



# Risico op ondergrondverdichting in het landelijk gebied in kaart

Alterra-rapport 2409  
ISSN 1566-7197

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





---

Risico op ondergrondverdichting in het landelijk  
gebied in kaart

---

---

---

Dit onderzoek is in 2012 uitgevoerd in opdracht van IPO (Interprovinciaal Overleg) als PRISMA-project 'Gevoeligheid op ondergrondverdichting in het landelijk gebied'

---

---

# Risico op ondergrondverdichting in het landelijk gebied in kaart

J.J.H. van den Akker<sup>1</sup>, F. de Vries<sup>1</sup>, G.D Vermeulen<sup>2</sup>, M.J.D. Hack-ten Broeke<sup>1</sup> en T. Schouten<sup>3</sup>

- 1 Alterra
- 2 Plant Research International
- 3 RIVM

## **Alterra-rapport 2409**

Alterra Wageningen UR  
Wageningen, 2013

## Referaat

Akker, J.J.H. van den, F. de Vries, G.D. Vermeulen, M.J.D. Hack-ten Broeke en T. Schouten, 2012. Risico op ondergrondverdichting in het landelijk gebied in kaart. Wageningen, Alterra, Alterra-Rapport 2409. 80 blz.; 15 fig.; 7 tab.; 50 ref.

In Nederland en op Europees niveau wordt ondergrondverdichting als een serieuze bodembedreiging gezien. Gebruik makend van het Bodemkundig Informatiesysteem BIS en het Landelijk Grondgebruiksbestand Nederland (LGN) is met het bodem-verdichtingsmodel SOCOMO bepaald of de gebruikelijke wiellasten bij dat landgebruik de sterkte van de ondergrond in natte of vochtige omstandigheden overschrijden. Vervolgens is aan de hand van de bodemeigenschappen en de grondwatertrappen bepaald of de ondergrond extra gevoelig is voor verdichting of dat natuurlijk herstel door bijvoorbeeld droogtekrimp mogelijk is. Sterkte, landgebruik en bodemeigenschappen bepalen zo samen het risico op ondergrondverdichting. Dit heeft geresulteerd in kaarten waarop het risico op ondergrondverdichting is aangegeven. De meeste gronden in Nederland blijken een matig tot zeer groot risico op ondergrondverdichting te hebben.

Trefwoorden: bodemverdichting, ondergrondverdichting, fysische bodemkwaliteit, bodemstructuur, natuurlijk herstelvermogen, landgebruik, beworteling, bodemvruchtbaarheid, infiltratiecapaciteit, verzadigde doorlatendheid.

ISSN 1566-7197

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

© 2013 Alterra (instituut binnen de rechtspersoon Stichting Dienst Landbouwkundig Onderzoek)  
Postbus 47; 6700 AA Wageningen; [info.alterra@wur.nl](mailto:info.alterra@wur.nl)

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

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

### **Alterra-rapport 2409**

Wageningen, februari 2013

# Inhoud

Woord vooraf	7
Samenvatting	9
1 Inleiding	11
1.1 Probleemstelling	11
1.2 Achtergrond	11
1.3 Projectdoelstelling	12
1.4 Uitgangspunten	12
1.5 Leeswijzer	13
2 Methoden om gevoeligheid voor verdichting te bepalen	15
2.1 Eerder onderzoek	15
2.2 Aanvullingen op bestaande methoden	16
3 Werkwijze en gebruikte gegevens voor de constructie van de risicokaarten	19
3.1 Gebruikte gegevens	19
3.1.1 BIS	19
3.1.2 LGN	21
3.2 Werkwijze voor de constructie van de risicokaarten	23
3.2.1 Ondergronden die van nature al dicht zijn en veengronden	24
3.2.2 Sterkte van de ondergrond	25
3.2.3 Belasting en landgebruik	26
3.2.4 Sterkte versus grondspanningen in de ondergrond	28
3.2.5 Natuurlijk herstel en factoren die het risico op te sterke ondergrondverdichting kleiner of groter maken	28
3.2.6 Systematiek voor het bepalen van het risico op verdichting	30
4 Resultaten, kaartmateriaal en toelichting	41
4.1 Resultaten vergelijking sterkte versus grondspanningen in de ondergrond met SOCOMO	41
4.2 Kaartmateriaal en toelichting	43
5 Discussie	45
5.1 Vergelijking met de resultaten van het Vlaamse onderzoek naar ondergrondverdichting	45
5.2 Discussiepunten begeleidingsgroep	45
5.3 Discussie constructie risicokaarten en resulterende kaarten	46
5.4 Relatie Bodembioologische indicator (Bobi) met ondergrond-verdichting	48
6 Conclusies en aanbevelingen	51
Literatuur	53
Bijlage 1 Provinciale kaarten op A3-formaat	57





# Woord vooraf

Dit rapport is het resultaat van het PRISMA-project 'Gevoeligheid voor ondergrondverdichting in het landelijk gebied' in opdracht van het Interprovinciaal Overleg (IPO), uitgevoerd in 2012. De begeleiding van het project was in handen van een projectgroep met de volgende samenstelling:

- A. Huinder (provincie Groningen, voorzitter)
- A. Venekamp (provincie Drenthe, secretaris)
- M. van Delst (provincie Gelderland)
- D. van der Eijk (provincie Zuid-Holland)
- J. Harthoorn (provincie Brabant)
- M. Heijmans (ZLTO)
- W. Jonkers (provincie Zeeland)
- E. Khodabux (provincie Noord-Holland)
- H. Miedema (agentschap NL)
- A. Postma (LTO Noord)
- N. de Wit (ministerie van I&M)



# Samenvatting

De studie naar kwetsbaarheid voor verdichting in het landelijk gebied heeft geresulteerd in kaartmateriaal voor heel Nederland waarop het risico voor ondergrondverdichting is aangegeven. Deze kaarten vindt u verderop in dit rapport en op de CD-ROM. Het risico op ondergrondverdichting is afhankelijk van bodemeigenschappen en van het landgebruik.

De in deze studie gebruikte bodemeigenschappen zijn afkomstig uit het Bodemkundig Informatiesysteem BIS van Alterra. Met deze bodemeigenschappen berekenen we allereerst de sterkte van de bodem bij verschillende vochtomstandigheden.

*Het risico op ondergrondverdichting wordt bepaald door bodemeigenschappen en landgebruik*

Het landgebruik is afgeleid van een serie bestanden van het Landelijke Grondgebruiksbestand Nederland (LGN). Op die manier hebben we gewasrotaties in beeld. Aan het landgebruik worden maatgevende machines en wiellasten gekoppeld en deze zijn bepalend voor de uiteindelijke bodembelasting. Bodemsterkte en bodembelasting resulteren samen in een gevoeligheid voor verdichting.

Tenslotte bepalen we op basis van bodemeigenschappen of er bijvoorbeeld sprake is van natuurlijk herstelvermogen zodat herstel van ondergrondverdichting op langere termijn mogelijk is. In dat geval schatten we het risico op blijvende ondergrondverdichting minder hoog in. Ook kan er sprake zijn van ongunstige omstandigheden en dan denken we dat het risico op blijvende schade juist hoger is.

Deze risicokaarten zijn een eerste hulpmiddel om na te gaan waar eventuele maatregelen zinvol kunnen zijn.

## Aanleiding

De aanleiding voor deze studie is dat zowel in Europa als in Nederland steeds meer wordt onderkend dat ondergrondverdichting een serieuze bodembedreiging is. Het is echter niet bekend waar en in welke mate ondergrondverdichting nu al optreedt. Het is ook onvoldoende bekend welke gronden en gebieden het meest gevoelig zijn voor verdichting.

De Technische Commissie Bodem heeft geadviseerd dat het beleid zich moet richten op preventie van ondergrondverdichting op regionaal niveau (TCB, 2011). Het Interprovinciaal Overleg (IPO) onderschrijft dit en heeft allereerst behoefte aan inzicht in waar de kwetsbare gronden voor ondergrondverdichting liggen. Daarom is deze studie uitgevoerd. We richten ons daarvoor op de aanwezige kennis en gegevens voor zover het betrekking heeft op ondergrondverdichting van de laag van 20 tot 60 cm beneden maaiveld, dus inclusief de ploegzool.

## Wat is ondergrondverdichting?

In de bodem komen tussen de vaste delen poriën voor. Poriën zijn belangrijk voor transport van lucht en water door de bodem en voor plantenwortels. Bij bodemverdichting, bijvoorbeeld door te hoge wiellasten, vermindert het poriënvolume. Bij een te sterke bodemverdichting neemt de doorlatendheid en het vochtbergend vermogen van de bodem af. Dit kan tot wateroverlast (bijvoorbeeld plasvorming) leiden en tot oppervlakkige afstroming, piekbelasting bij poldergemalen en tot inundatie van laag gelegen gronden. Ook is er meer kans op afspoeling van nutriënten en gewasbeschermingsmiddelen naar het oppervlaktewater. Een verdichte bodem is niet of

moeilijk bewortelbaar doordat de indringweerstand voor plantenwortels te hoog wordt, of omdat de aëratie (luchthuishouding) te slecht wordt, waardoor de gewasopbrengst afneemt. Bodemverdichting in de bouwvoor kan worden opgeheven door ploegen. Bij te zware belasting raken de lagen onder de bouwvoor ook verdicht. Deze verdichting is vrijwel niet op te heffen.

## **Resultaat**

Het eindresultaat van dit project is een kaart van Nederland waarop aangegeven staat hoe wij het risico op ondergrondverdichting inschatten op basis van de beschreven methodiek. De meeste gronden in Nederland lopen een matig tot zeer groot risico op ondergrondverdichting bij het huidige landgebruik en gangbare wiellasten.

Naast deze risicobeoordeling zijn nog twee andere categorieën onderscheiden. Dit zijn a) ondergronden die van nature al dicht zijn en nooit los zijn gemaakt omdat dat niet mogelijk is of zinloos en b) veenondergronden, die van nature zeer veerkrachtig zijn en een groot herstelvermogen hebben. De niet beoordeelde vlakken op de kaart zijn glastuinbouw, water en bebouwing.

Een atlas met GIS-bestanden en kaartmateriaal waarbij op provincies kan worden ingezoomd, is bijgevoegd op CD-ROM.

## **Conclusies en aanbevelingen**

Bij de meeste landbouwgronden is het risico op ondergrondverdichting bij het huidige landgebruik en gebruikelijke landbouwmechanisatie matig tot zeer groot. Een aantal ondergronden kan echter (deels) op een natuurlijke manier herstellen.

Aanbevolen wordt om de door ons gemaakte risicokaarten in de praktijk te toetsen door te controleren of de dichtheid in de ondergrond hoog is in de gebieden met een hoog of zeer hoog risico op verdichting. Maar ook om na te gaan of de dichtheid niet te hoog is bij ondergronden waarvan we inschatten dat ze een lager risico op ondergrondverdichting hebben.

Het is niet voldoende bekend hoe effectief natuurlijk herstel in de praktijk is om de doorlatendheid en de doorwortelbaarheid voldoende te verbeteren. Daarom wordt aanbevolen om naast dichtheden ook doorlatendheden en indringweerstand te meten.

De sterkte-eigenschappen van Nederlandse ondergronden zijn afgeleid van buitenlandse gegevens. De onzekerheid over de sterkte-eigenschappen zijn echter groot omdat de buitenlandse gegevens een grote variatie vertonen. Aanbevolen wordt om voor een aantal kenmerkende situaties in Nederland de sterkte-eigenschappen van Nederlandse ondergronden te meten. Hierdoor is het beter mogelijk om de maximaal toelaatbare wiellasten en bodemdrukken te berekenen. Daarmee kan bijvoorbeeld beter worden aangegeven of rupsen een goed alternatief vormen en kunnen gefundeerde adviezen worden gegeven over het voorkomen van ernstige verdichting van de ondergrond.

Tenslotte willen we de aandacht vestigen op het feit dat het rijden in de voor tijdens het ploegen een zeer groot risico op ondergrondverdichting met zich meebrengt. Preventie van ondergrondverdichting is al enige tijd goed mogelijk door 'bovenover' te rijden bij het ploegen. Ook is blijvende aandacht nodig voor risicomijding door verlaging van wiellasten waar mogelijk, keuze van een goede banduitrusting en het vermijden van hogere bandspanningen dan strikt nodig is in het veld.

# 1 Inleiding

## 1.1 Probleemstelling

Zowel in Europees verband als in Nederland is vastgesteld dat ondergrondverdichting een serieuze bodembedreiging is. Het is echter niet bekend waar en in welke mate ondergrondverdichting nu al optreedt. Het is ook onvoldoende inzichtelijk welke gronden en gebieden het meest gevoelig zijn voor verdichting. Zodoende is ook niet duidelijk waar maatregelen ter voorkoming van verdichting nuttig zijn of waar maatregelen nodig zijn om de gevolgen van ondergrondverdichting tegen te gaan.

De Technische Commissie Bodem (TCB) vindt dat het beleid zich moet richten op preventie van ondergrondverdichting op regionaal niveau (TCB, 2011). Het Interprovinciaal Overleg (IPO) onderschrijft dit en heeft allereerst behoefte aan inzicht in waar de kwetsbare gebieden voor ondergrondverdichting liggen. Daarom is deze studie uitgevoerd.

## 1.2 Achtergrond

### *Europese Bodemstrategie*

De Europese Bodemstrategie beoogt een duurzaam beheer van de bodem in de EU en spreekt van een aantal belangrijke bodembedreigingen, namelijk erosie, afname van organische stof, verdichting, verzilting, aardverschuivingen, verontreiniging en afdekking (EC, 2006). In verschillende studies is verkend welke van deze genoemde bodembedreigingen voor Nederland aan de orde zijn (o.a. Römken en Oenema, 2004; Milieu- en Natuurplanbureau, 2006). Ondergrondverdichting is daarbij naar voren gekomen als één van de voor Nederland relevante bodembedreigingen, waarvan we tegelijkertijd het minst goed weten hoe het ermee staat (Hack-ten Broeke et al., 2009). De Europese Bodemstrategie richt zich voor bodemverdichting specifiek op ondergrondverdichting, waarbij de ondergrond al begint op een diepte van 20 tot 35 cm (EC, 2006).

### *Wat is eigenlijk bodemverdichting?*

In de bodem komen tussen de vaste delen poriën voor. Via deze poriën vindt transport van lucht en water plaats en plantenwortels dringen via de open ruimten in de bodem naar beneden. Bij bodemverdichting, bijvoorbeeld door te hoge wiellasten, vermindert het poriënvolume. Bij een te sterke verdichting zal de doorlatendheid en het vochtbergend vermogen van de bodem afnemen. Hierdoor kan bij overvloedige regen eerder wateroverlast ontstaan. Op hellende terreinen neemt de oppervlakkige afstroming van water toe, met meer kans op watererosie. Ook is er bijvoorbeeld meer kans op afspoeling van nutriënten en gewasbeschermingsmiddelen naar het oppervlaktewater. Een verdichte bodem is niet of moeilijk bewortelbaar doordat de indringweerstand te hoog is of de aëratie (luchthuishouding) te slecht, waardoor de gewasopbrengst afneemt. De bodem biedt van nature weerstand tegen samendrukken. Deze weerstand of sterkte is afhankelijk van de grondsoort en van het vochtgehalte in de bodem. Bepaalde gronden hebben door de geologische herkomst al een zeer dichte pakking met een gering poriënvolume en een zeer beperkte doorlatendheid. Dit geldt bijvoorbeeld voor keileem.

### *Advies TCB*

De Technische Commissie Bodem (TCB) concludeert dat er aanwijzingen zijn dat verdichting van de ondergrond toeneemt, dat op basis van schattingen grote delen van Nederland gevoelig zijn voor ondergrondverdichting, maar dat er geen landsdekkend beeld bestaat op basis van metingen (TCB, 2011).

De TCB adviseert daarom om te inventariseren in welke gebieden aandacht nodig is voor het voorkomen van verdichting of voor het treffen van maatregelen.

### **1.3 Projectdoelstelling**

Het doel van dit project is het leveren van kaartmateriaal, schaal 1 : 50.000, waarop is aangegeven in welke gebieden binnen het landelijk gebied van de Nederlandse provincies sprake is van een risico op ondergrondverdichting en in welke gebieden niet. Daarbij wordt voor de risico-beoordeling en indeling in vijf gradaties gehanteerd: zeer beperkt risico, beperkt risico, matig risico, groot risico en zeer groot risico.

Het resultaat van dit project kan vervolgens door de provincies worden gebruikt om na te gaan waar mogelijke maatregelen nodig zijn en waar maatregelen het meeste effect zullen hebben om te komen tot duurzaam bodembeheer.

Het kaartmateriaal is (bijgevoegd op cd-rom) aangeleverd in de vorm van GIS-bestanden (shapefiles) en in de vorm van een atlas in pdf-formaat met een kaart per provincie op schaal 1 : 50.000. In de bijlage van het rapport zijn de kaarten per provincie in A3-formaat opgenomen.

### **1.4 Uitgangspunten**

We baseren ons op de aanwezige kennis en gegevens voor zover het betrekking heeft op ondergrondverdichting van de laag van 20 tot 60 cm – mv. (dus inclusief de ploegzool). Deze studie heeft tot doel de voor bodemverdichting kwetsbare gebieden in beeld te brengen. Daarmee beperkt deze studie zich tot het eerste deel van het TCB-stappenplan: in beeld brengen van kwetsbare gebieden voor bodemverdichting. Er zijn dus geen ervaringsgegevens verzameld of veldwaarnemingen gedaan om na te gaan of er in deze gebieden al verdichte bodemlagen voorkomen en of er zich problemen voordoen. Deze horen namelijk thuis in de stappen 2 en 3 van het TCB-stappenplan. Wel is ons onderzoek en de methode die we voorstellen mede gebaseerd op ervaringsgegevens en veldwaarnemingen uit het verleden.

Het is daarbij belangrijk om te benadrukken dat gevoeligheid voor ondergrondverdichting iets anders is dan het zich voordoen van verdichting. Gronden die gevoelig zijn voor deze bodembedreiging hoeven helemaal niet verdicht te raken als er verstandig mee wordt omgesprongen. En het is ook mogelijk dat gronden verdicht raken die er juist minder gevoelig voor zijn, maar die zwaar worden belast of veelvuldig onder natte omstandigheden worden bewerkt e.d. Het risico op verdichting hangt daarom nauw samen met zowel de gevoeligheid voor verdichting als het grondgebruik.

Voor de bepaling van het risico op verdichting is ook nadrukkelijk het natuurlijk herstelvermogen meegenomen als bepalende factor. Daarbij kan het herstel een aantal jaren in beslag nemen. Als het natuurlijk herstelvermogen ertoe leidt dat de volgende generatie na ons de gevolgen van ondergrondverdichting niet meer merkt, dan kennen wij dergelijke bodems een wat lagere gevoeligheid toe dan op basis van de bodemsterkte alleen. Het is duidelijk dat op dergelijke gronden op dit moment dus wel sprake kan zijn van verdichting. De nadere uitwerking van de gevolgde methodiek vindt u in hoofdstuk 2.

Gebruikmakend van het opgeleverde kaartmateriaal dat inzichtelijk maakt welke gebieden kwetsbaar zijn voor ondergrondverdichting kunnen de provincies invulling geven aan de vervolgstappen van het advies van de TCB. Dit houdt onder andere in het verzamelen van ervaringen en het uitvoeren van eenvoudige veldwaarnemingen om te bepalen waar de grootste noodzaak is voor het nemen van (regionale) maatregelen om de ongewenste gevolgen binnen en buiten de landbouw tegen te kunnen gaan.

## 1.5 Leeswijzer

In de eerstvolgende hoofdstukken wordt de methodiek uitgebreid beschreven. In hoofdstuk 2 vindt u achtergrondinformatie over methoden die in voorgaande studies zijn gebruikt en welke aanvullingen daarop wij nodig achten voor deze studie. In hoofdstuk 3 wordt stapsgewijs de gevolgde werkwijze beschreven. Allereerst beschrijven we in dat hoofdstuk de gebruikte gegevens uit het Bodemkundig Informatiesysteem van Alterra en uit het Landelijk Grondgebruikbestand van Nederland. In hoofdstuk 3 wordt beschreven welke gronden van nature verdicht zijn en hoe we de veengronden beoordelen. In de paragrafen daarna vindt u informatie over de berekening van de bodemsterkte, de bepaling van maatgevende wiellasten per landgebruikscategorie en de vergelijking tussen bodemsterkte en grondspanning. Die vergelijking bepaalt een eerste indeling van de risico-inschatting. Vervolgens wordt voor het natuurlijk herstelvermogen rekening gehouden met een aantal bonus- en maluspunten, die ook uitgebreid in hoofdstuk 3 zijn beschreven. In hoofdstuk 3 vindt u ook kaarten van Nederland die deze tussenstappen inzichtelijk maken.

Hoofdstuk 4 bevat het eindresultaat van de risico-beoordeling voor heel Nederland, gebaseerd op de in hoofdstuk 3 beschreven methodiek. Op de kaart is in vijf gradaties te zien hoe het is gesteld met het risico op ondergrondverdichting, gegeven het landgebruik van de bestanden LGN 4, 5 en 6. In hoofdstuk 5 tenslotte zijn conclusies en aanbevelingen opgenomen.





## 2 Methoden om gevoeligheid voor verdichting te bepalen

### 2.1 Eerder onderzoek

Er zijn verschillende methoden om de kwetsbaarheid voor verdichting te schatten. Voor de provincie Drenthe is een eerste verkenning uitgevoerd en is een kaart van de provincie gemaakt met een indicatie van de gebieden met de relatief hoogste verdichtingsrisico's op basis van de verwachte verdichting en landgebruik (Bakker et al., 2010). Voor deze inschattingen is gebruik gemaakt van het Bodemkundig Informatiesysteem (BIS) van Alterra en informatie uit de Landelijk Grondgebruiksbestanden (LGN).

Van den Akker en Hoogland (2011) beschrijven de resultaten van de toepassing van een aantal methoden om het risico van ondergrondverdichting te bepalen voor heel Nederland. De methoden kunnen worden opgesplitst in empirische en meer procesmatige methoden. Bij empirische methoden speelt ervaring en expert-judgement een grote rol. Een voorbeeld is de aanpak van Jones et al. (2003), waarbij aan de hand van een indeling naar bodemtextuur, ingeschatte pakkingsdichtheid en klimaat (vochttoestand) de verdichtingsgevoeligheid wordt bepaald.

#### *Inschatting op basis van bodemsterkte en belasting*

De laatste jaren wordt steeds meer een procesmatige aanpak gebruikt. Daarbij wordt de sterkte van de ondergrond berekend uit relaties tussen sterkte van de grond bij een bepaalde vochtspanning (vaak bij -60 en -300 cm waterdruk) en bodemeigenschappen zoals textuur, structuur, organische stofgehalte, droge dichtheid etc. Deze sterkte kan op zich als indicatie worden gebruikt voor de verdichtingsgevoeligheid: hoe groter de sterkte des te minder verdichtingsgevoelig (Horn et al., 2005; Horn en Fleige, 2009). Een volgende stap is om wiellasten te onderzoeken en de spanningen in de ondergrond te berekenen en deze te vergelijken met de sterkte van de grond. Wordt de sterkte overschreden, dan treedt vervorming en verdichting op (Van den Akker, 2004; Van den Akker en Hoogland, 2011; Van de Vreken et al., 2009). Deze aanpak geeft de mogelijkheid om voor een bepaald landgebruik de gevoeligheid van de ondergrond voor verdichting te bepalen door een voor dat landgebruik typerende combinatie van banduitrusting, bandspanning en wiellasten nader te beschouwen in relatie tot de sterkte van de ondergrond. In de meeste gevallen wordt alleen de druksterkte (precompression stress) vergeleken met de (verticale) grondspanningen in de ondergrond (o.a. Van De Vreken et al., 2009). Dit kan alleen als een diepte wordt beschouwd waar de schuifspanningen die door de wiellast worden opgeroepen in de ondergrond de afschuifsterkte van de grond niet overschrijden (bv. op 40 cm diepte zoals bij Van de Vreken et al., 2009). Van den Akker (2004) toonde aan dat voor zandgronden en lichte zavelen de afschuifsterkte bovenin de ondergrond op een diepte van 20 tot 40 cm maatgevend is. Bij belasting door een grote wiellast kan bij die lichte gronden de afschuifsterkte tot decimeters in de ondergrond worden overschreden, waardoor zowel verdichting als vervorming in sterke mate optreden. Hierbij gaat de bodemstructuur verloren en ontstaat een dichte, slecht gestructureerde laag direct onder de bouwvoor. Vooral bij lichte gronden moet daarom altijd de afschuifsterkte in de bepaling van de verdichtingsgevoeligheid worden meegenomen. Whalley et al., (2012) laten zien dat door verdichting alléén de verzadigde doorlatendheid van een zware kleigrond met een factor 50 afneemt. Door de grond bovendien nog te vervormen, neemt de verzadigde doorlatendheid nog eens met meer dan een factor 10 af.

### *Beschouwing resterende fysische bodemkwaliteit*

Een volgende stap in een procedure om de verdichtingsgevoeligheid te bepalen kan zijn om te onderzoeken wat de resterende fysische bodemkwaliteiten (zoals bijvoorbeeld de verzadigde doorlatendheid en mogelijkheden voor aeratie), ná de voor het landgebruik typerende bodembelasting en verdichting zijn. Blijken deze nog ruim te voldoen aan de grenswaarden voor fysische bodemeigenschappen zoals die in de literatuur kunnen worden gevonden, dan is de conclusie dat het effect van de bodemverdichting meevalt. In dat geval is de ondergrond minder verdichtingsgevoelig dan eerst was gedacht op basis van de sterkte van die grond. Door aan monsters waarvan de druksterkte is bepaald ook een aantal bodemfysische bodemeigenschappen (zoals de verzadigde doorlatendheid) te bepalen, kan het effect van bodemverdichting op die bodemeigenschappen worden vastgesteld. Dit is gedaan door Horn et al. (2005) en Horn en Fleige (2009). Het blijkt dat bijvoorbeeld de verzadigde doorlatendheid na bezwijken van de grond (door overschrijding van de sterkte door een belasting) inderdaad sterk achteruit gaat. Daarbij hoeft de verzadigde waterdoorlatendheid echter niet lager te worden dan de grenswaarde van 10 cm/dag. Dit betekent dat de beschouwde grond minder verdichtingsgevoelig is dan op basis van de sterkte van die grond was gedacht. De hoeveelheid data die moet worden verzameld om naast de sterkte ook nog het effect van de verdichting vast te stellen is zo groot, dat Horn en Fleige (2009) voorstellen dat voorkomen van bodemverdichting door de grondsterkte niet te overschrijden de voorkeur heeft. Het economische belang van mechanisatie met hoge capaciteit is echter zo groot dat het wellicht de moeite loont om de grenzen op te zoeken.

## **2.2 Aanvullingen op bestaande methoden**

### *Een extra factor: natuurlijk herstelvermogen*

Een belangrijk aspect bij de vaststelling van verdichtingsgevoeligheid van een grond is het natuurlijk herstelvermogen. Een verdichte ondergrond kan bijvoorbeeld door zwel en krimp als het ware weer een nieuwe structuur krijgen, waarbij krimpscheuren de verdichte laag doorsnijden en hoofdbanen vormen voor preferente stroming van water, zuurstofdiffusie en voor beworteling. Ook beworteling en bodemfauna kunnen al dan niet in combinatie met krimpscheuren zorgen voor een zeker herstel van een aantal bodemfysische eigenschappen van de grond. Op basis van onderzoek uit het verleden (verzameld in Ten Cate et al., 1995), meer recent onderzoek (o.a. Gregory et al., 2007; Larink et al., 2001) en onderzoek door studenten (De Leeuw, 2009; Roelfsema, 2011) kan meer worden gezegd over de relatie tussen textuur en organische stofgehalte en het herstelvermogen van een ondergrond. Uit de proeven van De Leeuw (2009) en Roelfsema (2011) op Nederlandse zavel- en kleigronden blijkt dat het natuurlijk herstel door droogtekrimp en daarna zwellen niet altijd direct tot een verbetering leidt van de bodemfysische eigenschappen, zoals bijvoorbeeld de verzadigde doorlatendheid. Een deel van de grondmonsters bleek na de krimpfase in de daarop volgende zwelfase meer te zwellen dan de eerder gerealiseerde krimp. Omdat de grondmonsters in monsterringen zijn opgesloten, zwelt de grond verticaal uit de ring. Bedenk daarbij echter dat in het veld de grond bij zwellen ook alleen maar naar boven een uitweg kan vinden. De eerder gevormde krimpscheuren worden hierbij volledig dichtgedrukt en de grond in het monster wordt vervormd. Hierdoor bleek in een aantal gevallen de verzadigde doorlatendheid significant af te nemen ten opzichte van de oorspronkelijke waterdoorlatendheid. Wel was de dichtheid afgenomen. Daardoor wordt de kans dat een volgende krimp-zwel cyclus wel leidt tot een verbetering van de verzadigde waterdoorlatendheid veel groter. Er zijn dus wel meerdere krimp-zwel cycli nodig voor dit natuurlijk herstel ook daadwerkelijk resulteert in verbetering van de bodemkwaliteit. Naast fysische structuurvormende processen, zoals krimp-zwel cycli zijn ook bodem-biologische structuurvormende processen van groot belang (o.a. Larink et al., 2001), hoewel er aanwijzingen zijn dat de bodemfauna vooral een positief effect heeft op de structuur en bodemkwaliteit van de bovengrond en veel minder op die van de ondergrond (Holthusen et al., 2012). Gregory et al. (2007) vonden dat bij een verdichte zandondergrond en een verdichte middelzware zavelondergrond (20% lutum) de herstelmogelijkheden door beworteling slecht waren, maar bij een zware kleigrond wel goed. In Nederland wordt de grens waarbij structuurherstel door krimp kan optreden in het algemeen op een lutumgehalte van 17,5 % gesteld (o.a. Boels, 1982). Dit zijn zandondergronden en lichte

zavelondergronden (Boels, 1982). Vooral lichte zaveln en zandgronden met een hoog gehalte aan fijn zand en silt kunnen worden verdicht tot compacte homogene grond zonder macroporiën en met zeer beperkte mogelijkheden voor beworteling. Sommige zandondergronden in Nederland (zoalseerdgronden) hebben een relatief hoog gehalte aan organische stof (> 3%). Deze zandgronden zijn minder kwetsbaar voor verdichting dan zandgronden met een laag gehalte aan organische stof, aangezien de organische stof deze gronden elastischer (veerkrachtiger) en minder stevig maakt (Zhang et al., 2005). Oorspronkelijk hadden vele zandgronden natuurlijk verdichte ondergronden, die werden losgemaakt om ze geschikter te maken voor landbouwgebruik. Losgemaakte ondergrond is echter kwetsbaar voor herverdichting en de structuur en de fysieke bodemeigenschappen van herverdichte grond zijn vaak slechter dan die van de oorspronkelijke te sterk verdichte grond. De verslechtering van de structuur en de bijbehorende aantasting van de fysieke en biologische eigenschappen van de ondergrond door herverdichting is door Kooistra et al. (1984) en Kooistra en Boersma (1994) duidelijk aangetoond voor lichte zavelgronden in Nederland. Het eenmaal woelen van deze gronden heeft ertoe geleid dat deze nu elke drie tot vier jaar moeten worden gewoeld.

