijlage 5 voor vier verschillende jaren het gebruik weergegeven.

Het aantal meetpunten is dusdanig laag dat er in plaats van het vervaardigen van vlakdekkende kaarten op basis van afgeleide, relatief onzekere, gegevens voor is gekozen om met puntaanduidingen te werken die zijn gebaseerd op harde meetgegevens. Door de puntaanduidingen wordt tevens duidelijk welke hiaten er in de meetgegevens nog bestaan.

3.3 Indicatoren voor bodemverdichting (ENVASSO)

Om te komen tot een afgewogen set gegevens waarmee de bodembedreiging goed in kaart kan worden gebracht, wordt aanbevolen uit te gaan van de resultaten van het ENVASSO-project (Kibblewhite et. al, 2008 en Huber et. al, 2008).

Bodemverdichting in het kader van het ENVASSO project is gedefinieerd als een verdichting en verstoring van de grond op dusdanige wijze dat het totale luchtgevulde poriënvolume afneemt met verstoring of verlies van een of meerdere bodemfuncties als gevolg.

Het ENVASSO-project (ENVironmental ASsessment of Soil for mOnitoring) is uitgevoerd in opdracht van de Europese Commissie onder het 6e Framework in de periode 2006 tot 2008. Het hoofddoel van dat project was het definiëren van een Europees zo uniform mogelijk opgezet bodem-monitoringssysteem met het oog op de bescherming van de Europese gronden. Het heeft geresulteerd in een 6-tal rapporten (<http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/projects/envasso/>):

1. Bodemindicatoren en criteria om de staat van de bodem te kunnen beoordelen (Volume I),
2. Beoordeling van bestaande bodemonderzoeken en monitoringssystemen (Volume II),
3. Opzet van een raamwerk voor een Europees bodem-monitoringssysteem (Volume III),
4. Evaluatie van 22 procedures in 28 pilots die gebruikt kunnen worden in het onderhouden van het bodem-monitoringssysteem (Volume IV).
5. Gekozen procedures voor het onderhouden van het Europees bodem-monitoringssysteem (Volume V),
6. Uit 1 t/m 5 volgend Europees bodem-monitoringssysteem bestaande uit een netwerk van locaties waaruit een kwalitatief hoogwaardig monsternamingsproces kan worden afgeleid (Volume VI).

De rapporten komen met tien indicatoren waarmee ondergrondverdichting kan worden vastgelegd en beoordeeld. Van deze tien indicatoren zijn er drie uitgekozen als meest geschikte monitoringseenheden gebaseerd op technische en financiële gronden. In tabel 3.1 zijn deze zogenaamde Top3-indicatoren weergegeven. In bijlage 3 zijn de andere indicatoren weergegeven.

Tabel 3.1

Top 3-indicatoren voor het monitoren van de bodemgesteldheid ten aanzien van bodemverdichting (Huber et al, 2008).

Onderwerp	Vraag	Indicator	Eenheid	Code
Verdichting en verslechtering van bodemstructuur	Wat is de stand van de bodemverdichting en verslechtering van bodemstructuur in Europa?	Dichtheid (droge bulkdichtheid, g.cm-3 of pakingsdichtheid; totale porositeit)	ton.cm-3; %	CP01
Verdichting en verslechtering van bodemstructuur	Wat is de stand van de bodemverdichting en verslechtering van bodemstructuur in Europa?	Luchtgevuld poriënvolume bij een vastgestelde drukhoogte	%	CP02
Oorzaken van bodemverdichting	Wat zijn de oorzaken en omstandigheden die resulteren in onomkeerbare verdichting?	Kwetsbaarheid voor verdichting (geschat)	Klassen	CP06

3.3.1 CP01: Dichtheid

Deze indicator is uitgekozen omdat het informatie verschaft over de huidige status van bodemdichtheid en kan gebruikt worden om te beoordelen waar ongewone dichtheden voorkomen of waar waarschijnlijk verdichting zal voorkomen. Het grootste probleem is dat de bulkdichtheid geen goede relatie heeft met de bodemstructuur en met structurele degradatie. Dit probleem kan deels teniet worden gedaan door gebruik te maken van de Packing Density dat beter de huidige dichtheidstoestand weergeeft en een nauwere relatie heeft met de porositeit (zie Indicator Fact Sheet for CP01 Density). Dichtheden kunnen over geheel Europa worden gebruikt omdat deze variabele al in veel landen wordt gemeten binnen monitoringsprogramma's en beschikbaar is in nationale inventarisaties.

In situaties waar de dichtheid bekend is kan met vergelijking 1 de packing density eenvoudig worden bepaald:

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

met:

Db = bulkdichtheid (g.cm^{-3})

PD = pakingsdichtheid (Eng: packing density) (g.cm^{-3})

C = kleigehalte (% g.g^{-1})

Voor de PD worden drie klassen onderscheiden (tabel 3.2) :

Tabel 3.2

PD-klassen.

PD-klasse	Waarde (g.cm^{-3})
Laag	< 1.40
Medium	1.40 tot 1.75
hoog	> 1.75

Bodems met een hoge PD worden als compact beschouwd en hebben bijna altijd een lucht gevuld poriënvolume van minder dan 5 à 10% bij een drukhoogte van 5 cm.

De meeste plantenwortels hebben problemen om in de grond te dringen bij een poriënvolume van minder dan 40% (Hidding and Van den Berg, 1961). Planten met dikke wortels zoals maïs hebben eerder last van verdichting. Zowel de aëratie als de dichtheid zijn hierin bepalende factoren. Kleigronden hebben vrijwel altijd een poriënvolume > 40%. Kleinere poriënvolumes duiden er daardoor al snel op dat we te maken hebben met een zand of leemgrond.



Figuur 3.3

Links: Rulle grond in een bouwvoor met goede structuur; de beworteling is goed. Rechts: Bouwvoor met slechte structuur op hetzelfde stuk land; de beworteling is slecht. (Bron: Kuipers, 1989).

Voordelen:

- Bulkdichtheid is een directe maat voor bodemdichtheid en in tijdreeksen voor bodemverdichting.
- Pakkingsdichtheid is een goede maat voor de dichtheid van een grond zoals die in het veld wordt ervaren en heeft een duidelijke relatie met de luchttoestand en structuur van de bodem.

Nadelen:

- Deze indicator kan variëren over kleine afstanden en tijdschalen.
- De bulkdichtheid wordt normaal gesproken bepaald uit onverstoorde bodemonsters die in het veld zijn gestoken. Dit kan tijdrovend en moeilijk zijn in droge condities.

Conclusie:

De voornaamste indicator voor verdichting is de bulkdichtheid van het bovenste gedeelte van de ondergrond, meestal de ploegzool. Het is aan te bevelen eens in de 5 tot 10 jaar de metingen op dezelfde locaties en diepten uit te voeren.

3.3.2 CP02: Luchtgevuld poriënvolume

Deze indicator is uitgekozen als een kwantitatieve maat voor bodemstructuur. Het is relatief eenvoudig te meten als het gecombineerd wordt met de bepaling van de bulkdichtheid. Het heeft relaties met belangrijke bodemeigenschappen zoals zuurstofdiffusie, waterdoorlatendheid en doorwortelbaarheid van planten. Bakker et al. (1987) bepaalden de relatie tussen de diffusiecoëfficiënt voor zuurstof en het luchtgevulde poriënvolume. In tabel 3.3 zijn drempelwaarden voor de luchtgevulde poriënvolumes gegeven. Deze waarden zijn niet gekoppeld aan een bepaalde drukhoogte van het bodemwater en zijn dus toepasbaar bij elke vochttoestand. Een goed gestructureerde grond heeft minder lucht in het profiel nodig (2%) dan een slecht gestruc-

tureerde grond (12%). Een goed gestructureerde grond kan bijna volledig met water zijn verzadigd voordat beluchtingproblemen op gaan treden.

Tabel 3.3

Minimum en voorkeur poriënvolumes uitgaande van een bepaalde structuurtoestand van de bodem. Bij een gegeven structuur en de aangegeven minimale waarden voor het poriënvolume treden juist geen respectievelijk geen anaerobe condities voor de plantwortels op. Een grond met een goede structuur heeft minder poriën nodig om planten te kunnen laten groeien dan een grond met een slechte structuur.

Bodemstructuur	Benodigd luchtgevuuld poriënvolume (%)	
	Ten minste	Bij voorkeur
Excellent	2	14
Goed	5	15
Matig	8	17
Slecht of structuurloos	12	21

Een algemene drempelwaarde voor alle grondsoorten is vastgesteld op 10% luchtgevuuld poriënvolume bij een drukhoogte van 50 cm.

Voordelen:

- Geeft een indicatie van zuurstofdiffusiecapaciteit en doorwortelbaarheid van de grond in natte omstandigheden.
- Makkelijker meetbaar dan de verzadigde waterdoorlatendheid.
- Goede indicator voor de hoeveelheid macroporiën.

Nadelen:

- Er is geen standaardisatie: sommige landen bepalen het luchtgevuulde poriënvolume bij 50 cm onderdruk, anderen bij 30, 60 of 100 cm.
- Het geeft onvoldoende inzicht in de continuïteit van doorlopende poriën die van belang zijn voor een goede ontwatering.

Conclusie:

Het is een goede voor de hand liggende indicator omdat het een directe maat is voor de luchtvoorziening van wortels en bodemleven. Bodemverdichting vermindert altijd het luchtgevuulde poriënvolume. Net als de metingen van de bulkdichtheid is het aan te bevelen eens in de vijf tot tien jaar de metingen op dezelfde locaties en diepten uit te voeren.



Figuur 3.4

Een klassiek voorbeeld van een verdichte bovengrond. De bodemstructuur in de bovengrond is volledig verstoord. Dit hindert de wortelgroei en verstoort het water- en nutriëntegebruik door het gewas (Bron: Soil Atlas of Europe, 2005).

3.3.3 CP06: Gevoeligheid en kwetsbaarheid voor verdichting

Deze indicator (Jones et al., 2003) is uitgekozen omdat deze gevoeligheid voor verdichting informatie verschaft over de noodzaak tot het toepassen van risico management op Europese schaal. Het kwetsbaarheidschema deelt de gevoeligheid op in verschillende categorieën op basis van textuur, organisch stof en bulkdichtheid. Deze gevoeligheid wordt omgezet in kwetsbaarheid, hetgeen de waarschijnlijkheid weergeeft dat grond verdicht onder verschillende vocht- en klimatologische condities.

Deze indicator is gebaseerd op een eenvoudig classificatiesysteem voor ondergrondverdichting. De methode bestaat uit twee fasen:

- Bepaal de gevoeligheid voor verdichting op basis van bodemtextuur (inclusief kleigehalte), pakkingsdichtheid en organisch stofgehalte. De bulkdichtheid kan worden bepaald door meting of gebruik van pedotransferfuncties (PDF's). Organische stofgehalten zijn bekend op een 1 km resolutie.
- Combineer de gevoeligheid met klimaatgegevens of actuele vochtgehalten om de kwetsbaarheidsklasse vast te stellen. Een hoog kwetsbare grond is een grond met een grote gevoeligheid voor verdichting onder vochtcondities boven veldcapaciteit ($h > 50$ cm).

Voordelen:

- Het combineert verschillende factoren in een enkele gevoeligheidsanalyse.
- Heeft bewezen redelijke resultaten op te leveren voor Europa.

Nadelen:

- Toepassing van het model op 1 : 1.000.000 schaal is twijfelachtig. Een schaal van 1 : 50.000 of groter is beter omdat op deze schaal gewassen of landgebruik zijn te koppelen aan specifieke velden (Jones et al., 2003).
- Er zijn onvoldoende data beschikbaar op schalen groter dan 1 : 1.000.000.

Conclusie:

Het is een direct bruikbare indicator om te bepalen of risico management nodig is op Europese schaal. Aanpassingen zijn wenselijk en mogelijk op het moment dat kennis en data toenemen. Als monitorings-instrument na vaststelling van de mogelijke verdichtingdreiging zijn de indicatoren CP01 en CP02 beter geschikt.

3.4 Gewenste aanvullende gegevens

3.4.1 Nulsituatie

Nu bekend is welke indicatoren het beste gebruikt kunnen worden om bodemverdichting in kaart te brengen en vervolgens te monitoren (CP01, CP02 en CP06) is het wenselijk te weten in hoeverre bestaande dichtheden ook werkelijk verdichte bodems voorstellen. Bodems kunnen van nature dichter zijn dan een gemiddelde soortgelijke grond door bijvoorbeeld afzettingscondities of de vorming van een inspoelingslaag. Daarom hoeven eventueel aangetroffen hoge dichtheden niet per se toegeschreven te worden aan het landgebruik.

In Nederland is de meeste grond intensief in gebruik voor legio doeleinden. Dit betekent dat een echte nulsituatie, ofwel de situatie voordat deze intensief door mensen werd gebruikt, voor de meeste gronden moeilijk is vast te stellen.

Een uitzondering vormen hierop de veengronden die in de loop de jaren zijn geoxideerd waardoor de toplaag grotendeels is verdwenen en waar de ondergrond aan de oppervlakte is komen te liggen of zal komen te liggen. Ten tijde van het bestaan van de veenlaag zijn op sommige plekken dichtheidsbepalingen aan de minerale ondergrond uitgevoerd. Deze metingen uit het verleden vormen nu een basis voor de nulsituatie op die plek. Als die metingen nog niet zijn uitgevoerd is het wenselijk dat zij alsnog plaats vinden.

In bijlage 4 zijn de punten weergegeven waar mogelijk een nulsituatie is vast te stellen op basis van eerder verrichte metingen onder de moerige gronden. De punten die geselecteerd zijn, hebben allen een toplaag met een organisch stofgehalte van meer dan 15% tot de aangegeven diepte. Op basis van profielbeschrijvingen die gedaan zijn in 2007 zijn voor een aantal punten de minerale ondergrond al dusdanig naar de oppervlakte 'verschoven' dat daar nu al bulkdichtheidsmetingen verricht kan worden om een eventuele verdichting van de ondergrond door meting vast te kunnen stellen. Dit vereist echter nog een vertaalslag omdat de moerige toplaag nooit geheel uit organisch materiaal bestaat, zodat een residulaag na oxidatie op de minerale ondergrond achter zal blijven. Als al het moerige materiaal in de toplaag verdwijnt, zal de maaiveld daling naar rato zijn en is de residuhoogte te berekenen met de dichtheid op circa 30cm daaronder.

In bijlage 5 zijn de landgebruikgegevens weergegeven van de

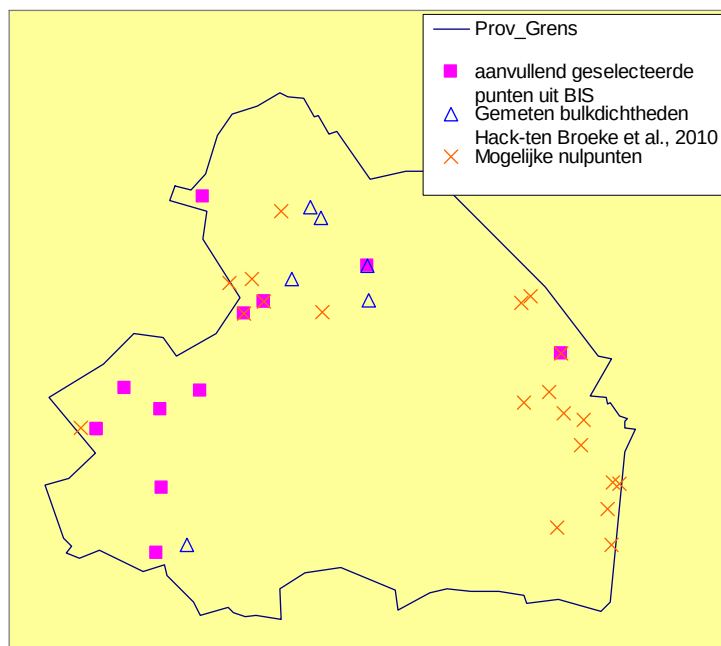
- punten uit het landelijk onderzoek met gemeten bulkdichtheden,
- aanvullend geselecteerde punten uit BIS met gemeten bulkdichtheden,
- punten die geschikt zijn voor het bepalen van de nulsituatie.

Buiten de gebieden die in het verleden zijn gemeten, zijn er ook veengebieden waar een nulmeting van de ondergrond mogelijk zou zijn voor toekomstig gebruik.

In figuur 3.5 zijn de locaties van de gemeten plekken aangegeven evenals de moerige gebieden die in het verleden nog niet zijn bemonsterd, maar die wel een waardevolle werkelijke nulsituatie zouden kunnen aanduiden. Uit de figuur wordt verder uit de lege plekken duidelijk waar het wenselijk is de huidige situatie nog vast te stellen. De huidige situatie duidt dan op gebieden die mogelijk al zijn verdicht, maar nog niet eerder zijn bemonsterd en waar geen duidelijke nulsituatie is vast te stellen.

Een schatting voor nulwaarde van de huidige-situatie-gebieden kan mogelijk verkregen worden door bestudering van historische data zodat de toestand verkregen wordt voordat zware machines het land hebben betreden. Het kan ook door metingen in het veld te verrichten met vergelijkbare omgevingscondities waarop nooit eerder zware machines zijn geweest (paired-field vergelijking).

Om een onderbouwde uitspraak te kunnen doen over de nulsituatie of huidige situatie in Drenthe zijn naar schatting enkele honderden metingen van de bulkdichtheid, kleigehalte en poriënvolume in de laag 20 tot 55cm onder de bovenkant van de minerale laag nodig. In de praktijk komt dat neer op gemiddeld één meetpunt per 10 km². De relevantie van deze meetgegevens neemt naar de diepte exponentieel af omdat de kans op verdichting met toenemende diepte afneemt. De dichtheid van de grond direct onder de ploegdiepte (ploegzool) is vaak de grootste bottleneck voor wortels en infiltrerend water.



Figuur 3.5

Punten 'X' die voor het bepalen van de nulsituatie in aanmerking komen.