#### *Natuurlijk herstel duurt jaren en is niet volledig*

Het effect van ondergrondverdichting op de gewasproductie kan het beste in langjarige proeven worden onderzocht, omdat verwacht kan worden dat natuurlijk herstel van ondergrondverdichting een proces is dat vele jaren duurt. In 1980 zijn in een aantal landen in Noord- en West-Europa, waaronder in Nederland en in Noord-Amerika, langeduurproeven gestart, waarbij initieel de grond werd belast door vier maal wiel aan wiel te berijden met wiellasten van 50 kN in Europa en met wiellasten tot 90 kN in Noord-Amerika. Daarna werd in het langjarige vervolg van de proef de grond niet zwaarder belast dan met wiellasten van maximaal 25 kN (Håkansson et al., 1987; Håkansson en Reeder, 1994). Na enkele jaren bleek het effect van de zware wiellasten op de bovengrond te zijn verdwenen. Het Zweedse onderzoek was al in 1976 gestart en gebaseerd op deze experimenten kwamen Håkansson en Reeder (1994) tot de conclusie dat na vier tot vijf jaar het effect van de ondergrondverdichting op de gewasopbrengst een verlaging van ongeveer 5% was en dat dit na tien jaar en de daarop volgende jaren nog 2,5 % was. Bedacht moet worden dat in de experimenten al die jaren de wiellasten onder de 25 kN bleven. In de normale landbouwpraktijk zijn de wiellasten hoger en is het effect van de ondergrondverdichting op de reductie van gewasproductie tussen de 2,5 en 5%. In Finland zijn de éénmalig verdichte percelen nog lange tijd gevolgd en Alakukku (2000) vond na 17 jaren nog steeds lagere opbrengsten bij de verdichte percelen. Ook bleek dat de oogst aan stikstof relatief nog lager was dan de gewasopbrengst. Voorhees (2000) vond in de experimenten in Minnesota (USA), waarbij met wiellasten van 90 kN was bereiden, een permanente reductie van maïsopbrengst van 6%, meer dan het dubbele dus van de 2,5% die in Europa werd gemeten. De hogere wiellasten zijn daar waarschijnlijk in ieder geval deels debet aan.

In Nederland zijn deze internationale experimenten uitgevoerd op zandgronden in drie locaties in het Oostelijke zandgebied (Heino, Lemelerveld en Lememelerberg) en in één locatie in het Zuidelijk zandgebied (Westerhoven) (Alblas et al., 1994; Wanink et al., 1990), omdat van deze fijnzandige en lemige gronden bekend was dat ze gevoelig zijn voor ondergrondverdichting (Boels, 1982). Deze proeven duurden slechts vier jaar en in tegenstelling tot de experimenten in andere landen werd elk jaar twee maal wiel aan wiel bereiden met wiellasten van 50 kN (loonwerkersmechanisatie), respectievelijk 25 kN (boerenmechanisatie) en als controle niet bereiden. Als gewas was gekozen voor snijmaïs in continueelt. De resultaten zijn aangegeven in tabel 2.1.

Alblas et al. (1994) komen op basis van deze cijfers tot de conclusie dat in Nederland de opbrengstreductie door ondergrondverdichting van maïs gemiddeld 7% per jaar is met grote uitschieters in droge jaren. De nadelige effecten van ondergrondverdichting komen vooral sterk naar voren in de wat extremere klimaatomstandigheden, zoals in natte en droge perioden. In natte perioden is de infiltratiecapaciteit en drainerend vermogen van de grond van groot belang en in droge perioden moet het gewas diep kunnen wortelen om het vocht in de ondergrond te kunnen benutten. Een voorbeeld van het effect van een sterk verdichte ploegzool op de opbrengst van aardappelen op een lichte zavel in het droge jaar 1976 volgt uit het onderzoek van Van Loon en Bouma (1978): de opbrengst van de proefstroken met een sterk verdichte ploegzool was 1,42 kg/m<sup>2</sup> vers

gewicht (0,20 kg/m<sup>2</sup> droog gewicht) versus 2,22 kg/m<sup>2</sup> vers gewicht (0,25 kg/m<sup>2</sup> droog gewicht) bij de referentie zonder verdichtingsproblemen. In beide gevallen werd er niet berekend.

**Tabel 2.1**

*Drogestof snijmaisopbrengst van één locatie in het Zuidelijk zandgebied (Westerhoven) en drie locaties in het Oostelijk zandgebied (Heino, Lemerleveld en Lemelerberg) bij ondergrondverdichting door: (A) wiellasten van 50 kN; (B) wiellasten van 25 kN en (C) zonder wiellasten (controle). Opbrengsten bij de behandelingen A en B in % van de controle (C = 100 %). (Naar Alblas et al., 1994).*

Locatie	Westerhoven			Heino			Lemelerveld			Lemelerberg		
	A %	B %	C Mg/ha	A %	B %	C Mg/ha	A %	B %	C Mg/ha	A %	B %	C Mg/ha
1983	68	90	17.6	95	93	13.6	-	-	-	-	-	-
1984	74	92	11.3	91	93	13.4	86	97	10.2	101	104	11.9
1985	87	101	14.8	97	97	10.9	84	87	11.2	93	99	13.8
1986	62	95	17.3	94	101	14.2	-	-	-	-	-	-

Uit meer recent Nederlands onderzoek (Hanse et al., 2011) blijkt onder andere dat ondergrondverdichting en vooral de achteruitgang van de infiltratiecapaciteit de opbrengst van suikerbieten nadelig beïnvloed. Hanse et al. (2011) vergelijken paarsgewijs 26 'toptelers' met 26 'gemiddelde telers'. De percelen van de paren liggen dicht bij elkaar, hebben dezelfde soort grond en waterhuishoudkundige situatie en verschillen alleen in opbrengst: de 'toptelers' hebben gemiddeld 20% meer suikerbietenopbrengst dan de 'gemiddelde telers'. Dit had statistisch gezien een significante relatie met de verzadigde doorlatendheid van de ploegzool, die bij de 'toptelers' significant hoger was dan bij de 'gemiddelde telers'.

Bij procesmatige methoden om de kwetsbaarheid voor ondergrondverdichting vast te stellen wordt het herstelvermogen van de grond tot nu toe buiten beschouwing gelaten. Dit geldt bijvoorbeeld ook voor de gevoeligheidskaarten die voor Vlaanderen zijn gemaakt (Van de Vreken et al., 2009). Bij empirische methoden is dit aspect er bij een aantal methoden impliciet en verborgen ingebouwd. Volgens ons is het natuurlijk herstelvermogen te belangrijk om deze bij de vaststelling van de gevoeligheid voor ondergrondverdichting buiten beschouwing te laten.

Het is misschien opmerkelijk dat in de geschetste methoden geen dichtheden worden berekend. In principe kan met een model als SOCOMO (Van den Akker, 2004) of met een door Alterra uitgebreide versie van SoilFlex (Keller et al., 2007) uit de grondspanningen een dichtheid na berijden worden berekend uit in het laboratorium vastgestelde relaties tussen spanningen en dichtheden. Deze relaties vergen echter vele (dure) proeven om voldoende invoergegevens te krijgen. Bovendien blijken de berekende dichtheden slecht overeen te komen met de werkelijke dichtheden die in de praktijk worden gemeten. Ditzelfde geldt ook voor berekeningen met geavanceerde grondmechanische modellen (bijvoorbeeld met de eindige elementenmethode) die nog meer invoer vergen, maar ook geen goede dichtheden berekenen. Uit metingen in de praktijk (o.a. Van den Akker, 2004) blijkt dat de spanningen berekend met een model als SOCOMO wel goed overeenkomen met gemeten grondspanningen.

# 3 Werkwijze en gebruikte gegevens voor de constructie van de risicokaarten

## 3.1 Gebruikte gegevens

### 3.1.1 BIS

In het Bodemkundig Informatiesysteem (BIS) hebben we de beschikking over de Bodemkaart van Nederland, inclusief grondwatertrappen (Gt's) op schaal 1 : 50.000. Deze bodemkaart vormt de basis voor de risicokaarten. Voor de laag onder de bouwvoor kunnen we de meest voorkomende textuurklassen bepalen. De informatie over de grondwatertrappen gebruiken we voor het bepalen van gebieden waar de gevoeligheid voor ondergrondverdichting toeneemt, omdat deze gebieden vaak nat zijn, of juist waar de verdichtingsgevoeligheid minder is en natuurlijk herstel een kans krijgt omdat de grond goed is ontwaterd.

#### *Bodemgegevens voor het bepalen van het ondergrondtype*

De uitgebreide legenda van de bodemkaart maakt onderscheid in bodemeenheden op basis van moeder-materiaal, aard, dikte en samenstelling van de bovengrond, aanwezigheid van afwijkende lagen in het bodemprofiel tot ca. 1,20 m diepte, kalkrijkdom en bodemvorming (Steur en Heijink, 1991). Aanvullende documentatie bevat voor de eenheden een zogenoemde profielschets, met een typering van laagdiktes en laagkenmerken per eenheid (De Vries, 1999). Belangrijke laagkenmerken zijn de gehalten aan organische stof, lutum, leem en kalk, de zandgrofheid en de typering van de Staringreeks bouwsteen. De Staringreeks bouwsteen vormt in dit project de indeling voor ondergrondtypen waarvoor we het risico op verdichting bepalen. Om het ondergrondtype vast te stellen, is eerst per bodemeenheid de ploegdiepte bepaald (zandgronden en veenkoloniale gronden 32 cm, lichte zavel en lössgronden 27 cm, overige veengronden, moerige gronden, zware zavel en kleigronden 22 cm). Daarna is aan de hand van de profielschetsen vastgesteld welk ondergrondtype onder de geploegde laag voorkomt. Hiervoor is gepeild op 5 cm onder de ploegdiepte (figuur 3.1).

Voor een aantal bodemeenheden is de keuze voor het ondergrondtype aangepast, omdat er sinds de opname van de bodemkaart in de periode 1960 - 1995 veranderingen zijn opgetreden. Dit geldt voor veengronden en moerige gronden omdat veenlagen door oxidatie van organische stof geleidelijk slinken. Dit resulteert uiteindelijk in andere bodemtypen, veengronden veranderen in moerige gronden en moerige gronden deformeren geleidelijk naar zandgronden. In 2001 - 2003 is bij een inventarisatie van de veendikte bij ca. 100.000 ha dunne veengronden in Oost-Nederland vastgesteld dat bij bijna de helft van het areaal de veendikte inmiddels zo sterk is afgenomen dat het geen veengronden meer zijn. Het zijn nu waarschijnlijk moerige gronden (Van Kekem et al., 2005). Voor het vaststellen van het ondergrondtype zijn we voor deze gedeformeerde veengronden uitgegaan van de informatie uit profielschetsen van de meest verwante moerige gronden. Bij de moerige gronden is de veendikte in de afgelopen jaren ook verminderd. Een steekproef geeft aan dat eveneens ca. 50% van het areaal niet meer tot de moerige gronden behoort. De gedeformeerde moerige gronden zijn echter nog niet op de kaart aangegeven. Daarom zijn we voor de meeste moerige gronden uitgegaan van de profielschets uit de documentatie. Alleen voor de moerige gronden waarbij volgens de documentatie uit 1999 de moerige toplaag dikker is dan de ploegdiepte (22 cm) zijn we uitgegaan van de textuur van de eerste minerale laag onder de moerige laag.



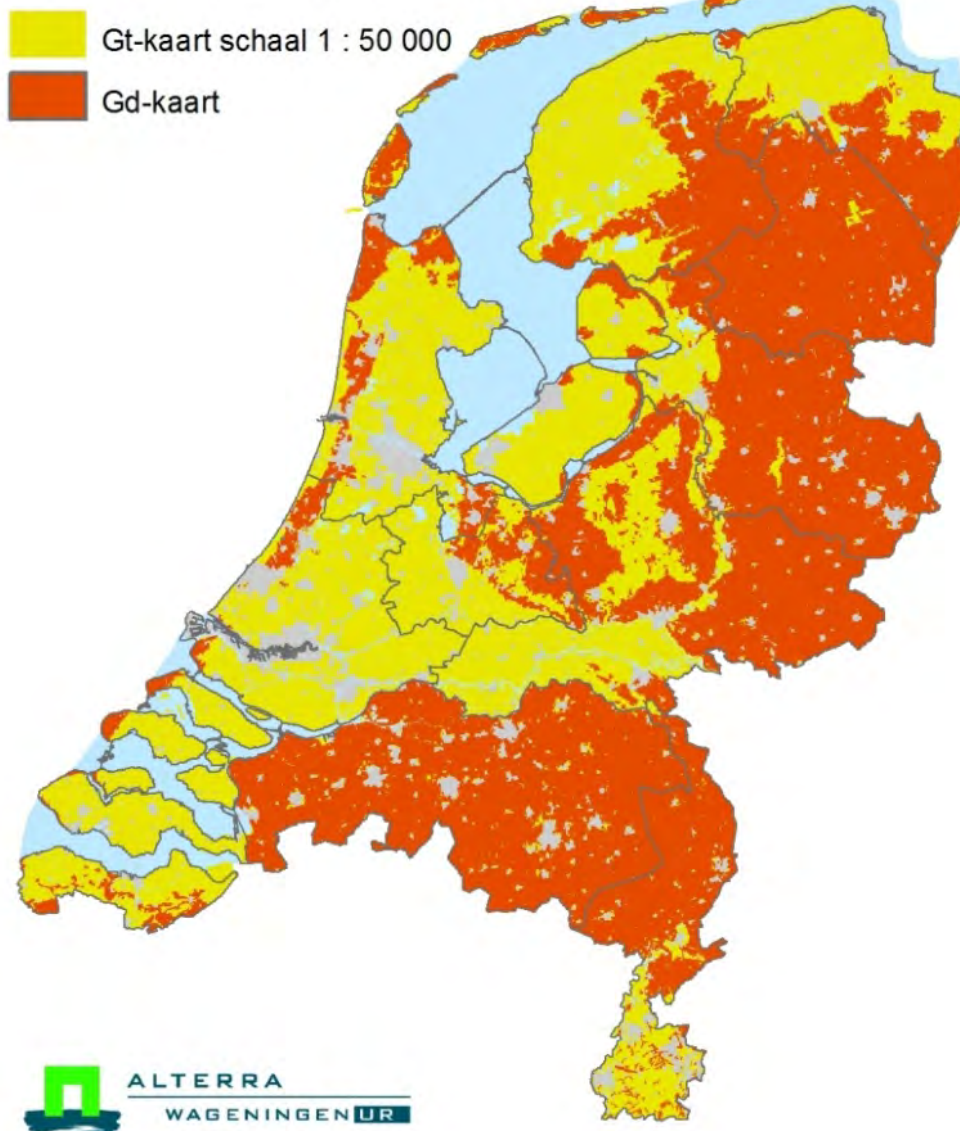
**Figuur 3.1**

*Samenstelling en textuur van de laag onder de bouwvoor.*

*Grondwatertrapgegevens voor het bepalen van de bonus- en maluspunten.*

De Gt-kaart geeft met de Gemiddeld Hoogste en de Gemiddeld Laagste Grondwaterstand (GHG en GLG) informatie over de fluctuatie van de grondwaterstand. De Gt-kaart, schaal 1 : 50.000, is gelijktijdig met de bodemkaart gemaakt. De kaart is dus voor geheel Nederland beschikbaar en de gegevens dateren evenals de gegevens van de bodemkaart uit de periode 1960 - 1995. Van Oost-Nederland en enkele zandgebieden in West-Nederland hebben we daarnaast de Gd-kaart (Van Kekem et al., 2005). Voor het maken van de Gd-kaart (grondwaterdynamiek) is een groot aantal grondwaterstandsmetingen verricht. Met geostatistische berekeningen is voor alle meetpunten de GHG en GLG bepaald, die vervolgens in combinatie met allerlei hulpinformatie ruimtelijk zijn geïnterpoleerd tot een gebiedsdekkend beeld. Bij het bepalen van de gebieden met een GHG ondieper dan 40 cm-mv. en voor de gebieden met een GLG > 120 zijn we, indien beschikbaar, uitgegaan van de informatie op de Gd-kaart en daarbuiten van de Gt-kaart, schaal 1 : 50.000 (figuur 3.2).

## Herkomst GHG- en GLG-informatie



*Figuur 3.2*

*Herkomst gegevens over GHG en GLG*

### 3.1.2 LGN

Het Landelijke Grondgebruiksbestand Nederland (LGN) is een landsdekkende kaart waarin 39 vormen van landgebruik zijn weergegeven. In het bestand worden de belangrijke landbouwgewassen, een aantal natuurklassen en een stedelijke klasse onderscheiden. De bestanden worden gemaakt met informatie uit satellietbeelden en andere relevante informatie. Elke drie tot vijf jaar wordt er een nieuwe versie gemaakt. De eerste experimentele versie (LGN1) is gemaakt uit satellietbeelden van 1984 - 1987. De laatste versie (LGN6) is gebaseerd op de beelden van 2007 en 2008.



Om inzicht te krijgen in gewasrotaties hebben we voor dit project de gegevens van LGN4, 5 en 6 gecombineerd. Uit de reeksen hebben we een 7-tal gebruiksklassen afgeleid (tabel 3.1). We maken onderscheid in grasland, maïs (inclusief rotatie met gras), granen (inclusief rotatie met gras), akkerbouw met rooivruchten, bollen, boomgaard, bos en overige natuur. De klasse overige natuur omvat de klassen met een veelal korte vegetatie, zoals hei, duingebieden en natuurgraslanden. In gebieden met bollenteelt, zoals in Noord-Holland en in Oost-Nederland, is sprake van een reizende bollenkraam, dat wil zeggen dat er op een perceel enkele jaren bollen worden geteeld en dat er daarna weer andere gewassen, zoals gras of maïs, worden verbouwd. Met LGN is het niet mogelijk om alle percelen waar in de afgelopen tien jaar bollen zijn geteeld te identificeren, omdat de bestanden met tussenpozen van een aantal jaren worden gemaakt. Bosgebieden zijn in de praktijk onder te verdelen in productiebossen en natuurlijke bossen. Deze typen bossen worden op verschillende manieren beheerd, dit zal zich ook uiten in de frequentie en intensiteit van het berijden met voertuigen en machines. Aan de hand van de LGN-bestanden is echter geen onderscheid te maken in productiebossen en natuurlijke bossen. In overleg met de begeleidingsgroep is besloten één categorie bos te onderscheiden. De intensiteit van het berijden van percelen met tuinbouw is vergelijkbaar met die bij akkerbouw met rooivruchten. Er is daarom geen aparte categorie tuinbouw onderscheiden. Tabel 3.1 geeft een overzicht van de combinaties die zijn ontstaan bij het combineren van de drie LGN-bestanden en de uiteindelijke landgebruiksklassen die gehanteerd worden. Figuur 3.3 geeft een overzicht van de verbreiding van de landgebruiksklassen.

**Tabel 3.1**

*Vertaling van grondgebruikcombinaties uit LGN4, 5 en 6 naar één klasse voor de beoordeling.*

Combinaties landgebruik volgens LGN4, LGN5 en LGN6	Beoordelen als
Gras	Gras
Gras, graan	Graan
Gras, maïs	Maïs
Gras, aardappelen, bieten, graan	Rooivruchten
Maïs	Maïs
Maïs, graan	Maïs
Maïs, aardappelen, bieten	Rooivruchten
Graan	Graan
Aardappelen, bieten, graan, overige gewassen	Rooivruchten
Gras, boomgaard	Boomgaard
Boomgaard	Boomgaard
Bollen, gras, bieten, aardappelen, graan	Bollen
Glastuinbouw	Glastuinbouw
Bos	Bos
Heide, natuurgrasland	Heide, natuurgrasland
Glastuinbouw	Glastuinbouw (niet beoordelen)
Bebouwing	Bebouwing (niet beoordelen)
Water	Water (niet beoordelen)





**Figuur 3.3**  
Landgebruiksklassen voor de beoordeling van het risico op verdichting

## 3.2 Werkwijze voor de constructie van de risicokaarten

Uitgaande van het doel - dat met het op te leveren kaartmateriaal inzichtelijk moet zijn welke gebieden welk risico hebben op ondergrondverdichting - hebben we een aanpak gehanteerd waarbij rekening wordt gehouden met:

1. Ondergronden die van nature al dicht zijn en nooit los zijn gemaakt omdat dat niet mogelijk is of zinloos en veenondergronden, die van nature zeer veerkrachtig zijn en een groot herstelvermogen hebben;
2. De sterkte van de ondergrond;
3. Het landgebruik en de daaruit volgende bodembelastingen in de vorm van wiellasten en banddrukken;
4. Factoren die de grond extra verdichtingsgevoelig maken en/of natuurlijk herstel bemoeilijken, bijvoorbeeld gronden met hoge grondwaterstanden;

5. Factoren die de grond minder gevoelig voor verdichting maken, zoals lage grondwaterstanden, goede mogelijkheden voor natuurlijk herstel of omdat belangrijke eigenschappen zoals de doorlatendheid niet of nauwelijks door verdichting worden beïnvloed.

Voorop staat dat deze studie betrekking heeft op ondergrondverdichting in de bodemlaag tussen 20 en 60 cm – mv. De reden dat alleen de ondergrond wordt beschouwd is dat de bovengrond zich op den duur door natuurlijke fysische en biologische processen eigenlijk altijd wel goed kan herstellen als er niet voortdurend overheen wordt gereden. Dit herstel van de bovengrond kan verder door ploegen sterk worden bevorderd. Als het begin van de ondergrond houden we daarom de ploegdiepte aan. Daarbij wordt er rekening mee gehouden dat voor verschillende grondsoorten de ploegdiepte verschilt.

### 3.2.1 Ondergronden die van nature al dicht zijn en veengronden

Er zijn ondergronden die van nature dicht zijn en waarbij losmaken geen zin heeft of eigenlijk onmogelijk is. Door de aard en samenstelling is er weinig biologische activiteit in deze bodems. Het zijn de volgende bodemeenheden:

- Keileem (KX) en oude klei (KT). Deze afzettingen hebben van nature een zeer dichte pakking, zijn slechte doorlatendheid, moeilijk bewerkbaar en slecht bewortelbaar.
- Leemgronden (pLn, Ln, BLn). Dit zijn de leemgronden in lokale depressies in het dekzandgebied. Deze gronden hebben vaak een 'spekkoekgelaagdheid' met compacte opbouw.
- Knipkleigronden (kMn..). Deze kalkloze zware kleien hebben sterke zwel- en krimp-eigenschappen. Bij uitdroging verplaatst bodemmateriaal uit de bouwvoor zich via de krimpscheuren naar beneden, waardoor onder de bouwvoor het volume vaste delen toeneemt en er bij zwellen interne verkleding en versmering optreedt. Door deze processen hebben de knipkleigronden onder de bouwvoor een compacte laag.
- Overslaggronden (AO). Overslaggronden zijn ontstaan bij dijkdoorbraken. Hierbij is in een kort catastrofaal moment materiaal afgezet. De samenstelling is zeer divers. Er is sprake van een mengsel van grof en fijn materiaal. Door deze samenstelling hebben de gronden vaak een gering porie-volume en dus een hoge dichtheid.
- Gronden met kleefaarde (KK). Kleefaarde is een kleigrond ontstaan door de verwerking van kalksteen. Kleefaarde heeft een sterk zwel- en krimpvermogen en daardoor een nauwe bewerkingmarge. In natte toestand is de grond erg dicht en kleverig en in droge toestand zeer hard.
- Gronden met kalksteen (AHk). Bij deze gronden in Zuid-Limburg zit vast kalksteen direct onder de bouwvoor.

Voor de bovengenoemde gronden houden we een aparte categorie aan.

Veenondergronden zijn veerkrachtig en gaan eerder bezwijken en plastisch vervormen dan dat ze te veel worden verdicht. Door de vervorming worden de bodemfysische eigenschappen wel verslechterd, maar daar staat tegenover dat ze een groot herstellvermogen hebben. Veengronden vormen om deze reden ook een aparte categorie op de risicokaart voor ondergrondverdichting. Echter, alléén de veengronden die op ca. 22 cm diepte uit moerige grond (veen) bestaan vallen in deze aparte veencategorie. Bijna de helft van alle Nederlandse veengronden zoals deze op de bodemkaart staan, hebben namelijk een dunne minerale afdeklaag (dunner dan 40 cm), die meestal bestaat uit klei. Dit is bijna altijd grasland, hoewel maisteelt ook wel voorkomt. De bovengrond is goed beworteld, maar het overgrote deel van graswortels bevindt zich in een dunne zodelaag. Voor de begindiepte van de ondergrond houden we een diepte van 22 cm aan, analoog aan de ploegdiepte bij kleigronden. Dit houdt in dat bij veengronden die als zodanig op de kaart staan, maar een dunne minerale deklaag hebben, een verdichte minerale laag kan ontstaan vanaf 22 cm diepte. Dat deze dichte laag inderdaad ontstaat komt overeen met onze ervaringen bij monsternamen voor verschillende veenprojecten. Deze veengronden worden dus wel getoetst op ondergrondverdichting.

### 3.2.2 Sterkte van de ondergrond

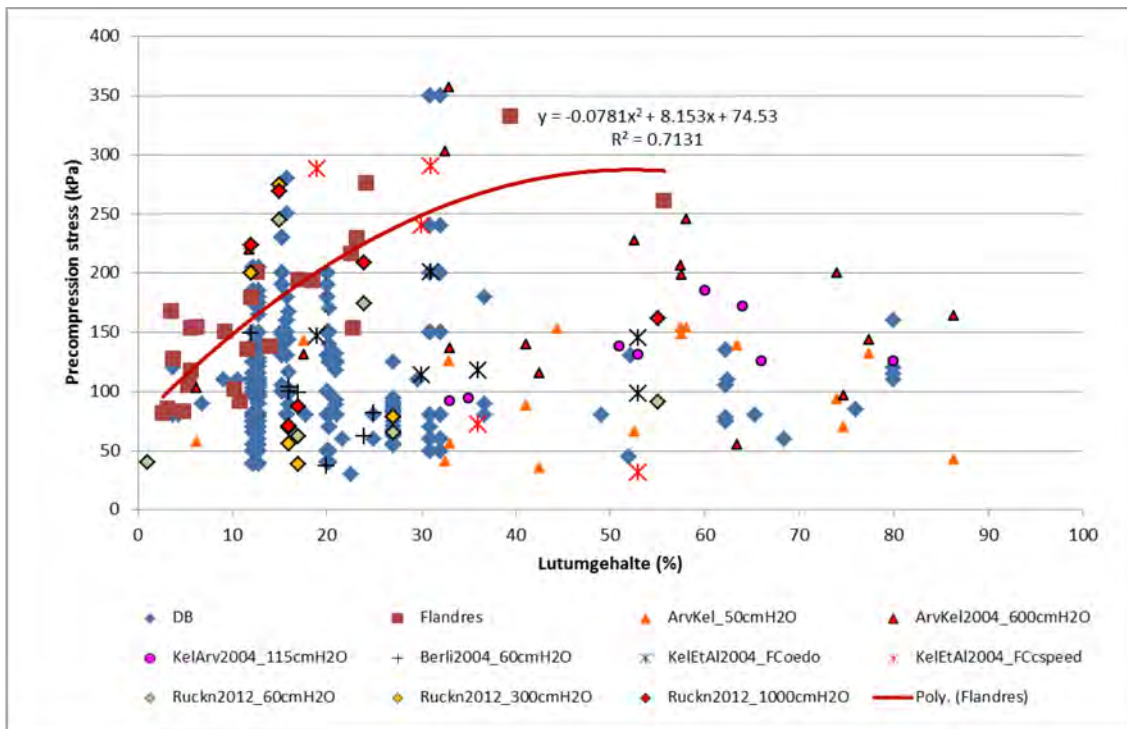
De procedure om het risico op ondergrondverdichting te bepalen begint met een vergelijking van de sterkte van de ondergrond met de belasting daarop. De sterkte van de ondergrond wordt bepaald met relaties van de sterkte met als verklarende parameters textuur, organische stof, structuur, dichtheid etc. Door Van den Akker (2003) zijn hiervoor vergelijkingen gebaseerd op Duitse gronden gebruikt (Lebert en Horn, 1999). De sterkteparameters die op deze manier voor Nederlandse ondergronden zijn bepaald zijn opgenomen in tabel 3.2. Uiteindelijk zijn de waarden van de precompressiesterkte  $P_v$  zoals die door Van den Akker (2003) zijn gebruikt, niet in deze studie gebruikt. Uit het Vlaamse bodemverdichtings-onderzoek (Van De Vreken et al., 2009) bleek namelijk dat de vergelijkingen van Lebert en Horn (1991) voor  $P_v$  waarschijnlijk zijn overgeparametriseerd en bij sommige Vlaamse ondergronden zelfs resulteerden in negatieve waarden. Van De Vreken et al. (2009) hebben voor de serie door hun onderzochte Vlaamse ondergronden de precompressie-sterkte laten bepalen voor natte gronden (pF 1.8). Deze waarden en een groot aantal waarden voor de precompressie-sterkte uit de literatuur en een database met sterkteparameters uit een aantal Europese landen zijn bijeengebracht in figuur 3.4. Uiteindelijk bleek het onmogelijk om goede verbanden tussen alle verzamelde data te krijgen en is besloten om alleen gebruik te maken van de Vlaamse data. Deze bleek namelijk een goed verband tussen de precompressiesterkte en het lutumgehalte te hebben. Een misschien nog belangrijkere reden is dat de bodems in Vlaanderen van alle bodems in de verzamelde data het meest op de Nederlandse bodems lijken voor textuur en ontstaanswijze. De gemeten precompressie-sterkten van de Vlaamse ondergronden blijken aan de hoge kant, zeker als wordt bedacht dat deze zijn gemeten aan monsters met een vochtspanning van -60 cm waterkolom. Om deze reden is besloten om deze waarden enigszins te reduceren tot 90% van de gemeten waarde. Een probleem was verder dat er geen precompressie-sterkten van de ondergrond bij een vochtspanning van -300 cm waterkolom zijn gemeten. De oplossing is gezocht door voor vochtige ondergronden (pF 2.5) de precompressie-sterkten uit de metingen bij een natte ondergrond te nemen. Op deze manier wordt enigszins rekening gehouden met de onzekerheid die in de metingen zit en het feit dat deze aan de hoge kant zijn vergeleken met de meetwaarden uit de meeste andere landen (zie figuur 3.4). In tabel 3.2 zijn de uiteindelijk gebruikte precompressie-sterkten in deze studie aangeduid met PSC.

**Tabel 3.2**

*Sterkteparameters voor Nederlandse ondergronden gebruikt door Van den Akker (2003) en in deze studie voor natte grond bij een vochtspanning van -60 cm waterkolom (pF 1.8) en vochtige grond bij een vochtspanning van -300 cm waterkolom (pF 2.5).*

*D = diepte waarop de ondergrond begint; C = cohesie;  $\varphi$  = hoek van inwendige wrijving;  $P_v$  = precompressie-sterkte zoals gebruikt door Van den Akker (2003); PSC = precompressie-sterkte zoals gebruikt in deze studie.*

Grondsoort en code	Natte grond (pF 1.8)					Vochtige grond (pF 2.5)				
	D	C	$\varphi$	$P_v$	PSC	C	$\varphi$	$P_v$	PSC	
	(cm)	(kPa)	(°)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	(°)	(kPa)	(kPa)	
Staringreeks										
Zandgronden	01-4	32	8	26	149,3	95,3	12	28	197,8	105,9
Grof zand	05	32	8	30	184,3	95,3	10	32	239,9	105,9
Keileem	06	32	8	30	124,3	95,3	10	32	122,2	105,9
Zeer lichte zavel	08	27	8	30	124,3	133,4	10	32	140,4	148,3
Matig lichte zavel	09	27	8	30	121,6	161,3	10	32	149	179,3
Zware zavel	010	27	10	22	204,4	192,3	14	31	78,8	213,7
Lichte klei	011	22	15	28	86,1	223,9	26	36	117,6	248,8
Matig zware klei	012	22	15	28	52,1	252,0	26	36	96	280,0
Zware klei	013	22	30	24	102,7	254,3	34	38	113,9	282,6
Zandige leem	014	22	10	35	107,4	102,0	15	39	81,7	113,3
Siltige leem	015	22	12	35	102,1	145,0	26	37	110	161,1



**Figuur 3.4**

*Precompressie-sterkten van ondergronden uit de literatuur (Arvidsson en Keller, 2004; Berli, 2004; Keller et al., 2004; Van De Vreken et al., 2009; Rücknagel, 2012) en uit een database samengesteld in het kader van een Europese Concerted Action on Subsoil Compaction (Trautner et al., 2003).*

De invoergegevens voor de grondsoort op een beschouwde diepte voor de sterkteberekening komen uit het BIS van Alterra. Voor de bodemkundige informatie maken we gebruik van de Bodemkaart van Nederland, schaal 1 : 50.000 en de daarbij behorende documentatie met beschrijvingen van de profielopbouw (De Vries, 1999). Gebiedsdekkend is aan de hand van deze gegevens bepaald welke bodemlagen (texturen) tussen 20 en 60 cm - mv. voorkomen in combinatie met het grondwaterstandsverloop.

### 3.2.3 Belasting en landgebruik

Als tweede wordt de belasting op de ondergrond nader beschouwd. Deze is afhankelijk van het landgebruik en de daarbij gebruikte mechanisatie. Voor het landgebruik is gebruik gemaakt van LGN-bestanden (zie 3.1.2). Omdat het vrijwel onmogelijk is om het cumulatieve verdichtingseffect van alle machines die in de loop der tijd op het veld gereden hebben gedetailleerd in beeld te brengen, is ervoor gekozen om voor elke vorm van landgebruik uiteindelijk één bepaalde, typerende wiellast, en bandspanning te benoemen die voor de constructie van de risicokaarten gebruikt werd. Hiervoor zijn in eerste instantie een aantal gebruikelijke landbouwmachines geselecteerd, waarvan het vermoeden bestaat dat daarbij de grootste bodembelastingen in de ondergrond optreden. Bij het type machines zijn niet de allergrootste machines gekozen, maar werd als richtlijn bij de selectie gebruikt dat het moderne machines met hoge capaciteit moeten zijn, die naar schatting op minstens 10% van het areaal gebruikt worden. Op deze manier is de huidige mechanisatie en die voor de nabije toekomst zo goed mogelijk getypeerd. Voor de vaststelling van wiellasten en banddrukken is gebruik gemaakt van de PRI-database voor bodembelasting door landbouwmachines (Vermeulen et al., in voorbereiding). Typerend is dat in de praktijk in het veld wordt gereden met de (meestal hogere) bandspanningen die noodzakelijk zijn voor het rijden op de weg met snelheden van 30 km per uur. Het risico op ondergrond-

verdichting wordt hierdoor duidelijk vergroot. De geselecteerde machines en de typerende wiellasten en banddrukken zijn in tabel 3.3 samengevat.

Voor al deze machines werden de bodemdrukken en afschuifkrachten in de ondergrond berekend en werd het risico op verdere verdichting van de ondergrond onderzocht (zie 4.1). Tenslotte werd per vorm van landgebruik uiteindelijk de machine met het grootste risico op ondergrondverdichting gekozen voor constructie van de risicokaarten. In een aantal gevallen werden twee machines geselecteerd, één voor de zwaardere gronden en één voor de lichtere gronden.

**Tabel 3.3**

*Typerende bewerkingen, landbouwwerktuigen, wiellasten, banduitrusting en bandspanningen. Het is een selectie van veel gebruikte en moderne landbouwmachines in het peiljaar 2010. Per vorm van landgebruik zijn de machines gekozen die vermoedelijk tot de hoogste piekdrukken in de ondergrond leiden.*

Land- gebruik	Grond- soort	Mogelijk maatgevende machine	Maximale wiellast (kg)	Benodigde banddruk <sup>1</sup> (kPa)		Typerende banddruk (kPa)
			Veld	Veld	Weg	
Gras	Klei	Trekker/bemester, aanvoersleepslang	2700	80	140	80
	Zand	Bemester, zelfrijder, tank 17 m <sup>3</sup>	9500	150	240	240
	-	Opraapwagen, dubbeldoel, 21 ton, tridem	4500	120	180	180
Mais	Klei	Trekker, 5-schaar wentelploeg	5900	230	200	230
	Zand	Trekker, 5-schaar wentelploeg	4000	130	130	130
	Zand	Bemester, zelfrijder, tank 17 m <sup>3</sup>	9500	150	100 <sup>3</sup>	150
	-	Maishakselaar, zelfrijder, geen bunker 370 kW	4600	100	160	160
	-	Dubbeldoel wagen, 21 ton, tridem	4500	120	180	180
Graan		Maaidorser, 330 kW, graantank 10500 l	10500	270	190	270
		Trekker, bemester met aanvoersleepslang	2700	80	140	80
Rooi- vruchten		Bunkerrooier, bunker 28 ton, 3 assen	11900	240	130	240
		Bunkerrooier, bunker 22 ton, vooras rupsen	16000			100 <sup>2</sup>
	Klei	Trekker, 5-schaar wentelploeg	5900	230	200	230
	Zand	Trekker, 5-schaar wentelploeg	4000	130	130	130
		Landbouwwagen, 30 ton, tridem, volbelast	6250	170	270	270
		Idem, belast tot wettelijk maximum op de weg	5000	130	190	190
	Zand	Bemester, zelfrijder, tank 17 m <sup>3</sup>	9500	150	100 <sup>3</sup>	150
Bollen		Trekker, voorlader-bunkerdak combi + plantmach.	2250	160	160	160
		Bollenrooimachine, 2 bedden, rupsen	9000			77 <sup>2</sup>
		Landbouwwagen, 16 ton, tandem	4400	160	230	230
Fruitteelt		Boomgaardspuit, 2000 l tank, enkelas	1100	125	220	220
		Smalspoor mest/compostwagen, 4 ton, tandem	1250	160	260	260
Bos		Houtoogstmachine (harvester)	6400	300	300	300
		Uitrijwagen (forwarder), 12 ton	6900	500	500	500
Overige natuur		Natte natuur: pistenbulley, rupsen	1250			5 <sup>2</sup>
		Droge natuur: opraapwagen, middelgroot, tandem, brede banden	3250	120	180	180

<sup>1</sup> De banddrukken zijn nodig voor de banden die standaard gemonteerd worden.

<sup>2</sup> Contactdruk, gemiddeld.

<sup>3</sup> Lege tank.

### **3.2.4 Sterkte versus grondspanningen in de ondergrond**

Voor de wiellasten en banden die uit de selectie van de gebruikelijke landbouwmachines volgen (paragraaf 3.2.3.) zijn vervolgens met het Soil Compaction Model SOCOMO (Van den Akker, 2004) de spanningen in de grond berekend en daarna bepaald of deze grondspanningen de sterkte van de ondergrond overschrijden. Hierbij wordt rekening gehouden met de druksterkte (precompressie-sterkte) en de afschuifsterkte van de ondergrond (paragraaf 3.2.2.). De berekeningen worden eerst uitgevoerd voor een vochtige grond en daarna voor een natte grond (vochtspanningen van respectievelijk -300 en -60 cm waterkolom). De natte grond komt veel voor in het voorjaar en de vochtige grond kan bijvoorbeeld voorkomen bij de oogstwerkzaamheden. Het is niet altijd noodzakelijk om de berekeningen ook voor de natte grond uit te voeren. Immers, als bij een vochtige grond door een bepaalde wiellast de ondergrond op de beschouwde diepten al bezwijkt, dan heeft het geen zin om dezelfde berekening nogmaals te doen met de lagere sterkteparameters van een natte grond.

Wordt de sterkte van de grond overschreden, dan heeft dat tot gevolg dat de grond verdicht en vervormt en dat de fysische eigenschappen verslechteren. Zoals eerder aangegeven hoeft dit niet te betekenen dat de fysische eigenschappen zodanig zijn verslechterd dat deze niet meer voldoen aan de grenswaarden voor doorlatendheid of beworteling. Dit is echter slecht te bepalen omdat relaties tussen krachten in de grond, het bezwijkgedrag, de daarop volgende mate van verdichting en vervorming, en de resulterende bodemeigenschappen complex zijn. Dichtheden in de ondergrond, en het al of niet voldoen aan de grenswaarden, moeten daarom worden gemeten en dat is in Nederland recent niet gebeurd.

De dichtheden die voor enigszins vergelijkbare gronden in Vlaanderen zijn aangetroffen op een diepte van 41 cm zijn echter bijna altijd ongeveer gelijk aan of dichter dan de maximaal toelaatbare dichtheid. Voor een zandgrond of lichte zavel is dit bijvoorbeeld  $1,6 \text{ g.cm}^{-3}$ . Overschrijding van de relatief hoge sterkte van dergelijke dichte grond resulteert direct in een hogere dichtheid dan de grensdichtheid. Op de vraag of grenswaarden voor de bodemkwaliteit worden overschreden volgt direct een bevestigend antwoord, waarna alleen de mogelijkheden van natuurlijk herstel en losmaken van de ondergrond nog overblijven.

### **3.2.5 Natuurlijk herstel en factoren die het risico op te sterke ondergrondverdichting kleiner of groter maken**

Een belangrijk innovatief onderdeel van de door ons ontwikkelde methodiek om het risico op ondergrondverdichting vast te stellen, is dat rekening wordt gehouden met een aantal factoren die het risico op ondergrondverdichting kleiner of groter maken. Het gaat hierbij in de eerste plaats om factoren zoals de vigerende bodemvochtomstandigheden, de mogelijkheden van natuurlijk herstel en de gevoeligheid van de bodemtexturen voor verlies van functionaliteit (doorlatendheid etc.). Hieronder wordt aangegeven hoe binnen de kaartenheden rekening gehouden kan worden met deze factoren. Een factor die ook bepalend is voor het verdichtingsrisico is de diepte tot waar de zone met verdichting zich uitstrekt, waarbij verdichting tot kleine diepte als minder risicovol wordt gezien dan verdichting tot grote diepte. Hieronder wordt besproken hoe dit is opgenomen in de risicobeoordeling. Tenslotte wordt besproken dat specifiek voor een aantal landgebruiksvormen het risico op ondergrondverdichting lager is, onder andere omdat er weinig over het land gereden wordt.

Oorspronkelijk is ook aandacht besteed aan het effect van losmaken van een verdichte ondergrond. In het algemeen is een losgemaakte ondergrond erg gevoelig voor herverdichting, maar er kan wel onderscheid gemaakt worden tussen gronden waarbij losmaken weinig resultaat en gronden waar het in ieder geval tijdelijk een positief resultaat heeft. In overleg met de begeleidingsgroep is echter besloten om losmaken van de ondergrond in deze studie verder buiten beschouwing te laten.

De volgende factoren zijn onderzocht:

Natte grond: een aantal gronden zijn landbouwkundig gezien onvoldoende gedraineerd en te kenschetsen als 'natte gronden'. Bij bijvoorbeeld natuurgebieden kan dit een gewenste situatie zijn, maar een natte grond is veel gevoeliger voor verdichting dan droge gronden. Ten eerste is de grondmechanische sterkte van natte grond lager dan die van droge grond. Verder treedt bij een natte grond meer versmering op als deze vervormt omdat de sterkte wordt overschreden. Dit resulteert in homogenisering van de grond en het sterk verslechteren van de bodemstructuur en doorlopende poriën worden vernield. De bodemfysische eigenschappen en bodemkwaliteit wordt hierdoor sterk verslechterd. Ook de mogelijkheden en omstandigheden voor bodembioologische herstelprocessen verslechteren sterk. Dit komt door de te natte omstandigheden met soms zuurstofloze omstandigheden, die nog extra wordt versterkt door een slechte bodemstructuur. In dit project wordt te natte grond gedefinieerd als grond met een Gemiddeld Hoogste Grondwaterstand (GHG) < 40 cm.

Droge grond: dit is feitelijk de positieve keerzijde van te natte grond. Droge grond is sterker dan natte grond, geeft goede mogelijkheden voor herstel door gunstige omstandigheden voor beworteling en bodembioologische processen en maakt bij krimpemde gronden scheurvorming en structuurvorming eerder mogelijk. Droge grond wordt in dit project gedefinieerd als grond met een Gemiddeld Laagste Grondwaterstand (GLG) > 120 cm. De meeste akkerbouwgronden en veel graslanden voldoen hieraan.

Lutumgehalte > 17,5%: bij een lutumgehalte of een kleigehalte groter dan 17,5% krimpen gronden bij uitdrogen zoveel dat krimpscheuren en structuurverbetering optreedt (zie paragraaf 2.2). Krimp blijkt in de praktijk een krachtig mechanisme te zijn om verdichte bodems te herstellen, omdat de scheuren beworteling en biologische processen sterk kunnen bevorderen. Gronden met een lager lutumgehalte dan 17,5%, zoals lichte zavels, kunnen juist zeer dicht zijn met een slechte structuur en nauwelijks natuurlijk herstel.

Humeuze ondergrond: dit is grond met meer dan ca. 3% organische stof. Hiervoor geldt enerzijds hetzelfde als bij het lutumgehalte van 17,5%, dat humus structuurbevorderend werkt door zijn sterke krimpgedrag. Daarnaast maakt humus de grond meer veerkrachtig waardoor hoge dichtheden worden voorkomen en de indringweerstand voor beworteling niet te hoog wordt. Om deze reden wordt bij kunstmatige gronden zoals bomenzand is het stedelijk gebied 4 - 5% veen gemengd om de verdichting te beperken en beworteling mogelijk te maken. De humus bevordert verder ook biologisch leven en daarmee het herstellvermogen. Een humeuze grond houdt wel beter water vast, waardoor deze minder sterk wordt.

Grof zand: één van de belangrijkste problemen van ondergrondverdichting is het soms sterk afnemen van het infiltratievermogen van de grond. Grof zand in de ondiepe ondergrond is landbouwkundig gezien niet gewenst, maar voor de beoordeling van verdichting is in ieder geval een voordeel dat de doorlatendheid ruim voldoende blijft en de infiltratiecapaciteit goed blijft.

Diepe verdichting: hoe dieper de zone met verdichting zich uitstrekt des te moeilijker het natuurlijk herstel plaats kan vinden. De zuurstofvoorziening in de grond wordt met de diepte steeds moeilijker en bij een dichte, slecht gestructureerde grond neemt deze sterk af. Bovendien blijft dichte grond natter en langere tijd (bijna) volledig verzadigd, waardoor de grond anaeroob blijft. De beworteling wordt daardoor sterk geremd. Wordt de ondergrond na verloop van tijd toch droger, dan wordt vaak al snel de mechanische indringweerstand te hoog voor beworteling (Boone, 1988). Onttrekking van water door wortels is de beste manier om een grond in de diepte droog te krijgen, waardoor krimp en biologische processen de mogelijkheid krijgen om de structuur te herstellen. Een diepe en goede beworteling is dus essentieel voor structuurherstel door bodemfysische en biologische herstelprocessen en andersom is een goede structuur essentieel voor een diepe beworteling. Deze wederkerige afhankelijkheid maakt dat hoe dieper de verdichting reikt des te slechter het natuurlijk herstel. Door Håkansson en Reeder (1994) wordt de grens waarop 'diep' begint op 40 cm gesteld. Deze diepte wordt ook in de Vlaamse studie naar bodemverdichting aangehouden (Van De Vreken et al., 2009). Door o.a. Schjønning et al. (2012) wordt ook een diepte van 50 cm als een kenmerkende diepte gezien waarop grondspanningen de sterkte van de ondergrond niet mogen overschrijden. Dit is gebaseerd op onder

andere voorschriften voor maximaal toelaatbare grondspanningen op een diepte van 50 cm zoals deze in de voormalige USSR waren gedefinieerd (Rusanov, 1994). In onze studie is analoog aan de Vlaamse studie en Håkansson en Reeder (1994) gekozen voor een diepte van 40 cm als een kritische diepte waaronder de mogelijkheden van herstel slecht worden.

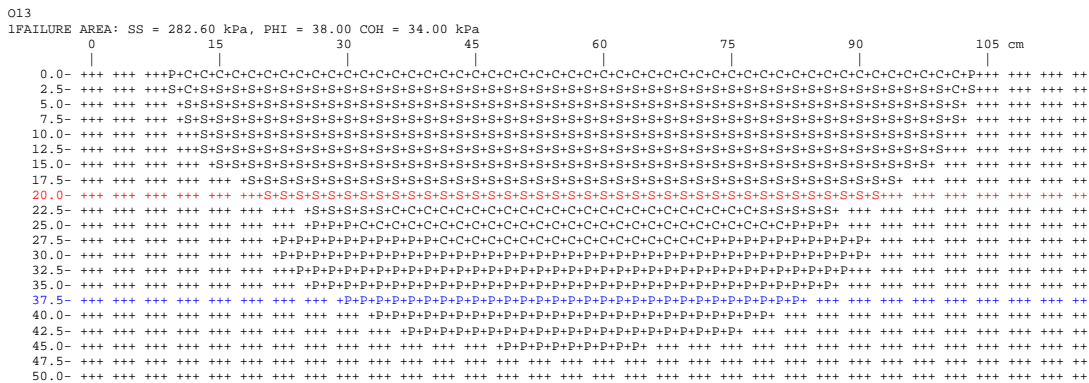
Extensieve berijding: het aantal malen dat akkerbouwland wordt bereiden wordt in het algemeen onderschat. Van de Zande (1991) berekende dat in de akkerbouw het oppervlakte aan sporen vier maal zo groot is als het totale oppervlakte van het betreffende perceel. Daarbij wordt gesteld dat elk wiel van een voertuig een spoor maakt. Uiteindelijk wordt zo het hele perceel vele malen bereiden. Omdat het herstel van de ondergrond traag of niet aanwezig is, wordt bij te hoge wiellasten op den duur de gehele ondergrond verdicht. Als het percentage van de ondergrond dat te sterk verdicht is voor goede beworteling of infiltratie van water de 100% begint te naderen, verslechtert de situatie sterk. Op dat moment zijn er steeds minder plekken op steeds grotere onderlinge afstanden waar de wortels of water via minder dichte grond de diepere ondergrond kunnen bereiken, met als gevolg grote gedeelten of het hele veld met beperkte bewortelingsmogelijkheden en infiltratiecapaciteit. Bij bossen, maar ook bij boomgaarden, wordt de berijding beperkt tot een gedeelte van het oppervlakte en dit gedeelte is ook goed verdeeld over dit oppervlakte. Dit heeft als voordeel dat een groot gedeelte van het oppervlakte goede mogelijkheden heeft om zijn structuur te behouden en eventueel te herstellen. Bij de meeste natuurgebieden is de berijding vele malen extensiever dan in de landbouw en ook daar is veel permanente begroeiing aanwezig, waardoor niet het hele oppervlakte wordt bereiden.

### **3.2.6 Systematiek voor het bepalen van het risico op verdichting**

De basis van de systematiek is dat er eerst per landgebruik wordt bepaald of een kenmerkend machinegebruik met de daarbij horende wiellasten, banduitrusting en bandspanningen leidt tot een zodanige belasting van de ondergrond dat deze bezwijkt, verdicht en vervormt. Dit bezwijken treedt op als de grondspanningen die door de wiellast in de ondergrond optreden groter zijn dan de druksterkte en/of de afschuifsterkte van die grond. Het kenmerkend machinegebruik, waarbij de kans het grootst is dat de sterkte in ondergrond wordt overschreden, wordt per landgebruik geselecteerd uit tabel 3.3. Vaak is al direct duidelijk wat de zwaarste belasting oplevert, maar bij twijfel wordt meer dan één machinegebruik doorgerekend. De berekening van de grondspanningen en de vergelijking met de sterkte van de ondergrond worden gedaan met het bodemverdichtingsmodel SOCOMO (Van den Akker, 2004).

De benodigde sterkteparameters die in de modelberekeningen voor het bezwijkgedrag van de ondergrond zijn gebruikt verschillen per grondsoort en per vochtgehalte en zijn aangegeven in tabel 3.2. De berekeningen zijn uitgevoerd met een concentratiefactor van 4. De concentratiefactor geeft aan hoe sterk de grondspanningen zich verspreiden in de diepte. Hoe droger en steviger de grond, des te beter spreiden de grondspanningen zich in de diepte en des te sneller nemen de grondspanningen met de diepte af. Voor droge, stevige grond is de concentratiefactor 3 (Koolen en Kuipers, 1983). Hoe natter de grond, des te slechter wordt de spreiding in de diepte en de grondspanningen concentreren zich meer onder de wiellast en de concentratiefactor neemt toe tot 5. Een concentratiefactor van 4 wordt gebruikt bij een vochtige grond (Koolen en Kuipers, 1983) en geeft in het algemeen een goede vergelijking met de grondspanningen die in de praktijk onder wiellasten worden gemeten. Omdat de dichtheid en daarmee de stevigheid van de ondergrond in de loop der tijd is toegenomen, wordt ook voor grond met een vochtspanning van -60 cm waterkolom (pF 1.8) de concentratiefactor 4 gebruikt. Het model SOCOMO berekent in dit geval per 2,5 cm tot een diepte van 50 centimeter alle grondspanningen onder een wiellast in een doorsnede onder de wielas dwars op de rijrichting. De wiellast drukt in het spoor en grijpt dus op spoordiepte aan. Rekening wordt gehouden met een spoordiepte van 2 – 3 cm. In de dwarsdoorsnede wordt aangegeven of de grond bezwijkt door overschrijding van de druksterkte (precompressie sterkte), de afschuifsterkte of een combinatie van de twee. Een voorbeeld is gegeven in figuur 3.5.





**Figuur 3.5**

Voorbeeld van de uitvoer van SOCOMO. Het gaat om een wiellast van 10.500 kg uitgeoefend door een maaidorser met een band 800/65R32 met een bandbreedte van 80 cm en een bandspanning van 270 kPa (2,7 bar). De beschouwde ondergrond 013 is een zware klei. Het is vochtige klei met een vochtspanning van -300 cm waterkolom. In een doorsnede onder de as van het wiel in de grond dwars op de rijrichting en tot een diepte van 50 cm wordt getoond waar de grond bezwijkt (de opgewekte grondspanningen overschrijden daar de sterkte van de grond). De letters geven het bezwijkmechanisme aan: S = overschrijding van de druksterkte (precompressiesterkte), P = overschrijding van de afschuifsterkte, waardoor plastische vervorming optreedt, C = de combinatie van S en P. De ploegdiepte van een zware klei is ca. 22 cm, Bij de beschouwing of de ondergrond wordt verdicht wordt rekening gehouden met een inspoordiepte van 2 - 3 cm. Daarom wordt op een diepte van 20 cm onder het spoor beschouwd of de ondergrond (ploegzool) bezwijkt en daardoor verdicht. Dit is aangegeven in ROOD. Om te controleren of diepe verdichting optreedt wordt een diepte van 37,5 cm onder het spoor beschouwd. Dit is aangegeven in BLAUW.

De drukverdeling in het contactvlak band - grond is gelijk genomen aan de drukverdeling in Van den Akker (2004). Dat wil zeggen dat in de lengterichting (rijrichting) de spanningsverdeling de vorm heeft van een tweedegraads parabool en in de dwarsrichting een derdegraads parabool, waarbij de druk onder de zijkant van de band (de wangen) 80% is van de drukspanning in het centrum van het contactvlak. De gemiddelde druk in het contactvlak is volgens een vuistregel van Koolen en Kuipers (1983) gelijk genomen aan 1,2 maal de bandspanning. Voor lage bandspanningen (minder dan 100 kPa cq 1 bar) gaat deze vuistregel niet meer op, maar in deze studie zijn bij alle beschouwde wiellasten de bandspanningen hoger dan 100 kPa (1 bar). Bij zeer hoge bandspanningen gaat de vuistregel ook niet op. We hebben een maximale gemiddelde contactdruk van 300 kPa aangehouden.

Als eerste zijn voor alle soorten landgebruik de maatgevende kenmerkende wiellast/bandbreedte/ bandspanning combinaties doorgerekend voor alle ondergronden aangegeven in tabel 3.2 bij een vochtspanning van -300 cm waterkolom (pF 2.5). In een aantal gevallen wordt in BIS aangegeven dat op de betreffende diepte de grond kenmerken heeft van een bovengrond (vaak een hoger organisch stofgehalte dan gebruikelijk). In dat geval wordt voor textuur een vergelijkbare ondergrond gerekend uit tabel 3.2.

Voor de gevallen dat de ondergrond direct onder de bovengrond (ploegdiepte) of op een diepte van ca. 40 cm bij de vochtspanning van -300 cm waterkolom sterk genoeg is om de belasting te dragen, wordt dan vervolgens voor deze wiellast/bandbreedte/bandspanning berekend of de ondergrond op deze twee diepten ook voor 'natte' grond bij een vochtspanning van -60 cm waterkolom (pF 1.8) sterk genoeg is en niet bezwijkt en verdicht.

Als een ondergrond direct onder de bovengrond (onder de ploegdiepte, in de ploegzool) sterk genoeg is om de wiellast te dragen, bij zowel een vochtspanning van -300 cm als bij een vochtspanning van -60 cm waterkolom, dan is het risico op ondergrondverdichting 'zeer beperkt'. Als de sterkte alleen voldoende is bij een

vochtspanning van -300 cm waterkolom, dat is het risico op ondergrondverdichting 'matig'. Is de sterkte bij beide vochtspanningen te weinig, dan is het risico op verdichting 'groot'.

Na dit deel van de bepaling van het risico op ondergrondverdichting (gebaseerd op de toetsing of de belasting volgend uit het landgebruik de sterkte van de ondergrond overschrijdt of niet), wordt vervolgens gekeken of deze waardering nog kan worden bijgesteld door rekening te houden met natuurlijk herstel en factoren die een ondergrond meer of minder gevoelig maken voor verdichting en/of de mogelijkheden voor natuurlijk herstel bevorderen of verslechteren. Deze factoren zijn als een Bonus/Malustoeslag ingebracht in de systematiek om het risico op ondergrondverdichting te bepalen (zie tabel 3.4).

**Tabel 3.4**

*Bonus/Malustoeslagen voor de factoren die het risico op verdichting verkleinen respectievelijk vergroten en/of die het herstel bevorderen respectievelijk bemoeilijken. Alle Malus- en Bonuspunten worden bij elkaar opgeteld, waarbij Bonus- en Maluspunten tegen elkaar weg kunnen vallen. De uiteindelijk maximale verhoging of verlaging van het risico op verdichting is maximaal 1 punt.*

Reden waarom:	————— Data uit BIS —————					Extensieve berijding	Diepe verdichting > 40 cm
	Natte grond GHG < 40 cm	Droge grond GLG > 120 cm	Lutum > 17,5 %	Humeuze ondergrond	Grof zand		
Kans op verdichting	X	X		X		X	
Kans op herstel	X	X	X	X		X	X
Doorlatendheid blijft goed					X	X	
Bonus of Malus	Malus	Bonus	Bonus	Bonus	Bonus	Bonus	Malus

De indeling in gradaties op basis van de sterkte van de ondergrond en de mogelijkheid om de wiellasten te dragen zonder ondergrondverdichting, gecombineerd met de toekenning van Bonus- en Maluspunten is in onderstaande kleurentabel weergegeven.

Voor het eindoordeel tellen we alle bonus- en maluspunten bij elkaar op en dan wordt pas gekeken of er sprake is van + of -.

De werkwijze om tot een oordeel te komen is dan als volgt: eerst wordt gekeken of de sterkte van de ondergrond voldoende is bij natte en vochtige grond. Is dit bij beide vochtgehalten het geval (+ en +), dan begint men in de categorie 'zeer beperkt'. Is dit alleen het geval bij vochtige grond (- en +), dan begint men in de risicoklasse 'matig'. Is de sterkte van de ondergrond in beide gevallen te laag (- en -), dan begint men in de risicoklasse 'groot'.

De volgende stap is het vaststellen van de bonus- en maluspunten. Als er meer bonuspunten zijn dan maluspunten, dan schuift het oordeel één risicoklasse richting minder risico op (het risico wordt beperkter). Als er meer malus- dan bonuspunten zijn, dan schuift oordeel één risicoklasse richting meer risico op (het risico wordt groter). Als er evenveel bonus- en maluspunten zijn of er zijn helemaal geen bonus- of maluspunten, dan blijft men binnen de eerder vastgestelde risicoklasse. Al met al schuift men in de tabel 3.5 via de bonus- en maluspunten hooguit één risicoklasse naar boven of beneden op.

**Tabel 3.5**

*Kleurentabel met beoordeling van het risico op verdichting op basis van de sterkte van de ondergrond en Bonus- en Maluspunten voor positieve en negatieve factoren voor het risico op ondergrondverdichting cq. de kans op natuurlijk herstel. De eerste kolom geeft het uiteindelijke oordeel: van een 'zeer beperkt' risico tot een 'zeer groot' risico. De kolommen 2 t/m 5 geven de mogelijke combinaties die tot dit oordeel leiden.*

<u>Gradatie</u> Risico op ondergrond- verdichting	Sterkte ondergrond voldoende bij natte omstandigheden	Sterkte ondergrond voldoende bij vochtige omstandigheden	Bonuspunt voor diep grondwater, hoog lutumgehalte, humeuze ondergrond, grof zand, of extensieve berijding	Maluspunt vanwege ondiep grondwater of diepe verdichting
1 zeer beperkt	+	+	nvt	geen
2 beperkt	+	+	nvt	ondiepe GHG
	-	+	minstens 1 bonuspunt	geen
3 matig	-	+	geen	geen
	-	+	minstens 1 bonuspunt	minstens 1 maluspunt
	-	-	minstens 1 bonuspunt	geen
4 groot	-	+	geen	minstens 1 maluspunt
	-	-	geen	geen
	-	-	minstens 1 bonuspunt	minstens 1 maluspunt
5 zeer groot	-	-	geen	minstens 1 maluspunt

De totstandkoming van de risicokaarten loopt dus via een aantal tussenstappen, waarvan kaarten zijn gemaakt voor het voorkomen van bonus- en maluspunten. Deze kaarten worden achtereenvolgens weergegeven in de figuren 3.6 t/m 3.11.


Malus voor GHG < 40 cm-mv.