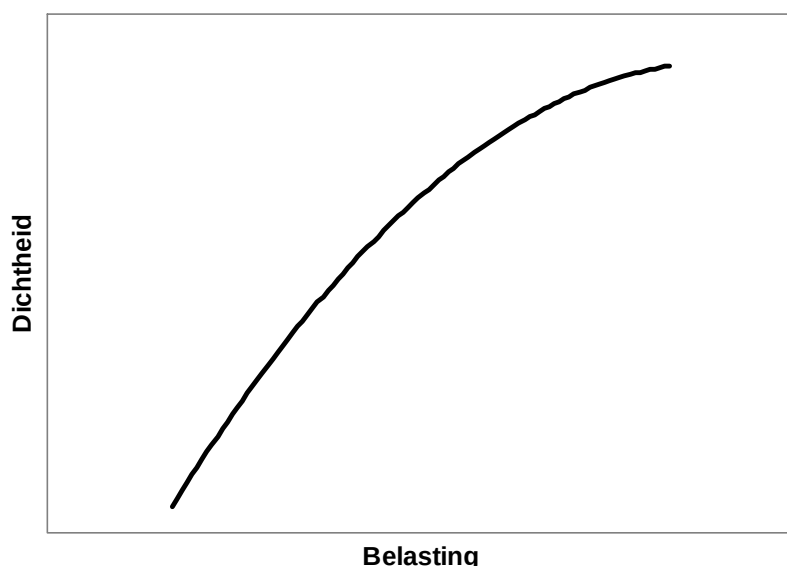
3.4.2 Dichtheidsveranderingen

Zodra de nulsituatie of de huidige situatie is vastgelegd kan met herhalende metingen op dezelfde locaties in kaart worden gebracht in hoeverre de grond aan dichtheidsveranderingen, ofwel verdichting, onderhevig is. Koppeling aan typen van landgebruik met inherent machinegebruik resulteert vervolgens in een verband.

Omdat de toename van de verdichting op één locatie en diepte een niet-lineair verloop heeft, zijn tenminste drie metingen op dezelfde plek in de tijd nodig. Het niet-lineaire verloop komt voort uit het gegeven dat een eenmaal verdichte grond moeilijker verdere verdichting zal ondergaan (figuur 3.6).

Om de gemeten verdichting te kunnen relateren aan het type landgebruik is het nodig te weten wat er met het land in de tussenliggende periode is gebeurd:

- Wat is de grondbewerking geweest; is er bijvoorbeeld gewoeld, e.d.?
- Wat was het landgebruik? Was het grasland, of is er regelmatig maïs op verbouwd, etc.
- Welke machines zijn er op het land geweest (koppeling grondgebruik aan machines).



Figuur 3.6

Er is een steeds grotere kracht nodig om een grond nog verder te verdichten.

In het volgende hoofdstuk is een indicatieve koppeling tussen het landgebruik en de verwachte verdichting in 2010 gemaakt. De nadruk ligt hierbij op het indicatieve karakter. De koppeling is gebaseerd op het werkelijk landgebruik over de jaren, maar de verwachte verdichting is afgeleid uit gegevens van gelijksoortige gronden elders in Nederland. Voor een eenduidige betrouwbare uitspraak is het aantal werkelijke meetgegevens veruit ontoereikend. De koppeling maakt wel duidelijk in welke gebieden prioritering van een eventuele meet-campagne zou moeten liggen.

Om verdichting te monitoren geeft het ENVASSO-project de richtlijn om eens in de 5 à 10 jaar metingen te verrichten. Om de verdichting in kaart te kunnen brengen in een kortere looptijd, is het beter metingen om de 3 à 5 jaar uit te voeren.

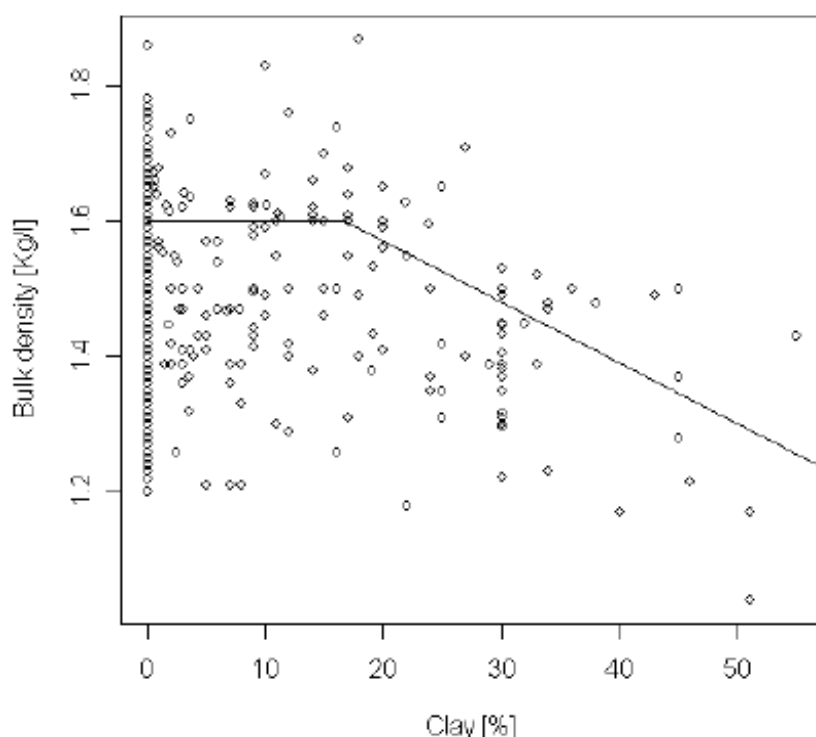
Om op kortere termijn een idee te krijgen van het verloop van de verdichting zijn vergelijkende metingen tussen de verdichting op de kop en het midden van de akkers mogelijk. Omdat de kopakker intensiever wordt bereiden neemt de ondergrondverdichting daar sneller toe dan in het midden van het veld.

4 Risico per teelt

Op basis van de meetgegevens uit de eerste twee paragrafen van hoofdstuk 3 is in dit hoofdstuk gekeken in hoeverre een koppeling is te maken tussen het landgebruik en de metingen. Verder is een koppeling gelegd tussen de voorspellingen uit het landelijk onderzoek en het landgebruik.

4.1 Gemeten dichtheden en landgebruik

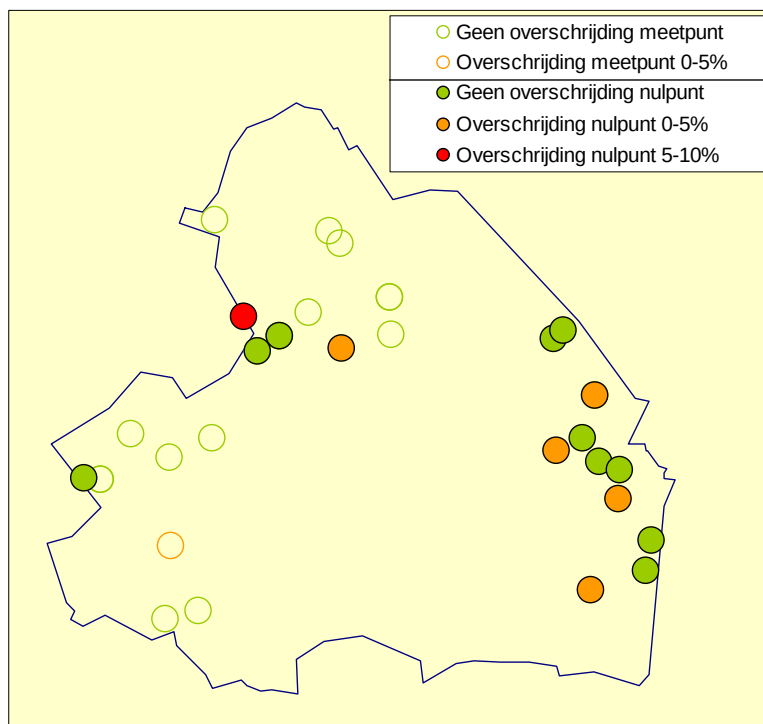
Van het totaal aantal gegevens van de in hoofdstuk 3 weergegeven meetpunten in Drenthe is slechts van enkele punten de packing density te berekenen. Daarom is ervoor gekozen de werkelijk gemeten dichtheid als maat te hanteren en deze te toetsen aan de waarden zoals die weergegeven zijn in figuur 4.1. Van de beschouwde gronden kan over het algemeen gezegd worden dat zij een kleifractie bezitten die lager is dan 16,7%, waardoor de linkerhelft van de grafiek geldig is als toetsingscriterium. In figuur 4.2 en in bijlage 6 is de dichtheid aangegeven gecombineerd met een overschrijdingspercentage van de drempelwaarde van $1,6 \text{ g/cm}^3$.



Figuur 4.1

Metingen van bulkdichtheid en kleigehalte van een groot aantal Nederlandse minerale ondergronden. De lijn geeft de drempelwaarde aan waarboven bulkdichtheden mogelijk zijn verdicht. De schuine lijn bij kleigehalten >16,7% is feitelijk de PakkingsDichtheid van hoofdstuk 3.1.1 ($PD = Db + 0.009C$, met $PD = 1,75$).

Als de waarde niet wordt overschreden, is het overschrijdingspercentage nul gesteld. Er moet voor ogen gehouden worden dat de percentages betrekking hebben op een momentopname in het verleden en getoetst worden aan een drempelwaarde die is vastgesteld op basis van een gemiddelde grond binnen Nederland. Daarbij wordt voorbij gegaan aan het feit dat sommige gronden van nature dichter zijn dan andere. Dat betekent dat bij een overschrijding van de drempelwaarde niet per se sprake hoeft te zijn van antropogene verdichting. Dit blijkt uit de overschrijdingspercentages van de nulpuntmetingen die tijdens de metingen onder een veenlaag verborgen waren. Er mag voor die diepere punten van worden uitgegaan dat zij niet door machines zijn verdicht.



Figuur 4.2

Overschrijdingspercentage van de drempelwaarde van de dichtheid ten opzichte van een soortgelijke grond elders in Nederland onderverdeeld naar de huidige meetpunten en de potentiële nulpunten. De metingen dateren alle uit de periode 1962 – 1988.

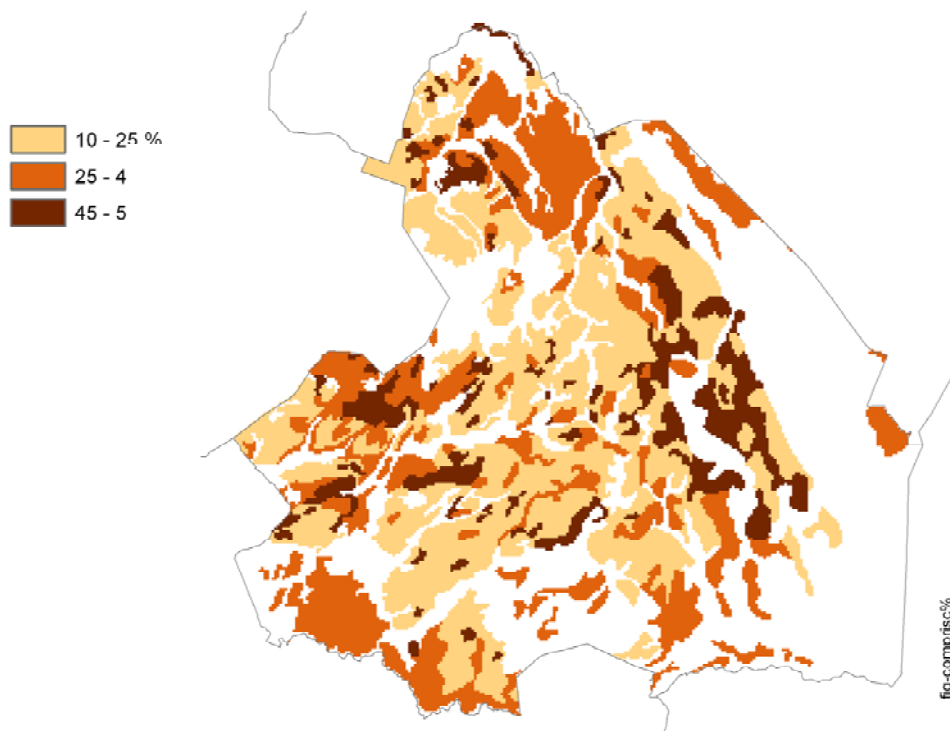
Met de informatie van de beschouwde meetpunten is geen exacte koppeling te leggen tussen de wiellasten, het draagvermogen van de grond, de gebruikte machines en de werkomstandigheden. Het aantal overschrijdingen ten opzichte van de referentiewaarde van figuur 4.1 is dusdanig klein dat het niet zinvol is deze overschrijdingen af te zetten tegen het landgebruik om daar universele uitspraken over te doen.

4.2 Verwachte verdichting en landgebruik

Door het landgebruik te beschouwen in relatie tot de verwachte verdichting zoals weergegeven in het landelijk onderzoek, kan wel een richtinggevende uitspraak worden gedaan over de teelt-verdichtings-relatie. De verwachte verdichting in 2010 (Hack-ten Broeke et al., 2009) is vastgesteld op basis van soortgelijke gronden elders in Nederland waarbij de dichtheidsverandering in de tijd is onderzocht. Deze veranderingen zijn doorvertaald naar de grondsoorten in Drenthe. Het landgebruik was daarbij niet beschouwd. Deze werkwijze moet als indicatief worden beschouwd vanwege het zeer geringe aantal werkelijke metingen in het gebied.

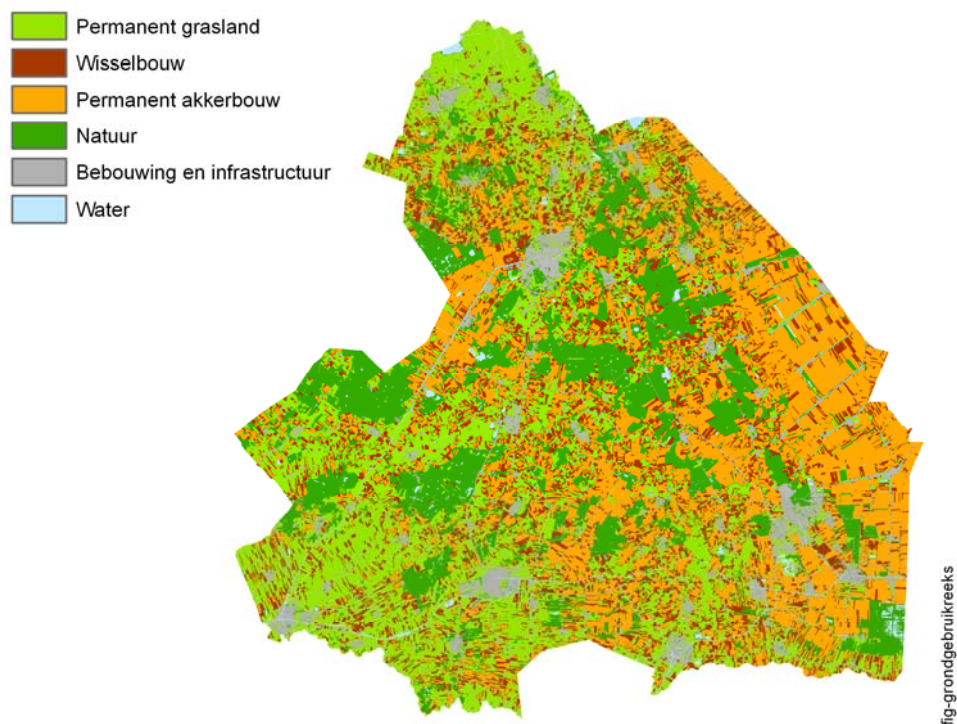
In figuur 4.3 is het verwachte aantal overschrijdingen van de drempelwaarde van figuur 4.1 in 2010 weergegeven op basis van de dichtheidsgegevens van soortgelijke gronden in Nederland.

In figuur 4.4 is het landgebruik in Drenthe weergegeven. Als het landgebruik in de loop der jaren wisselt, dan is dat aangeduid met Wisselbouw. Als het landgebruik tegenwoordig bebouwing of oppervlaktewater is, ongeacht het gebruik in het verleden, dan is dat aangeduid met Bebouwing of Water.



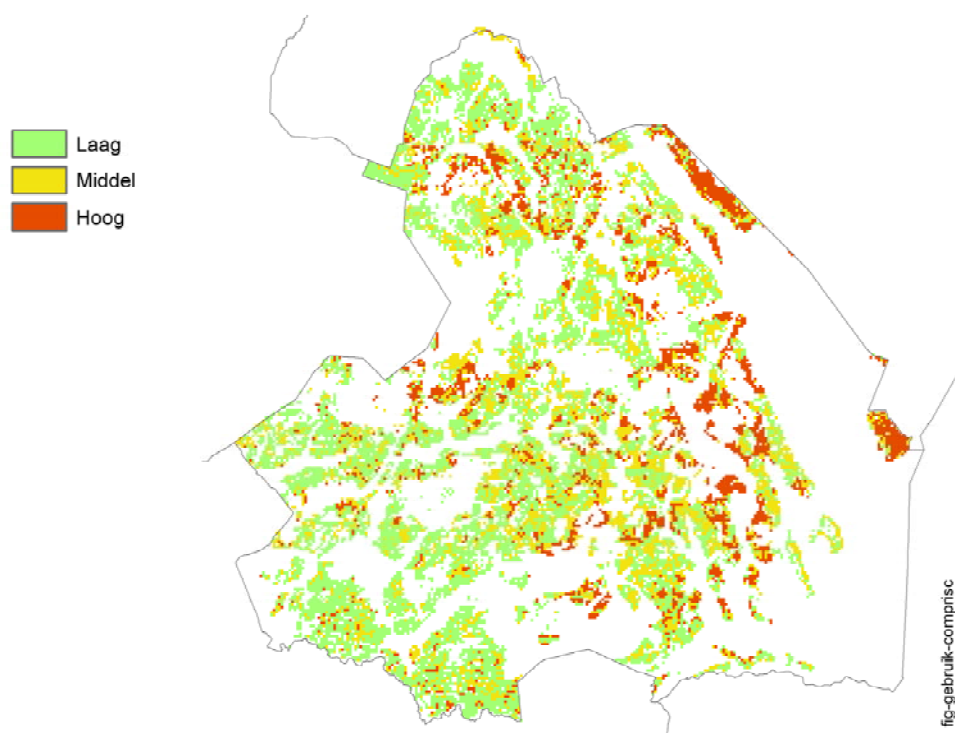
Figuur 4.3

Verwachte aantal waarnemingen per 100 waarnemingen waar in 2010 de drempelwaarde voor ondergrondverdichting volgens figuur 4.1 is overschreden (bron: Hack-ten Broeke et al., 2009). De witte vlekken zijn vooral veengebieden die niet in het onderzoek zijn betrokken. Een donkerbruine vlek betekent bijvoorbeeld dat er verwacht wordt dat op ongeveer 50 van de 100 plekken (i.e. 50% van de oppervlakte) de drempelwaarde is overschreden.