**Malus**

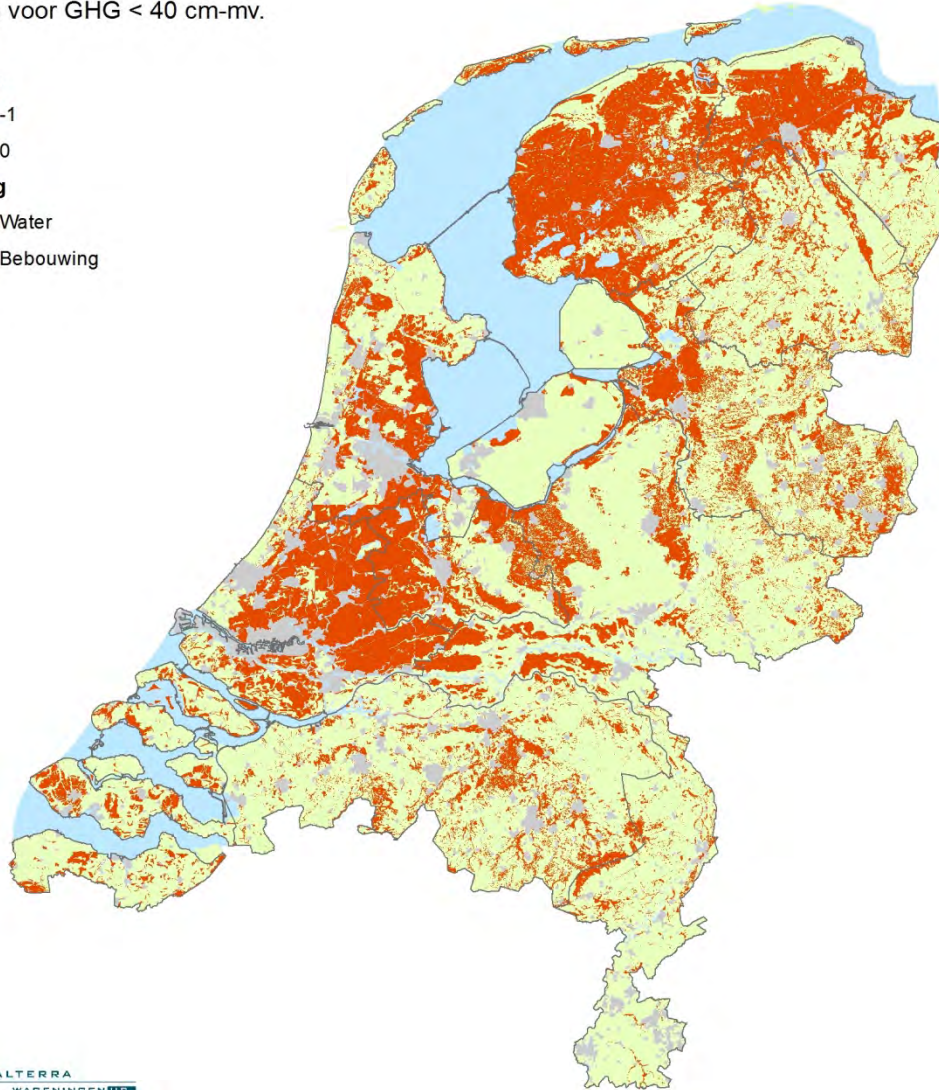
 -1

 0

**Overig**

 Water

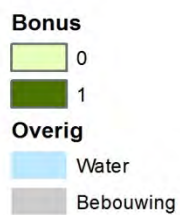
 Bebouwing



**Figuur 3.6**

*Gebieden met een GLG < 40 cm-mv (maluspunt).*

Bonus voor GLG > 120 cm-mv.



**Figuur 3.7**  
*Gebieden met een GLG > 120 cm-mv (bonuspunt).*



Bonus voor meer dan 17,5% lutum onder de bouwvoor

**Bonus**

0

1

**Overig**

Water

Bebouwing

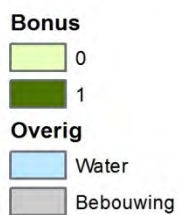


 **ALTERRA**  
WAGENINGEN UR

**Figuur 3.8**

*Gebieden met meer dan 17,5% lutum onder de bouwvoor (bonuspunt).*

Bonus voor humeuze laag onder de bouwvoor



**Figuur 3.9**

*Gebieden met een humeuze laag onder de bouwvoor (bonuspunt).*

Bonus voor grof zand onder de bouwvoor

**Bonus**

0

1

**Overig**

Water

Bebouwing






***Figuur 3.10***

*Gebieden met grof zand onder de bouwvoor (bonuspunt).*





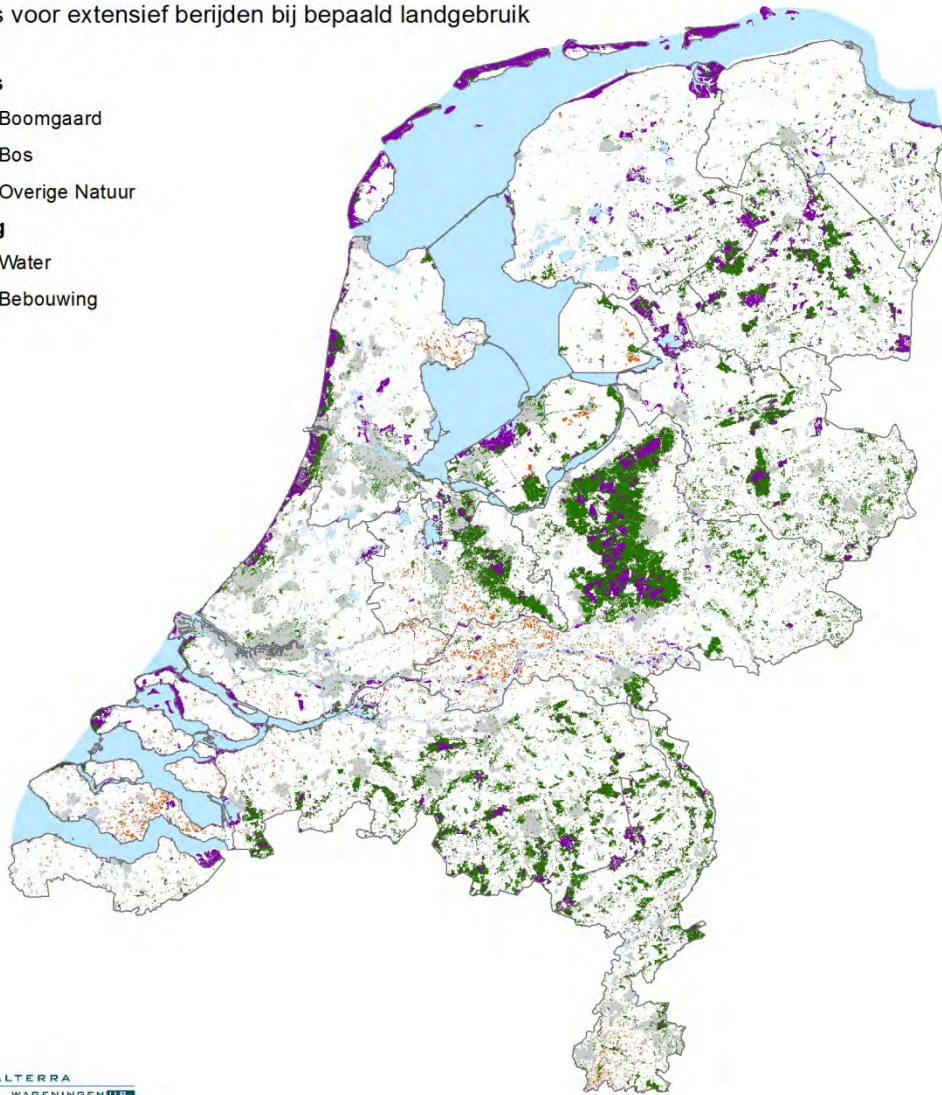
Bonus voor extensief berijden bij bepaald landgebruik

**Bonus**

-  Boomgaard
-  Bos
-  Overige Natuur

**Overig**

-  Water
-  Bebouwing



**Figuur 3.11**

*Bonuspunt wegens extensief berijden.*



## 4 Resultaten, kaartmateriaal en toelichting

### 4.1 Resultaten vergelijking sterkte versus grondspanningen in de ondergrond met SOCOMO

#### *Belasting en bodemsterkte*

De resultaten zijn bijeengebracht in tabel 4.1. In het algemeen wordt geconcludeerd dat de ondergrond de wiellasten die bij landbouwkundig en bosbouwkundig gebruik worden ingezet niet kunnen dragen, zodat bijna onherroepelijk een ploegzool ontstaan en deze zich ruimtelijk en in de diepte zal uitbreiden. In de meeste gevallen is ook de sterkte op 40 cm diepte niet voldoende om de gebruikelijke wiellasten te dragen.

Van de wiellasten die voor verschillend landgebruik zijn aangegeven in tabel 3.3, blijkt voor grasland de zelfrijdende bemester of bij kleigronden de opraapwagen maatgevend te zijn. Alleen zware kleigronden zijn sterk genoeg om bij een vochtspanning van -300 cm waterkolom niet te bezwijken.

Voor landgebruik waarbij in Nederland bijna standaard wordt geploegd bleek de wiellast, die door het achterwiel van de trekker verticaal, maar ook horizontaal in de open voor op de ondergrond wordt uitgeoefend, in alle gevallen te resulteren in overschrijding van zowel de druksterkte (precompressiesterkte) als de afschuifsterkte. Op een diepte van 40 cm is het rijden in de open voor wat minder desastreus: bij lichte, middelzware en zeer zware klei is dan de grond sterk genoeg om deze belasting te dragen. Echter, de bemester, maai-dorser, bietenrooier of landbouwwagens hebben zodanig hoge wiellasten dat bij de landgebruikscategorieën 'mais', 'graan' en 'rooivruchten' de ondergrond bij lange na niet sterk genoeg is om de opgewekte grondspanningen te dragen. Alleen bij 'mais' kan bij zware klei de ondergrond op een diepte van 40 cm de opgewekte grondspanningen weerstaan.

Bij 'bollen' zijn de wiellasten van de landbouw kipwagens maatgevend (naast ploegen). Alleen in het (nogal theoretische) geval van een zware klei als ondergrond op een diepte van 40 cm blijkt de ondergrond het te kunnen houden. Bij het landgebruik 'bos' zijn in alle gevallen de wiellasten van de uitrijwagen (forwarder) te hoog en bezwijkt, hoewel een ondergrond van zware klei op een diepte van 40 cm sterk genoeg is om de grondspanningen te weerstaan. Bij 'fruitteelt' is de smalspoor mest- en compostwagen maatgevend. Deze machines hebben vrij smalle banden met een hoge bandspanning en ondanks de vrij lage wiellast zijn de grondspanningen op ploegzoldiepte te hoog en is alleen zware klei bij een vochtspanning van -300 cm waterkolom sterk genoeg om niet te bezwijken. Op een diepte van 40 cm zijn de grondspanningen zo laag geworden dat zware zavels en andere kleigronden niet bezwijken. Bij natuur met korte vegetatie (overige natuur) is de opraapwagen maatgevend. Alleen bij zeer zware klei is de ondergrond op ploegzoldiepte voldoende sterk, ook bij een vochtspanning van -60 cm waterkolom. Op 40 cm diepte zijn de kleiondergronden sterk genoeg.

#### *Voor de hand liggende mogelijkheden om de ondergrondverdichting te beperken*

Verder onderzoek leert dat door 'bovenover' te ploegen, dus door bij het ploegen niet in de open voor over de ondergrond te rijden, er veel schade kan worden vermeden. Verder kan in veel gevallen de bandspanningen lager zijn dan nu gebruikelijk. Om schade aan banden te vermijden en om geen tijd te verliezen bij het verlaten van het veld en vervolgens rijden op de weg, wordt bijna altijd de bandspanning permanent hoog gehouden. Bandspanningen verlagen tijdens de veldwerkzaamheden is naast 'bovenover' ploegen een tweede goede mogelijkheid om schade te voorkomen.

**Tabel 4.1.**

Resultaat berekeningen met SOCOMO voor alle grondsoorten bij een vochtspanning van -300 cm waterkolom en relevante wiellasten bij verschillend landgebruik. In de bovenste tabel is aangegeven of de ploegzool voldoende sterk is (aangegeven met '+') of bezwijkt en verdicht door overschrijding van de druksterkte (s) of de afschuifsterkte (p) of een combinatie van s en p ( $c = s + p$ ). Als de sterkte van de grond voldoende is, wordt de berekening ook uitgevoerd voor de grond met een vochtspanning van -60 cm waterkolom. Het resultaat daarvan is tussen haakjes gegeven ((+), (s), (p), (c)). In de onderste tabel is hetzelfde aangegeven voor de ondergrond op 40 cm diepte.

			Sterkte ploegzool voldoende (+) of bezwijkmechanisme (s, p of c)							
Staring bouwsteen	Textuur	Diepte ploegzool	Gras	Mais	Graan	Rooivruchten	Bollen	Fruitteelt	Bos	Overige natuur
001	Leemarm zand	32	c	c	c	c	c	p	c	c
002	Zwak lemig zand	32	c	c	c	c	c	p	c	c
003	Sterk lemig zand	32	c	c	c	c	c	p	c	c
004	Zeer sterk lemig zand	32	c	c	c	c	c	p	c	c
005	Grof zand	32	c	c	c	c	c	p	c	c
006	Keileem	22	c	c	c	c	c	c	c	c
008	Zeer lichte zavel	27	c	c	c	c	c	p	c	p
009	Matig lichte zavel	27	c	c	c	c	c	p	c	p
010	Zware zavel	27	p	c	c	c	c	p	c	p
011	Lichte klei	22	c	c	c	c	c	p	c	p
012	Matig zware klei	22	p	c	c	c	c	p	p	p
013	Zeer zware klei	22	+ (p)	c	c	c	p	+ (p)	p	+ (+)
014	Zandige leem	22	s	c	c	c	c	c	c	c
015	Siltige leem	22	s	c	c	c	c	p	c	c
			Sterkte op 40 cm diepte voldoende (+) of bezwijkmechanisme (s, p of c)							
Staring bouwsteen	Textuur	Diepte ploegzool	Gras	Mais	Graan	Rooivruchten	Bollen	Fruitteelt	Bos	Overige natuur
001	Leemarm zand	32	c	c	c	c	c	p	c	p
002	Zwak lemig zand	32	c	c	c	c	c	p	c	p
003	Sterk lemig zand	32	c	c	c	c	c	p	c	p
004	Zeer sterk lemig zand	32	c	c	c	c	c	p	c	p
005	Grof zand	32	c	c	c	c	c	p	c	p
006	Keileem	22	c	c	c	c	c	p	c	p
008	Zeer lichte zavel	27	c	c	c	c	p	p	c	p
009	Matig lichte zavel	27	p	c	c	c	p	p	p	p
010	Zware zavel	27	p	c	c	c	p	+ (p)	p	p
011	Lichte klei	22	p	p	p	p	p	+ (+)	p	+ (p)
012	Matig zware klei	22	p	p	p	p	p	+ (+)	p	+ (p)
013	Zeer zware klei	22	+ (p)	+ (p)	p	p	+	+ (+)	+ (p)	+ (+)
014	Zandige leem	22	c	c	c	c	c	+ (+)	c	p
015	Siltige leem	22	c	c	c	c	p	+ (+)	p	+ (p)
+ = sterkte voldoende			p = plastische vervorming door overschrijding afschuifsterkte							
s = verdichting door drukspanning			c = combinatie s en p							

## 4.2 Kaartmateriaal en toelichting

Tabel 4.1 laat al zien dat het overgrote deel van de Nederlandse ondergrond een groot risico loopt op verdichting. Alleen bij ondergronden bestaande uit zeer zware klei zijn op grasland, bij fruitteelt en overige natuur het risico 'matig'. Alleen door rekening te houden met natuurlijk herstel en factoren die het herstelproces bevorderen en factoren die het risico op ernstige ondergrondverdichting verlagen, kan een iets betere situatie worden gezien. Deze factoren worden door het systeem met Bonus/Malus-toeslagen (zie tabel 3.5) ingebracht en dit resulteert in kaarten met het 'Risico op ondergrondverdichting'.

Hieronder wordt op kleine schaal deze kaart voor Nederland gegeven (figuur 4.1). In een aparte bijlage worden de kaarten per provincie gegeven, waarbij ook de tussenproducten worden getoond.

Risico op ondergrondverdichting bij huidig landgebruik



**Figuur 4.1**

*Risico op ondergrondverdichting bij huidig grondgebruik.*



## 5 Discussie

### 5.1 Vergelijking met de resultaten van het Vlaamse onderzoek naar ondergrondverdichting

De resultaten en conclusies in het rapport 'Verkennde studie betreffende bodemverdichting in Vlaanderen en afbakening van risicogebieden voor bodemverdichting' van Van De Vreken et al., (2009), hebben betrekking op de ondergrond op een diepte van 41 cm. Daarbij is niet zozeer naar het specifieke landgebruik gekeken, maar zijn berekeningen gemaakt voor een tractorband en een band die onder zware landbouwmachines, zoals bietenrooiers of maaidorsers, wordt gebruikt. Voor de tractorband werd gekozen voor een 480/80R42-band met een breedte van 484 mm. De 'oogstmachineband' is een 800/65R32-band met een breedte van 801 mm. De bandspanningen werden optimaal genomen, dat wil zeggen de laagste bandspanning in het veld die volgens de fabrikant mogelijk is bij de beschouwde wiellast. In de Vlaamse studie zijn voor de beschouwde diepte van 41 cm de berekende grondspanningen vergeleken met de sterkte van de ondergrond op die diepte. Daarbij is geen rekening gehouden met de afschuifspanningen en afschuifsterkte van de grond en zijn alleen de drukspanningen en druksterkte (precompressiesterkte) van de grond beschouwd. De precompressiesterkten van de verschillende ondergronden zijn daarbij berekend met pedotransfer functies (PTF's) van Lebert en Horn (1991). De precompressiesterkte van een serie Vlaamse ondergronden is ook gemeten bij een vochtspanning van -60 cm waterkolom. Mede aan de hand van de meetresultaten kwamen de Vlaamse onderzoekers achteraf bezien tot de conclusie dat de pedotransfer functies van Lebert en Horn (1991) soms twijfelachtige resultaten gaven. De conclusie van het Vlaamse onderzoek is dat vandaag de dag vele Vlaamse ondergronden zijn verdicht. Dit werd bevestigd met dichtheidsmetingen op zeventien percelen in Vlaanderen.

In het Nederlandse onderzoek wordt naast de diepte van 40 cm ook de ploegzooldiepte beschouwd. Verder wordt er rekening gehouden met het landgebruik en de daaruit volgende wiellasten. De uit de wiellast volgende grondspanningen worden vergeleken met de precompressiesterkte, die bepaald is met de precompressiesterkten die zijn gemeten in het Vlaamse onderzoek. Daarnaast wordt ook getoetst of de afschuifsterkte van de grond wordt overschreden. Op een diepte van 40 cm blijkt bij lichte tot zeer zware kleiondergrond de afschuifsterkte maatgevend te zijn. Al met al is de conclusie hetzelfde als in het Vlaamse onderzoek: voor vele Nederlandse ondergronden is het risico op verdichting groot. In Nederland is geen uitgebreid inventariserend onderzoek gedaan naar de mate van verdichting van de ondergrond, echter incidentele, vrij recente onderzoeken naar de verdichting van zandgronden en lichte zavelen laten zien dat deze ondergronden in vele gevallen verdicht zijn (Van den Akker en De Groot, 2008; Van den Akker et al., 2010). Een statistische onderzoek van bodemdichtheidsgegevens in BIS laat zien dat dit waarschijnlijk ook geldt voor kleigronden (Van den Akker en Hoogland, 2011).

### 5.2 Discussiepunten begeleidingsgroep

#### Beoordeling veengronden

Veengronden met een dun mineraal dek ('dun' in de zin van dunner dan 40 cm) worden beoordeeld volgens dat minerale dek. In de meeste gevallen is dit minerale dek klei. Het gaat hier dus om veengronden zonder dun kleidek. Die worden op de risicokaart voor verdichting niet beoordeeld, maar aangeduid als 'Beperkt door veenlagen'. Zoals aangegeven in paragraaf 3.2.1 worden deze veengronden geacht niet gevoelig te zijn voor verdichting. De ervaring leert echter dat graslanden op veengronden die onder natte omstandigheden worden gemaaid of beweid soms langdurig te kampen hebben met verdichting. De draagkracht van veen is in natte



omstandigheden zeer laag en zeker oppervlakkig kan de veengrond dan sterk worden vertrapt en versmeerd, waardoor de structuur aan het oppervlak totaal wordt vernield en de infiltratiecapaciteit sterk afneemt. Ook kan diepe spoorvorming optreden, waarin het water lang kan blijven staan. Aan de andere kant ziet men dat veengrasland in landbouwkundig gebruik zich sterk kan herstellen, vooral als het gras na de winter weer sterk gaat groeien. Beworteling en uitdrogingskrimp verbeteren ook de structuur onder de oppervlakkige laag. Permanent grasland op veengronden in landbouwkundig gebruik heeft meestal een goede bodemstructuur en kent een goed herstelvermogen. In 'natuurgrasland' is de grasgroei veel minder sterk omdat het land veel natter blijft en omdat er niet of veel minder wordt bemest. Daarnaast kunnen ook processen gaan optreden die ook niet structuurbevorderend zijn, zoals vervilting van de zode, verzuring etc. De bulkdichtheid van diepere veengrondlagen zijn echter altijd zo laag dat nooit van een probleem met ondergrondverdichting kan worden gesproken. Wel kan de doorlatendheid van veen soms erg laag zijn. Dit hangt in hoge mate samen met de samenstelling van het veen (veenmos, zegge, riet, bosveen), de verteringsgraad en de aanwezigheid van klei/slib. Het natte, bijna volledig verzadigde veen laat zich moeilijk verdichten en is bijzonder veerkrachtig. Wel kan er vervorming optreden, maar het krimpvermogen en daardoor het herstelvermogen is zeer groot, zodat permanente schade aan de ondergrond niet optreedt.

### **Beoordeling zandgronden**

Dat de zandgronden het meeste risico lopen op ondergrondverdichting ligt gevoelsmatig niet voor de hand. Dit komt voornamelijk omdat de insporing bij zandgronden die niet te nat zijn in het algemeen beperkt is. Zandgronden zijn in het algemeen sneller droog dan andere minerale gronden en zijn daardoor eerder goed berijdbaar dan die andere gronden. Echter, het gaat niet om de berijdbaarheid, maar of de ondergrond te veel wordt verdicht, waardoor in eerste instantie de indringweerstand voor beworteling te hoog kan worden en in tweede instantie de doorlatendheid toch een probleem kan gaan vormen. Zandondergronden hebben echter maar weinig extra verdichting nodig om te dicht te worden (dichtheid > 1,6 g/cm<sup>3</sup>). Dit laatste is vooral het geval bij zandgronden en/of lichte zavel met veel fijn zand, leem en/of lutum, waarbij de poriën tussen de grovere korrels kunnen worden opgevuld met fijnere korrels en uiteindelijk met lutum. Dit resulteert in een dichte structuurloze 'betonstructuur'. Het probleem met zandgronden is ook dat bij verdichting niet alleen sprake is van compactie (in elkaar duwen), maar ook van vervorming, en dat dan de grote doorgaande bioporiën en oude wortelgangen ook verloren gaan. Het natuurlijk herstel van zandgronden is zeer slecht. Ook door kunstmatig losmaken (woelen) zijn zandondergronden zeer moeilijk te herstellen omdat ze gemakkelijk herverdichten. Dit alles maakt de gevoeligheid en risico op ondergrondverdichting zo groot.

## **5.3 Discussie constructie risicokaarten en resulterende kaarten**

### **De sterkte van de ondergrond**

Een zwak punt bij de constructie van de risicokaarten op ondergrondverdichting is het ontbreken van de sterkte-eigenschappen van Nederlandse ondergronden. Een vergelijking van precompressiesterken van verschillende auteurs uit verschillende landen laat grote verschillen zien die onderling slecht correleren. Bij gebrek aan Nederlandse waarden voor de precompressiesterke zijn uiteindelijk Vlaamse meetwaarden gebruikt. Omdat de bodems van zuidwestelijk Nederland doorlopen in Vlaanderen, kan worden verwacht dat in ieder geval een deel van de Nederlandse bodems goed overeenkomt met de Vlaamse bodems en dat de Vlaamse precompressiesterken ook in Nederland gelden. De Vlaamse precompressiesterken zijn bepaald op gronden met een vochtspanning van -60 cm waterkolom. Al met al is de basis van de risico-kaarten gebaseerd op een (te) beperkte serie Vlaamse meetresultaten. Echter, uiteindelijk blijken de gebruikelijke wiellasten bij het landgebruik in Nederland zo groot, dat de sterkte van de ondergrond bijna nooit voldoende is om de door de wiellasten opgewekte grondspanningen te weerstaan (zie tabel 4.1). De Vlaamse meetwaarden voor de precompressiesterken zijn in vergelijking met de metingen in andere landen hoog. Het is dus zeer onwaarschijnlijk dat bij metingen aan Nederlandse ondergronden (veel) hogere precompressiesterken worden gevonden. De conclusie kan dan ook niet anders zijn dat bijna alle Nederlandse ondergronden door het huidige



machinegebruik zijn verdicht. In de procedure om het risico op ondergrondverdichting te bepalen is de uitgangspositie dus bijna altijd slecht: 'groot risico op ondergrondverdichting' (zie tabel 3.5). Alleen een ondergrond die herstel mogelijkheden heeft kan naar de iets betere klasse 'matig risico op ondergrondverdichting' promoveren met de gedefinieerde bonuspunten voor herstel (zie tabel 3.4). Zodoende maakt het voor het construeren van de risicokaarten dus niet uit dat we de sterkte van de Nederlandse ondergronden niet kennen: de wiellasten zijn bijna altijd zo groot dat de sterkte van de ondergrond bijna altijd zeker wordt overschreden, waardoor de ondergrond wordt verdicht.

### **De bonus en maluspunten**

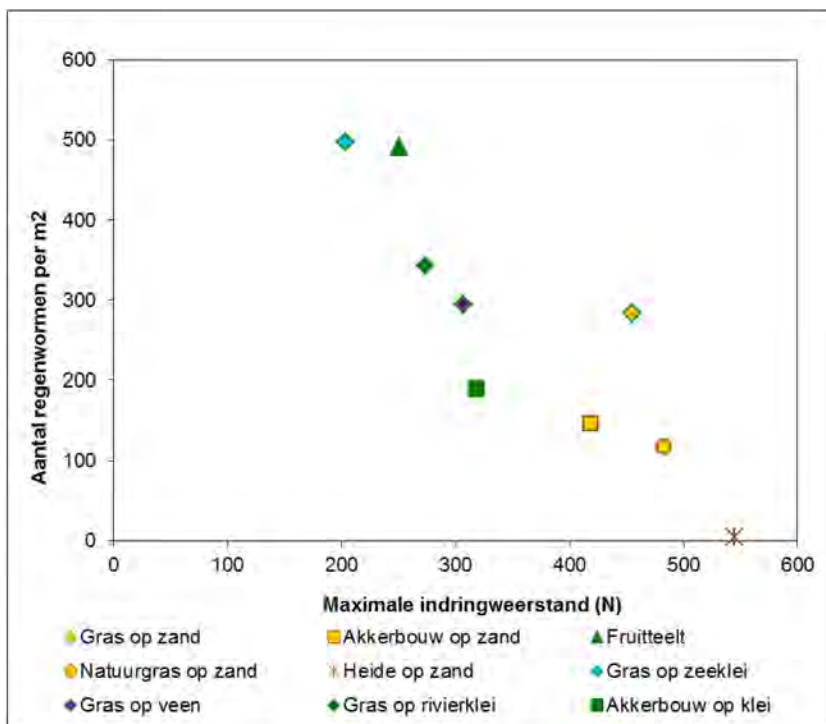
De bonus- en maluspunten voor positieve en negatieve factoren voor het risico op ondergrondverdichting cq de kans op natuurlijk herstel blijken uiteindelijk meestal het verschil te maken of een ondergrond in de klasse 'groot risico op ondergrondverdichting' valt of naar 'matig risico op ondergrondverdichting' promoveert of naar 'zeer groot risico op ondergrondverdichting' degradeert. Op zich is dit een hachelijke zaak, want elke bonus- en maluspunt wordt even zwaar geteld, terwijl in werkelijkheid niet elke positieve of negatieve factor even sterk doorwerkt op het risico op ondergrondverdichting cq. de kans op natuurlijk herstel. Zeker natuurlijk herstel heeft tijd nodig en dan nog is het waarschijnlijk dat het herstel niet volledig is. Per grondsoort en ontwaterings-situatie kan dit ook nog verschillen. Het optellen van de bonus- en maluspunten is dan ook een vrij grove methode om het risico op ondergrondverdichting te bepalen. Aan deze onzekerheid wordt deels tegemoet gekomen door te bepalen dat de bonus- en maluspunten de inschatting van het risico op ondergrondverdichting hoogstens met één klasse omhoog of omlaag kan brengen. Ondanks de onzekerheden vertegenwoordigen de bonus- en maluspunten een schat aan ervaringen die zeker moeten worden meegewogen in een systeem om het risico op ondergrondverdichting vast te stellen. Hoe goed dit de werkelijkheid benadert, moet in de praktijk met metingen worden vastgesteld.

### **Landgebruik en wiellasten**

Van het landgebruik blijken alleen 'Fruiteelt' en 'Overige natuur' en in een enkel geval 'Gras' niet altijd tot ondergrondverdichting te leiden. In elk landgebruik waar geploegd wordt, is de vorming van een ploegzool en dus ondergrondverdichting niet te vermijden. Dit werkt bijna altijd ook door tot op 40 cm diepte. Dit komt omdat met een grote wiellast ( 4 tot 5,9 ton) op de ondergrond wordt gereden. Bovendien wordt voor de benodigde trekkracht ook nog een grote horizontale kracht op de ondergrond uitgeoefend, waardoor tot onder de 40 cm grote afschuifspanningen worden opgewekt. Een andere destructieve gewoonte is om in het veld met de bandspanning te rijden die noodzakelijk is om op de weg te rijden (in tabel 3.3 aangegeven als de typerende bandspanning). Van de mogelijkheid om in het veld met een lagere bandspanning te rijden wordt in de praktijk dus geen of veel te weinig gebruik gemaakt. In een aantal gevallen leidt ook een niet eens zo grote wiellast tot ondergrondverdichting, omdat met vrij smalle banden met een hoge bandspanning wordt gereden. Zelfrijdende bemesters en oogstmachines hebben vrijwel allemaal zulke hoge wiellasten dat zelfs bij de grootste verkrijgbare banden de bandspanning nog zo hoog is dat niet kan worden gesproken van 'lagedrukbanden', zodat ondergrondverdichting bijna altijd onvermijdelijk is. Lagere wiellasten of gebruik van rupsbanden zouden hier een oplossing kunnen bieden. Geconcludeerd kan worden dat de mogelijkheden voor preventie van ondergrondverdichting niet worden uitgebuit. In veel gevallen zijn echter ook de wiellasten zo hoog dat bij wat vochtigere grond al ondergrondverdichting optreedt. Hoe hoog die wiellasten maximaal mogen zijn zonder dat de opgewekte grondspanningen de sterkte van de ondergrond overschrijden en verdichting optreedt, is niet goed te bepalen omdat de daarvoor noodzakelijke sterkte-eigenschappen van de Nederlandse ondergronden ontbreken.

## 5.4 Relatie Bodembioologische indicator (Bobi) met ondergrondverdichting

Door het RIVM wordt al meer dan tien jaar een monitoring uitgevoerd met de Bodembioologische indicator (Bobi) in het Landelijk Meetnet Bodemkwaliteit (LMB). Dit heeft geresulteerd in een bestand met de biologische, chemische en fysische karakteristieken van de bodem op 325 gemonsterde locaties. Het bestand wordt beschouwd als representatief voor driekwart van het bodemoppervlak Nederland. De metingen en data richten zich sterk op de bovengrond, dus de bovenste 20 à 30 cm. Vanaf 2004 worden er echter ook tot 80 cm diepte indringweerstand met een penetrologger gemeten. De vraag is of dit bruikbare informatie oplevert over natuurlijk herstel van de ondergrond door biologische processen en/of dat ondergrondverdichting een negatief effect heeft op de bodembioologie. Een echt diepgaand onderzoek naar de relatie tussen de Bobi data en ondergrondverdichting was in dit project niet mogelijk. Het RIVM heeft wel een verkennend onderzoek gedaan naar relaties tussen indringweerstand en Alterra heeft daarvoor de Bobi data gekoppeld met ondergrondgegevens uit BIS. De meest duidelijke resultaten zijn gepresenteerd in de figuren 5.1, 5.2 en 5.3.

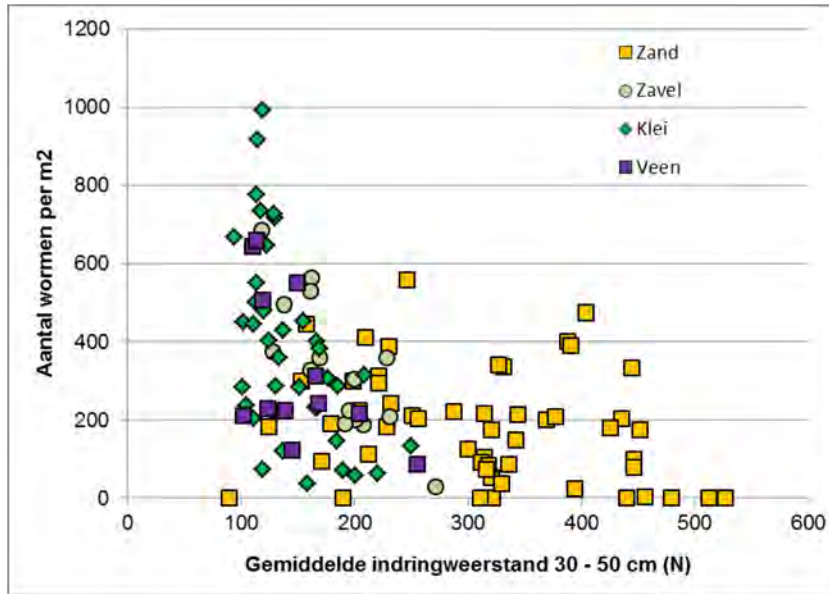


**Figuur 5.1**

Relatie tussen de maximale indringweerstand en het aantal wormen per m<sup>2</sup> in de bovengrond (bovenste 20 cm van de bodem) bij negen categorieën uit het Bobi - LMB bestand. De geel getinte symbolen geven zand aan, groen en blauw staan voor klei en paars voor veen. De maximale indringweerstand werden gemeten in de diepterange van 30 tot 50 cm.

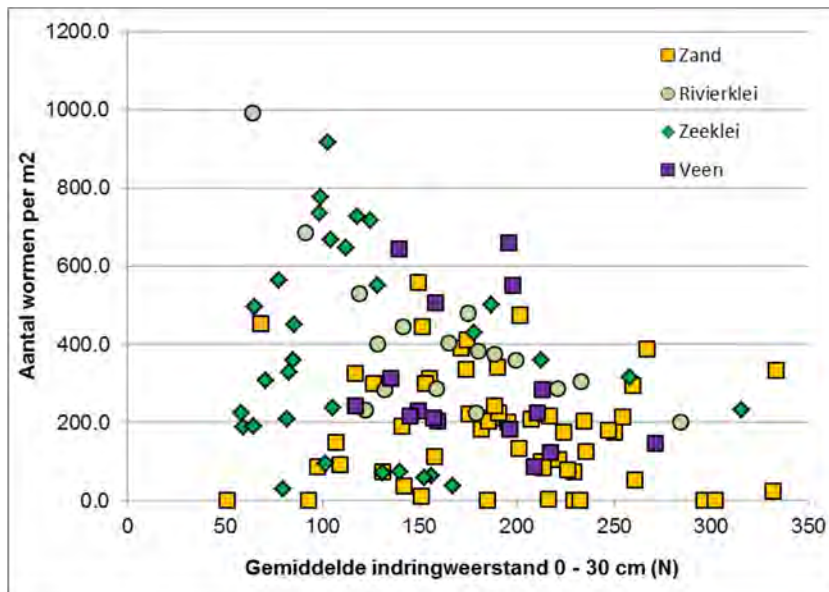
Uit figuur 5.1 volgt dat een hogere maximale indringweerstand in de ondergrond is gerelateerd aan lagere aantallen regenwormen per m<sup>2</sup> in de bovenste 20 cm van de bodem. Deze trend geldt voor alle gronden en de afzonderlijke categorieën zand en klei. De zandgronden in figuur 5.1 hebben maximale indringweerstand die hoger zijn dan 400 N. Door o.a. Ten Cate et al. (1995) wordt aangegeven dat beworteling sterk wordt bemoeilijkt bij een indringweerstand van 300 N. Regenwormen lijken nadelige effecten te ondervinden van hoge indringweerstand, die op zich aangeven dat de ondergrond dicht is. De trend van lagere aantallen regenwormen bij hogere indringweerstand wordt bevestigd in figuur 5.2. Ook hier lijkt in het algemeen

gesteld te kunnen worden dat het aantal wormen per m<sup>2</sup> in de bovengrond lager wordt bij een hogere indringweerstand in de ondergrond. Deze relatie gaat op voor het geval dat alle gronden bij elkaar worden genomen en ook voor de afzonderlijke grondsoorten klei, zavel en veen. De relatie lijkt niet op te gaan voor de grondsoort zand afzonderlijk. Uit figuur 5.3 blijkt dat hetzelfde opgaat voor de relatie tussen het aantal wormen per m<sup>2</sup> in de bovengrond (0 - 20 cm diep) en de gemiddelde indringweerstand van de bovengrond (0 - 30 cm diep). Hogere indringweerstand in de bovengrond resulteren in lagere aantallen wormen in de bovengrond.



**Figuur 5.2**

Het aantal wormen per m<sup>2</sup> in de bovengrond op 120 locaties in relatie tot de gemiddelde indringweerstand van de bodemlaag op 30 - 50 cm diepte. Bij de bodemlaag (ondergrond) is onderscheid gemaakt naar de grondsoorten zand, zavel, klei en veen.



**Figuur 5.3**

Het aantal wormen per m<sup>2</sup> in de bovengrond op 120 locaties in relatie tot de gemiddelde indringweerstand van de bodemlaag op 0 - 30 cm diepte. Bij de bodemlaag (bovengrond) is onderscheid gemaakt naar de grondsoorten zand, rivierklei, zeeklei en veen.

Verwacht kan worden dat er een sterke correlatie is tussen de indringweerstand van de bovengrond en de grond daaronder in de laag 30 - 50 cm diepte. Voor de kleigronden blijkt dit inderdaad het geval te zijn ( $R^2 = 0,7$ ), maar voor zand- en veengronden geldt dit zeker niet ( $R^2 = 0,2$  tot  $0,3$ ). Hoge indringweerstand van de bovengrond of ondergrond resulteren samen of afzonderlijk in lagere aantallen wormen per  $m^2$ . Verdichting zal biologisch herstel van die verdichting dus bemoeilijken. Het is de vraag of wormen de ondergrond op redelijke termijn echt los kunnen maken. Wel zouden verticale wormgangen in de ondergrond de verzadigde waterdoorlatendheid, beworteling en zuurstofvoorziening sterk kunnen verbeteren. Dichtheidsmetingen of indringweerstandmetingen zijn niet geschikt om deze verbetering van bodemfysische kwaliteiten te meten. Meting van de verzadigde doorlatendheid zou daarvoor wel geschikt zijn. Uit de beschikbare data is niet te bepalen of biologische processen de kwalijke gevolgen van ondergrondverdichting effectief (deels) oplossen. Het is overigens ook nog de vraag of de afwezigheid van regenwormen een gevolg is van verdichting of andersom, dat door de afwezigheid van wormen de verdichting in stand blijft.

## 6 Conclusies en aanbevelingen

De volgende conclusies kunnen worden getrokken:

- Bij de meeste landbouwgronden is het risico op ondergrondverdichting bij het huidige landgebruik en gebruikelijke landbouwmechanisatie groot.
- Een deel van die ondergronden kan waarschijnlijk door krimp en zwel en biologische processen op natuurlijke wijze (deels) herstellen.
- Het is niet goed bekend hoe effectief natuurlijk herstel in de praktijk is. Om dit te bepalen zijn metingen aan dichtheden en bodemfysische eigenschappen, zoals bijvoorbeeld de verzadigde doorlatendheid, noodzakelijk.
- Onderzoek in de jaren 70 tot 90 van de vorige eeuw laten zien dat verdichting van de ondergrond tot flinke opbrengstdervingen kan leiden. Dit komt vooral tot uitdrukking in extremere jaren, zowel droog als nat. Een opbrengstderving van 20%, maar soms ook een verloren oogst, is dan mogelijk.
- Bij het landgebruik 'Bos' veroorzaken de vrij hoge wiellasten in combinatie met de hoge bandspanningen ondergrondverdichtingen. Een voordeel daarbij is dat in ieder geval niet alle grond wordt bereiden, zodat een volvelds dichtgereden ondergrond, zoals bij landbouwgebruik dreigt, niet voorkomt.
- Bij het landgebruik 'Fruitteelt' geldt hetzelfde als bij 'Bos', maar met veel lagere wiellasten, zodat bij sterkere ondergronden (zware zavel en kleiondergronden) de sterkte niet wordt overschreden en de ondergrondverdichting beperkt blijft.
- Het in de open voor rijden tijdens het ploegen maakt het voorkomen van ondergrondverdichting onmogelijk.
- Typerend is dat in de praktijk in het veld wordt gereden met de (meestal hogere) bandspanningen die noodzakelijk zijn voor het rijden op de weg met snelheden van 30 km per uur. Het risico op ondergrondverdichting wordt hierdoor duidelijk vergroot.
- Vooral bij zelfrijdende bemesters en oogstmachines zijn de wiellasten zo groot, dat het voorkomen van ondergrondverdichting onmogelijk wordt.
- Door het ontbreken van de sterkte-eigenschappen van Nederlandse ondergronden, kan maar globaal worden vastgesteld wat de maximale wiellasten zijn waarbij de ondergrond nog niet wordt verdicht.
- Hoge indringweerstand van de bovengrond of ondergrond resulteren samen of afzonderlijk tot lagere aantallen wormen per m<sup>2</sup>. Verdichting zal biologisch herstel van die verdichting dus bemoeilijken.

Aanbevolen wordt om:

- De risicokaarten in de praktijk te toetsen. Dit houdt in dat wordt gecontroleerd of in de gebieden met een hoog of zeer hoog risico op bodemverdichting de ondergrond inderdaad een (te) hoge dichtheid heeft. Ditzelfde geldt voor de ondergronden die door natuurlijk herstel juist een lager risico op ondergrondverdichting hebben.
- Naast dichtheden zou bij de toetsing van de risicokaarten ook een aantal bodemfysische eigenschappen moeten worden gemeten. Vooral de verzadigde doorlatendheid blijkt een goede indicator te zijn of een ondergrond zich kwalitatief voldoende heeft hersteld van de kwalijke gevolgen van ondergrondverdichting (o.a. Hanse et al., 2011). Vrij eenvoudige metingen die aanvullend kunnen worden uitgevoerd zijn het luchtgehalte bij vochtspanningen van -50 en -100 cm waterkolom (overeenkomstig omstandigheden in het voorjaar) en de indringweerstand met een penetrometer (Van den Akker en De Groot, 2008).
- De sterkte-eigenschappen van Nederlandse ondergronden te meten bij een vochtspanning van -60 en -300 cm waterkolom. Dit maakt het mogelijk om beter de maximaal toelaatbare wiellasten van een bepaalde band met een bepaalde bandspanning te berekenen. Ook kan dan beter worden aangegeven of rupsen een goed alternatief vormen. Zo kunnen gefundeerde adviezen worden gegeven over het voorkomen van ernstige ondergrondverdichting. Daarnaast kunnen de risicokaarten op ondergrondverdichting, als het

nodig is, worden verbeterd of er kunnen aparte kaarten worden gemaakt waarop het effect van preventieve maatregelen wordt aangegeven.

- Veel nadruk te leggen op het feit dat het rijden in de voor tijdens het ploegen een zeer belangrijke oorzaak is van ernstige ondergrondverdichting. Het is al enige tijd goed mogelijk om 'bovenover' te rijden bij het ploegen. Daarmee kan grote winst op het gebied van preventie van ondergrondverdichting worden gehaald. Voor het bovenover ploegen zijn wel aanpassingen aan de ploeg noodzakelijk, waardoor deze 3 tot 7 k€ meer gaat kosten. Bij dit laatste bedrag is de ploeg ook aangepast voor ploegen met gps (exclusief de gps apparatuur op zich). Dit is echter niet echt noodzakelijk: met een zogenaamde markeur is bovenover ploegen zonder gps ook goed mogelijk. Verder kan worden gewezen op alternatieven voor ploegen, zoals spitten of niet-kerende grondbewerking.
- Verder moet worden gewaarschuwd voor de toepassing van hogere bandspanningen dan strikt nodig in het veld. Daarnaast worden soms relatief smalle banden gebruikt met hoge bandspanningen, die daardoor ondanks relatief lage wiellasten toch ondergrondverdichting veroorzaken.

# Literatuur

Akker, J.J.H. van den, 2004. SOCOMO: a soil compaction model to calculate soil stresses and the subsoil carrying capacity. *Soil & Tillage Research* 79: 113-127.

Akker, J.J.H. van den en W.J.M. de Groot, 2008. Een inventariserend onderzoek naar de ondergrondverdichting van zandgronden en lichte zavel. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 1450, 77 blz.

Akker, J.J.H. van den, W.J.M. de Groot, H.R.J. Vroon, F.J.E. van der Bolt en A.J. van Kekem, 2010. Stijghoogteverschillen en verdichting: een eerste Twentse verkenning in de praktijk. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 1735, 86 blz.

Akker, J.J.H. van den en T. Hoogland, 2011. Comparison of risk assessment methods to determine the subsoil compaction risk of agricultural soils in the Netherlands. *Soil and Tillage Research* 114 (2).

Alakukku, L., 2000. Response of annual crops to subsoil compaction in a field experiment on clay soil lasting 17 years. In: Horn, R., Van den Akker, J.J.H. and Arvidsson, J., (Eds.), 2000. *Subsoil Compaction: Distribution, Processes and Consequences*. *Advances in GeoEcology* 32, Catena Verlag, Reiskirchen, Germany: 205-208.

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

Arvidsson, J. en T. Keller, 2004. Soil precompression stress I. A survey of Swedish arable soils. *Soil & Tillage Research* 77: 85-95

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

Berli, M., B. Kulli, W. Attinger, M. Keller, J. Leuenberger, H. Flüher, S.M. Springman en R. Schulin, 2004. Compaction of agricultural and forest subsoils by tracked heavy construction machinery. *Soil & Tillage Research* 75: 37-52

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

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

Cate J.A.M. ten, A.F. van Holst, H. Kleijer en J. Stolp, 1995. Handleiding geografisch onderzoek. Richtlijnen en voorschriften. Deel D. Interpretatie van bodemkundige gegevens voor diverse vormen van bodemgebruik. Technisch document 19D. DLO-Staring Centrum, Wageningen.

Europese Commissie (EC), 2006. Voorstel voor een kaderrichtlijn van het Europees parlement en de raad tot vaststelling van een kader voor de bescherming van de bodem en tot wijziging van richtlijn 2004/35/EG. Brussel, 22-9-06, COM (2006) 232.

- Gregory A.S., C.W. Watts, W.R. Whalley, H.L. Kuan, B.S. Griffiths, P.D. Halleth en A.P. Whitmore, 2007. Physical resilience of soil to field compaction and the interactions with plant growth and microbial community structure, *European Journal of Soil Science* 58, 1221-1232.
- 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.
- Håkansson, I. en R.C. Reeder, 1994. Subsoil compaction by vehicles with high axle load – extent, persistence and crop response. *Soil & Tillage Research*, 29, 277–304.
- Hanse, B., G.D. Vermeulen, F.G.J. Tjink, H.-J. Koch en B. Märlander, 2011. Analysis of soil characteristics, soil management and sugar yield on top and averagely managed farms growing sugar beet (*Beta vulgaris* L.) in the Netherlands. *Soil & Tillage Research* 117: 61–68
- Holthusen, D., M. Jänicke, S. Peth en R. Horn, 2012. Physical properties of a Luvisol for different long-term fertilization treatments: I. Mesoscale capacity and intensity parameters. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 175, 4–13
- Horn, R. en H. Fleige, 2009. Risk assessment of subsoil compaction for arable soils in Northwest Germany at farm scale. *Soil & Tillage Research* 102, p. 201-208
- Horn, R., H. Fleige, F.-H. Richter, E.A. Czyz, A. Dexter, E. Diaz-Pereira, E. Dumitru, R. Enarache, F. Mayol, K. Rajkai, D. de la Rosa en C. Simota, 2005. SIDASS Project. Part 5: Prediction of mechanical strength of arable soils and its effect on physical properties at various map scales. *Soil & Tillage Research* 82, p. 47-56.
- Jones, R.J.A., G. Spoor en A.J. Thomasson, 2003. Vulnerability of subsoils in Europe to compaction: a preliminary analysis. *Soil & Tillage Research* 73, 131-141.
- Keller, T. en J. Arvidsson, 2004. Technical solutions to reduce the risk of subsoil compaction: effects of dual wheels, tandem wheels and tyre inflation pressure on stress propagation in soil. *Soil & Tillage Research* 79 (2004) 191–205.
- Keller, T., J. Arvidsson, J.B. Dawidowski en A.J. Koolen, 2004. Soil precompression stress II. A comparison of different compaction tests and stress–displacement behaviour of the soil during wheeling. *Soil & Tillage Research* 77: 97–108.
- Keller, T., P. Défossez, P. Weiskopf, J. Arvidsson en G. Richard, 2007. SoilFlex: A model for prediction of soil stresses and soil compaction due to agricultural field traffic including a synthesis of analytical approaches. *Soil & Tillage Research*, 93: 391-411.
- Kooistra, M.J. en O.H. Boersma, 1994. 'Subsoil compaction in Dutch marine sandy loams: loosening practices and effects'. *Soil Tillage Research* 29: 237-247.
- Kooistra, M.J., J. Bouma, O.H. Boersma en A. Jager, 1984. 'Physical and morphological characterization of undisturbed and disturbed ploughpans in a sandy loam soil'. *Soil Tillage Research* 4, 405-417.
- Koolen, A.J. en H. Kuipers, 1983. *Agricultural Soil Mechanics*. Advanced Series in Agricultural Sciences 13. Springer, Berlin.



- Larink O., D. Werner, M. Langmaack en S. Schrader, 2001. Regeneration of compacted soil aggregates by earthworm activity, *Biological and Fertility of Soils* 33, 395–401
- Lebert, M. en R. Horn, 1991. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. *Soil Tillage Res.* 19, 275–286.
- Leeuw B. de, 2009. Recovery potential of compacted subsoils: A case study on loamy and clayey soils in the Netherlands, Thesis report Wageningen University.
- Milieu- en Natuurplanbureau (MNP), 2006. Milieubalans 2006. Bilthoven, MNP-publicatienummer 500081001
- Roelfsema, E., 2011. Influence of the shrink and swell cycle on soil physical properties of loam and clay soils in the Netherlands. Thesis report Wageningen University.
- Römken, P.F.A.M. en O. Oenema (red.), 2004. Quick Scan Soils in the Netherlands. Overview of the soil status with reference to the forthcoming EU Soil Strategy. Wageningen, Alterra-rapport 948.
- Rücknagel, J., O. Christen, B. Hofmann en S. Ulrich, 2012. A simple model to estimate change in precompression stress as a function of water content on the basis of precompression stress at field capacity. *Geoderma* 177–178: 1–7
- Rusanov, V.A., 1994. USSR standards for agricultural mobile machinery: permissible influences on soils and methods to estimate contact pressure and stress at a depth of 0.5 m. *Soil & Tillage Research*, 29: 249–252.
- 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.
- Rutgers, M. en L. Dirven-van Breemen (red.), 2011. Een gezonde bodem onder een duurzame samenleving. Bilthoven, RIVM. Rapport 607406001
- Schjønning, P., M. Lamandé, T. Keller, J. Pedersen en M. Stettler, 2012. Rules of thumb for minimizing subsoil compaction. *Soil Use and Management* 28: 378–393.
- Technische Commissie Bodem (TCB), 2011. Advies Bodemverdichting. Den Haag, TCB-A071
- Trautner, A., J.J.H. van den Akker, H. Fleige, J. Arvidsson en R. Horn, 2003. A subsoil compaction database: its development, structure and content. *Special Issue on Subsoil Compaction, Soil and Till. Res.* 73: 9-13.
- Van De Vreken, P., L. Van Holm, J. Diels en J. Van Orshoven, 2009, in opdracht van het Departement Leefmilieu, Natuur en Energie. Verkennende studie betreffende bodemverdichting in Vlaanderen en afbakening van risicogebieden voor bodemverdichting. Eindrapport. Spatial Application Division Leuven en Afdeling Water- en Bodembeheer, K.U. Leuven. 133 p.
- Van Loon, C.D. en J. Bouma, 1978. A case study on the effect of soil compaction on potato growth in a loamy sand soil. 2. Potato plant responses. *Neth. J. Agric. Sci.*, 26: 421-429
- Vermeulen, G.D. en U.D. Perdok, 1994. Chapter 19. 'Benefits of Low Ground Pressure Tyre Equipment'. In: Soane, B.D. en C. van Ouwerkerk (eds.). *Soil Compaction in Crop Production. Developments in Agricultural Engineering*. Elsevier, Amsterdam: 447-478.

Vermeulen, G.D. en J.J.H. van den Akker, 2010. Ontwikkeling van bodembelasting door landbouwmachines 1980 – 2010. Presentatie van een projectactiviteit, 14 pp.

Vermeulen, G.D., B.R. Verwijs en J.J.H van den Akker. Vergelijking van de bodembelasting bij agrarisch veldwerk in 1980 en 2010. Wageningen, Plant Research International, rapport ....(in voorbereiding).

Voorhees, W.B., 2000. 'Long term effects of subsoil compaction on yield of maize'. In: Horn, R., Van den Akker, J.J.H., Arvidsson, J. (Eds.), Subsoil Compaction: Distribution, Processes and Consequences. Advances in GeoEcology 32. Catena Verlag, Reiskirchen, Germany, pp. 331-338.

Vries, F. de, 1999. Karakterisering van Nederlands gronden naar fysisch-chemische kenmerken. Wageningen, Staring Centrum-rapport 654.

Wanink, F., J. Alblas, H.M.G. van der Werf en J.J.H. van den Akker, 1990. 'Snijmaïsofbrengst beïnvloed door berijding'. Landbouwmechanisatie, nr. 4, april 1990, pp. 28-29.

Whalley, W.R., G.P. Matthews en S. Ferraris, 2012. The effect of compaction and shear deformation of saturated soil on hydraulic conductivity. Soil & Tillage Research 125, 23–29.

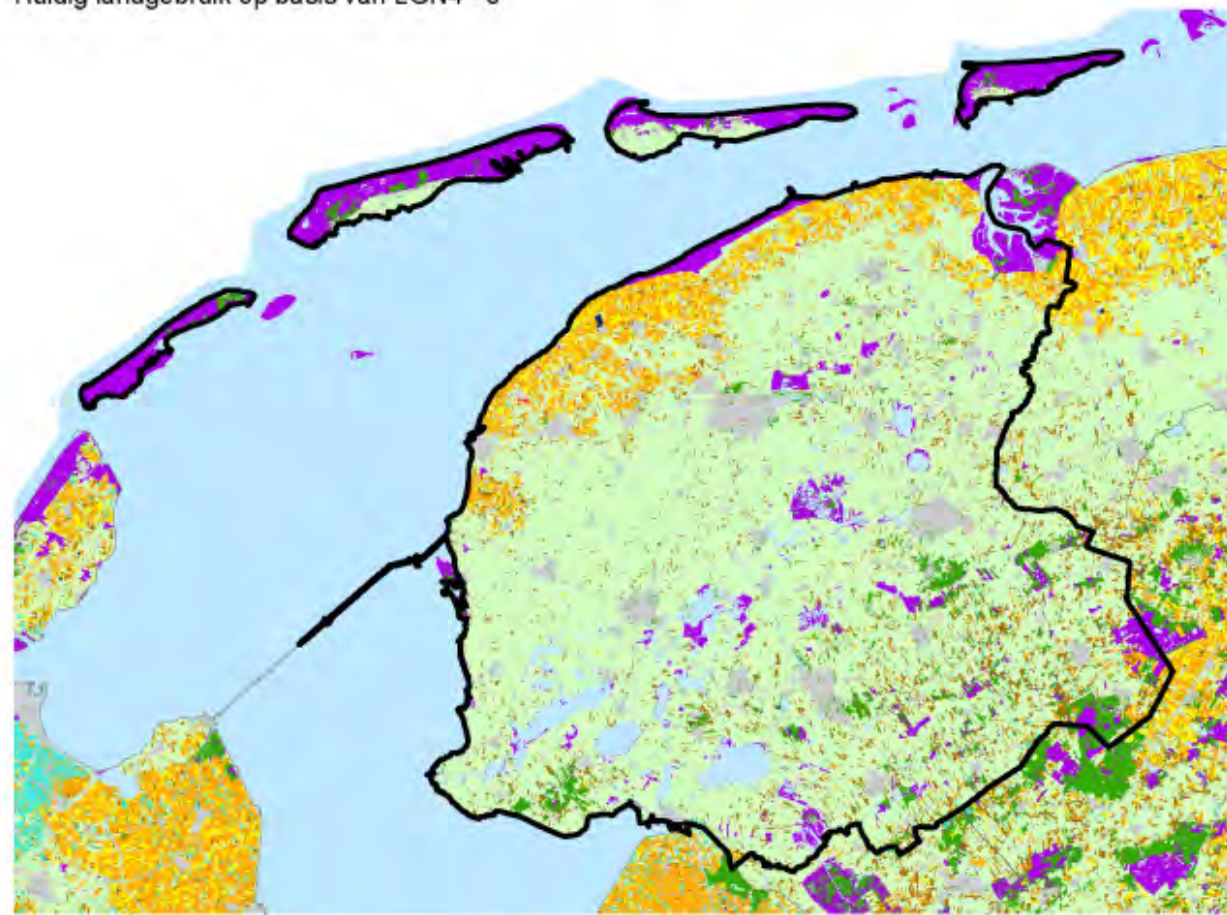
Zhang, B., R. Horn en P.D. Hallett, 2005. Mechanical Resilience of Degraded Soil Amended with Organic Matter. Soil Sci. Soc. Am. J. 69:864–871.

# **Bijlage 1 Provinciale kaarten**





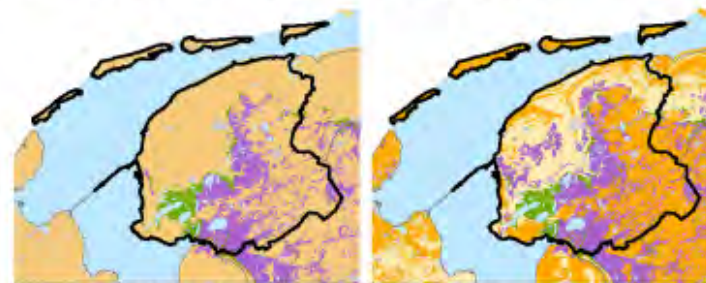
Provincie Friesland  
Huidig landgebruik op basis van LGN4 - 6



- Gras
- Mais
- Graan
- Rooivruchten
- Bollen
- Boomgaard
- Glastuinbouw
- Bos
- Heide en natuurgrasland
- Bebouwing
- Water

Sterkte eerste bodemlaag onder de bouwvoor in vochtige en natte toestand bij verschillend landgebruik

Malus voor sterkte ondergrond op ca. 40 cm-mv., afhankelijk van het landgebruik



Sterkte eerste laag in vochtige en natte toestand (kaartje links)								
	gras-land	mais	granen	rooiv- vruchten	bollen	boom- gaard	bos	overige natuur
	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
	++	++	++	++	++	++	++	++
	+	+	+	+	+	+	+	+
	-	-	-	-	-	-	-	-
Malus voor sterkte ondergrond op ca. 40 cm (kaartje rechts)								
	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	-1	-1	-1	0	0	0
	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	0
	-1	-1	-1	-1	-1	0	-1	0
	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1

Bonus grof zand

Bonus humeuze ondergrond

Bonus kleiige ondergrond

Bonus GLG > 120 cm-mv

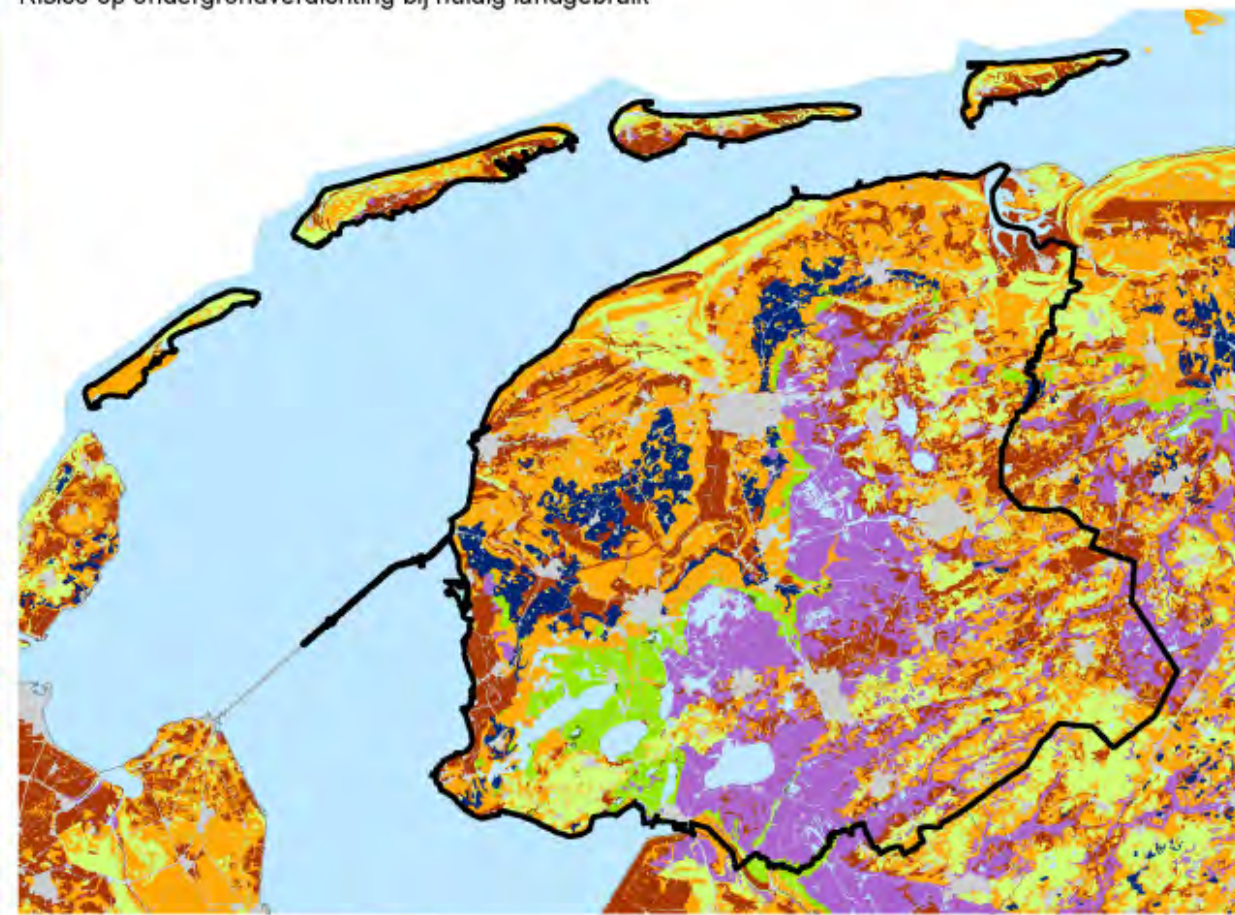
Malus GHG < 40 cm-mv.