Figuur 4.4

Landgebruik in Drenthe. Wisselbouw is hier gedefinieerd als akkerbouw tijdelijk afgewisseld met grassland.



Figuur 4.5

Indicatie van de gebieden met de relatief hoogste verdichtingrisico's door combinatie van de figuren 4.3 en 4.4. De aanduidingen Laag, Middel en Hoog zijn verwoord in tabel 4.1.

Uit figuur 4.3 blijkt dat er een overschrijding van de drempelwaarde verwacht wordt in minder dan de helft van de oppervlakte. Uit het landelijk onderzoek blijkt echter ook dat de *gevoeligheid* voor verdichting hoog is en daarom de maximaal toelaatbare wiellasten laag. De gevoeligheid is gebaseerd op textuur en kleigehalte, waarbij een aantal klassen zijn gedefinieerd (bijlage 7). De gevoeligheid zegt iets over het gemak waarmee een grond is te verdichten, maar nog niets over de dichtheid. Door werkelijk gemeten dichtheden in de rest van Nederland te vergelijken met die van soortgelijke gronden in Drenthe kan wel een uitspraak over de verwachte dichtheid worden gedaan (zie ook punt 4 van paragraaf 3.1). Feitelijk wordt dan getoetst aan de drempelwaarde van figuur 4.1. In deze figuur zijn statistische technieken gebruikt die metingen in ruimte en tijd doorvertalen naar gebieden die niet zijn bemeten en waarvan geen tijdreeksen bekend zijn. Hiermee is dan toch een verwachting voor de toekomst te maken en is een vlakdekkende kaart te maken ondanks dat niet alle plekken zijn bemeten. Aangezien de machines die in de landbouw gebruikt worden tegenwoordig steeds zwaarder worden en de figuur gebaseerd is op een overwegend aantal oude metingen (>20 jaar geleden) aangevuld met een gering aantal recente metingen, wordt de ernst van de situatie in figuur 4.3 wellicht onderschat.

In tabel 4.1 is aangegeven hoe de relatieve verdichtingrisico's zijn verdeeld over de soorten landgebruik en het verwachte aantal overschrijdingen van de drempelwaarde. Een weging van hoog naar laag voor wat betreft het landgebruik is daarbij toegepast op achtereenvolgens permanente akkerbouw, wisselbouw, grasland en overig. De resulterende aanduidingen hoog, midden en laag zijn relatief geschaald. Gronden in gebruik voor akkerbouw hebben vanwege het gebruik van bijvoorbeeld zware oogstmachines over het algemeen een hogere kans om verdicht te raken dan grasland. De aanduidingen geven geen absolute kans aan.

Tabel 4.1

Verdeling van de relatieve verdichtingrisico's zoals weergegeven in figuur 4.5, rekening houdend met het landgebruik en het verwachte aantal overschrijdingen van de drempelwaarde. De aanduidingen geven geen absolute kans aan.

Aantal overschrijdingen volgens figuur 4.3	Landgebruik volgens figuur 4.4	Indicatie van de verdichtingrisico's volgens figuur 4.5
45-55	Akkerbouw	Hoog
25-45		
45-55	Wisselbouw	
25-45	Wisselbouw	Middel
10-25	Akkerbouw	
45-55	Grasland	
Overig	Overig	Laag

In figuur 4.5 zijn de figuren 4.3 en 4.4 gecombineerd. Daaruit is af te leiden welke gebieden het meeste risico lopen gezien het bodemtype in relatie tot het landgebruik. De gebieden met de hoogste risico's verdienen bij een eventuele meetcampagne naar de werkelijke ondergrondverdichting de eerste aandacht. Het is geen absolute maat van de verdichtingrisico's vanwege het ontbreken van voldoende meetgegevens in ruimte en tijd.

4.3 Veenkoloniaal bouwplan

Een veenkolonie is een nederzetting die is ontstaan doordat arbeiders naar een gebied trokken waar hoogveen werd afgegraven voor de productie van turf. Door de aard van de ontginning werden in de jongere, laat 18^e en 19^e eeuwse veenontginningen de nederzettingen langs het hoofdkanaal gesticht. Er zijn echter ook veenkoloniën die niet zijn ontstaan langs een kanaal, maar langs een weg. Hoewel veenkoloniën in letterlijke zin de nederzettingen zelf zijn, duidt men er gewoonlijk het gehele Drents-Groningse veenkoloniale gebied mee aan waarin de nederzettingen zich bevinden. Veenkoloniale 'gronden' komen daarom, behalve in de afgegraven hoogveengebieden zelf, ook buiten deze gebieden voor. Dit kan voor verwarring zorgen.

Een veenkoloniale grond, ook wel dalgrond genoemd, is in de strikte betekenis van het woord een kunstmatige bodem die gemaakt is na afgraving van het hoogveen in de veenkoloniën. De aan het begin van de afgraving tijdelijk aan de kant gezette bovenste laag van het veen werd naderhand weer door de bovengrond van het overgebleven schrale dekzand gemengd. Bij een veenkoloniale grond is er veel variatie in de bodemopbouw. Een donkere bovenlaag, soms met een tussenlaag van veen, op dekzand met een veldpodzol is het overheersende type. De gronden zijn rijk aan zwarte organische stof die snel versmeert met een slechte structuur. De slechte structuur uit zich in de gevoeligheid voor verstuiwen in het voorjaar. Bij een hoger organischestofgehalte is de draagkracht minder goed, maar is de gevoeligheid voor ondergrondverdichting in principe geringer. Echter in geval van een minerale dekzandondergrond neigt deze toch tot verdichting.

Een traditioneel Veenkoloniaal Bouwplan is een bouwplan waarbij de 1:2 frequentie zetmeelaardappelen afgewisseld wordt met een 1:4 frequentie graan en suikerbieten. In vier jaar tijd worden dus twee keer zetmeelaardappelen geteeld tegen één keer graan en één keer suikerbieten. Het traditionele veenkoloniale bouwplan wordt behalve in de veenkoloniën ook buiten deze gebieden uitgeoefend.

Op gronden waarop een veenkoloniaal bouwplan wordt uitgeoefend hoefden tot voor kort dierlijke meststoffen, zuiveringsslib of een mengsel met deze meststoffen niet emissiearm te worden aangewend. Daarmee vormde het een uitzondering op de verplichting tot emissiearme aanwending zoals genoemd in het Besluit Gebruik Meststoffen.

In de veenkoloniën worden echter ook regelmatig bloembollen of gras geteeld, hetgeen een verbijzondering van het oorspronkelijke veenkoloniale bouwplan is.

Tot 1 januari 2010

In het kader van de mestwetgeving is een veenkoloniaal bouwplan daarom strikter omschreven: Een veenkoloniaal bouwplan is een bouwplan met de teelt van fabrieksaardappelen ten behoeve van de zetmeelindustrie met een teeltfrequentie van tenminste eenmaal per drie jaar, met dien verstande dat geen sprake is van een veenkoloniaal bouwplan in de periode dat op de desbetreffende grond bloembollen worden geteeld of gras wordt geteeld.

Met deze definitie werd voorkomen dat de uitzonderingssituatie van het niet emissiearm aanwenden van dierlijke mest op veenkoloniale gronden ook bij het verbouwen van gras of bloembollen werd gebruikt. De uitzondering op de verplichting tot emissiearme aanwending voor het veenkoloniaal bouwplan is ingevoerd, omdat op deze gronden het aanwenden van drijfmest of van zuiveringsslib in bepaalde gevallen noodzakelijk was om verstuiwing tegen te gaan.

Voor het veenkoloniaal bouwplan was de stuifbestrijding door middel van het aanwenden van dierlijke mest dus toegestaan. In de nota van toelichting bij het Besluit Gebruik Meststoffen (Stb. 1987, 114) is aangegeven dat het bij een veenkoloniaal bouwplan gaat om de stuifgevoelige gronden die in de Veenkoloniën en enkele daaraan grenzende zandgebieden liggen. Degene die een veenkoloniaal bouwplan uitoefent moest dat desge-

vraagd kunnen aantonen, bijvoorbeeld door het tonen van schriftelijke teelt- en leveringsovereenkomsten die waren afgesloten met de zetmeelindustrie. De stuifbestrijding bij akkerbouw werd slechts toegepast in de jaren dat daadwerkelijk een verstuiwing van de zandgronden dreigde, zoals bij harde wind in een droge periode. Bij de reguliere 'permanente' bloembollenteelt vindt de stuifbestrijding structureel plaats. Het bovengenoemde besluit voorziet erin dat de bloembollenteelt uitdrukkelijk werd uitgezonderd van de omschrijving van veenkoloniaal bouwplan. Als op grond waarop ten minste eenmaal per drie jaar fabrieksaardappelen ten behoeve van de zetmeelindustrie werd geteeld, op een gegeven moment bloembollenteelt plaatsvond, moest op dat moment de stuifbestrijding door middel van cellulose plaatsvinden. Als in de periode dat op het betreffende perceel geen bloembollenteelt plaatsvond stuifbestrijding noodzakelijk was, kon hiervoor zoals gezegd toch gebruik worden gemaakt van dierlijke mest.

Vanaf 1 januari 2010

Echter, bij besluit van 9 november 2009 (Besluit 2009, 477) is het in gebieden met een veenkoloniaal bouwplan niet langer meer toegestaan drijfmest, zuiveringsslib of een mengsel met deze meststoffen ter bestrijding van stuif bovengronds toe te dienen. De redenering hiervoor is dat er inmiddels verschillende alternatieve bestrijdingsmethoden beschikbaar zijn, zoals het afdekken met een papiercellulose-emulsie en de inzaai van zomergerst. Toepassing van stuifbestrijding kan nodig zijn bij de teelt van bieten, die maximaal een derde deel uitmaken van het veenkoloniale bouwplan. Daarbij is het ook niet altijd nodig het gehele perceel te behandelen. De kosten van genoemde bestrijdingsmethoden bedragen circa € 100 tot € 200 per hectare. De maatregel is ingegaan per 1 januari 2010.

De wetgeving ten aanzien van uitspoeling van nutriënten en het aanwenden van dierlijke mest zijn soms strijdig met de doelen die nagestreefd worden ten aanzien van het voorkomen van ondergrondverdichting. De nieuwe wetgeving is erop gericht de voedingsstoffen toe te dienen op het moment dat het gewas deze ook werkelijk kan opnemen. Dit is voornamelijk in het begin van de groei. In dat geval namelijk zal de benutting optimaal en daarmee de uitspoeling minimaal zijn. Deze zienswijze heeft erin geresulteerd dat de toegestane uitrijperiode is bekort. Voor de teler betekent het dat hij de mest in het voorjaar direct voorafgaand aan de zaai zal moeten uitrijden. In deze periode is de bodem echter nog tamelijk nat en daarmee gevoelig voor verdichting.

Het Besluit Gebruik Meststoffen heeft tot doel de belasting van de bodem en het water door fosfaat- en stikstofverbindingen afkomstig uit dierlijke meststoffen, zuiveringsslib, compost, overige organische meststoffen en stikstofkunstmest terug te dringen. Echter dierlijke meststoffen zorgen voor een hoger organisch stofgehalte in de bodem waardoor de veerkracht van de bodem stijgt en de kans op verdichting vermindert.

Om uitspoeling van stikstof tegen te gaan is het op grond van artikel 4a in het Besluit Gebruik Meststoffen verboden op bouwland en grasland stikstofkunstmest te gebruiken in de periode van 16 september tot en met 31 januari. Er bestaat een uitzondering op dit verbod voor de teelt van vollegrondsgroenten. Verder mag voor de teelt van enkele wintergewassen hiervan beperkt worden afgeweken om te voorzien in de stikstofbehoefte na 15 september. Onderzoek heeft uitgewezen dat een beperkte gift stikstofkunstmest tussen 16 september en 1 februari vanuit landbouwkundig oogpunt ook doelmatig is voor een optimale ontwikkeling van winterkoolzaad, voor tulpen en voor de teelt van zaad van roodzwenkgras en veldbeemdgras vanaf het tweede jaar. Deze gewassen nemen de stikstof ook daadwerkelijk op tijdens deze periode. Omdat het milieukundig nadeel van een stikstofgift in de voorheen verboden periode gering is in verhouding tot het belang voor de telers, is in het Besluit Gebruik Meststoffen voorzien in de mogelijkheid om stikstofkunstmest te gebruiken op deze gewassen. De uitzondering voor winterkoolzaad en voor beide soorten graszaad geldt voor de periode van 16 september tot en met 15 oktober en voor de tulp van 16 januari tot en met 31 januari. Kunstmest heeft een hoge doelmatigheid van voedingsstoffen waardoor het gewas minder behoefte heeft aan een diepere beworteling, hetgeen ongunstig is voor een goede bodemstructuur. Het gebruik van kunstmest in plaats van organische mest veroorzaakt verder een afname van toevoegingen van organische stof. Voor bovengenoemde wintergewassen is het gebruik van organische mest niet toegestaan.

Als gevolg hiervan kon bij de aanplant van plantsoen- en fruitbomen, die veelal in het winterhalfjaar op zand- en lössgronden plaats vindt geen basisbemesting met vaste dierlijke meststoffen worden gegeven. Om hieraan tegemoet te komen biedt het Besluit Gebruik Meststoffen nu bij uitzondering de mogelijkheid om voor deze teelt op zand- en lössgronden vaste mest toe te dienen. Gelet op het beperkte areaal aanplant en het beperkte gehalte minerale stikstof in vaste mest, is het milieurisico gering. Deze maatregel is een stap in de goede richting voor wat betreft het voorkomen van ondergrondverdichting.

In het traditionele veenkoloniale bouwplan wordt te weinig effectieve organische stof (EOS) aangevoerd om het organischestofgehalte van de bodem te handhaven (Wijnholds et. al., 2008). Onder EOS wordt verstaan de hoeveelheid organische stof die na een jaar nog over is van de totaal aangevoerde hoeveelheid organische stof (OS). Bij een grote verhouding EOS/OS is er gedurende een jaar weinig afgebroken en voor het gewas beschikbaar gekomen, maar is de opbouw van het organisch stofgehalte in de bodem wel hoog. Wanneer de gewasresten op bouwplanniveau te weinig EOS leveren is extra aanvoer nodig. Door het toevoeren van mest kan de EOS-aanvoer in het bouwplan stijgen tot boven de gewenste 2000 kg EOS per ha. Daarmee wordt voorkomen dat het organisch stofgehalte daalt en de kans op bodemverdichting van de bouwvoor toeneemt.

Met organische stof worden ook mineralen aangevoerd. Met varkensmest wordt bijvoorbeeld veel fosfaat aangevoerd. Hoge gehalten aan mineralen verlagen de bemestingskosten, maar verhogen het risico van uitspoeling. Vooral bij najaarstoepassing van mest op kleigrond kan veel stikstof uitspoelen. In het kader van de Meststoffenwet wordt bij de normering onderscheid gemaakt in zuiveringsslib, havenslib, compost, dierlijke mest of andere soortgelijke voor bemesting bruikbare producten.

Op de website www.kennisakker.nl/kenniscentrum/document/kennis-en-keuzes-bij-het-organische-stofbeheer#6 worden handvatten gegeven voor een effectief organisch stofbeheer en mogelijkheden om het organisch stofgehalte in de bodem te verhogen. De wijze waarop dit op verantwoorde wijze is uit te voeren verschilt sterk per bedrijf en is hier daarom niet verder uitgewerkt. Op de website www.boerderij.nl/Rundveehouderij/Mest/Wet-en-regelgeving.htm#meststoffenwet_2006 is de Rekenmodule Mestbeleid van het LNV-loket opgenomen waarmee de gebruiksnorm van een bedrijf berekend kan worden.

De voor ondergrondverdichting drie meest risicovolle teelten in het veenkoloniale gebied zijn aardappelen, bieten en snijmaïs. Bij elk van de drie teelten worden zware machines ingezet vooral bij het rooien van de gewassen.

Pootaardappelen worden voor een normale teelt in april in de grond gebracht met relatief lichte machines en onder relatief droge en dus gunstige bodemomstandigheden. Zetmeel- of fabrieksaardappelen worden vroeg of laat in het najaar geoogst afhankelijk van het ras. Door een vroege oogst kan ondergrondverdichting worden verminderd doordat de drogere bodem een grotere draagkracht bezit. Het gebruik van een aardappelrooier op flexibele rupsbanden is mogelijk om ondergrondverdichting te verkleinen. Het verlagen van de bodemdruk met flexibele rupsbanden resulteert echter vaak in het vergroten van de capaciteit door het gebruik van grotere en zwaardere machines (figuur 4.6).



Figuur 4.6

Grimme 4 rijige 15 tons aardappelbunkerrooier op rupsen.

Het zaaien van **bieten** gebeurt in de lente. In de herfst (vanaf september) worden de volgroeide bieten machinaal gerooid met een bietenrooier (figuur 4.7). De grootste zelfrijdende bietenrooier is een machine die twaalf bietenrijen in één keer kan rooien. De meest gangbare machine is momenteel echter nog steeds de zelfrijdende zesrijige bietenrooier. Aan de voorkant van de machine zit een frees, die het blad van de bieten verwijdert. Daarachter zit een kopmes dat de kop van de biet afsnijdt. Vervolgens worden door lichters de bieten uit de grond gelicht en op een transportband gebracht. Via de transportband komen de bieten eerst op een zogenaamde zon te liggen. Dit is een ronddraaiend verticaal liggend wiel met spijlen dat de grond van de bieten zoveel mogelijk verwijdert. Vanaf de zon gaan de bieten naar een voorraadbak.



Figuur 4.7

Zesrijige zelfrijdende bietenrooier met voorraadbunker.

Een volle bak bevat ongeveer 17.000 kg en wordt gelost in een aanhangwagen die getrokken wordt door een tractor. Deze tractor brengt de bieten naar een tijdelijk opslag. Het rooien van bieten is dus net als bij het oogsten van aardappelen een risicovolle gelegenheid ten aanzien van het aspect ondergrondverdichting. Ook hier geldt dat het vervroegen van de oogst een belangrijk hulpmiddel is in het verkleinen van de schade door verdichting. Het kleine verlies in opbrengst dat wordt veroorzaakt door het vroeg oogsten van fabrieks-aardappelen en suikerbieten wordt gecompenseerd door subsidies die worden verstrekt voor vroege partijen, maar deze compensatie bestaat niet voor de meeste andere gewassen.