- 0
- 1
- Water
- Bebouwing

- 1
- 0

Risico op ondergrondverdichting bij huidig landgebruik



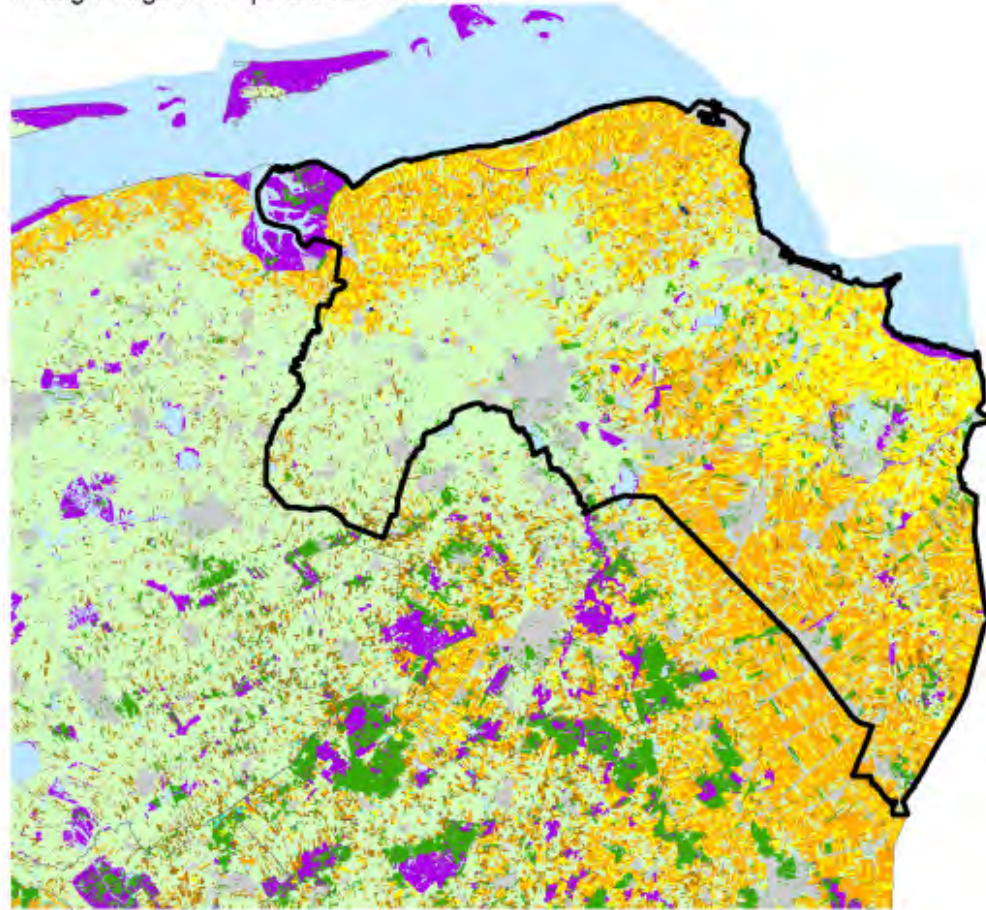
- Risico op verdichting
- Matig
- Bepaald door veenlagen
- Verdere onderscheidingen
- Zeer beperkt
- Groot
- Van nature dicht
- Water
- Bepaald
- Zeer groot
- Glastuinbouw, niet beoordeeld
- Bebouwing en infrastructuur







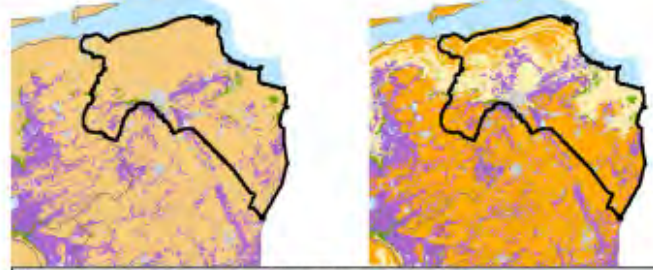
Provincie Groningen  
Huidig landgebruik op basis van LGN4 - 6



- Gras
- Mais
- Graan
- Rooivruchten
- Bollen
- Boomgaard
- Glastuinbouw
- Bos
- Heide en natuurgrasland
- Bebouwing
- Water

Sterkte eerste bodemlaag onder de bouwvoor in vochtige en natte toestand bij verschillend landgebruik

Malus voor sterkte ondergrond op ca. 40 cm-mv., afhankelijk van het landgebruik



Sterkte eerste laag in vochtige en natte toestand (kaartje links)								
	gras-land	maïs	graan	rooiv- vruchten	bollen	boom- gaard	bos	svenge- natuur
	+/+	+/+	+/+	+/+	+/+	+/+	+/+	+/+
	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-
	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-
Malus voor sterkte ondergrond op ca. 40 cm kaartje rechts								
	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	-1	-1	0	0	0	0
	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	0
	-1	-1	-1	-1	-1	0	-1	0
	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1

Bonus grof zand



- 0
- 1
- Water
- Bebouwing

Bonus humeuze ondergrond



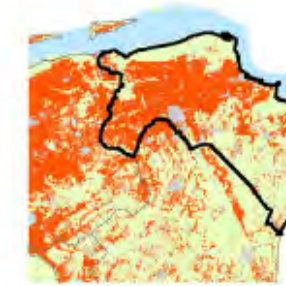
Bonus kleiige ondergrond



Bonus GLG > 120 cm-mv.

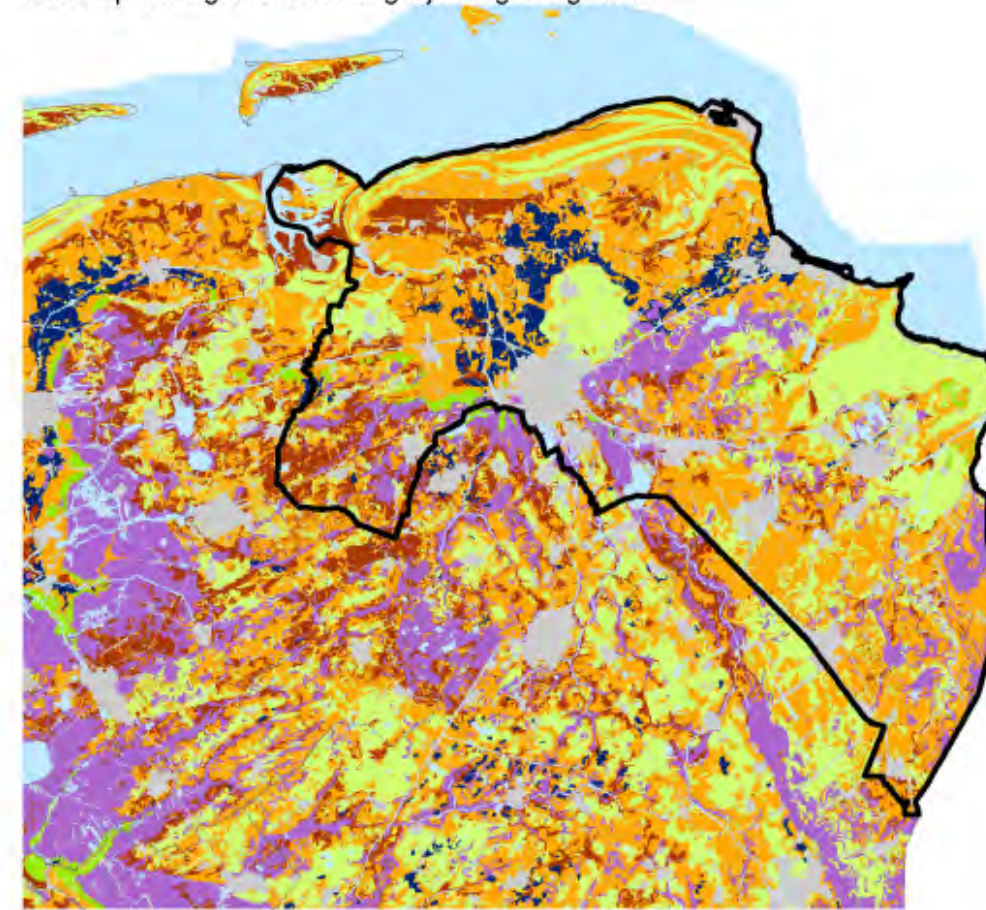


Malus GHG < 40 cm-mv.



- 1
- 0

Risico op ondergrondverdichting bij huidig landgebruik



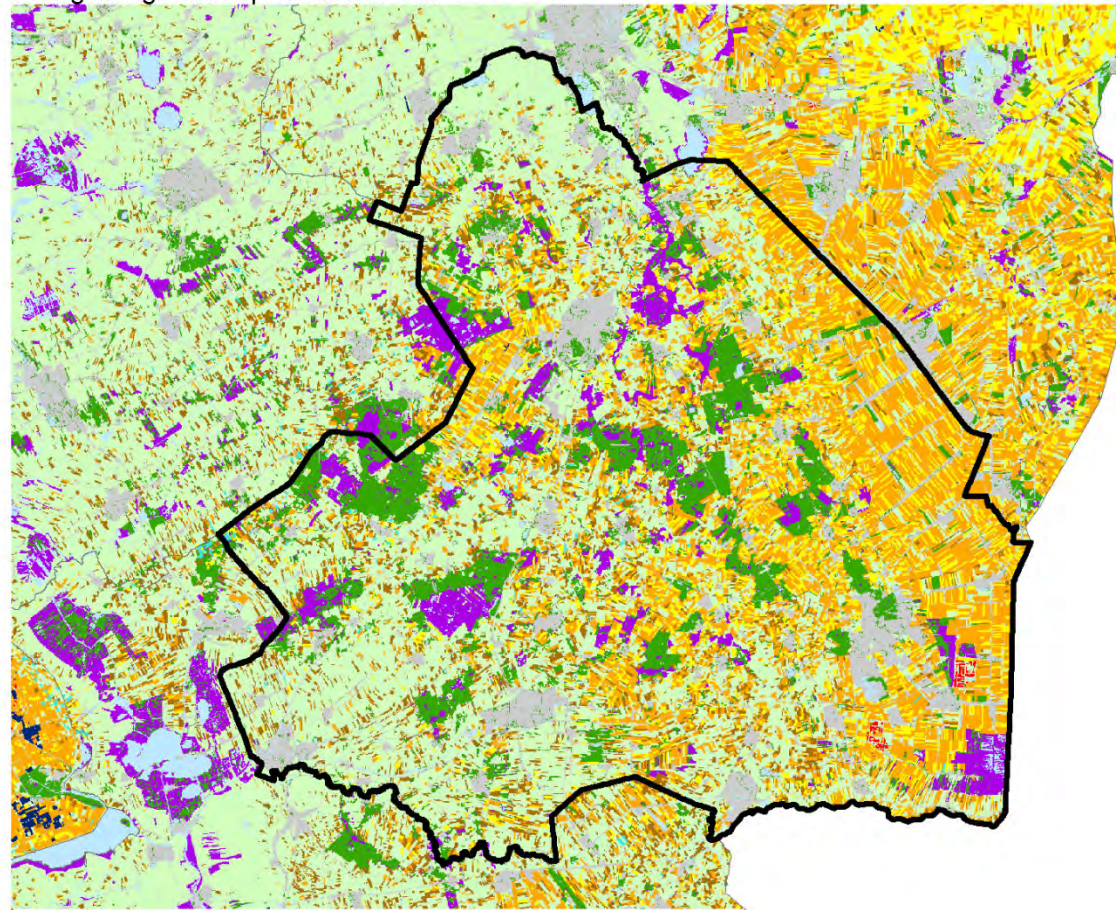
- Risico op verdichting
- Matig
- Beperkt
- Zeer beperkt
- Beperkt door veenlagen
- Groot
- Van nature dicht
- Zeer groot
- Glastuinbouw, niet beoordeeld
- Verdere onderscheidingen
- Water
- Bebouwing en infrastructuur



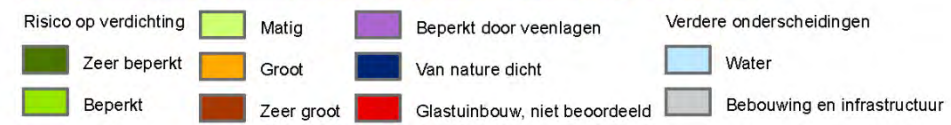
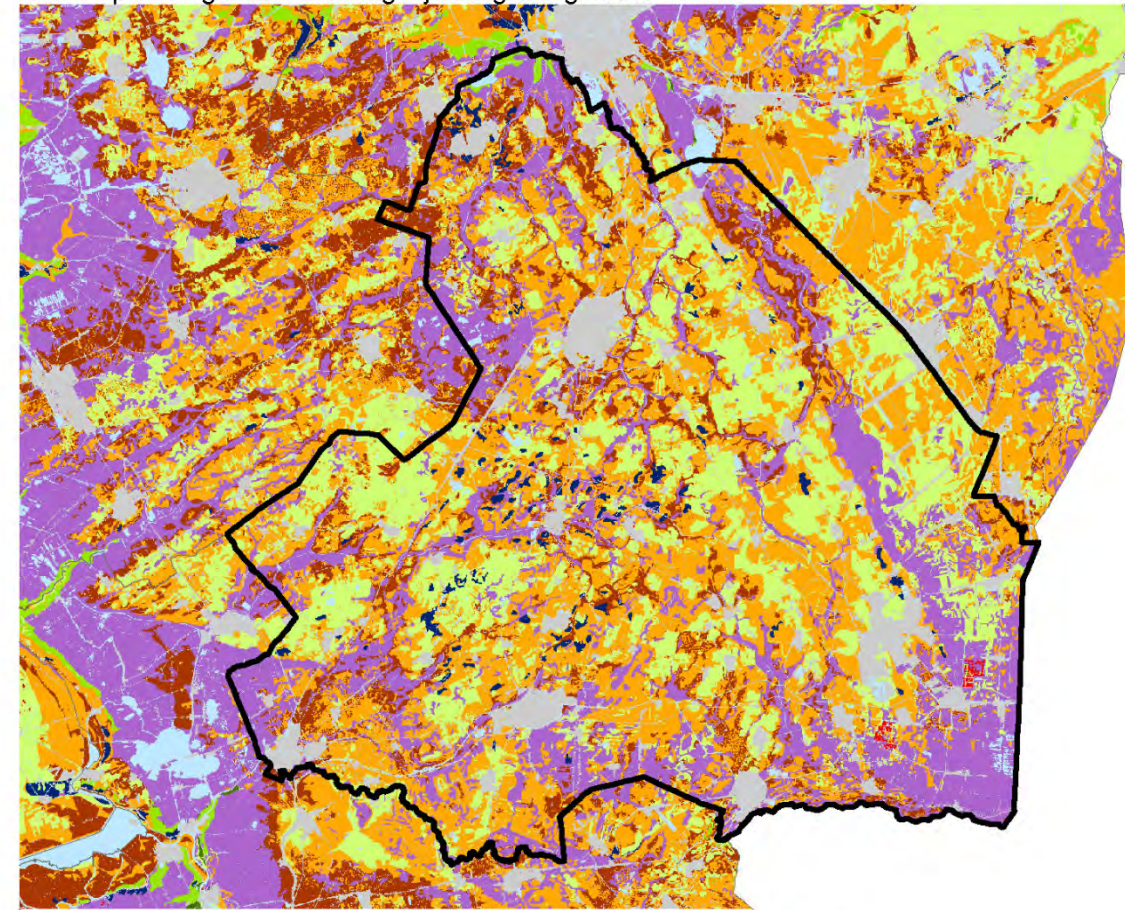




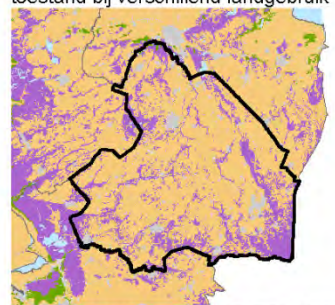
Provincie Drenthe  
Huidig landgebruik op basis van LGN4 - 6



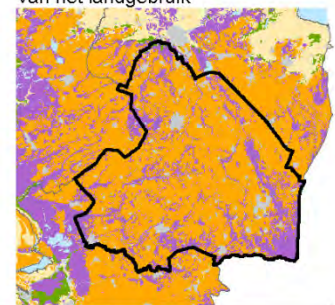
Risico op ondergrondverdichting bij huidig landgebruik



Sterkte eerste bodemlaag onder de bouwvoor in vochtige en natte toestand bij verschillend landgebruik



Malus voor sterkte ondergrond op ca. 40 cm-mv., afhankelijk van het landgebruik

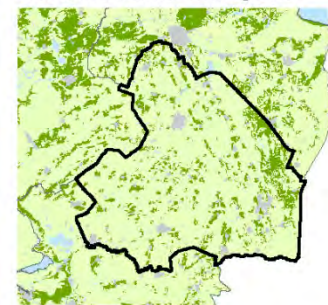


Sterkte eerste laag in vochtige en natte toestand (kaartje links)									
	gras-land	mals	granen	rooivruchten	bollen	boomgaard	bos	overige natuur	
	+/+	+/+	+/+	+/+	+/+	+/+	+/+	+/+	
	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	
	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	
Malus voor sterkte ondergrond op ca. 40 cm (kaartje rechts)									
	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	-1	-1	0	0	0	0	
	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	0	
	-1	-1	-1	-1	-1	0	-1	0	
	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	

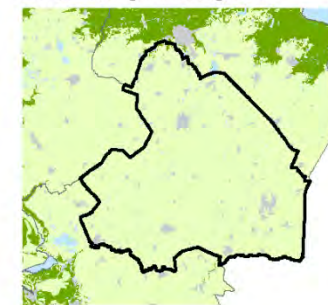
Bonus grof zand



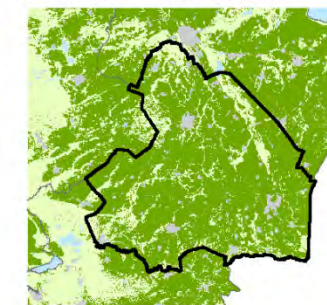
Bonus humeuze ondergrond



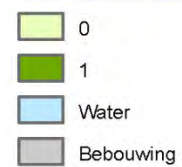
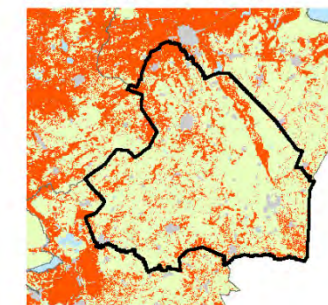
Bonus kleiige ondergrond



Bonus GLG > 120 cm-mv.



Malus GHG < 40 cm-mv.

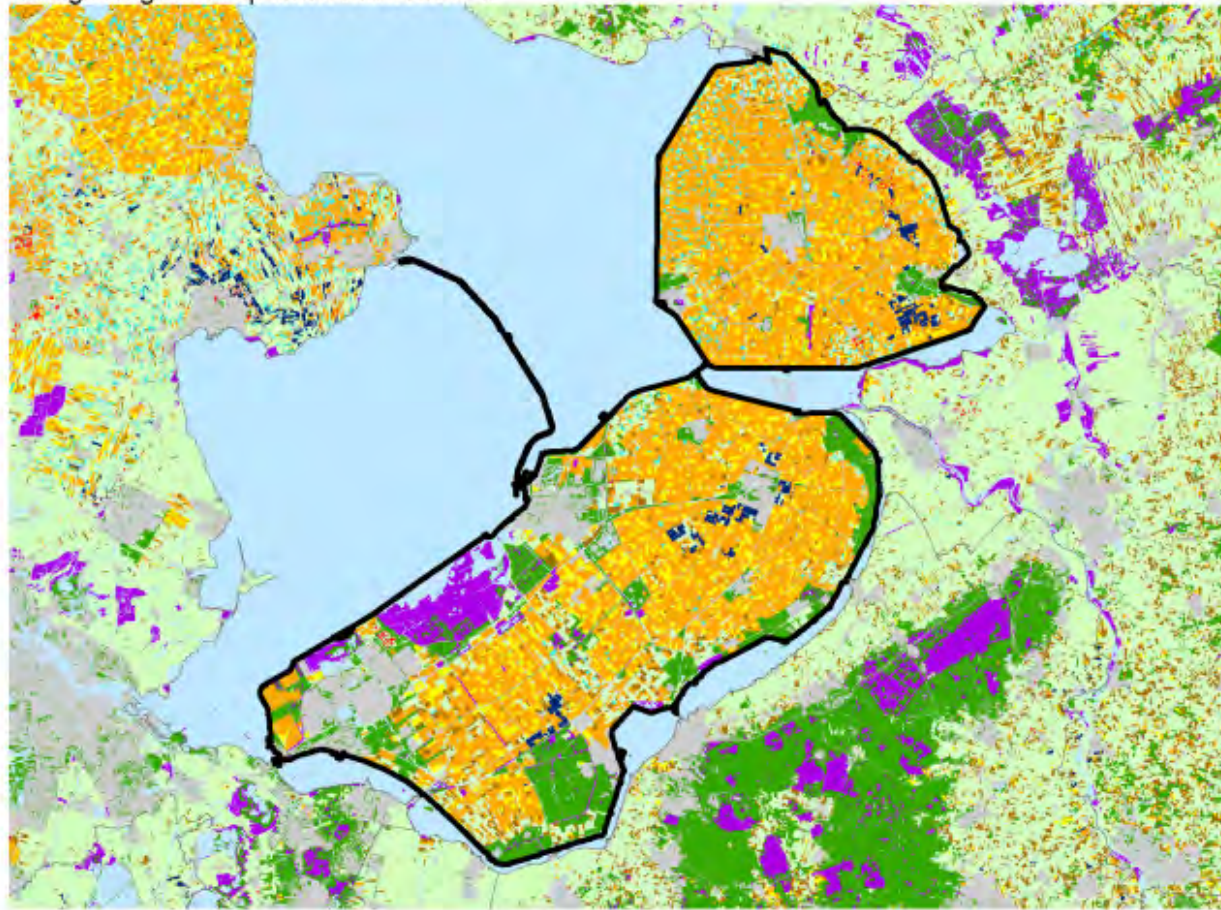






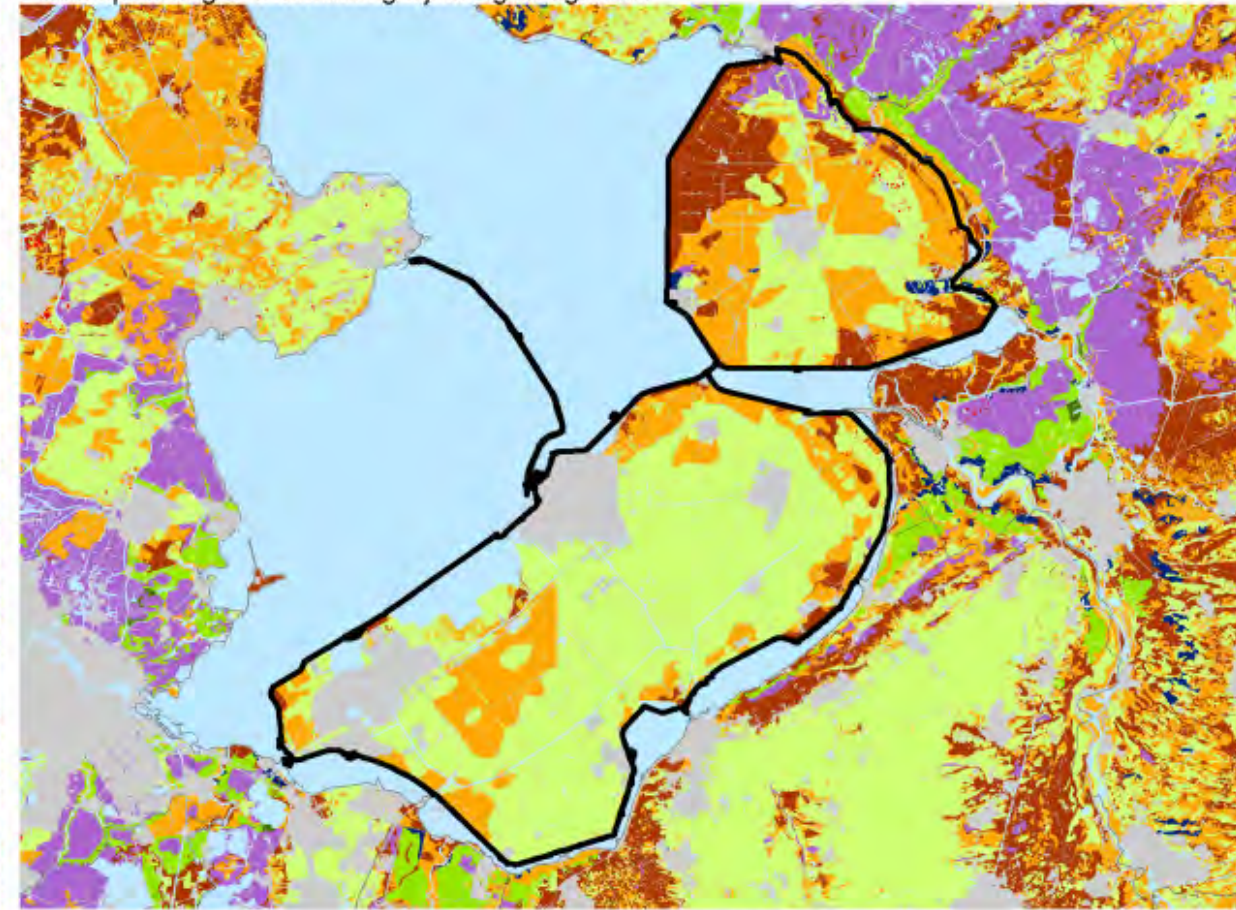


Provincie Flevoland  
Huidig landgebruik op basis van LGN4 - 6



- Gras
- Rooivruchten
- Glastuinbouw
- Bebouwing
- Mais
- Bollen
- Bos
- Water
- Graan
- Boomgaard
- Heide en natuurgrasland

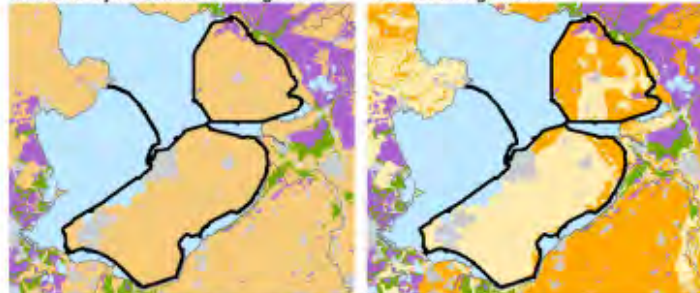
Risico op ondergrondverdichting bij huidig landgebruik



- Risico op verdichting
- Matig
- Bepert door veenlagen
- Verdere onderscheidingen
- Zeer beperkt
- Groot
- Van nature dicht
- Water
- Bepert
- Zeer groot
- Glastuinbouw, niet beoordeeld
- Bebouwing en infrastructuur

Sterkte eerste bodemlaag onder de bouwvoor in vochtige en natte toestand bij verschillend landgebruik

Malus voor sterkte ondergrond op ca. 40 cm-mv., afhankelijk van het landgebruik



Sterkte eerste laag in vochtige en natte toestand (kaartje links)								
	gras-land	mais	granen	rooivruchten	bollen	boomgaard	bos	overige natuur
	++	++	++	++	++	++	++	++
	+-	-	-	-	-	+-	-	++
	-	-	-	-	-	-	-	-

Malus voor sterkte ondergrond op ca. 40 cm (kaartje rechts)								
	0	0	-1	-1	0	0	0	0
	0	0	-1	-1	0	0	0	0
	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	0
	-1	-1	-1	-1	-1	0	-1	0
	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1

Bonus grof zand

Bonus humeuze ondergrond

Bonus kleige ondergrond

Bonus GLG > 120 cm-mv.

Malus GHG < 40 cm-mv.



- 0
- 1
- Water
- Bebouwing

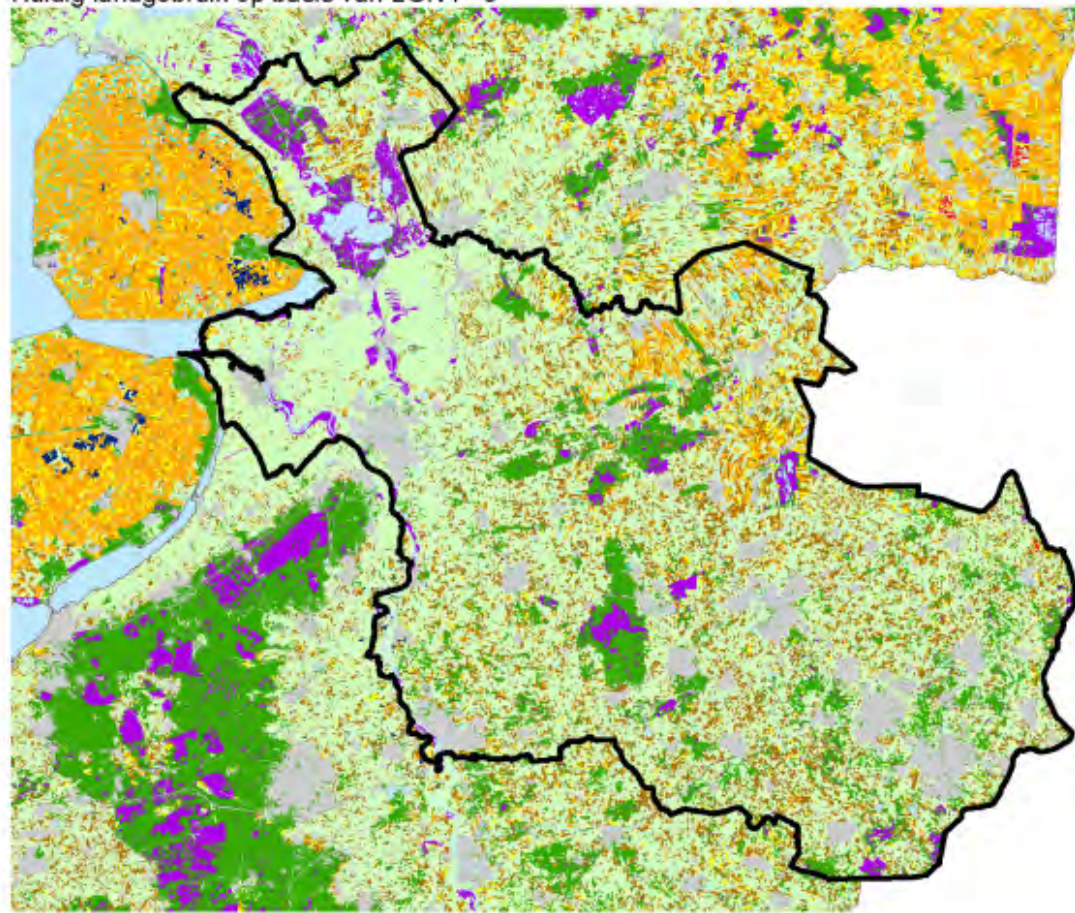
- 1
- 0





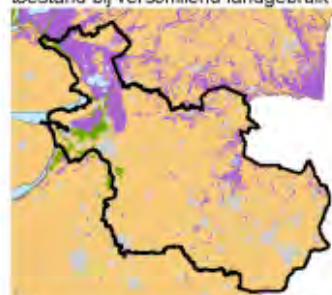


Provincie Overijssel  
Huidig landgebruik op basis van LGN4 - 6

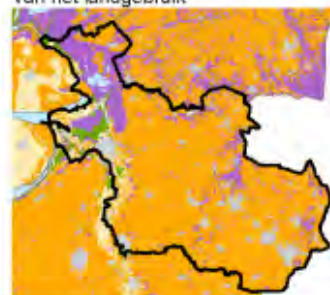


- Gras
- Rooivruchten
- Glastuinbouw
- Bebouwing
- Mais
- Bollen
- Bos
- Water
- Graan
- Boomgaard
- Heide en natuurgrasland

Sterkte eerste bodemlaag onder de bouwvoor in vochtige en natte toestand bij verschillend landgebruik

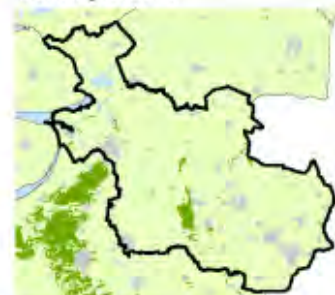


Malus voor sterkte ondergrond op ca. 40 cm-mv., afhankelijk van het landgebruik



Sterkte eerste laag in vochtige en natte toestand (kaartje links)									
	grasland	mais	granen	rooivruchten	bollen	boomgaard	bos	overige natuur	
	++	++	++	++	++	++	++	++	
	+-	-	-	-	-	-	-	-	
	-	-	-	-	-	-	-	-	
Malus voor sterkte ondergrond op ca. 40 cm (kaartje rechts)									
	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	-1	-1	0	0	0	0	
	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	0	
	-1	-1	-1	-1	-1	0	-1	0	
	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	

Bonus grof zand



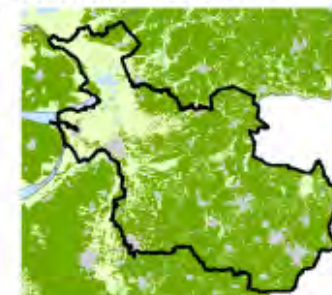
Bonus humeuze ondergrond



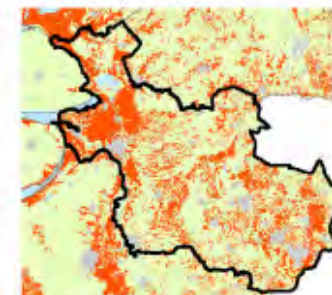
Bonus kleige ondergrond



Bonus GLG > 120 cm-mv

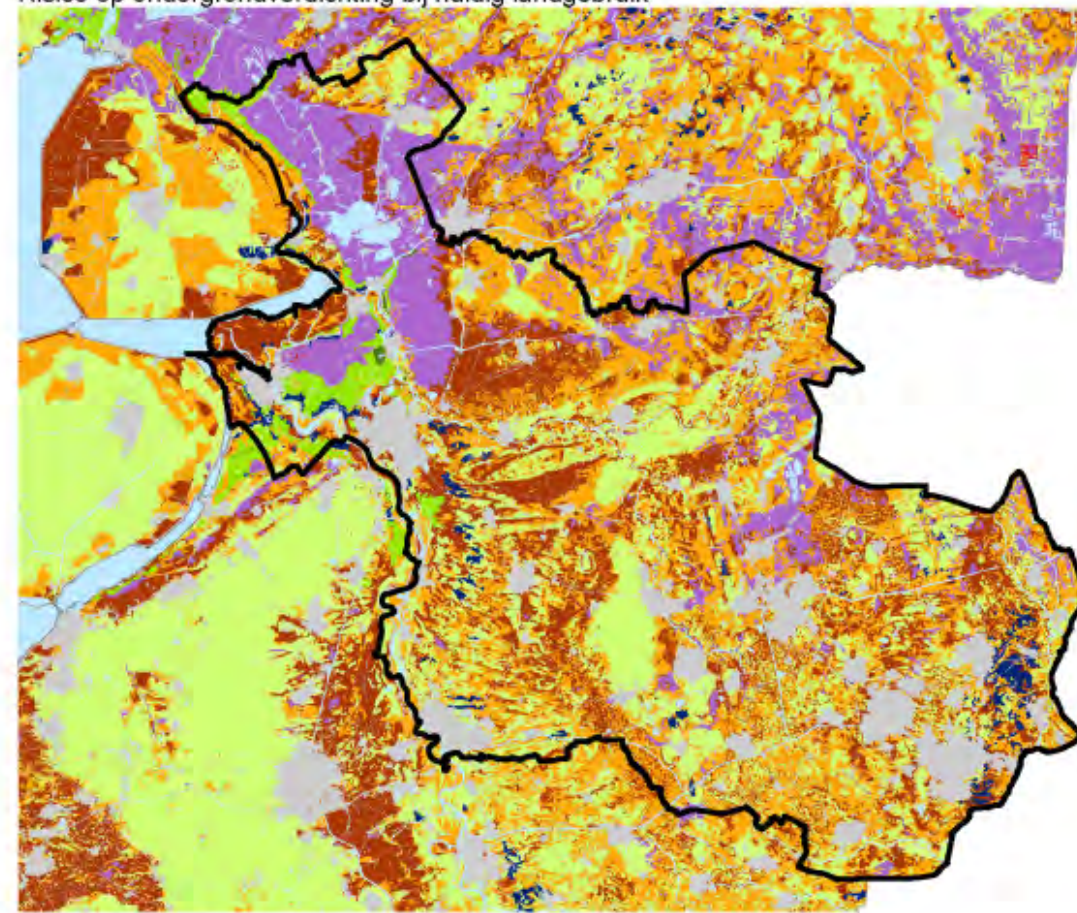


Malus GHG < 40 cm-mv



- 0
- 1
- Water
- Bebouwing

Risico op ondergrondverdichting bij huidig landgebruik



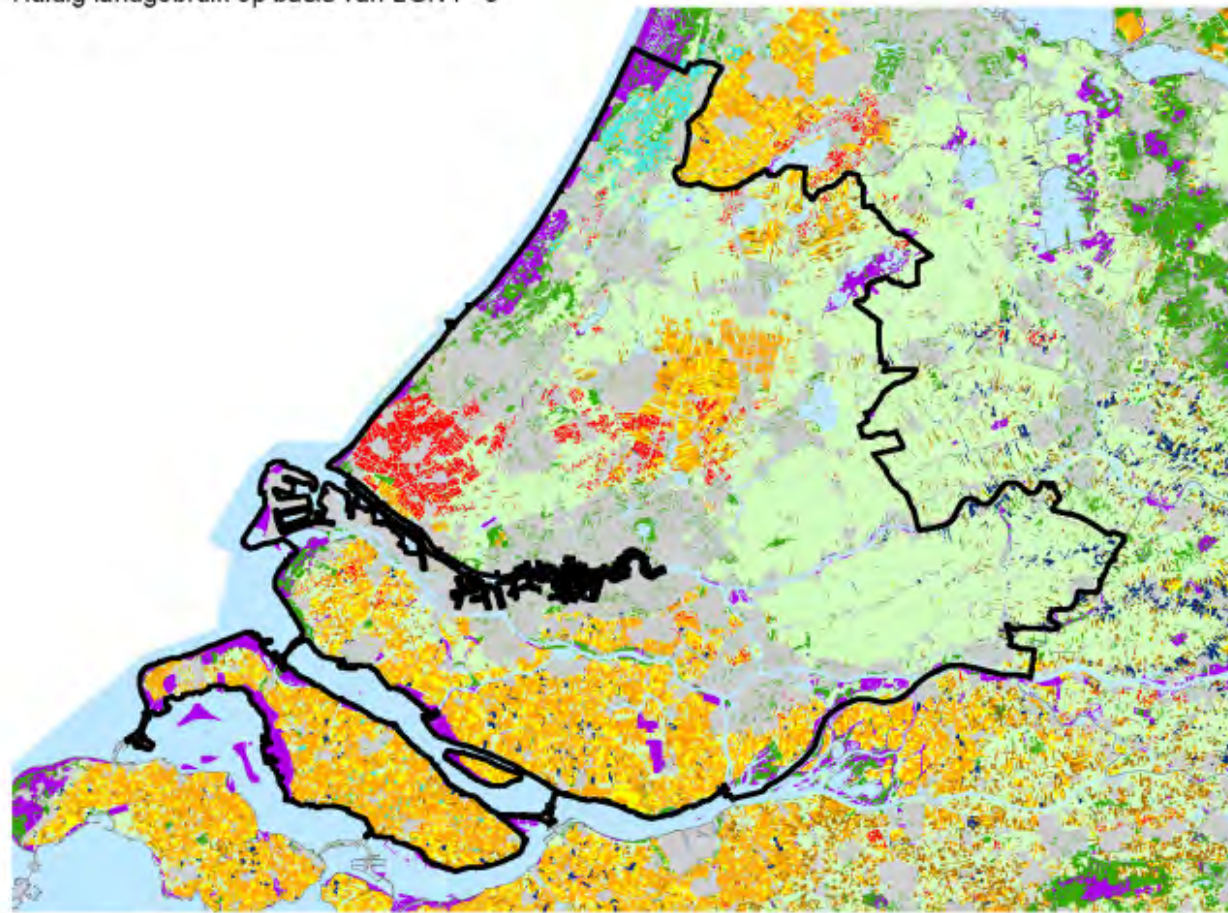
- Risico op verdichting
- Matig
- Bepaald door veenlagen
- Verdere onderscheidingen
- Zeer beperkt
- Groot
- Van nature dicht
- Water
- Beperkt
- Zeer groot
- Glastuinbouw, niet beoordeeld
- Bebouwing en infrastructuur







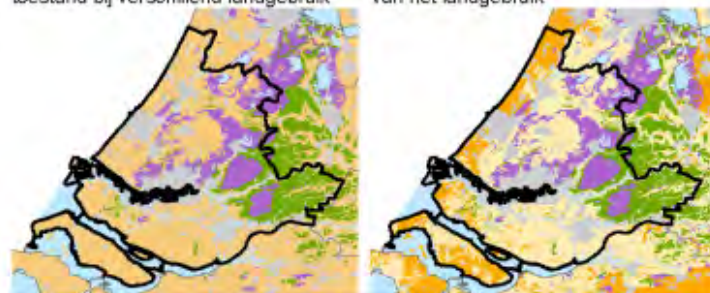
Provincie Zuid-Holland  
Huidig landgebruik op basis van LGN4 - 6



- Gras
- Rooivruchten
- Glastuinbouw
- Bebouwing
- Mais
- Bollen
- Bos
- Water
- Graan
- Boomgaard
- Heide en natuurgrasland

Sterkte eerste bodemlaag onder de bouwvoor in vochtige en natte toestand bij verschillend landgebruik

Malus voor sterkte ondergrond op ca. 40 cm-mv., afhankelijk van het landgebruik

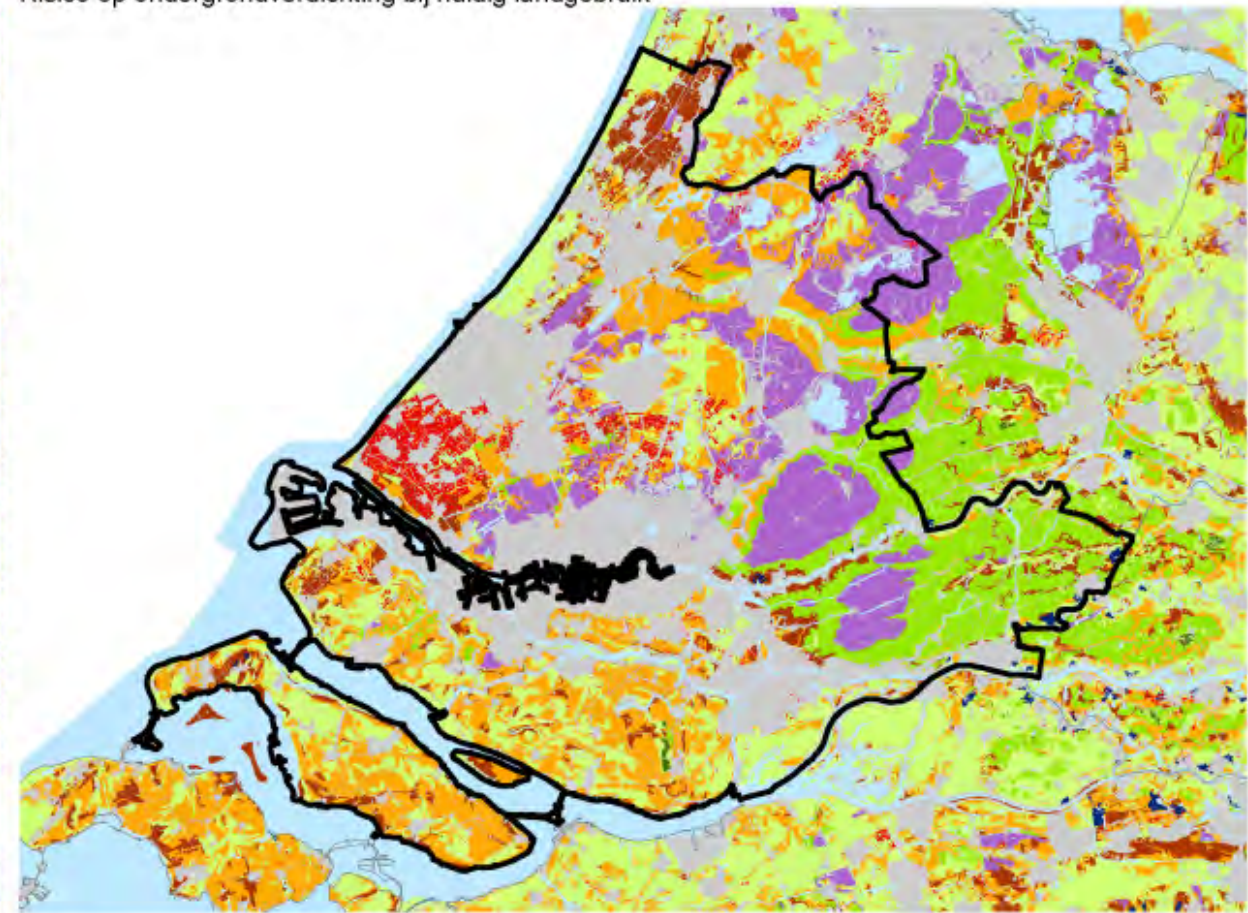


Sterkte eerste laag in vochtige en natte toestand (kaartje links)								
	gras-land	mais	granen	rooiv- vruchten	bollen	boom- gaard	bos	overige natuur
	++	++	++	++	++	++	++	++
	+	+	+	+	+	+	+	+
	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-

Malus voor sterkte ondergrond op ca. 40 cm (kaartje rechts)								
	0	0	-1	-1	0	0	0	0
	0	0	-1	-1	0	0	0	0
	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0
	-1	-1	-1	-1	0	0	-1	0
	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1

Risico op ondergrondverdichting bij huidig landgebruik



- Risico op verdichting
- Matig
- Bepert door veenlagen
- Verdere onderscheidingen
- Zeer beperkt
- Groot
- Van nature dicht
- Water
- Beperkt
- Zeer groot
- Glastuinbouw, niet beoordeeld
- Bebouwing en infrastructuur

Bonus grof zand

Bonus humeuze ondergrond

Bonus kleiige ondergrond

Bonus GLG > 120 cm-mv

Malus GHG < 40 cm-mv



- 0
- 1
- Water
- Bebouwing

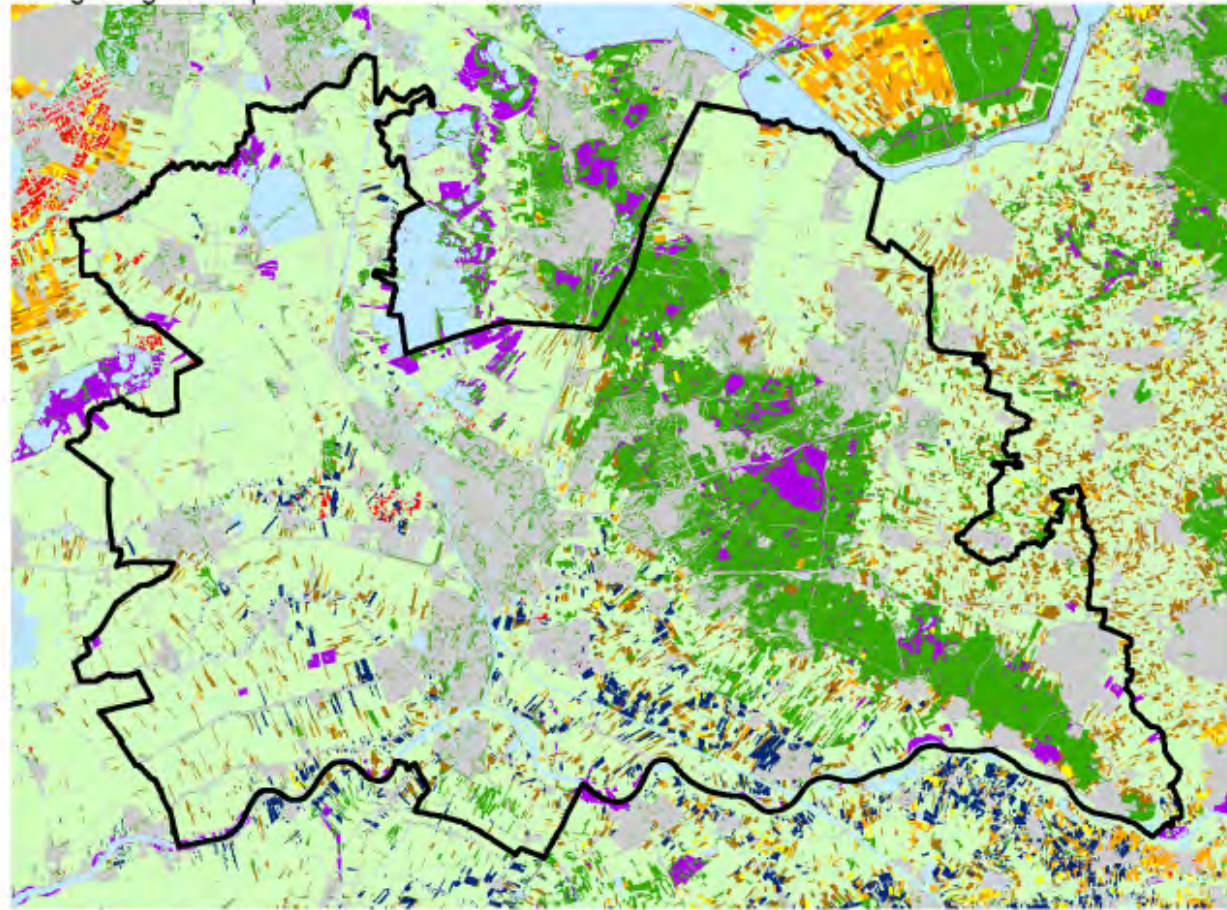
- 1
- 0



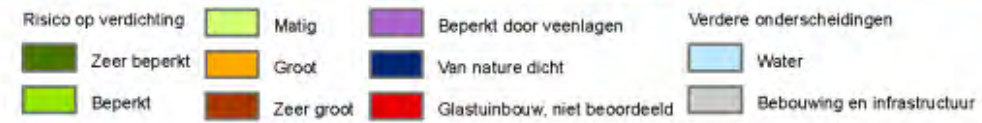
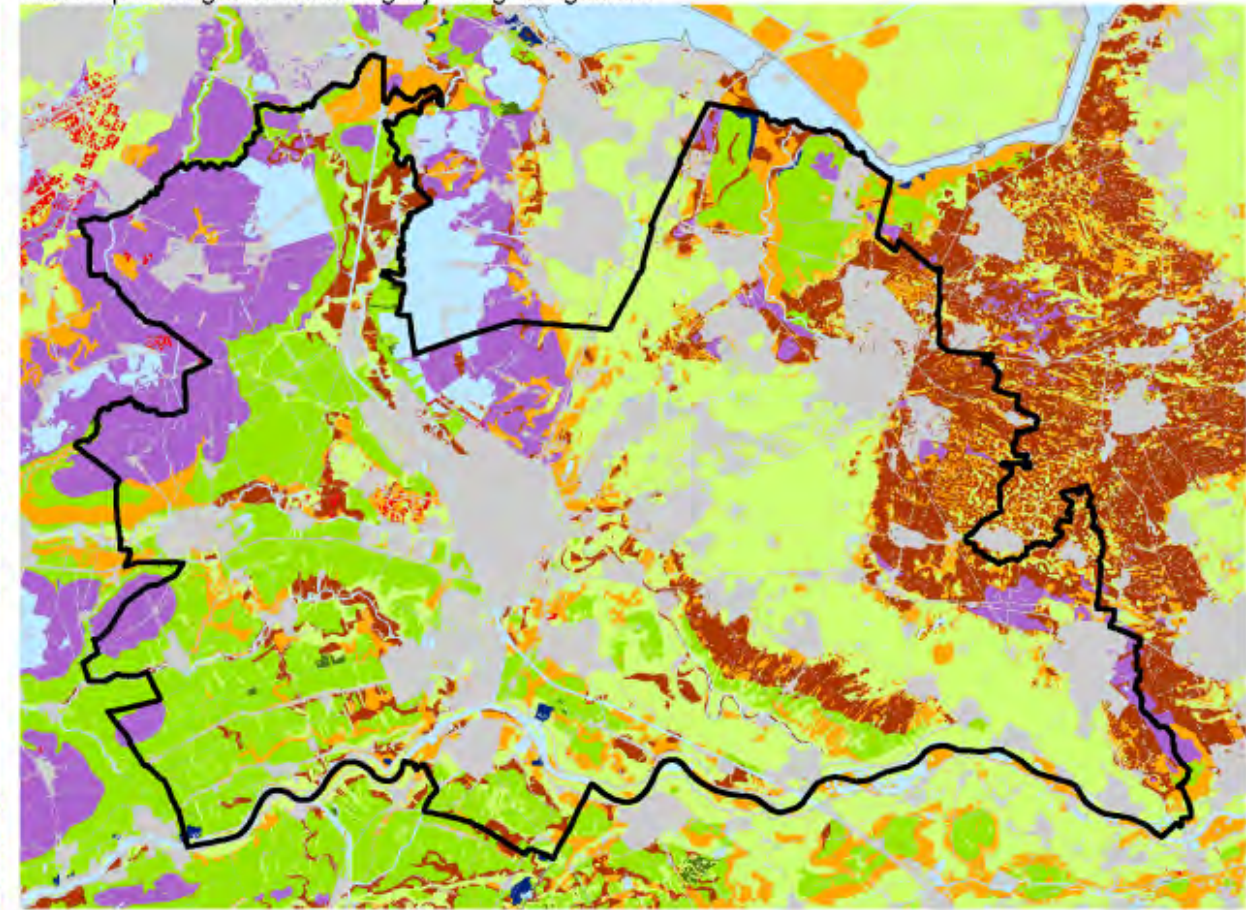




Provincie Utrecht  
Huidig landgebruik op basis van LGN4 - 6

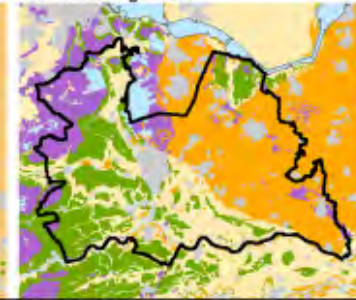
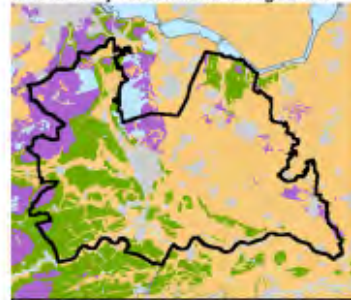


Risico op ondergrondverdichting bij huidig landgebruik



Sterkte eerste bodemlaag onder de bouwvoor in vochtige en natte toestand bij verschillend landgebruik

Malus voor sterkte ondergrond op ca. 40 cm-mv., afhankelijk van het landgebruik



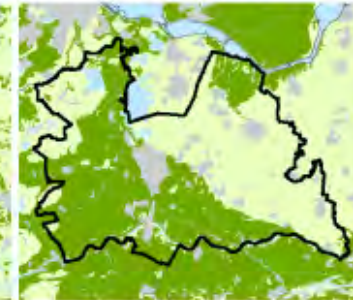
Bonus grof zand



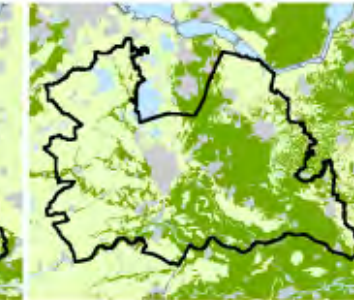
Bonus humeuze ondergrond



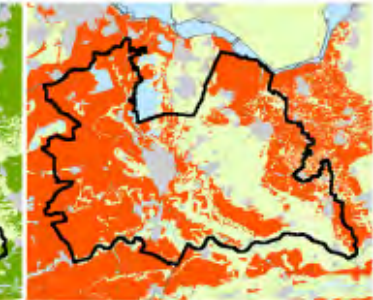
Bonus kleige ondergrond



Bonus GLG > 120 cm-mv.



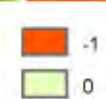
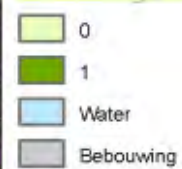
Malus GHG < 40 cm-mv.



Sterkte eerste laag in vochtige en natte toestand (kaartje links)								
grasland	mais	granen	rooivruchten	bollen	boomgaard	bos	overige natuur	
++	++	++	++	++	++	++	++	
+	+	+	+	+	+	+	+	
-	-	-	-	-	-	-	-	

Malus voor sterkte ondergrond op ca. 40 cm (kaartje rechts)								
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	-1	-1	-1	0	0	0	0
-1	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0
-1	-1	-1	-1	-1	0	-1	0	0
-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1

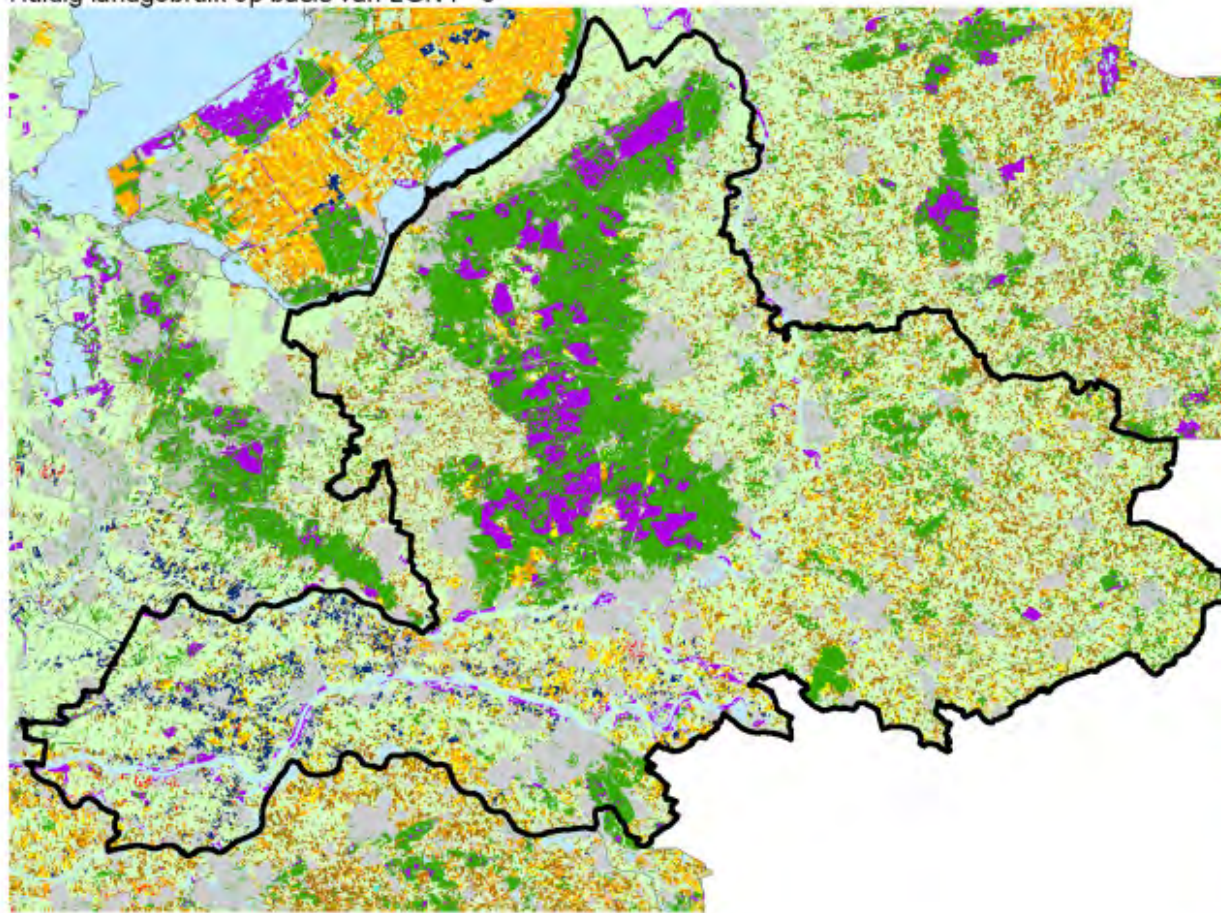






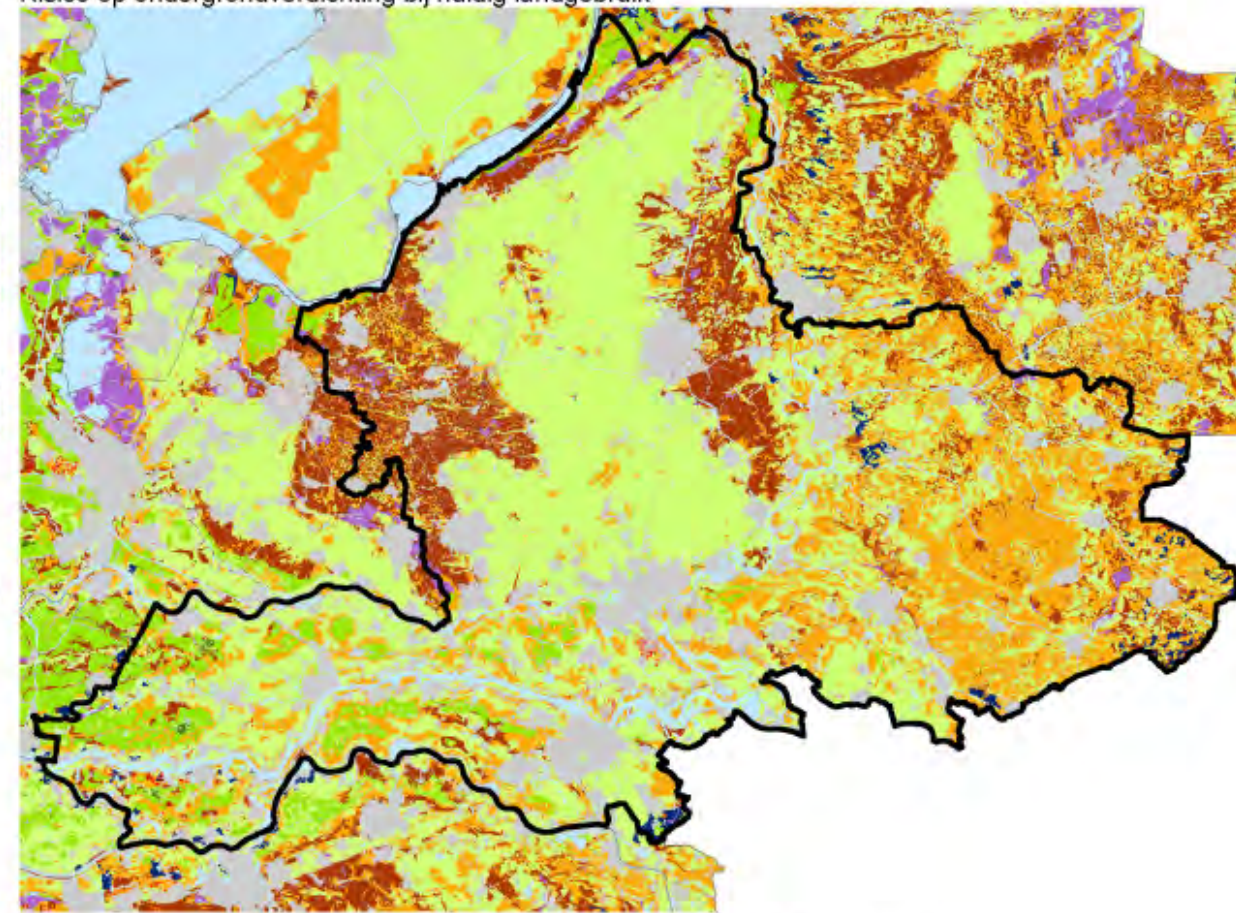


Provincie Gelderland  
Huidig landgebruik op basis van LGN4 - 6



- Gras
- Rooivruchten
- Glastuinbouw
- Bebouwing
- Mais
- Bollen
- Bos
- Water
- Graan
- Boomgaard
- Heide en natuurgrasland

Risico op ondergrondverdichting bij huidig landgebruik



- Risico op verdichting
- Matig
- Beperkt door veenlagen
- Verdere onderscheidingen
- Zeer beperkt
- Groot
- Van nature dicht
- Water
- Beperkt
- Zeer groot
- Glastuinbouw, niet beoordeeld
- Bebouwing en infrastructuur

Sterkte eerste bodemlaag onder de bouwvoor in vochtige en natte toestand bij verschillend landgebruik

Malus voor sterkte ondergrond op ca. 40 cm-mv., afhankelijk van het landgebruik



Sterkte eerste laag in vochtige en natte toestand (kaartje links)								
	gras-land	mais	graan	rooiv- vruchten	bollen	boom- gaard	bos	overige natuur
	++	++	++	++	++	++	++	++
	+	+	+	+	+	+	+	+
	-	-	-	-	-	-	-	-
Malus voor sterkte ondergrond op ca. 40 cm (kaartje rechts)								
	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	-1	-1	0	0	0	0
	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	0
	-1	-1	-1	-1	-1	0	-1	0
	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1

Bonus grof zand



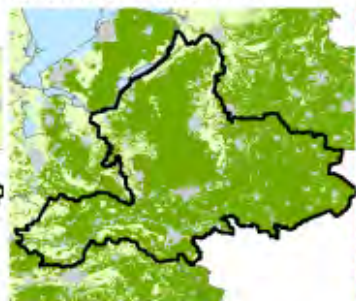
Bonus humeuze ondergrond



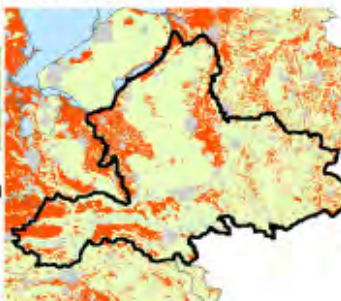
Bonus kleige ondergrond



Bonus GLG > 120 cm-mv.