De normale Nederlandse zesrijige zelfrijdende bietenrooiers hebben een bunkerlaadvermogen tussen 9 en 27 ton en een totaal gewicht (vol) tussen 28 en 46 ton (Tijink, 2005). De rooimachines zijn voorzien van vier, vijf of zes banden. Belangrijk voor het verdichtingpotentieel van bietenrooimachines is de verdeling van het totale gewicht over de gemonteerde banden. Sommige rooimachines vertonen grote verschillen tussen de last per band en bij andere is de last goed verdeeld over alle wielen. Eveneens belangrijk voor het verdichtingpotentieel is dat bij sommige rooimachines het land slechts één keer met een band bereiden wordt (hondegang), wat het verdichtingsrisico vermindert. Afhankelijk van de bunkerinhoud, het aantal wielen en het ontwerp (gewichtsverdeling over de wielen) varieert de maximale wiellast tussen 9 en 13 ton (Van der Linden en Vandergeten, 1999). De breedte van de banden op zesrijige bunkerrooiers varieert van 62 tot 105 cm. Afhankelijk van het machineontwerp varieert de aanbevolen bandenspanning (bij cyclische belasting in het veld) voor het wiel met maximale last tussen 140 en 290 kPa (Tijink, 2005). De hoogste wiellasten treden op bij vierwielige rooimachines die een relatief grote bunkerinhoud hebben. Recentelijk zijn negenrijige en twaalfrijige bunkerrooiers ontwikkeld. De benodigde gegevens om het verdichtingpotentieel van deze rooimachines te beoordelen zijn nog niet gepubliceerd. De oogstomstandigheden voor suikerbieten zijn vaak nat, wat een negatieve invloed heeft op het verdichtingsrisico.

Het IRS neemt waar dat de opbrengst van suikerbieten varieert tussen de -30 en +10% (www.spade.nl/spadewijzer-resultaat.asp?KenniskbankID=307) ten opzichte van het gemiddelde als gevolg van een slechte of goede bodemstructuur. De opbrengst is vooral afhankelijk van de zaaidatum, de hoeveelheid zonnestraling, de temperatuur, maar ook de bodemgesteldheid en de daarmee samenhangende vochtvoorziening. Zowel te veel als te weinig vocht kan van invloed zijn op de snelheid van bereiken van de groeistadia. Met het SUMO-model (SUIkerbieten MOdel) van het IRS kan vrij nauwkeurig de opbrengst worden voorspeld.

Mais wordt in de regel geoogst tussen half september en half oktober als de korrel hard deegrijp is. In het algemeen wordt het gehele gewas met blad, stengel en kolven verhakseld met een maishakselaar en ingekuild. Bij de oogst van mais is het een tendens dat ook de maishakselaars een steeds grotere capaciteit krijgen, maar daarmee ook groter en zwaarder worden, waardoor ze een steeds grotere bedreiging vormen voor de ondergrondverdichting. Ook de meerrijdende vrachtauto zorgt voor grote wiellasten. Moderne hakselaars zijn vele malen groter en zwaarder dan die in figuur 4.8 is weergegeven.



Figuur 4.8
Maïshakselaar.

Het motorvermogen van veldhakselaars varieert tussen 200 en 400 kW (Weissbach, 2002). Het gewicht van de basismachine neemt slechts weinig toe met de toename van het motorvermogen. Het maïsvoorzetstuk voegt echter veel gewicht toe aan de voorzijde van de machine dat moet worden geneutraliseerd met eveneens extra gewicht aan de achterzijde van de machine. Om goed bestuurbaar te zijn, moet 30% van het machinegewicht op de achteras rusten. Op die manier kan het totale machinegewicht 18 ton bedragen en de voorwielbelasting 6.3 ton. Ook voor veldhakselaars is de totale machinebreedte de beperkende factor voor de breedte van de banden die kunnen worden gemonteerd. Meestal worden 650/75R32-banden gebruikt, wat resulteert in een totale machinebreedte van 3 m. De minimaal vereiste bandenspanning van een veldhakselaar met maïsvoorzetstuk is daarbij ongeveer 180 kPa in het veld en 290 kPa op de weg.

Als de wielbelasting bij zandgronden meer dan 30 kPa bedraagt en bij kleigronden meer dan 40 kPa dan is het waarschijnlijk dat ondergrondverdichting op zal treden. Deze wiellasten zijn laag voor de moderne landbouw. In de praktijk komen wiellasten voor van 80 tot 120 kN. Het moet worden opgemerkt dat wiellasten dynamisch van karakter zijn, waarbij de bodemdruk in één tot drie seconden tot een maximum oploopt en weer nul wordt. Daardoor houdt de maximale last minder dan een seconde stand. De hierboven aangehaalde wielbelasting van 30 en 40 kPa, waarbij het waarschijnlijk is dat ondergrondverdichting op zal treden, heeft betrekking op trage belastingen. Het is waarschijnlijk dat de ondergrond bij korte belastingen hogere bodemdrukken kan weerstaan dan bij deze semistationaire toestanden. Dit neemt niet weg dat hoge wiellasten tot 120 kN zonder twijfel ondergrondverdichting zullen veroorzaken in de meeste gronden.

Een juiste **vruchtwisseling** draagt bij aan behoud van de bodemkwaliteit (Van den Akker et al., 2006). De rooigewassen en maaigewassen worden om en om geteeld om een jaar met zware grondverstoring af te wisselen met een jaar met lichte grondverstoring. In het jaar met lichte grondverstoring kan de bodemstructuur zich herstellen. Vrchtwisseling met diepwortelende gewassen en toepassing van groenbemesting is gunstig voor de bodemstructuur en voorkomt verlies van voedingsstoffen aan het milieu. In het traditionele veenkoloniale bouwplan zijn zowel aardappelen als bieten als maïs gewassen die een hoge mate van ondergrondverdichting zullen veroorzaken. Indien in hogere mate gras wordt geteeld, zijn de natuurlijke herstel-mogelijkheden groter.

Beperking van de frequentie van gewassen uit dezelfde botanische familie voorkomt de ontwikkeling van grondgebonden schadelijke organismen en ziekten. Onderzoek door Alblas et al. (1994) bewees dat diepwortelende gewassen de verdichting van compacte lagen in het bodemprofiel verminderden. Mais geteeld na luzerne gaf hogere opbrengsten dan wanneer maïs werd geteeld na maïs, waarschijnlijk als gevolg van de diepere beworteling en hogere worteldichtheid gemeten in het maïsveld na luzerne dan in het doorlopend met maïs bebouwde veld. Recente resultaten van een project door Van Eekeren et al. (2004) tonen aan dat de bodemstructuur in de teellaag onder gras na maïs was verbeterd terwijl de hoeveelheid macroporiën in de ondergrond nog niet was veranderd. Macroporositeit neemt toe met de toenemende leeftijd van de grasbedekking, hogere pH en toepassing van vaste mest.

5 Maatregelen

Dit hoofdstuk is een weergave van een korte literatuurstudie naar de mogelijke maatregelen ter voorkoming dan wel bestrijding van verdichte gronden en hun effectiviteit. Bij het bepalen van mogelijke maatregelen is vooral gelet op de effecten die de maatregelen hebben op de landbouw en het milieu. De aangegeven maatregelen zijn algemeen van karakter, maar ook toepasbaar op Drenthe.

5.1 Ontstaan van verdichting

Verdichting van de ondergrond is een bekend probleem bij zandgronden en lichte zavelgronden (Van den Akker et al., 2006). 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. De organische stof maakt deze gronden elastischer en vermindert de weerstand tegen beworteling.

Oorspronkelijk hadden vele zandgronden natuurlijk verdichte ondergronden, die werden losgemaakt om ze geschikt 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 duidelijk aangetoond voor lichte zavelgronden in Nederland. Het eenmaal woelen van deze gronden heeft ertoe geleid dat nu elke drie tot vier jaar moet worden gewoeld.

De meeste landbouwondergronden in Nederland, met inbegrip van de kleigronden, hebben een ploegzool. Sommige van deze ploegzolen dateren van vele eeuwen geleden en kwamen tot stand door de ploeg en de hoeven van het paard, dat tijdens het ploegen in de open voor direct op de ondergrond liep. Na de introductie van de tractor nam de snelheid waarmee ploegzolen ontstonden nog toe, aangezien een voorwiel en een achterwiel van de tractor in de open voor loopt. Of deze ploegzolen als schadelijk moeten worden gezien, hangt af van de mate waarin de indringing van wortels, water en lucht in de ondergrond wordt belemmerd.

Verdichting en de resulterende structuurbederf kan een zeer negatieve invloed hebben op twee belangrijke functies van de bodem die een hoge prioriteit hebben bij het ministerie van Landbouw Natuurbeheer en Voedselveiligheid, namelijk gewasproductie en opslag van water in de grond. Bodemverdichting heeft een grote invloed op de biodiversiteit. Verdichte gronden met weinig macro- en mesoporiën zijn een vijandige omgeving voor bodemflora en -fauna. Dit wordt verergerd als deze verdichte bodem nat en anaëroob wordt. De verminderde waterinfiltratiecapaciteit van verdichte gronden kan een verhoogd risico inhouden voor vervuiling van oppervlaktewater met mest, voedingsstoffen en landbouwchemicaliën. Ook neemt het risico van erosie en overstromingen toe. Het is echter nog niet duidelijk hoe ernstig de situatie is, aangezien informatie ontbreekt over de ernst en de verspreiding van het verdichtingsprobleem.

De praktijk op de boerderij richt zich primair op economische duurzaamheid en economische motivaties voor de korte termijn (Leidraad Bodembescherming, onderdeel 5720, 2006). Dit resulteert in grotere boerderijen en toenemende intensificatie. Grotere boerderijen resulteren in intensificatie als land wordt gekocht en de

kosten moeten worden gedekt. Als de boerderij groter wordt door land te pachten, treedt geen intensificatie op. Intensificatie resulteert in een toename van rooigewassen en een daarmee gepaard gaande afname in maaigewassen (bijvoorbeeld granen) en groenbemesting. Daarnaast wordt de oogst van deze rooigewassen vertraagd als gevolg van veranderingen in genetische eigenschappen, toepassingsregimes voor kunstmest en gewasbeschermingstechnieken.

Bodemverdichting veroorzaakt afnemende bodemproductiviteit door verdroging, plasvorming, stikstofverlies en kwetsbaarheid voor ziekten, plagen en schimmels. Boeren proberen deze afnemende bodemproductiviteit tegen te gaan door meer irrigatie, uitbreiding van drainagesystemen en toepassing van kunstmest/drijfmest en bestrijdingsmiddelen. Steeds meer boeren realiseren zich dat dit een doodlopende weg is. Vele (kleine) boerderijen worden opgeheven, gedeeltelijk als gevolg van de afnemende bodemkwaliteit en vele resterende boeren zoeken naar innovaties om de economische levensvatbaarheid evenals de bodemkwaliteit te bewaren.

Hoewel meer en meer boeren zich bewust schijnen te worden van het belang van bodemkwaliteit, toont de meerderheid slechts in beperkte mate interesse in het behoud ervan. Bewustmaking en het wekken van interesse is van groot belang. Eenvoudige methoden om achteruitgang van bodemstructuur te vermijden zijn: lagere bandenspanning, de juiste keuze van machines, de juiste timing van veldwerk en het vermijden van slechte vruchtwisseling (zoals voortdurend maïs).

In Nederland is op dit moment geen wetgeving geformuleerd om bodemverdichting te voorkomen. Het Nederlandse beleid met betrekking tot bodemkwaliteit is voornamelijk geformuleerd in termen van de chemische bodemkwaliteit in relatie tot bodem- of oppervlaktewatervervuiling. Nieuw Nederlands beleid met betrekking tot bodemkwaliteit is onderweg en wordt beschreven in de 'Beleidsbrief Bodem'. Duurzaam gebruik van de bodem en (toekomstige) risicogeoriënteerde regels voor gebruikmaking van de bodem zijn de belangrijkste pijlers voor het beoogde beleid. Hoewel bovengrondverdichting geen belangrijk toekomstig risico vormt omdat de gevolgen omkeerbaar zijn, zou ondergrondverdichting heel goed onderdeel van het nieuwe beleid kunnen worden vanwege het risico van verminderde geschiktheid voor toekomstig agrarisch gebruik.

5.2 Voorkoming en herstel van verdichting

Het beheer van de bodem omvat alle grondgebonden veldbewerkingen die nodig zijn binnen de gewascyclus, waterbeheersmaatregelen (drainage) en maatregelen die van invloed zijn op het gehalte aan organische stof en de pH van de bodem. Tot op zekere hoogte is het weer een onzekere factor in bodembeheer (Van den Akker et al., 2006).

De huidige akkerbouw en groenteteelt in Nederland wordt gekenmerkt door een praktisch geheel gemechaniseerde cyclus van risterploegen, zaaibedbereiding, gewasbescherming en oogst. Wortel- en knolgewassen, zoals zetmeelaardappelen, suikerbieten en wortelen hebben een relatief belangrijk aandeel in de gewasrotatie.

Het Besluit Gebruik Meststoffen (artikel 8a) verplicht om na de teelt van maïs op zand- en lössgronden een van de aangeduide vanggewassen te verbouwen. Daarnaast moeten op grond van artikel 4b van het Besluit Gebruik Meststoffen vanggewassen worden geteeld bij het scheuren van grasland op zand- en lössgronden. In het algemeen worden, buiten de genoemde verplichtingen, nog maar beperkt groenbemesters of vanggewassen verbouwd.

Ploegen is een van de kritische bewerkingen voor ondergrondverdichting. Ploegen gebeurt gewoonlijk onder relatief natte bodemomstandigheden, een voorwiel en achterwiel van de tractor loopt in de ploegvoor op de ondergrond en het trekken van de ploeg vereist zowel een hoge wiellast als een hoog koppel bij het

trekkerachterwiel dat in de voor loopt. Ploegloze teelt, minder diep ploegen en bovenover ploegen (wiel niet in de ploegvoor) zijn mogelijke manieren om het verdichtingspotentieel te verminderen, maar worden niet op grote schaal toegepast. Bij de oogst van wortel- en knolgewassen moeten grote hoeveelheden product over het veld worden getransporteerd. Om economische redenen is er sprake van grootschalige activiteiten en de wiellasten zijn vaak relatief hoog. In sommige gevallen vindt de oogst laat in het najaar plaats (suikerbieten, wortelen), als de grond nat is. Met de huidige apparatuur is oogsten onder vrijwel alle bodemgesteldheden mogelijk. Hoewel de feitelijke effecten van oogstmachines op de ondergrond niet voldoende zijn onderzocht, kan de oogst van wortel- en knolgewassen worden beschouwd als een van de kritische activiteiten in termen van ondergrondverdichting. Bij de oogst van graan en voedergewassen zijn de wiellasten hoog en zijn de mogelijkheden voor vermindering van de bandspanning beperkter dan bij de oogstmachines voor rooigewassen. Echter, de oogstomstandigheden zijn vanwege het drogere weer in het algemeen gunstiger om ondergrondverdichting te voorkomen.

Op grasland is de toediening van mest de meest kritische activiteit voor bodemverdichting. Het gewoonlijk hogere gehalte aan organische stof in grasland en de overvloed aan wortels kan echter helpen om verdichting te voorkomen in de bovengrond, maar dit gaat niet op voor de ondergrond.

Een normale grondbewerking is er op gericht om goede bewortelingsmogelijkheden voor het gewas te krijgen (www.spade.nl/spadewijzer-resultaat.asp?KenniskbankID=136). Een goed waterdoorlatende, niet verslachte grond voldoet aan de eisen voor een goede beworteling. Met goed doorlatende gronden wordt ook bedoeld dat geen storende lagen aanwezig zijn. Weten tot welke omstandigheden de grond te bewerken is zonder die te verdichten is de belangrijkste manier om verdichtingen te voorkomen. Voorkómen van verdichting is natuurlijk beter dan herstel. Dat betekent dat vooral gezocht moet worden naar manieren om de druk op de grond te beperken en deze aan te passen aan de actuele 'sterkte' van de grond. In het vroege (natte) voorjaar kan het bijvoorbeeld nodig zijn om de bandenspanning te verlagen tot 0,6 bar. Een juiste keuze van de banden (breed) in combinatie met een lage druk in combinatie met het vermijden van het berijden op natte grond zijn de meest effectieve manieren om ondergrondverdichting te voorkomen. Een bandendruk in het veld van meer dan 0,8 tot 1 bar is daarbij niet wenselijk. Om transport over de weg wel weer mogelijk te maken wordt geadviseerd om een zogenaamd drukwisselsysteem te gebruiken. Daarbij is het raadzaam om te kiezen voor meesturende assen van werktuigen. Zware machines moeten uiteraard zoveel mogelijk worden vermeden.

Tabel 5.1

Maximaal toegestane lasten (ton) voor landbouwmachines bij het rijden op de openbare weg in Nederland (Van de Akker et al. 2006).

<i>Kenmerk</i>	<i>Tractoren</i>	<i>Aanhangers</i>	<i>Zelf-rijdende machines</i>	<i>Machine-combinaties</i>
Wiellast		5	6	
Aslast	10			
Voertuiggewicht (op banden)	14		50	50
Voertuiggewicht (op rupsbanden)			10	

In de Leidraad Bodembescherming, onderdeel 5720 (Van den Akker et al., 2006) is een overzicht gegeven van preventieve en herstellende maatregelen en hun effecten. Hieronder zijn de belangrijkste resultaten weergegeven.

In tabel 5.2 noemen De Boer et al. (2004) een reeks maatregelen om bodemverdichting te voorkomen of te beperken, waarbij een onderscheid wordt gemaakt tussen de vorming van een ploegzool, verdichting van de bovengrond (0-0,3 m) en verdichting van de ondergrond (> 0,3 m). Dit verschil wordt gemaakt omdat verdichting van de bovengrond en ploegzool relatief gemakkelijk kunnen worden opgelost, terwijl het veel moeilijker is om een oplossing te vinden voor verdichting van de ondergrond. Een ploegzool die herhaaldelijk wordt verdicht heeft zeer slechte fysieke bodemeigenschappen en is daarom apart beschouwd.

Effecten van waterbeheer:

Verbeterde drainage resulteert in een drogere bodem met een beter draagvermogen, waardoor een langere periode ontstaat waarin de bodem kan worden gecultiveerd en waarmee opbrengsten kunnen worden verhoogd. Verhoging van de grondwaterstand kan een omgekeerd effect hebben als drainage en het draagvermogen verminderen. Verhoging van de grondwaterstand bevordert de denitrificatie en de oplosbaarheid van fosfaat.

Het optimaliseren van waterbeheer om de gewasproductie te verbeteren zal geld kosten, maar moet op de lange duur positieve effecten hebben. Optimaliseren van waterbeheer op boerderijniveau is niet altijd mogelijk, aangezien boeren zeer afhankelijk zijn van hun waterschappen. De precieze manier waarop waterbeheer kan worden geoptimaliseerd, verschilt per locatie en wat 'optimaal waterbeheer' is, hangt af van het perspectief van de verschillende belanghebbenden.

Vruchtwisseling

De juiste vruchtwisseling kan verslechtering van de bodemstructuur, erosie en afname van organische stof in de bodem voorkomen.

Mogelijkheden en onmogelijkheden van gewassen en vruchtwisseling:

1. Elk gewas heeft specifieke cultivatie-eisen. Deze randvoorwaarde in combinatie met de beschikbare mankracht kunnen worden gebruikt om alleen zware mechanische bewerkingen uit te voeren in perioden waarin de minste schade aan de bodem wordt toegebracht.
2. Gewassen zoals wintertarwe, luzerne en koolzaad verbeteren het gehalte organische stof in de bodem en daarmee de bodemstructuur en gaan erosie tegen. Deze gewassen zijn echter economisch niet interessant voor boeren, hoewel dit nadeel met subsidies kan worden weggenomen, bijvoorbeeld in het kader van wederzijdse naleving (Engels: Cross Compliance).
3. Doorlopende maïsbouw vervangen door vruchtwisseling met gras zorgt ervoor dat de graszode regelmatig in de bodem wordt geploegd. Dit kost meer en heeft negatieve neveneffecten (verlies van nitraten). Op basis van de door de Europese Commissie aan Nederland verleende derogatie (het mogen afwijken) van de Nitraatrichtlijn voor bedrijven met een areaal van meer dan 70% grasland bestemd voor veevoeder aan graasvee zal het areaal grasland waarschijnlijk toenemen ten koste van areaal maïs. De derogatie moet jaarlijks individueel worden aangevraagd bij de Dienst Regelingen van het ministerie van LNV. Dit kan resulteren in een toename van gras ten opzichte van maïs. In dat geval hoeft een vruchtwisseling van maïs-gras niet ten nadele te gaan van doorlopende weidegrond.
4. Als land wordt gepacht of door boeren onderling wordt verkaveld, kan een goede vruchtwisseling plaatsvinden, zelfs als boeren hun specialisatie behouden.
5. Goede vruchtwisseling is belangrijk op alle bodemtypen, maar elke wisseling is specifiek voor de situatie.

Een vruchtwisseling moet zijn ontworpen om bodemerosie te voorkomen, het gehalte organische stof in de bodem te vergroten en de bodemstructuur te verbeteren. Enkele praktische regels om dit te realiseren zijn: een minimum van 25% diepwortelende maaigewassen (bijvoorbeeld granen, luzerne en koolzaad), een maximum van 30% snijmaïs en uitsluiting van voortdurende verbouw van hetzelfde gewas. Verdere verfijning van deze maatregelen is noodzakelijk.

Het kiezen van de juiste vruchtwisseling vanuit het perspectief van bodemkwaliteit kan moeilijk zijn in de praktijk, in het bijzonder op boerderijen met op dit moment een grote verhouding van gewassen die nadelig zijn voor de bovengenoemde aspecten van bodemkwaliteit. Dit zal relatief grote (negatieve) financiële gevolgen hebben voor deze boerderijen, die in de nabije toekomst slechts gedeeltelijk kunnen worden gecompenseerd door subsidies op basis van wederzijdse naleving. Het economische langetermijneffect op boerderijniveau zal waarschijnlijk neutraal of positief zijn.

Tabel 5.2*Overzicht maatregelen ter beheersing van de bodemstructuur (De Boer et al., 2004).*

	Type maatregel		Werkzaam		
	Pre-ventief	Cura-tief	Boven-grond	Ploeg-zool	Onder-grond
<i>Basis</i>					
Waterbeheer op perceelsniveau: Goede ontwatering/afwatering; onderhoud/vernieuwing drainage; aandacht voor slootpeil (grasland)	X		X	X	X
<i>Vruchtwisseling/bouwplan (strategische keuzen)</i>					
meer diepwortelende gewassen	X	X		X	X
minder gewassen die in het najaar met zware machines geoogst worden	X		X	X	X
natte percelen in het voorjaar: keuze voor gewassen of rassen die later gezaaid kunnen worden	X		X	X	X
natte percelen in het najaar: keuze voor gewassen of rassen die eerder geoogst kunnen worden	X		X	X	X
fruitboomgaarden met grasbaan/ondervrucht	X		X	X	X
hanteren van een vast rijpadensysteem; aanpassen mechanisatie	X		X	X	X
boomgaarden: teelt van ziekteresistente rassen of omschakeling naar biologisch (minder bewerkingen)	X		X	X	X

Tabel 5.2 (vervolg)

Overzicht maatregelen ter beheersing van de bodemstructuur (De Boer et al., 2004).

	Type maatregel		Werkzaam		
	Pre-ventief	Cura-tief	Boven-grond	Ploeg-zool	Onder-grond
<i>Basis</i>					
<i>Grondbewerking</i>					
diepwoelen of diepspitten		X	X	X	X
vaste tand dieper door de grond		X	X	X	X
woelers aan de ploeg	X	X	X	X	X
bovenover ploegen (niet in ploeg-voor)	X			X	X
voldoende trekkracht voor ploeg	X			X	
pennenfrees voor niet-kerende grondbewerking	X		X	X	X
alleen bewerken bij voldoende droge bodem	X		X	X	X
<i>Oogst en na oogstbewerkingen</i>					
lichtere (oogst)machines	X		X	X	X
lagere bandenspanning, bredere banden, meer banden	X		X	X	X
vroeger oogsten indien mogelijk (bijv. vroege suikerbieten en zet-meelaardappelen)	X		X	X	X
stoppelbewerking na de oogst	X	X	X		
grasland: vee alleen inscharen bij voldoende droge bodem	X		X		
Wat in de bovenstaande tabel goed is voor de ondergrond is ook goed voor een ploegzool en de boven-grond. Losmaken van de ondergrond en ook de ploegzool is een kortetermijnoplossing; Op de langere termijn is diepwoelen nadelig voor de grondstructuur.					

Vaste rijsporen en precisielandbouw

Door de introductie van vaste rijsporen op het veld voor zware machines wordt onderscheid gemaakt tussen bodem voor gewasproductie en bodem voor transport. De bodem tussen en naast de rijsporen blijft onberoerd en er vindt geen verdichting plaats van de boven- en ondergrond.

Mogelijkheden van vaste rijsporen en precisielandbouw:

1. Vaste rijsporen zijn in het bijzonder effectief tegen bodemaantasting op kleigronden. Op zandgronden is een enigszins coherente bovengrond gewenst, in het bijzonder in droge jaren. Om dit te bereiken kan een vorenpakker worden toegepast waarbij de bovengrond iets wordt verdicht. Op hellingen vergroten vaste rijsporen het risico van watererosie als de sporen waterkanalen worden.
2. Binnen één gewasseizoen zijn vaste rijsporen al een wijdverspreid fenomeen. Door de oogst en grondbewerkingen aan het einde/begin van een gewas vervagen echter de sporen op hetzelfde veld voor een volgend gewas.
3. Het doorlopende gebruik van vaste rijsporen bij een lange reeks van gewassen kan plaatsvinden met behulp van GPS-systemen. Oogst en hoofdgrondbewerking voor de start van een nieuw gewas kan niet uitsluitend plaatsvinden met gebruik van de vaste rijsporen.
4. Bij precisielandbouw worden de bodem- en gewassenmerken binnen een veld in kaart gebracht om locatiespecifieke bemesting en grondbewerking toe te passen. Precisielandbouw is nog steeds in ontwikkeling en is nog steeds relatief duur.

Vaste rijsporen zijn een effectief middel om de negatieve gevolgen van verdichting op specifieke zones binnen de velden te beperken. De methode is echter niet geschikt voor alle boerderijen. Eén en ander is afhankelijk van bodemtype, verbouwde gewassen en bedrijfsomvang van de boerderij.

Grasbaan/dekplanten (erosie, organische stof in de bodem, bodemstructuur)

In boomgaarden wordt gras gezaaid tussen rijen bomen om verslechtering van de bodemstructuur te voorkomen. Deze maatregel kan ook worden toegepast bij andere typen boerderijen door gras te planten aan de kopeinden van velden of in rijsporen.

Specifieke grondbewerkingsmethoden

Verschillende grondbewerkingsmethoden (diepploegers op de ploeg, bovenover ploegen, graven in plaats van ploegen, voldoende vermogen om de ploeg te trekken, grondbewerkingssystemen waarbij de bodemlaag niet wordt gekeerd) verbeteren de bodemstructuur of verminderen de gevoeligheid van de bodem voor erosie.

Mogelijkheden en onmogelijkheden voor specifieke grondbewerkingsmethoden:

1. Verdichting van diepe bodemlagen en een ploegzool kan soms tijdelijk worden opgelost door diepploegen. Deze maatregel is echter alleen effectief gedurende een beperkte periode en kan op de lange duur een sterkere verdichting veroorzaken.
2. Stoppelbewerking door ondiep ploegen beperkt watererosie na oogsten op lemige gronden. Op zandgronden (Veenkoloniën) kan stoppelbewerking echter de winderosie vergroten.
3. In het algemeen verbetert grondbewerking de afbraak van organische stof en verhoogt de gevoeligheid van de bodem voor erosie.
4. Bij het ploegen rijdt de tractor meestal met één voor- en achterwiel in de bouwvoor, waardoor directe verdichting van de ondergrond optreedt. Als er een ploeg ontwikkeld wordt waarbij het rijden in de bouwvoor overbodig wordt, zal verdichting van de ondergrond sterk verminderen.

Specifieke grondbewerkingsmethoden kunnen helpen bij het behouden of verbeteren van bodemstructuur. Het voorkomen van wind- en watererosie vraagt om verschillende methoden. Deze methoden zijn gewoonlijk bruikbaar op boerderijen en hebben een neutraal of positief effect op het rendement van de boerderij.

Vervroegen oogsttijdstip

De oogst van rooigewassen in natte perioden in het najaar veroorzaakt een verslechtering van de bodemstructuur. Als ook de structuur van de ondergrond negatief wordt beïnvloed, dan is deze schade moeilijk te herstellen. Sommige gewassen kunnen eerder worden geoogst, bij beter weer en betere bodemomstandigheden. Het nadeel van deze benadering is dat de opbrengst lager kan zijn, of in het geval van suikerbieten dat een langere opslag bewaarverliezen veroorzaakt. Een voordeel van een vroegere oogst is dat dit de mogelijkheid kan scheppen om vervolgens een wintergewas te verbouwen. Het verbouwen van een wintergewas heeft extra positieve effecten op de bodemstructuur, op erosie en op het gehalte organische stof in de bodem. Bij afwezigheid van een wintergewas kan de erosie iets toenemen.

Vervroegen van het oogsttijdstip is effectief in het voorkomen van verslechtering van de bodemstructuur. Het is niet geschikt voor alle gewassen. Het kleine verlies in opbrengst dat wordt veroorzaakt door het vroeg oogsten van fabrieksaardappelen en suikerbieten wordt gecompenseerd door subsidies die worden verstrekt voor vroege partijen, maar deze compensatie bestaat niet voor de meeste andere gewassen.

Bodemdruk beperken

Lagere bedrijfsinkomsten vragen om kostenbesparende maatregelen. Dit leidt tot specialisatie en een steeds grotere bedrijfsomvang. Specialisatie resulteert vaak in incomplete vruchtwisseling en grotere bedrijfsomvang resulteert in het gebruik van grotere, zwaardere machines en een volledige personeelsbezetting gedurende het hele jaar, waarbij activiteiten niet kunnen worden beperkt tot perioden die gunstig zijn voor de bodemstructuur. Op die manier zijn specialisatie en een grotere bedrijfsomvang er de oorzaak van dat de limieten van het draagvermogen van de bodem worden benaderd of overschreden.

Tabel 5.3*Effecten van maatregelen ter beheersing van bodemstructuur (De Boer et al., 2004).*

	<i>Economie</i>		<i>Milieu</i>		<i>Bodemwater karakteristieken</i>		
	<i>Kosten</i>	<i>Opbrengst</i>	<i>Meststoffen</i>	<i>Pesticiden</i>	<i>Oppervlaktewater</i>	<i>Grondwater</i>	<i>Capillaire opstijging</i>
<i>Basis</i>							
Waterbeheer op perceelsniveau: goede ontwatering/afwatering; onderhoud/ vernieuwing drainage; aandacht voor slootpeil (grasland)	+	++	–	0	+	–	0
<i>Vruchtwisseling/bouwplan (strategische keuzen)</i>							
meer diepwortelende gewassen	++	0	0	0	–	+	+
minder gewassen die in het najaar met zware machines geoogst worden	++	0	0	0	–	+	+
natte percelen in het voorjaar: keuze voor gewassen of rassen die later gezaaid kunnen worden	0	0	0	0	–	+	+
natte percelen in het najaar: keuze voor gewas- sen of rassen die eerder geoogst kunnen worden	0	0	+	–	–	+	+
fruitboomgaarden met grasbaan / ondervrucht	+	0	0	0	–	+	+
hanteren van een vast rijpadensysteem; aanpas- sen mechanisatie	+	+	0	0	–	+	+
boomgaarden: teelt van ziekteresistente rassen of omschakeling naar biologisch (minder bewerkingen)	+	+	0	–	–	+	+

Tabel 5.3 (Vervolg)

Effecten van maatregelen ter beheersing van bodemstructuur (De Boer et al., 2004).

	Economie		Milieu		Bodemwater karakteristieken		
	Kosten	Opbrengst	Meststoffen	Pesticiden	Oppervlaktewater	Grondwater	Capillaire opstijging
<i>Basis</i>							
<i>Grondbewerking</i>							
diepwoelen of diepsspitten	+	+	0	0	–	+	0
vaste tand dieper door de grond	0	0	0	0	–	+	–
woelers aan de ploeg	0	0	0	0	–	+	0
bovenover ploegen (niet in ploegvoor)	0	0	0	0	–	+	+
voldoende trekkracht voor ploeg	0	0	0	0	–	+	+
pennenfrees voor niet-kerende grondbewerking	0	0	0	+	–	+	+
alleen bewerken bij voldoende droge bodem	0	+	0	0	–	+	+
<i>Oogst en na oogstbewerkingen</i>							
lichtere (oogst)machines	+	0	0	0	–	+	+
lagere bandenspanning, bredere banden, meer banden	+	+	–	0	–	+	+
vroeger oogsten indien mogelijk (bijv. vroege suikerbieten en zetmeelaardappelen)	0	–	0	–	–	+	+
stoppelbewerking na de oogst	0	0	0	0	–	+	+
grasland: vee alleen inscharen bij voldoende droge bodem	0	+	–	0	–	+	+
+ betekent: a) hogere kosten, b) gunstiger opbrengst, c) verhoogd gebruik van meststoffen, d) meer gebruik van pesticiden, e) meer ontwatering oppervlaktewater, f) meer infiltratie naar grondwater en g) verdere capillaire opstijging.							

Aanpassingen aan grote, zware machines kunnen schade aan de bodemstructuur beperken of voorkomen, met gebruikmaking van het principe om de druk van de machine op de bodem te minimaliseren. Minimalisering van de druk kan worden bereikt door de bandenspanning te verminderen, bredere banden te gebruiken of lichtere machines in te zetten. Niettemin blijft het van cruciaal belang dat de bodem voldoende droog is voordat de machines op het veld komen.

Opmerkingen met betrekking tot beperking van de bodemdruk:

1. Lagere druk van machines op de bodem leidt tot hogere (arbeids)kosten en investeringen
2. Mogelijke oplossing: afspraken tussen groepen boeren en loonbedrijven met als doel om de juiste machines te kopen en de juiste periodes te bepalen voor bewerkinsactiviteiten.
3. Bredere banden kunnen transportproblemen veroorzaken bij deelname aan het normale wegverkeer om het veld te bereiken, aangezien hun maximumsnelheid lager is en hun breedte groter. Aanpassing van de bandenspanning (laag in het veld, hoog op de weg) stuit op praktische bezware n.
4. Mogelijke oplossing voor aanpassing van bandenspanning is het gebruik van een bandspanningsswisselingssysteem. Dit systeem wordt toegepast door sommige boeren en loonbedrijven, maar het verhoogt de exploitatiekosten.

Een combinatie van het gebruik van lage bandenspanningen met beperking van bodemberijding tot perioden met het juiste vochtgehalte van de bodem (dus wanneer het draagvermogen van de bodem voldoende is) is zeer effectief in het voorkomen van verslechtering van de bodemstructuur. Vermindering van de druk van machines op de bodem vereist in eerste instantie enkele investeringen (brede banden, wisselsystemen voor bandenspanning, drijfmestbemesting met gesleepte slangen) en verhoogt daarmee de financiële kosten en kost meer tijd. Op de lange termijn heeft dit waarschijnlijk een neutraal tot positief effect op het rendement van de boerderij. Vermeulen en Perdok (1994) hebben in een uitgebreid veldexperiment, waarbij een systeem met lage gronddruk (LGD) werd vergeleken met een systeem met 'normale' gronddruk (HGD), aangetoond dat de extra kosten voor het LGD-systeem in arbeid en investeringen konden worden betaald uit de winst van hogere gewasopbrengsten en een hogere kwaliteit van de gewassen. Voor zover bekend heeft verlaging van de druk van machines op de bodem geen negatieve neveneffecten en is een veelbelovende maatregel voor cross-compliance, mits de naleving voldoende kan worden gecontroleerd.

Algemene opmerkingen

Op dit moment is het belangrijkste beleid om verdichting te verminderen of te voorkomen door het stimuleren van technische oplossingen (vaste rijsporen, minder zware machines, etc.). Een betere bodemstructuur in de boven- en ondergrond verhoogt ook de vitaliteit van de gewassen. Deze verhoging van de gewasvitaliteit resulteert in een verminderde toepassing van bestrijdingsmiddelen. Een diepere beworteling van gewassen vermindert de behoefte aan kunstmest omdat de doelmatigheid van voedingsstoffen toeneemt. Een compacte en natte bodem resulteert in verlies van stikstof door denitrificatie. Een bodem met een goede structuur heeft een efficiënter stikstofgebruik.

Omdat technologische ontwikkelingen vaak worden gebruikt om de machinecapaciteit en de werkbelasting te vergroten, is er een reëel gevaar dat enkele van de bovengenoemde voordelen niet worden gerealiseerd in de praktijk op de boerderij. Een voorbeeld is dat er door verlaging van de bandenspanning meer activiteiten tijdens minder geschikte perioden plaats kunnen vinden. Dit is uiteraard ongewenst.

Soms hebben maatregelen die getroffen worden om een milieuprobleem op te lossen nadelige gevolgen voor een ander milieuaspect. Het huidige beleid voor voedingsstoffenbeheer stimuleert bijvoorbeeld de toepassing van drijfmest op kleigronden in het voorjaar zodat de kans op uitspoeling van niet door het gewas opgenomen nutriënten wordt verkleind (Besluit 2009, 477). Toepassing in het voorjaar op kleigronden verhoogt echter het risico van bodemverdichting. Daarnaast lijkt hetzelfde beleid te resulteren in een verschuiving van het gebruik

van organische mest naar het gebruik van kunstmest en daarmee in een afname van toevoegingen van organische stof.

Het nationale beleid om de stand van het grondwaterpeil te verhogen (waterbesparingen waterretentie) verhoogt het risico op verdichting. In de nabije toekomst zal het gebruik van bestrijdingsmiddelen, mest en kunstmest worden beperkt. Deze middelen kunnen daarom niet worden gebruikt om het gewas te stimuleren als de vitaliteit daarvan laag is als gevolg van een slechte bodemstructuur. Daarom neemt de stimulans om een goede bodemstructuur te behouden en verdichting te voorkomen toe.



Figuur 5.1

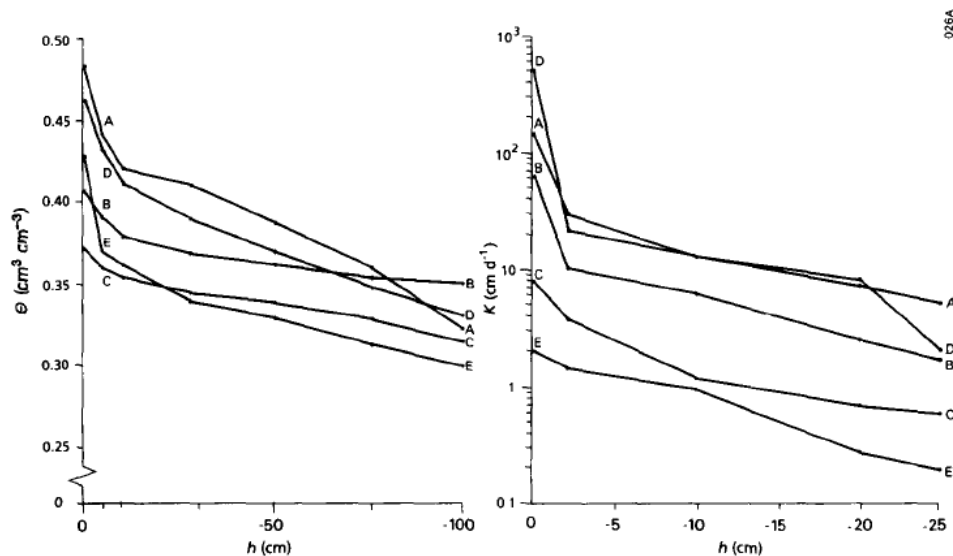
Test en demo zes voorzetwoelers: verschillen zijn groot, DLV plant ,www.spade.nl/upload/nieuws/Verslag%20woelers%20DLV%20Plant%2030-9-2009.pdf.

Op www.spade.nl/spadewijzer-resultaat.asp?KenniskbankID=307 zijn praktische tips gegeven over hoe ondergrondverdichting voor de verschillende bodemtypen opgeheven kan worden. De tips zijn nuttig, maar men zou kunnen denken dat de genoemde maatregelen effectief zijn in het bestrijden van ondergrondverdichting. Men moet echter goed voor ogen houden dat woelen vaak een negatieve invloed op de bodemstructuur heeft. Na een moeilijke oogst of bij problemen met de bodemstructuur wordt vaak naar de woeler gegrepen. Sommige bedrijven gebruiken de woeler als hoofdgrondbewerking in plaats van de ploeg. Het algemene gevoel is dat hoe dieper de grond los is hoe beter het gewas kan groeien. Veel fabrikanten construeren daarom een woeler die flink losmaakt. Dit betekent veel tanden en bijvoorbeeld grote platen aan de onderkant. Diep losmaken heeft echter een keerzijde. De grond wordt daarmee veel gevoeliger voor verdichting. Ook interne slomp treedt sneller op.

Intensief losmaken is daarmee opnieuw oorzaak van problemen met bodemstructuur. Onderzoek heeft al vaak uitgewezen dat losbreken van storende lagen op langere termijn meestal zelfs negatief uitpakt. Het kan ook een doel zijn om niet intensief te woelen, maar wel dusdanig dat de waterberging tijdelijk wordt vergroot. Na het woelen kan het beste direct een groenbemester of gewas ingezaaid worden. De wortels van het gewas fixeren de ontstane poriën voor een deel. Mogelijk nóg belangrijker is dat bedekking van de bodem interne slomp voorkomt.

De maatregelen van diepe grondbewerkingen, zoals diepploegen, diepwoelen of diepspitten worden vanwege de vaak tegenvallende resultaten nauwelijks meer toegepast. De grootste schadelijke gewaseffecten van ondergrondverdichting zijn gevonden bij ondergronden die eerst diep zijn losgemaakt. Op zandgrond kan een 75 cm diep losgemaakte en vervolgens sterk verdichte ondergrond, ook vier jaar later hiervan nog grote gevolgen ondervinden: de beworteling stopte al op 40 cm diepte en de opbrengst was 30% lager (Wanink et al., 1990).

Een algemeen advies is dan ook om de ondergrond niet los te maken. Het voorkómen van verdichting is dus veel belangrijker dan het herstellen hiervan.



Figuur 5.2

pF curves (links) en waterdoorlatendheidscurves (rechts) van de zone tussen 2.5 en 4.5 cm onder maaiveld. (A) oud grasland; (B) niet-verdicht akkerland; (C) eerste ploegzool; (D) losgemaakte ondergrond na één jaar; (E) losgemaakte ondergrond na drie jaar (bron: Kooijstra et al, 1994).

Natuurlijk herstel

Natuurlijk herstel van eenmaal verdichte ondergronden door bodemorganismen valt in de praktijk tegen in gronden met een laag kleigehalte. De organismen dringen namelijk moeilijk door in de harde en zuurstofarme grond. Door krimp- en zweileigenschappen van kleigronden ontstaan relatief gunstige omstandigheden voor structuurvorming in de vorm het daardoor ontstaan van diepe scheuren waardoor vocht snel kan worden afgevoerd en lucht diep in het profiel kan doordringen. Dit heeft een positief effect op de leefomstandigheden voor bodemorganismen dieper in het profiel. Het met zware machines rijden over te vochtige grond heeft een negatief effect op het natuurlijk herstellend vermogen. De slomp die daardoor optreedt, verstoort de lucht- en vochthuishouding die voor bodemorganismen van belang is. Vorstwerking kan ook voor andere gronden gunstig zijn door structuurvorming als gevolg van ontdooiende ijslenzen in het bodemprofiel. Vorst dringt in het Nederlandse klimaat echter niet ver genoeg in de grond door om ondergrondverdichting te kunnen herstellen. Natuurlijk herstel van de bovengrond geeft veel betere resultaten. Een bovengrond herstelt dus veel beter uit zichzelf dan een ondergrond, waardoor ondergrondverdichting neigt naar een onomkeerbaar proces. In de biologische landbouw wordt als regel ondiep geploegd en worden rotaties met meerdere gewassen en groenbemesters toegepast. Dit verkleint in principe het gevaar voor verdichting en stimuleert ook de natuurlijke opheffing van verdichtingen. De bijdrage van de biologische landbouw aan verbetering van de

bodemstructuur in Nederland is nog beperkt omdat slechts ongeveer 1,5% van het landbouwareaal onder biologische teelt ligt.

5.3 Huidige landbouwpraktijk

Vanwege het eigen belang van agrariërs (en loonwerkers) wordt bodemverdichting zoveel mogelijk voorkomen door rekening te houden met de bodemcondities en aanpassing van machines (Alterra, 2004, mededeling LTO-N, Kok, 2004, PPO, 2005). Uit een enquête door PPO blijkt dat 70% van de respondenten geen grondbewerking uitvoert onder te natte omstandigheden en 51% het machinegewicht en de bandenspanning beperkt. Respectievelijk 15 en 20% zou deze maatregelen meer of in sterkere mate willen uitvoeren (PPO, 2005). Volgens Cumela en PPO vermijden agrariërs dat loonwerkers met al te grote machines op hun land rijden. Over het algemeen zijn agrariërs te spreken over de samenwerking met de loonwerker. Loonwerkers werken in opdracht van de agrarische ondernemer, zodat deze invloed op de werkzaamheden kan uitoefenen. Daarnaast worden soms expliciet afspraken gemaakt over wat wel en niet kan (Von Meijenfeldt et al., 2006).

Als gevolg van bodemverdichting verslechtert de porositeit voor water en lucht en de doordringbaarheid van wortels, met als gevolg opbrengstvermindering en afwijkende bodembiodiversiteit. Economische overwegingen kunnen er toe leiden dat toch onder natte omstandigheden het land wordt opgegaan. Dit kan zijn vanwege het niet langer kunnen uitstellen van de oogst, vanwege afspraken met afnemers en met loonwerkers, enzovoort. Dat dit gebeurt wordt bevestigd in het praktijkonderzoek van PPO (PPO, 2005). Het optreden van bodemverdichting wordt deels beïnvloed door factoren die buiten de invloed van de bodemgebruiker zelf liggen, zoals de waterhuishouding en de weersomstandigheden tijdens oogstperiodes. De waterhuishouding wordt geregeld door waterschappen. Peilbeheer door de ondernemer zelf wordt steeds minder toegestaan (PPO, 2005).

Omdat het korte termijn-belang van de agrariër (de oogst) soms voor het lange termijn-belang van de bodemstructuur gaat, wordt aanbevolen om kennis over de negatieve effecten te (blijven) verspreiden. De overheid kan door middel van voorlichting en onderzoek naar herstelmaatregelen een duurzamere situatie bereiken. Ook kan de overheid proberen de afnemers te benaderen, want naast een rol voor de sector zelf, hebben de afnemers van agrarische producten ook een rol. Bijvoorbeeld door uitstel van levertijden bij slecht weer en door duurzaam bodemgebruik in contracten op te nemen. Ook de EU heeft een rol in het kader van het bevorderen van internationale kennisuitwisseling tussen agrariërs, loonwerkers en mechanisatie industrie.

5.4 Kosten van maatregelen

Het netto bedrijfsresultaat is sterk afhankelijk van de bedrijfsgrootte, machinepark, loonbedrijfsaandeel, gewassoort en gewasrotatie en bodemsoort. Algemene extra kosten voor herstelmaatregelen zijn daarom moeilijk te geven. Om toch een indruk te krijgen van de kosten per maatregel en de baten die het geeft, zijn deze hieronder apart weergegeven en zijn enkele specifieke studies aangehaald waarin een kosten-baten analyse is uitgevoerd op specifieke bedrijven. Er is onderscheid gemaakt naar de kosten van herstelmaatregelen, saldi van bolgewassen, rendabiliteit van verminderde bodembelasting en opbrengstderving bij intensivering van de rotatiesnelheid.

Herstelmaatregelen

Diepploegen en omzanden zijn maatregelen die een perceel opleveren dat niet direct bewerkbaar is. Deze percelen moeten eerst opnieuw worden geëgaliseerd en soms gedraineerd.

De kosten zijn (Visscher et al., 2008):

- € 2.000,- tot € 3.000,- per hectare voor het totaalpakket van diepploegen;
- € 20.000,- tot € 25.000,- per ha voor omzanden (van bollenland);

- € 20.000,- tot € 120.000,- per ha. voor opzanden (van bollenland). Het hoogste bedrag geldt als een volledig nieuw zandpakket aangevoerd moet worden;
- € 150,- tot € 500,- per hectare voor diepwoelen (Vliet et al., 2009).

De kosten voor omzanden worden in de praktijk alleen terugverdiend door de teelt van hoogsalderende gewassen, zoals bloembollen of tuinbouwgewassen. Ook het opzanden wordt volgens de bollentelers terugverdiend door de teelt van relatief dure bolgewassen. Overigens is door de introductie van de teelt in netten de mogelijkheid ontstaan om zonder grote ingrepen in de bodem ook tulpen te telen op zwaardere gronden. Teelt van hyacinten, narcissen en andere meer bijzondere bolgewassen vindt echter bijna uitsluitend plaats op duin- en zeezandgrond.

Voor de teelt van reguliere akkerbouw- en groentegewassen zijn dergelijke ingrepen te kostbaar. Het economisch rendement van veel akkerbouw- en groentegewassen is de laatste jaren onvoldoende om dit terug te verdienen. Voor ondernemers die in het verleden door op- of omzanden de grond lichter hebben gemaakt, heeft deze ingreep zijn geld waarschijnlijk wel opgeleverd.

Saldi van bolgewassen

Saldi van bolgewassen in afnemend saldo zijn (Schreuder et al., 2005):

- € 40.000,- lelie grof plantgoed
- € 29.000,- hyacint
- € 18.000,- iris
- € 16.000,- dahlia
- € 13.000,- tulp
- € 11.000,- krokus
- € 7.000,- narcis kleinbloemig

Visscher et. al (2008) geven aan dat bollentelers van mening zijn dat voor de hoogsalderende bolgewassen (narcissen, hyacinten en bijzondere bolgewassen) om- of opgezande gronden vereist zijn voor een goede kwaliteitsproductie. Dat heeft te maken met de goede en beheersbare ontwatering, waardoor de grond vrijwel altijd berijdbaar en bewerkbaar is en wateroverlast zelden optreedt. Voor hyacinten is het daarbij wenselijk dat het gewas niet beregend hoeft te worden, wat alleen mogelijk is bij een ondiepe, goed beheersbare grondwaterstand. Daarnaast is het van belang dat de kleine bollen en knollen van sommige bijzondere bolgewassen in kluitloze grond geteeld worden, zodat deze met minimale hoeveelheden tarra gerooid kunnen worden. Ten slotte is het voor export naar de Verenigde Staten en Japan van belang dat na de oogst alle grond van de bollen gespoeld kan worden. Dit is het best uitvoerbaar met slibarme grond met een laag organische stofgehalte. Mogelijk zijn er wel alternatieve gronden in of buiten Nederland, waar deze bollen ook geteeld kunnen worden, zonder dergelijke kostenposten. Het zoeken naar een andere locatie met een wat lagere productie kan wellicht meer opleveren dan opzanden. Vanwege de kosten van zandgrond in West-Nederland wordt ook volop gezocht naar mogelijkheden voor teelt op andere gronden. Hierdoor is de teelt van tulp vooral uitgebreid op klei- en zavelgrond, met behulp van nettenteelt. Het merendeel van de lelies wordt nu op zandgrond in Oost-Nederland geteeld. Ondanks pogingen tot het telen van hyacint op zwaardere grond en zandgrond in Oost-Nederland worden de meeste hyacinten nog steeds op duin- en zeezandgrond geteeld in West-Nederland. Voor Zantedeschia loopt onderzoek voor teeltmogelijkheden in Oost-Nederland.

De behoefte aan land voor de teelt van hyacint kan bepalend zijn voor de totale behoefte aan zee- en duinzandgrond. Het areaal hyacint bedraagt ongeveer 1.200 ha, zodat bij een teeltrotatie van 1:4 tot 1:5 er momenteel een totale behoefte aan geschikte grond voor de teelt van hyacint is van 4.800 tot 6.000 ha. Het areaal duin- en zeezandgrond in de Bollenstreek, Kennemerland en het Noord-Hollandse zandgebied is ongeveer 8.000 ha (Schreuder en Van der Wekken, 2005), maar niet alle grond is hierbij goede hyacinten-grond. De Bollenstreek en Kennemerland zijn dichtbevolkte regio's, waardoor verwacht kan worden dat een deel van het areaal bollengrond in deze regio's op termijn bebouwd zal worden. Voor deze verdwijnende

bollengrond wordt vaak compensatie gezocht in het vinden van geschikte gronden elders, eventueel met behulp van op- en omzanden.

Rendabiliteit van verminderde bodembelasting

In de meeste landbouwsystemen mag worden verwacht dat de wielbelastingen hoger zijn dan 25 kN waardoor er van uit kan worden gegaan dat de vermindering van de gewasproductie door ondergrondverdichting ergens tussen 2,5 en 5% ligt (Van den Akker et al, 2006).

Het aantal werkbare dagen stijgt na woelen of diepploegen met 20% en het aantal dagen met voldoende bodembeluchting met 10% (Kooijstra et al., 1994). De vochttekorten in het groeiseizoen zijn 50% minder dan in verdichte grond (Van Lanen et al, 1987).

In de studie van Jansen (1991) naar de rendabiliteit van verminderde bodembelasting is aangetoond dat:

- lage banddruk een 5% hoger saldo voordeel oplevert voor aardappelen en suikerbieten ten opzichte van hoge banddruk;
- onbereiden grond via het vaste rijpadensysteem een 10% en 15% hoger saldo voordeel voor respectievelijk suikerbieten en aardappelen oplevert;
- het gemiddelde bedrijfssaldo bij een bouwplan met consumptieaardappelen, wintertarwe + groenbemester, suikerbieten en zaaiuien met normale rotatie ongeveer € 110/ha bedraagt (t.o.v. dit rapport is een 5% inflatiecorrectie per jaar toegepast);
- voor een 60 ha bedrijf komt de extra investeringsruimte voor aanschaf en onderhoud van lagedrukbandsystemen dan neer op ongeveer € 35.000,- als de werktuigen binnen zeven jaar zijn afgeschreven.

Opbrengstderving bij intensivering van de rotatiesnelheid (Visscher et al, 2008)

In onderstaand overzicht zijn een aantal voorbeelden gegeven van metingen op specifieke bedrijven voor de teelt van aardappelen en suikerbieten in verschillende rotatiefrequenties.

Consumptieaardappelen:

- 1:6 rotatie: 14% hogere opbrengst t.o.v. 1:3 rotatie (kleigrond Dronten)
- 1:4 rotatie: 3% hogere opbrengst t.o.v. 1:3 rotatie (kleigrond Dronten)
- 1:2 rotatie: 3% lagere opbrengst t.o.v. 1:3 rotatie (zavelgrond Lelystad). Behalve de knalopbrengst nam ook de kwaliteit af en was de sortering fijner (Lamers en Hoekstra, 1989; Lamers, 1986). De tweejarige rotatie bestond uit aardappel en suikerbiet. In de driejarige rotatie was ook wintertarwe opgenomen
- Continueelt: 19% lagere opbrengst t.o.v. 1:3 rotatie (zavelgrond Lelystad)
- 1:4 rotatie: 12% hogere opbrengst t.o.v. 1:3 rotatie (lichte zavelgrond Kloosterburen). De vierjarige rotatie van pootaardappel, wintertarwe, suikerbiet en wintertarwe + groenbemester werd vergeleken met een driejarige rotatie van pootaardappel, suikerbiet en wintertarwe + groenbemester
- 1:4 rotatie: 12% hogere opbrengst t.o.v. 1:3 rotatie (lichte zavelgrond Kloosterburen). De vierjarige rotatie van pootaardappel, wintertarwe, suikerbiet en wintertarwe + groenbemester werd vergeleken met een driejarige rotatie van pootaardappel, suikerbiet en wintertarwe + groenbemester. Oorzaak van de lagere opbrengst was schurftaantasting
- 1:2 rotatie: 10% lagere opbrengst t.o.v. 1:3 rotatie (lichte zavelgrond Kloosterburen). Oorzaak van de lagere opbrengst was schurftaantasting.

Suikerbieten:

- De teeltfrequentie van suikerbieten had slechts een gering effect op de suikeropbrengst (kleigrond Dronten)
- 1:2 rotatie: 4% lagere suikeropbrengst t.o.v. 1:3 rotatie (zavelgrond Lelystad).
- Continueelt: 19% lagere suikeropbrengst t.o.v. 1:3 rotatie (zavelgrond Lelystad)

- 1:2 rotatie: 4% hogere suikeropbrengst t.o.v. 1:3 rotatie (lichte zavelgrond Kloosterburen), waarschijnlijk doordat in de nauwere bouwplannen pootaardappelen in plaats van tarwe aan de bieten vooraf gingen
- 1:4 rotatie: 4% lagere suikeropbrengst t.o.v. 1:3 rotatie (lichte zavelgrond Kloosterburen), waarschijnlijk doordat in de nauwere bouwplannen pootaardappelen in plaats van tarwe aan de bieten vooraf gingen
- 1:2 rotatie van suikerbieten gaf zoveel ziekteproblemen dat een rendabele bietenteelt onmogelijk was geworden (zandgrond Vredepeel) (Geelen, 1995)

De teelt van graszaad voor een rooivruucht kan een opbrengstverhoging geven van 3 -5% (Borm en Wander, 1995). Vooral aardappelen reageren gunstig. Bij suikerbieten heeft het bijna altijd een positief effect op de wortelopbrengst. Het suikergehalte kan echter wat lager zijn, indien de vertering van de ondergeploegde graszaadstoppel te laat op gang is gekomen en de bieten vroeg worden gerooid.

Conclusies

Woelen is een relatief goedkope maatregel, maar wordt afgeraden in verband met de negatieve effecten op de bodemstructuur na enkele jaren. Diepploegen, om- en opzanden is alleen zinvol als het wordt toegepast bij hoogsalderende gewassen, zoals bloembollen of tuinbouwgewassen. Voor enkele bloembolgewassen zijn de saldi weergegeven. Lelies en hyacinten blijken de grootste opbrengst te geven. Het toepassen van lage-drukbandsystemen op de akkerbouwbedrijven levert een betere bodemstructuur op waardoor gewassen in de regel 5% of meer extra opbrengst genereren ten opzichte van een systeem met hogedrukbandsystemen. Voor een 60 ha bedrijf komt dat neer op een extra investeringsruimte voor aanschaf en onderhoud van lagedrukbandsystemen van ongeveer € 35.000,-. Extensivering van rotatiesnelheden van consumptieaardappelen resulteert in 3% tot 14% stijging van de opbrengst bij een rotatiesnelheid van 1:4 of 1:6 ten opzichte van een rotatiesnelheid van 1:3. Voor suikerbieten zijn de resultaten van metingen op verschillende bedrijven niet eenduidig.

6 Conclusies en aanbevelingen

Eventuele prioritaire gebieden

Zowel in Nederland als in Drenthe zijn drie bodembedreigingen het meest relevant, namelijk erosie, afname van de hoeveelheid organische stof en verdichting. Bij erosie gaat het in de provincie Drenthe vooral over wind-erosie. Afname van organische stofhoeveelheden speelt met name in de (voormalige) veengebieden.

Om een algemene indruk te geven waar in Drenthe voornamelijk de aanwijzing van prioritaire gebieden aan de orde kan zijn hebben we een combinatiekaart gemaakt waar onder meer op te zien is waar bodembedreigingen elkaar overlappen. Op de kaart is af te lezen in welke delen van Drenthe geen bodembedreigingen aan de orde zijn, waar één bedreiging speelt of waar twee of zelfs meer bodembedreigingen in overweging genomen zouden moeten worden als de Kaderrichtlijn Bodem van kracht wordt, gegeven de huidige kennis en beschikbaarheid van data.

Verdichting

Naar aanleiding van de verontrustende resultaten uit het landelijk onderzoek naar bodemverdichting is in dit rapport getracht inzicht te verschaffen in de data die aan de conclusies van dat rapport ten grondslag liggen en deze waar mogelijk uit te breiden. De resultaten van het landelijk onderzoek zijn veelal gebaseerd op afgeleide gegevens uit textuuranalyses van soortgelijke gronden elders in Nederland. Werkelijke dichtheidsmetingen blijken op de onderzochte bodemlaag (30-80 cm min maaiveld) nauwelijks beschikbaar: niet in ruimte, maar ook niet in de tijd. Dit maakt de voorspellingen onzeker.

In dit rapport is daarom getracht de hoeveelheid concrete metingen uit te breiden op basis van separate onderzoeken in het verleden en op basis van het 'verschuiven' van ondergronden naar de bovengrond door oxidatie van moerige lagen in de bovengrond. Het aantal geschikte metingen is desondanks nog steeds erg laag.

In dit rapport is daarom relatief veel aandacht geschonken aan de wijze waarop aanvullende geschikte metingen zouden moeten worden uitgevoerd en welke prioritering daarbij het beste kan worden gehanteerd.

Verder is veel aandacht besteed aan de literatuurstudie waarin het bestrijden, maar vooral ook aan het voorkomen van ondergrondverdichting is onderzocht. Herstellende maatregelen resulteren namelijk meestal niet in de effecten die ervan worden verwacht. Voorkomen is in het geval van ondergrondverdichting sterk te prevaleren boven herstel. Er ligt een grote uitdaging voor ontwerpers van machines, voor loonwerkers, overheden en de boeren zelf om geschikt materieel te ontwerpen en te gebruiken en om bewustwording van de problematiek te creëren.

Om de werkelijke ernst van de ondergrondverdichting te kunnen inzien zijn gerichte meetcampagnes nodig.

Literatuur

Akker, J.J.H. van den en P. Schønning, 2004. *Subsoil Compaction and ways to prevent it*. Tjele, CABI Publishing, Managing Soil Quality - Challenges in Modern Agriculture, pp. 163-184.

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 pp.

Bakker, J.W., F.R. Boone en 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)*. Wageningen, ICW rapport 20, 44 pp.

Boer, H.C. de, A.P. Philipsen, P.H.M. Dekker, A.J.G. Dekking en W.C.A. van Geel, 2004. *Advies goede landbouw- en milieuconditie landbouwgronden (GLMC)*. Wageningen, Praktijkonderzoek van de Animal Sciences Group van Wageningen UR.

Faber, J.H., G.A.J.M. Jagers op Akkerhuis, J. Bloem, J. Lahr, W.H. Diemont en L.C. Braat, 2009. *Ecosysteemdiensten en transitie in bodemgebruik; Maatregelen ter verbetering van biologische bodemkwaliteit*. Wageningen, Alterra. Rapport 1813.

Hack-ten Broeke, M.J.D., C.L. van Beek, T. Hoogland, M. Knotters, J.P. Mol-Dijkstra, R.L.M. Schils, A. Smit en F. de Vries, 2009. *Kaderrichtlijn Bodem; basismateriaal voor eventuele prioritaire gebieden*. Wageningen, Alterra. Rapport 2007.

Huber, S., G. Prokop, D. Arrouays, G. Banko, A. Bispo, R.J.A. Jones, M.G. Kibblewhite, W. Lexer, A. Möller, R.J. Rickson, T. Shishkov, M. Stephens, G. Toth, J.J.H. van den Akker, G. Varallyay, F.G.A. Verheijen en A.R. Jones, (eds), 2008. *Environmental Assessment of Soil for Monitoring: Volume I Indicators & Criteria*. EUR 23490 EN/1, Office for the Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 339 pp.

Jansen, S.R.M., 1991. *Rendabiliteit van een verminderde bodembelasting – Bedrijfseconomische evaluatie van een lagedruk-berijdingssysteem*. Lelystad, Proefstation AGV, Verslag nr. 127.

Kibblewhite, M.G., R.J.A. Jones, L. Montanarella, R. Baritz, S. Huber, D. Arrouays, E. Micheli en M. Stephens, (eds), 2008. *Environmental Assessment of Soil for Monitoring Volume VI: Soil Monitoring System for Europe*. EUR 23490 EN/6, Office for the Official Publications of the European Communities Luxembourg, 72 pp.

Kooistra, M.J. en O.H. Boersma, 1994. *Subsoil compaction in Dutch marine sandy loams: loosening practices and effects*. Wageningen, DLO Winand Staring Centre for Integrated Land, Soil and Water Research.

Kuipers, S.F., 1989. *Bodemkunde*. Culemborg, vijftiende druk, vierde oplage.

Lanen H.A.J. van, M.H. Bannink en J. Bouma, 1987. *Use of Simulation to Assess the Effects of Different Tillage Practices on Land Qualities of a Sandy Loam Soil*. Wageningen, Soil Survey Institute.

Meijnenfeldt, H. von, et al., 2006. *Duurzaam bodemgebruik in de landbouw - een beoordeling van agrarisch bodemgebruik in Nederland*. Den Haag, ministerie van VROM, ministerie van LNV & SenterNovem Bodem+.

Olesen, J.E., R. Eltun, M.J. Gooding, E. Steen Jensen en U. Köpke, 1999. *Designing and testing crop rotations for organic farming - Proceedings from an international workshop*. Skive, Danish Research Centre for Organic Farming, DARCOF Report no.1.

Rutgers, M., G.A.J.M. Jagers op Akkerhuis, J. Bloem, A.J. Schouten en A.M. Breure, 2009. *Prioritaire gebieden in de Kaderrichtlijn Bodem. Belang van bodembiodiversiteit en ecosysteemdiensten*. Bilthoven, RIVM. Rapport 607370001.

Soil Atlas of Europe, European Soil Bureau Network, European Commission, 2005, 128 pp. Office for Official Publications of the European Communities, L-2995 Luxembourg.

Spoor, G., F.G.J. Tjink en P. Weisskopf, 2003. *Subsoil compaction: risk, avoidance, identification and alleviation*. Bedford, Bergen op Zoom, Zurich, Soil & Tillage Research 73 (2003) 175-182.

Staatsblad Stb. 1996, 685. *Besluit van 20 december 1996, houdende een wijziging van het Besluit gebruik dierlijke meststoffen alsmede van het Besluit kwaliteit en gebruik overige organische meststoffen*. 's-Gravenhage.

Staatsblad Stb. 2009, 477. *Besluit van 9 november 2009, houdende wijziging van het Besluit gebruik meststoffen en het Besluit glastuinbouw (vierde actieprogramma Nitraatrichtlijn)*. 's-Gravenhage.

Vermeulen, G.D. en J. Mosquera, 2009. *Soil, crop and emission responses to seasonal-controlled traffic in organic vegetable farming on loam soil*. Wageningen, Plant Research International, Soil & Tillage Research 102, pp. 126-134.

Visscher, J., P.H.M. Dekker, H.C. de Boer, E. Brommer, O.A. Clevering, A. M. van Dam, W.C.A. van Geel, M.H.A. de Haan, I.E. Hoving, A. van der Klooster, H.A. van Schooten, R. Schreuder en P. de Wolf, 2008. *Perspectieven bedrijfsmaatregelen voor duurzaam bodemgebruik. Kosten en effectiviteit van vijf maatregelen*. Lelystad, Animal Sciences Group, Rapport 148.

Vliet, J. van, L. Vlaar en P. Leendertse, 2009. *CLM xxx 2009*. Culemborg. CLM Onderzoek en Advies.

Vries, F. de en F. Brouwer, 2006. *De bodem van Drenthe in beeld*. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 1381.

Vries, F., R. Hendriks, R. Kemmers en R. Wolleswinkel, 2008. *Het veen verdwijnt uit Drenthe. Omvang Oorzaken Gevolgen*. Wageningen, Alterra. Rapport 1661.

Wijnholds, K.H., J. Groten, M.P.J. van der Voort, C.L.M. de Visser en R.D. Timmer, 2008. *Energiekompas voor de Veenkoloniën - Voorlopige resultaten onderzoek 2007*. Wageningen, Praktijkonderzoek Plant & Omgeving B.V., PPO projectnummer 3250081900.

Bijlage 1

Gebruikte meetgegevens landelijk onderzoek

In de volgende tabel staan de meetgegevens die gebruik zijn in het landelijk onderzoek (Hack-ten Broeke et al., 2009) die betrekking hebben op Drenthe.

Loc	3426	4012	4013	4267	4268	1676
X-coördinaat	219835	231380	239845	233480	234650	239975
Y-coördinaat	523270	556400	558090	565390	564120	553900
%compact	6.25	2.5	19.375	7.5	2.5	8.125
Diepte bovenkant	32	30	20	30	32	28
Diepte onderkant	37	35	35	35	37	38
% lutum	0	0	0	0	0	7.9
Dichtheid	1.5	1.56	1.29	1.48	1.56	1.47
Datum	1988	1984	1984	1984	1985	1979
monstername						
Landgebruik	Akk	Gras	Nat	Gras	Gras	0
Code	A3x	A3x	Z12	Z18	A3	A3x
Ondergr30	B3	B3	01	B2	B2	B3
Textuur	Humeus sterk lemig fijn zand	Humeus sterk lemig fijn zand	Leemarm fijn zand	humeus zwak lemig fijn zand	humeus zwak lemig fijn zand	Humeus sterk lemig fijn zand
Ave_%compact	7.4219	7.4219	5.2207	6.3714	6.3714	7.4219
Stddev_%compact	6.5823	6.5823	9.3625	8.519	8.519	6.5823
Ave_dichth	1.4813	1.4813	1.4963	1.4974	1.4974	1.4813
Stddev_dichth	0.1053	0.1053	0.132	0.136	0.136	0.1053

De berekende mate van verdichting staat in de rij %compact. De gepresenteerde waarde is de afwijking (als percentage) van de dichtheid ten opzichte van de dichtheid van de gepresenteerde lijn in figuur 4.1. Die lijn geeft de drempelwaarde aan waarboven bulkdichtheden mogelijk zijn verdicht.

Bijlage 2

Aanvullende meetpunten met bulkdichtheden

In de volgende tabel staan meetgegevens afkomstig uit BIS die aanvullend gebruikt kunnen worden voor verdichtingonderzoek.

Boring	Diepte		%lutum (schatting)	%leem (schatting)	Gemeten dichtheid (g/cm ³)	Jaar
	boven	onder				
3427	40	45	0	11	1.5	1988
3564	33	39	2	15	1.37	1977
4013	40	50	0	19	1.33	1984
4083	42	47	0	8	1.63	1980
4086	40	45	0	18	1.36	1962
4093	35	40	0	7	1.43	1980
4094	35	40	4	17	1.59	1980
4113	33	38	12	12	1.3	1980
4113	40	45	2	24	1.59	1980
4261	32	37	3	15	1.3	1986
4261	42	47	3	19	1.43	1986
4264	40	45	6	18	1.39	1986
4300	40	45	5	14	1.33	1985

*) Enkele punten vallen op de kaart weg omdat zij zich op dezelfde locatie dieper onder het maaiveld bevinden.

Bijlage 3

Indicatoren bodemverdichting (ENVASSO)

De indicatoren CP01, CP02 en CP06 zijn opgenomen in de hoofdttekst.

CP03 Permeability

According to Lebert et al. (2003, 2004), a saturated hydraulic conductivity of 10 cm d⁻¹ is a suitable threshold for permeability in the subsoil, which is the same value used for classifying a soil as 'bad' in the Netherlands (Cultuurtechnische Vereniging, 1988). In the UK, soils with air capacities (airfilled pores at 5kPa) < 5% are considered to be very slightly porous (Hodgson, 1997, p.50); very slight porosity is normally associated with a saturated hydraulic conductivity of < 10 cm d⁻¹ and is indicative of poor soil structure (Thomasson, 1975).

The saturated conductivity (Ksat) of a soil can be considered as one of the best indicators of its physical quality because Ksat has a direct relationship with the quality of the soil structure and the existence of continuous macro-pores (Wösten et al., 2001). The major part of the decrease in pore volume caused by compaction is at the expense of the macro-pores and soil deformation strongly affects pore continuity. Both macro-pores and pore-continuity affect the ability of the soil to conduct water and air and any reduction in either results in slow saturated hydraulic conductivity, that increases surface runoff and erosion.

The Technical Working Group on Soil Erosion', established under the Thematic Strategy for Soil Protection of the European Union, identified saturated hydraulic conductivity (Ksat) as an indicator for the physical quality of a soil (Van Camp et al., 2004b). (Ksat) is a commonly measured property and is also an important soil property needed in calculations and modelling of water infiltration, runoff, erosion, trafficability, and transport of nutrients and subsequent pollution. However, Ksat data are not widely available in Europe although hopefully this will change with implementation of the forthcoming Soil Framework Directive.

Advantages:

- An integrated indicator of soil structure, oxygen diffusion capacity, rootability and conditions for biota.
- In case of topsoils, the measurement of the infiltration capacity can be considered.

Disadvantages:

- Measurement of saturated hydraulic conductivity is laborious and time consuming, thus it is sometimes prohibitively expensive to obtain a statistically significant series of measurements.
- The diameter of the samples must be in agreement with the structural elements, which normally necessitates large diameter cores (e.g. 20 cm).
- The method of sampling and measurement can significantly affect the results and standardisation is required.
- Saturated hydraulic conductivity in the topsoil can change over short time intervals.
- Infiltration capacity of topsoils measures unsaturated hydraulic conductivity, which is a less well defined measurement than saturated hydraulic conductivity.

Conclusion

This indicator is a direct measure of one of the key functions of the soil, the infiltration capacity and filtering capability. The priority area is the upper part of the subsoil (including any pan or compacted layer). Topsoil compaction can be important for land that is not in arable agriculture, in which the soil is not loosened annually.

CP04 Mechanical resistance (penetrometer resistance)

The mechanical resistance of a soil is related to its rootability and there is a strong inverse relationship between resistance to penetration and soil moisture condition. The resistance to penetration is best measured using a penetrometer and measurements should be taken when the soil is at 'field capacity'. There is also a strong relationship between mechanical resistance and the shape and size of the penetrometer cone used. The 'small' ASAE(B) cone, which has a top angle of 30° and a base area of 1.3 cm², is recommended. Greacen et al. (1969), Gooderham (1977a, b), Ehlers et al. (1983), Dexter (1986) and Håkansson et al. (1988) concluded that limiting values of penetrometer resistance (P_r) for root growth range between 2 and 5 MPa. Brussaard et al. (2004) suggested a threshold value of $P_r < 3$ MPa. However, in well-structured subsoils a higher threshold value $P_r < 4$ or 5 MPa may be acceptable. Nevertheless, it must be appreciated that in certain circumstances a well-structured soil can have a high penetration resistance whilst rootability still remains good.

Advantages:

- Measurements are rapid and easy, making it possible to obtain large quantities of data over relatively short time intervals.
- This enables statistical analyses on frequency and distribution of compaction within a field.

Disadvantages:

- There is a strong relationship between penetrometer resistance and soil moisture, which makes the interpretation of the measurements difficult unless the field moisture content is also measured.
- Ideally, the penetrometer resistance should be measured when the soil is at or near 'field capacity', which restricts considerably the opportunities for data collection.
- There is a strong relationship between penetration resistance and the shape and size of the penetrometer cone, therefore standardisation will be needed if this indicator is to be used in any future European soil monitoring system.

Conclusion:

Mechanical resistance is closely related to the rootability of a soil and a penetrometer is a useful instrument to identify compacted layers. However, a well structured soil can have a high resistance to penetration whilst rootability remains good.

CP05 Visual assessment (of structure and rooting)

Advantages:

- The results can reveal previous compaction.
- Additional profile information can be determined during the assessment.

Disadvantages:

- Assessment is subjective and can be laborious.
- Expertise is needed to assure meaningful and standardised determinations and even highly skilled field scientists need regular calibration checks on their assessments.
- Interpretation is difficult because seasonal, climatic and drainage conditions can have a large impact on rooting and other visible aspects of compaction.

Conclusion:

This is a direct and complete determination of compaction and structural degradation and the effect on rooting, biota, structure, and air and water regime in the whole profile, but consistent data is difficult to obtain because of standardisation and calibration issues.

CP07 Drainage condition (wetness condition, groundwater levels)

Advantages:

- Drainage status is needed for identification and classification of the soil and is a routine assessment in any soil survey.
- Natural drainage conditions are closely related to soil type.

Disadvantages:

- Skilled 'field soil scientists' are needed for the estimation of soil drainage conditions.
- Monitoring of groundwater levels is time consuming and expensive, especially when the levels fluctuates over short timescales.

Conclusion:

Soil drainage class defines the length of time that soils are wet or dry. Soil moisture content is crucially important when studying compaction. Wet soil deforms much more easily than dry soil and machinery (or stock) degrades soil structure to a much greater extent when heavy loads are applied under wet conditions. Soil drainage class is assessed routinely during soil surveys and on experimental sites, thus data are readily available.

CP08 Soil strength

Three soil strength properties, i.e. cohesion, angle of internal friction and the pre-compaction stress, should be considered. The measurement of the cohesion and angle of internal friction are laborious and expensive and data for these properties are not common in agricultural research. Cohesion and angle of internal friction are needed to determine the shear strength of soils. In agriculture, shear strength failure of subsoils by wheel loads occurs when the cohesion is low. This means that sandy subsoils can be vulnerable to shear strength failure and can be deformed and compacted in this way (Van den Akker, 2004; Van den Akker and Schjønning, 2004).

The high cohesion of clay soils results in a high shear strength which prevents shear failure of clayey subsoils. Compaction by failure of the pre-compaction stress plays an important role in both sandy and clay soils. The pre-compaction stress can be measured with a uni-axial test. This test is moderately laborious but not very expensive. Measurement of the pre-compaction stress can be a good option for a systematic assessment and monitoring of the vulnerability of subsoils to compaction.

In the European SIDASS project (Horn and Fleige, 2005), a classification of pre-compaction stress is defined (Horn et al., 2005).

Classification of pre-compaction stress

Very low	< 30 kPa;
Low	30-60 kPa;
Medium	60-90 kPa;
High	90-120 kPa;
Very high	120-150 kPa

Source: Horn et al., 2005

This classification is a measure of compactability, the higher the pre-compression stress the lower the vulnerability of the soil to compaction.

Advantages:

- Soil strength is very useful for further evaluating and extrapolating the threat of compaction and in developing guidelines for its prevention.
- Soil strength is a direct measure of the capacity of the soil to bear loads.

Disadvantages:

- Measurement is moderately laborious and not standardised in agricultural research.
- Soil strength also depends on soil moisture and speed of loading.

Conclusion:

Soil strength relates directly to the likelihood of the soil to compact, and thus the vulnerability of soil to compaction.

CP09 Ground pressure (weight and type of machinery - wheeled or tracked vehicle and density and type of stock - animals)

Advantages:

- Enables evaluation and extrapolation of the results of monitoring compaction.
- In the case of wheeled vehicles, the size, number and type of tyres can be varied to reduce the applied ground pressures.
- This indicator provides a means for the policy process to mitigate soil compaction.

Disadvantages:

- An inventory of mechanisation at administrative unit level (NUTS) in Europe is required but data of this type are scarce.
- The situation on any monitoring site will be strongly dependent on the equipment type and its use.

Conclusion:

The ground pressure exerted by wheeled or tracked vehicles is a direct cause of compaction and structural degradation. This indicator has additional value for policy purposes, but data are scarce and usually only available at local scale.

CP10 Soil management & tillage practice

Advantages:

- Soil management practices are the basis for determining the vulnerability and/or the resilience of the soil to compaction.
- The results of monitoring soil compaction can be interpreted better if good soil management (especially tillage) data are available.
- This indicator provides a link to policy for mitigating soil compaction.

Disadvantages:

- Data on soil management practices are rarely georeferenced and/or extensive enough for determining the vulnerability and/or the resilience of the soil to compaction.

Conclusion:

Soil management practices are useful for identifying the pressures on soil.

Bijlage 4

Boorpunten in veengebieden t.b.v. nulmeting

De boorpunten die in onderstaande tabel zijn weergegeven hebben allen organische stofgehalten in de toplaag die door middel van metingen in het verleden zijn vastgesteld en die een waarde bezitten van meer dan 15% (moerige gronden). De term 'schatting OS' heeft betrekking op het feit dat niet alle lagen binnen een punt door metingen zijn bepaald. Op basis van profielbeschrijvingen zijn deze leemtes ingeschat.

Kolom 'organische laag tot .. cm' geeft de diepte weer vanaf maaiveld tot waar het organisch stofgehalte groter is dan 15%. In het rechtergedeelte van de tabel staat eenzelfde kolom, maar deze heeft betrekking op schattingen uit profielopnamen in het jaar 2007.

Boring	Opnamejaar	Schatting OS			Organische laag tot.. cm	Centr-profnr.	organische laag tot .. cm bij nieuwe boring	Opname jaar nieuwe boring
		min	max	gem				
4284	1973	-	-	20	30	12B-4	15	2007
4446	1986	16	95	65	116	12C-16	120	2007
4261	1986	27	80	45	30	12C-17	45	2007
4262	1986	23	96	65	88	12C-18	100	2007
4264	1986	18	90	45	24	12C-20	n.a.	n.a.
4014	1984	31	31	31	25	12D-25	15	2007
3981	1977	17	98	75	52	12H-28	0	2007
3982	1977	26	84	55	56	12H-29	20	2007
4114	1980	60	78	65	28	16E-17	30	2007
4116	1980	13	33	25	120	16E-20	115	2007
3747	1978	18	86	45	80	17F-37	65	2007
3587	1977	14	89	55	87	18A-43	90	2007
3588	1977	13	93	70	110	18A-44	100	2007
3563	1977	19	74	45	40	18A-45	25	2007
3564	1977	22	88	55	30	18A-46	0	2007
3574	1977	72	95	85	230	18C-52	160	2007
3392	1977	17	18	50	83	18C-53	0	2007
3393	1977	10	97	65	110	18C-54	n.a.	n.a.
3395	1977	22	93	70	105	18C-56	75	2007
3102	1977	18	94	80	120	18C-58	110	2007
3474	1977	93	98	96	268	23A-12	n.a.	n.a.

n.a. = boring is niet aanwezig.

Bijlage 5

Overzicht landgebruik

Gegevens gebruikt voor landelijk onderzoek

Loc	X	Y	velddatum	Landgebruik			
				velddatum	1987	1997	2003
3426	219835	523270	1988	Akkerb	Natuur	Gras	Bw/Wat
4012	231380	556400	1984	Gras	Gras	Gras	Gras
4013	239845	558090	1984	Natuur	Natuur	Natuur	Natuur
4267	233480	565390	1984	Gras	Akkerb	Gras	Akkerb
4268	234650	564120	1985	Gras	Gras	Gras	Gras
1676	239975	553900	1979	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

Extra gegevens geselecteerd uit BIS

3427	216440	522255	1988	Akkerb	Natuur	Gras	Bw/Wat
3564	261340	547200	1977	Gras	Gras	Gras	Gras
4013	239845	558090	1984	Natuur	Natuur	Natuur	Natuur
4083	216960	530450	1980	Gras	Akkerb	Gras	Akkerb
4086	221275	542460	1962	Gras	Gras	Gras	Gras
4093	216820	540200	1980	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
4094	212840	542850	1980	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
4113	209675	537800	1980	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
4113	209675	537800	1980	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
4261	228315	553720	1986	Gras	Gras	Gras	Bw/Wat
4261	228315	553720	1986	Akkerb	Akkerb	Akkerb	Akkerb
4264	226095	552090	1986	Natuur	Natuur	Natuur	Natuur
4300	221540	566710	1985	Gras	Gras	Gras	Gras

Gegevens geschikt voor bepaling nulsituatie

4284	230205	564970	1973	Gras	Gras	Gras	Gras
4446	227045	556435	1986	Gras	Gras	Gras	Gras
4261	228315	553720	1986	Gras	Gras	Gras	Gras
4262	224550	555935	1986	Gras	Gras	Gras	Gras
4264	226095	552090	1986	Akkerb	Gras	Gras	Akkerb
4014	234800	552400	1984	Gras	Gras	Gras	Gras
3981	256980	553450	1977	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
3982	258050	554390	1977	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
4114	207970	537900	1980	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
3747	257250	541050	1978	Akkerb	Akkerb	Akkerb	Akkerb
3587	261755	539750	1977	Gras	Gras	Gras	Gras
3588	263875	538815	1977	Gras	Gras	Gras	Gras
3563	260060	542380	1977	Akkerb	Gras	Gras	Akkerb
3564	261340	547200	1977	Gras	Gras	Natuur	Natuur
3574	267850	530850	1977	Akkerb	Akkerb	Akkerb	Akkerb
3392	263675	535700	1977	Akkerb	Akkerb	Akkerb	Akkerb

Gegevens gebruikt voor landelijk onderzoek

Loc	X	Y	velddatum	Landgebruik			
				velddatum	1987	1997	2003
3393	267200	531010	1977	Gras	Gras	Gras	Gras
3395	260925	525450	1977	Gras	Gras	Gras	Gras
3102	266575	527700	1977	Akkerb	Akkerb	Akkerb	Akkerb
3474	267025	523250	1977	Akkerb	Akkerb	Akkerb	Akkerb

Bw/Wat = Bebouwing of Oppervlaktewater

Bijlage 6

Overzicht dichtheden en overschrijdingspercentages

Gegevens gebruikt voor landelijk onderzoek						
Loc	X	Y	velddatum	PD	dichtheid	overschrijdings% van 1,6 g/cm ³
3426	219835	523270	1988	n.a.	1.50	0
4012	231380	556400	1984	n.a.	1.56	0
4013	239845	558090	1984	n.a.	1.29	0
4267	233480	565390	1984	n.a.	1.48	0
4268	234650	564120	1985	n.a.	1.56	0
1676	239975	553900	1979	1.5411	1.47	0
Extra gegevens geselecteerd uit BIS						
Loc	X	Y	velddatum			
3427	216440	522255	1988	n.a.	1.50	0
3564	261340	547200	1977	n.a.	1.37	0
4013	239845	558090	1984	n.a.	1.33	0
4083	216960	530450	1980	n.a.	1.63	1.87
4086	221275	542460	1962	n.a.	1.36	0
4093	216820	540200	1980	n.a.	1.43	0
4094	212840	542850	1980	n.a.	1.59	0
4113	209675	537800	1980	n.a.	1.30	0
4113	209675	537800	1980	n.a.	1.59	0
4261	228315	553720	1986	n.a.	1.30	0
4261	228315	553720	1986	n.a.	1.43	0
4264	226095	552090	1986	n.a.	1.39	0
4300	221540	566710	1985	n.a.	1.33	0
Gegevens geschikt voor bepaling nulsituatie						
Loc	X	Y	velddatum			
4284	230205	564970	1973	n.a.	n.a.	-
4446	227045	556435	1986	n.a.	n.a.	-
4261	228315	553720	1986	n.a.	1.43	0
4262	224550	555935	1986	n.a.	1.70	6.25
4264	226095	552090	1986	n.a.	1.41	0
4014	234800	552400	1984	1.69	1.65	3.12
3981	256980	553450	1977	1.5	1.41	0
3982	258050	554390	1977	1.34	1.29	0
4114	207970	537900	1980	n.a.	1.59	0
3747	257250	541050	1978	1.66	1.64	2.50

Gegevens gebruikt voor landelijk onderzoek						
Loc	X	Y	velddatum	PD	dichtheid	overschrijdings% van 1,6 g/cm ³
3587	261755	539750	1977	1.59	1.54	0
3588	263875	538815	1977	0.92	0.85	0
3563	260060	542380	1977	1.39	1.29	0
3564	261340	547200	1977	1.68	1.67	4.38
3574	267850	530850	1977	n.a.	n.a.	-
3392	263675	535700	1977	1.67	1.65	3.12
3393	267200	531010	1977	1.57	1.53	0
3395	260925	525450	1977	1.68	1.66	3.75
3102	266575	527700	1977	1.23	1.22	0
3474	267025	523250	1977	n.a.	n.a.	-

PD = Packing Density, n.a. = niet aanwezig

Overschrijdings% = ((dichtheid/1.6)-1)*100%

Bijlage 7

Textuur en PD versus gevoeligheid voor verdichting

Spoor et al. (2003) geven een overzicht van de gevoeligheid voor verdichting in relatie tot de textuur en packing density.

Susceptibility to compaction according to texture and packing density^a

Texture class	Packing density (Mg m^{-3})		
	Low (<1.40)	Medium ($1.40\text{--}1.75$)	High (>1.75)
Coarse	VH	H	M ^b
Medium ($<18\%$ clay)	VH	H	M
Medium ($>18\%$ clay)	H	M	L
Medium fine ($<18\%$ clay)	VH	H	M
Medium fine ($>18\%$ clay)	H	M	L ^c
Fine	M ^d	L ^e	L ^c
Very fine	M ^d	L ^e	L ^c
Organic	VH	H	

^a Susceptibility classes: L, low; M, moderate; H, high; VH, very high.

^b Except for naturally compacted or cemented coarse (sandy) materials that have very low (L) susceptibility.

^c These soils are already compact.

^d These packing densities are usually found only in recent alluvial soils with bulk densities of $0.8\text{--}1.0 \text{ Mg m}^{-3}$ or in topsoils with $>5\%$ organic carbon.

^e Fluvisols in these categories have moderate susceptibility.

Bijlage 8

Gevoeligheid en vochtgehalte versus kwetsbaarheid

Spoor et al. (2003) geven een overzicht van de kwetsbaarheid voor verdichting in relatie tot de gevoeligheid voor verdichting en het vochtgehalte in de bodem.

Vulnerability to compaction according to soil susceptibility and wetness^a

Susceptibility class	Wetness condition			
	Wet	Moist	Dry	Very dry
VH	E ^b (E) ^c	E (E)	V (E)	V (V)
H	V (E)	V (E)	M (V)	M (M)
M	V (E)	M (V)	N (M)	N (N)
L	M (V)	N (M)	N (N)	N (N)

^a Classes of vulnerability to compaction: N, not particularly vulnerable; M, moderately vulnerable; V, very vulnerable; E, extremely vulnerable.

^b Classes outside brackets refer to situations with significant subsoil protection.

^c Classes within brackets refer to situations with minimal subsoil protection.

Bijlage 9

Kwetsbaarheid versus maximale banddruk

Spoor et al. (2003) geven een overzicht van de kwetsbaarheid voor verdichting in relatie tot de maximaal toelaatbare bodem- en banddruk.

Recommended maximum tyre inflation pressure according to vulnerability class

Vulnerability class	Recommended maximum	
	Ground pressure ^a (kPa)	Tyre inflation pressure ^b (kPa)
E (extremely vulnerable)	65	40
V (very vulnerable)	100	80
M (moderately vulnerable)	150	120
N (not particularly vulnerable)	200	160

^a The average vertical stress in the soil/tyre area, calculated from the wheel load and the contact area on a smooth rigid surface.

^b Estimated from $p = 1.25 p_i$, where p is the average ground pressure and p_i the tyre inflation pressure. At a tyre inflation pressure of 40 kPa the effect of carcass stiffness considered and the ground pressure is estimated to be 65 kPa.