Malus GHG < 40 cm-mv.



- 0
- 1
- Water
- Bebouwing

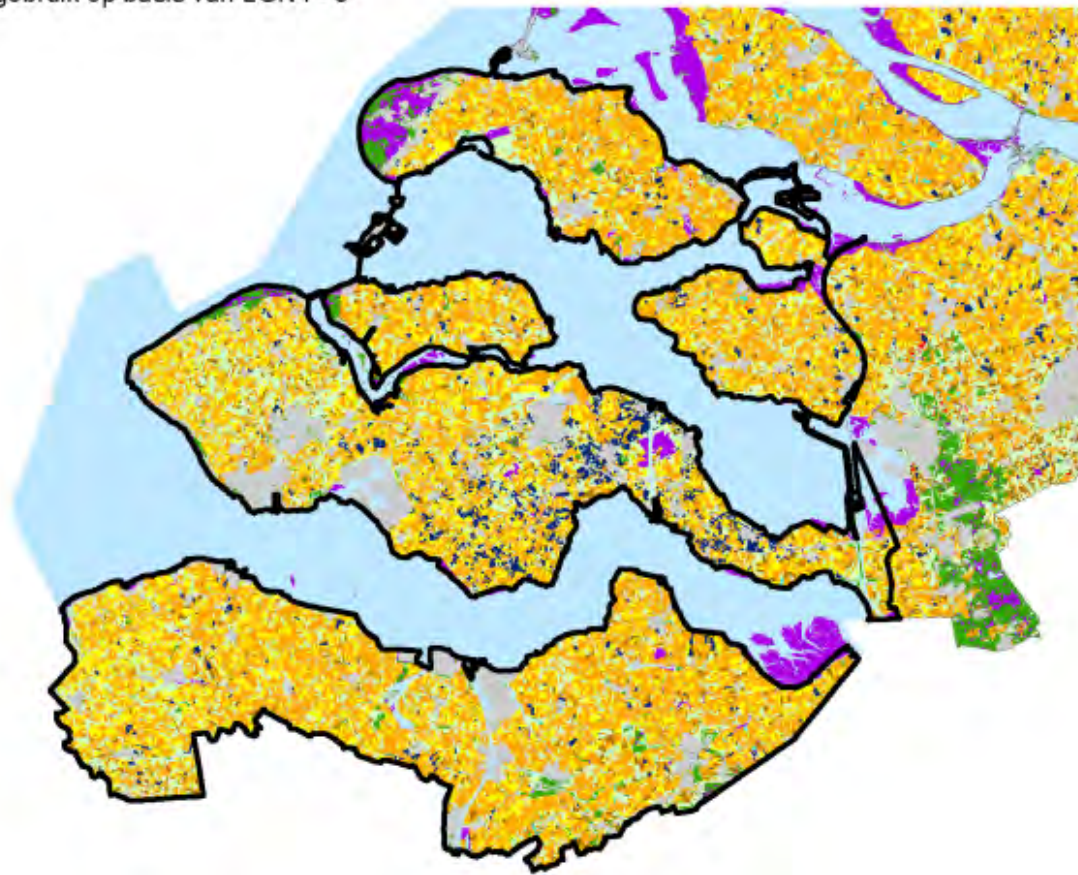
- 1
- 0



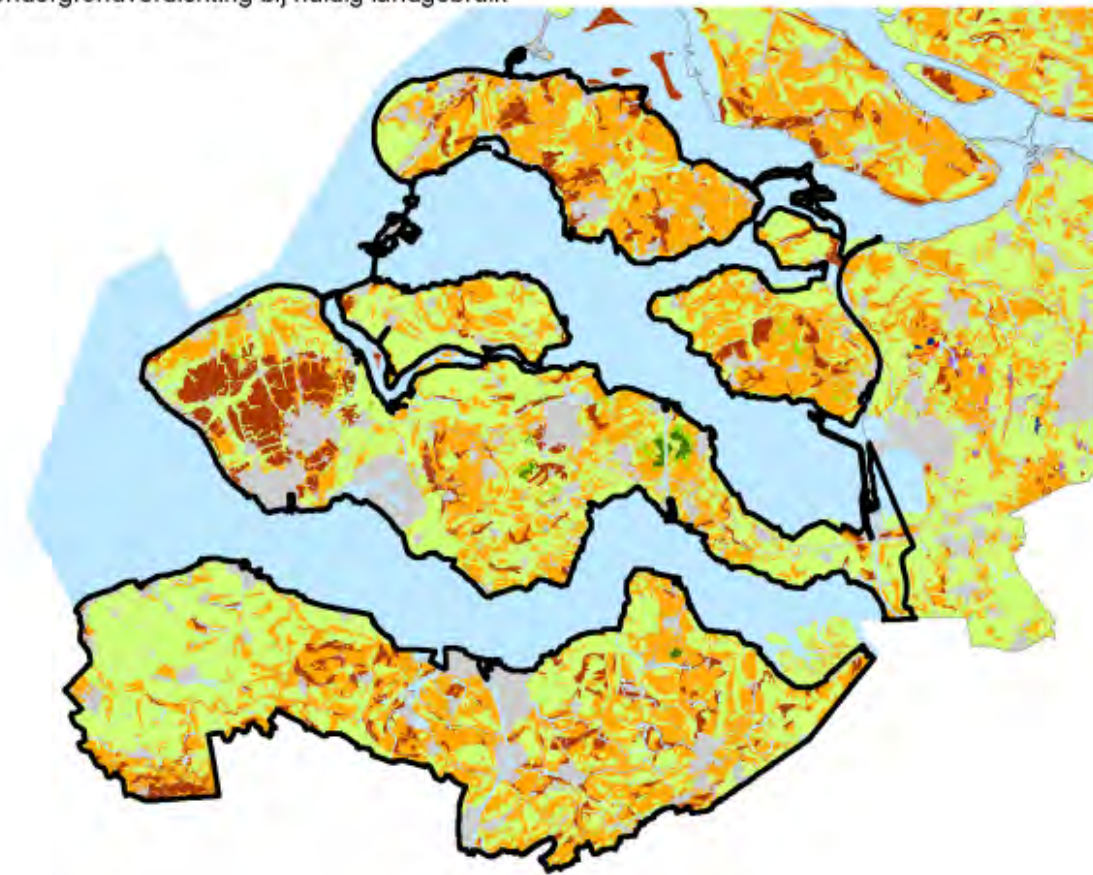




Provincie Zeeland  
Huidig landgebruik op basis van LGN4 - 6



Risico op ondergrondverdichting bij huidig landgebruik



- Gras
- Rooivruchten
- Glastuinbouw
- Bebouwing
- Mais
- Bollen
- Bos
- Water
- Graan
- Boomgaard
- Heide en natuurgrasland

- Risico op verdichting
- Matig
- Beperkt door veenlagen
- Verdere onderscheidingen
- Zeer beperkt
- Groot
- Van nature dicht
- Water
- Beperkt
- Zeer groot
- Glastuinbouw, niet beoordeeld
- Bebouwing en infrastructuur

Sterkte eerste bodemlaag onder de bouwvoor in vochtige en natte toestand bij verschillend landgebruik

Malus voor sterkte ondergrond op ca. 40 cm-mv., afhankelijk van het landgebruik



Bonus grof zand



Bonus humeuze ondergrond



Bonus kleige ondergrond



Bonus GLG > 120 cm-mv



Malus GHG < 40 cm-mv



Sterkte eerste laag in vochtige en natte toestand (kaartje links)								
	gras-land	mais	gras	rooivruchten	bollen	boomgaard	bos	overige natuur
	+/-	+/+	+/+	+/+	+/-	+/+	+/+	+/+
	+/-	-/-	-/-	-/-	-/-	+/-	-/-	+/+
	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-
Malus voor sterkte ondergrond op ca. 40 cm (kaartje rechts)								
	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	-1	-1	0	0	0	0
	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	0
	-1	-1	-1	-1	-1	0	-1	0
	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1

- 0
- 1
- Water
- Bebouwing

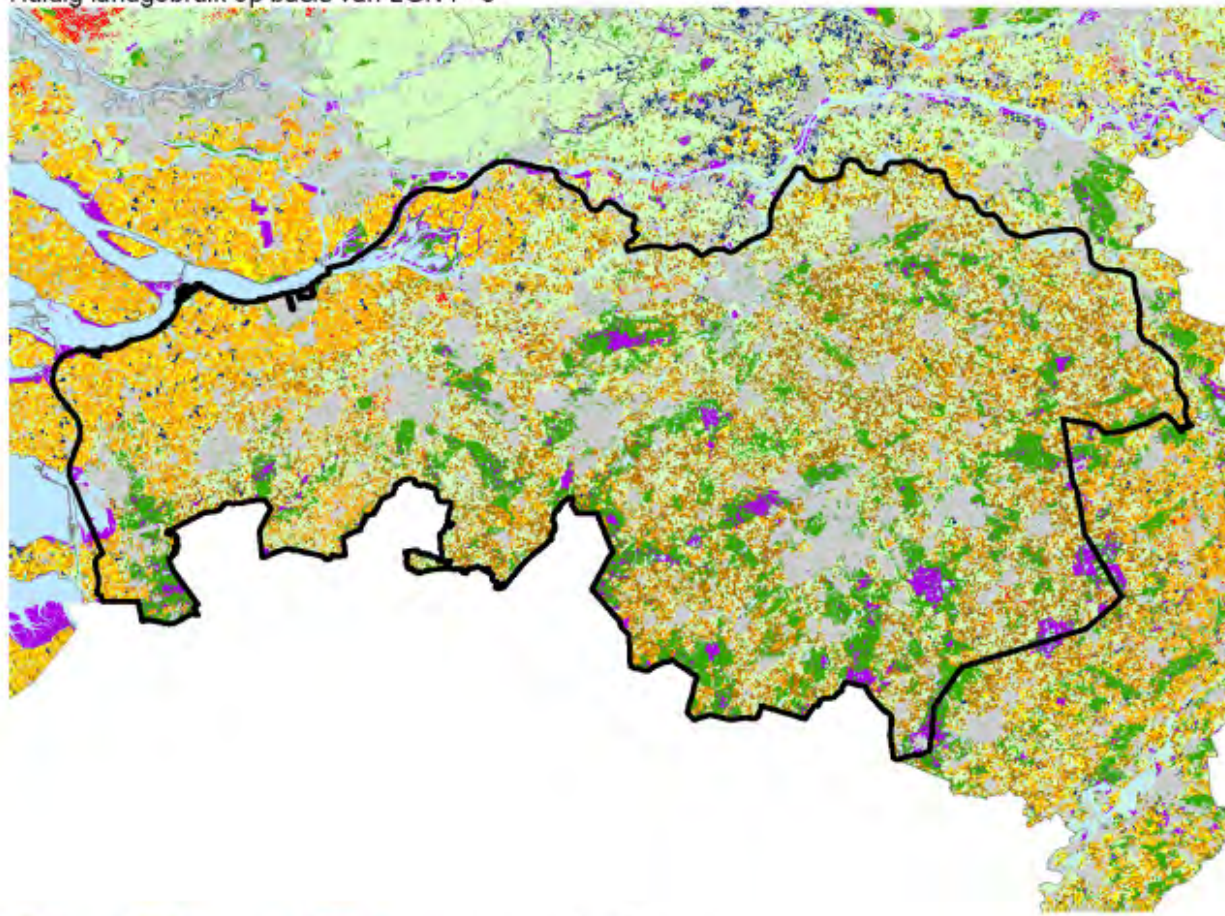
- 1
- 0



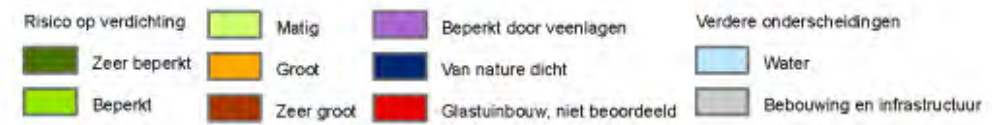
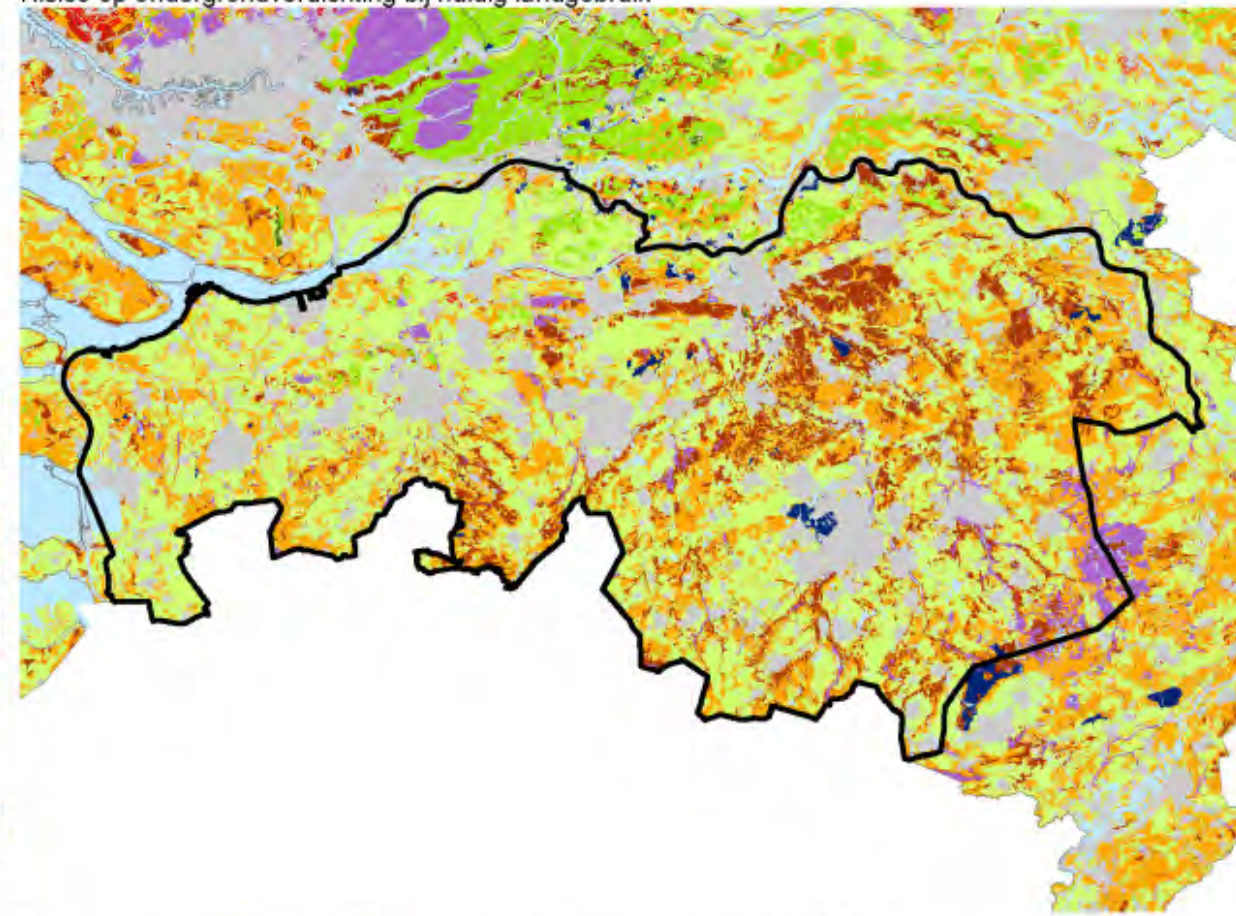




Provincie Noord-Brabant  
Huidig landgebruik op basis van LGN4 - 6



Risico op ondergrondverdichting bij huidig landgebruik



Sterkte eerste bodemlaag onder de bouwvoor in vochtige en natte toestand bij verschillend landgebruik

Malus voor sterkte ondergrond op ca. 40 cm-mv., afhankelijk van het landgebruik



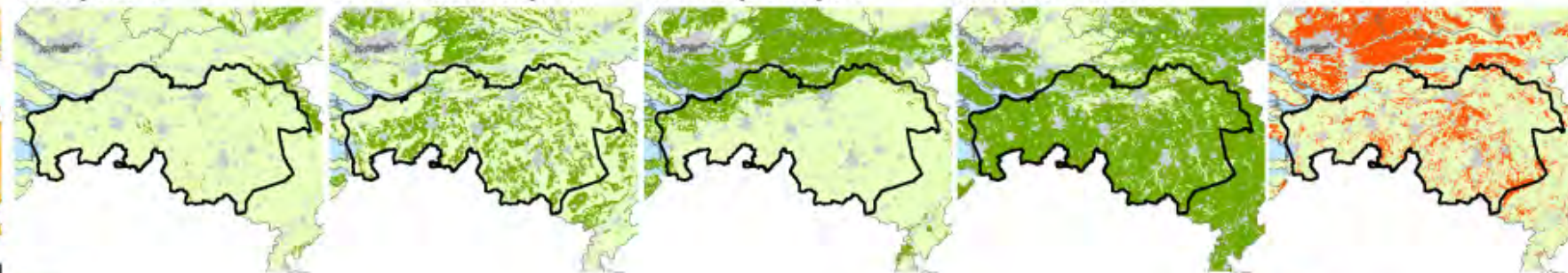
Bonus grof zand

Bonus humeuze ondergrond

Bonus kleiige ondergrond

Bonus GLG > 120 cm-mv

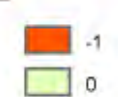
Malus GHG < 40 cm-mv



Sterkte eerste laag in vochtige en natte toestand (kaartje links)								
	gras-land	mais	granen	rooiv- vruchten	bollen	boom- gaard	bos	overige natuur
	++	++	++	++	++	++	++	++
	+	-	-	-	-	+	-	+
	-	-	-	-	-	-	-	-

Malus voor sterkte ondergrond op ca. 40 cm (kaartje rechts)								
	gras-land	mais	granen	rooiv- vruchten	bollen	boom- gaard	bos	overige natuur
	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	-1	-1	0	0	0	0
	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	0
	-1	-1	-1	-1	-1	0	-1	0
	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1

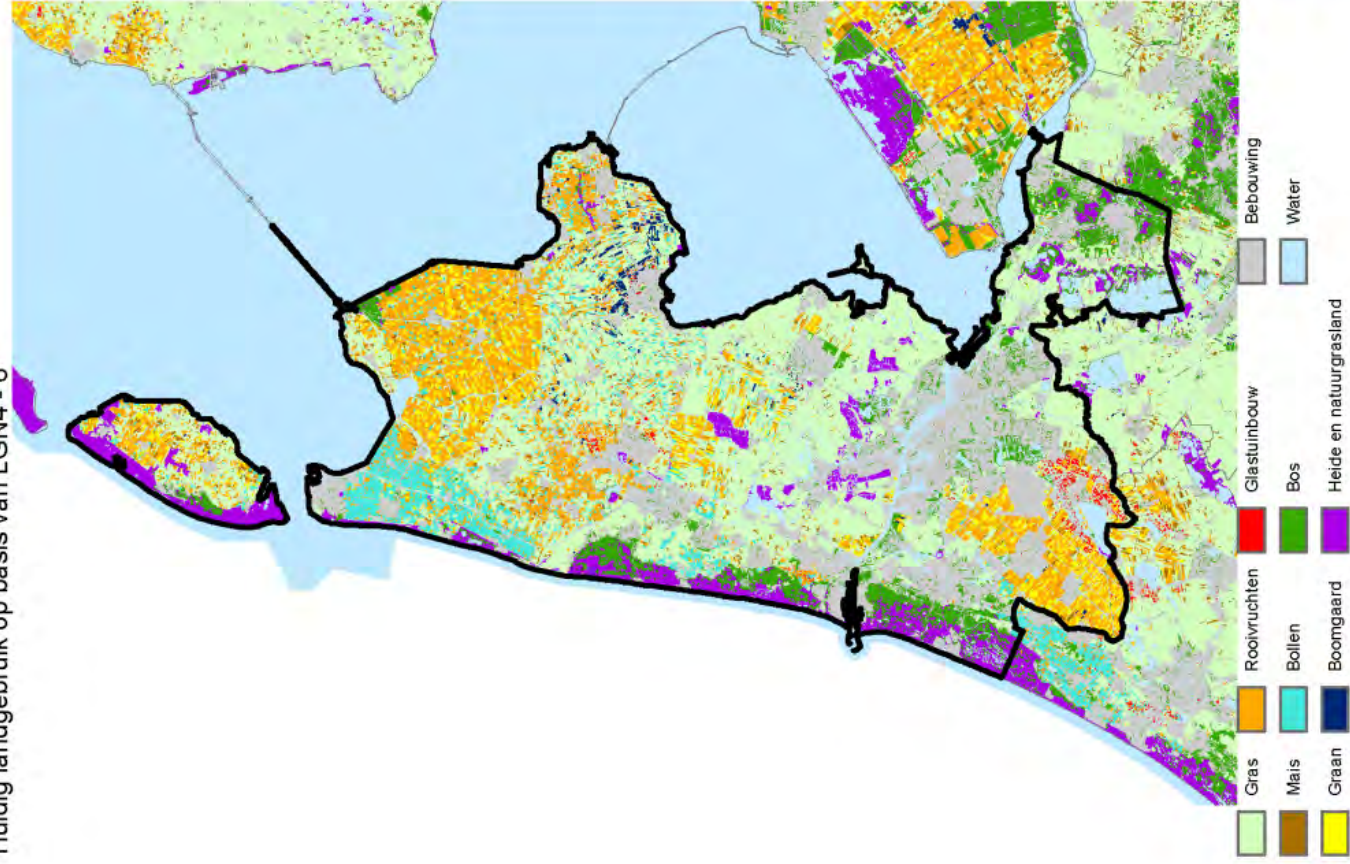




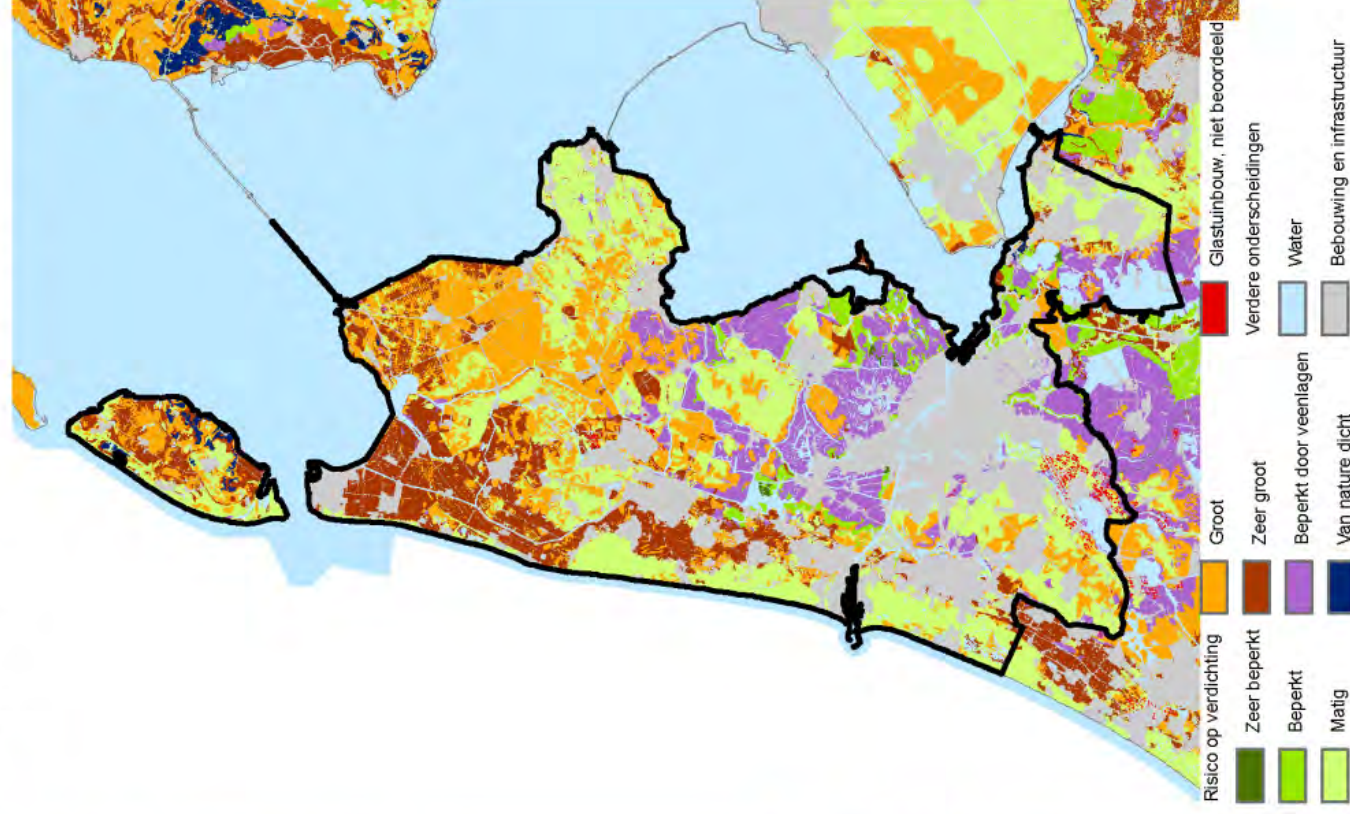




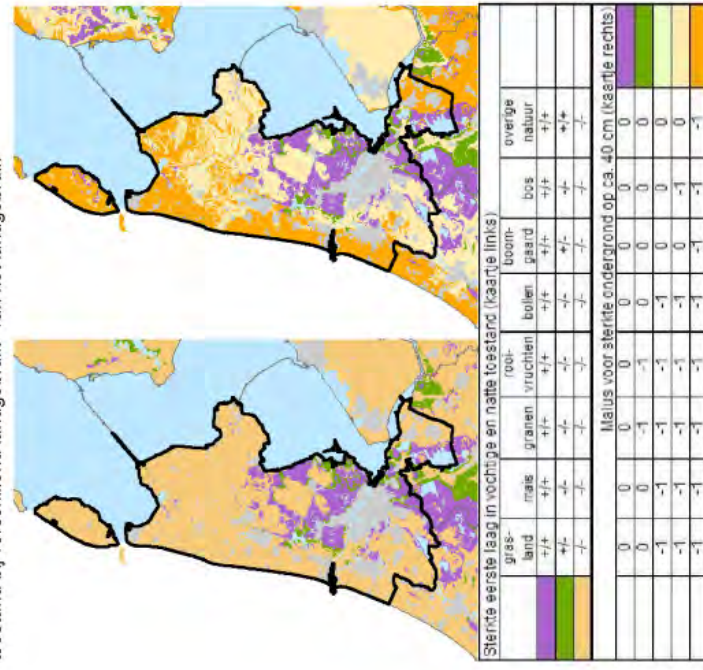
Provincie Noord-Holland  
Huidig landgebruik op basis van LGN4 - 6



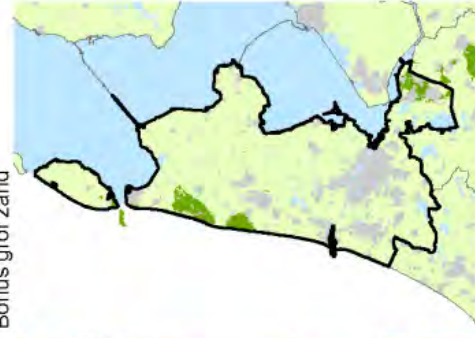
Risico op ondergrondverdichting bij huidig landgebruik



Sterkte eerste bodemlaag onder de bouwvoor in vochtige en natte toestand bij verschillend landgebruik van het landgebruik



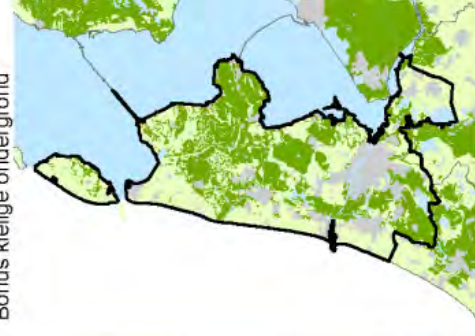
Bonus grof zand



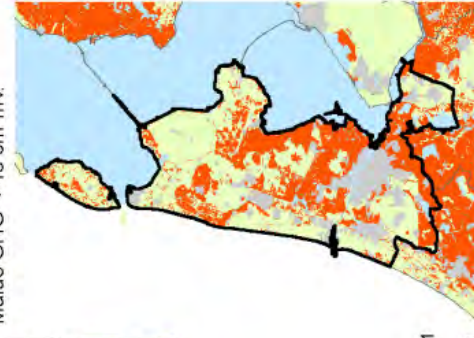
Bonus humeuze ondergrond



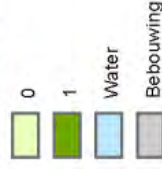
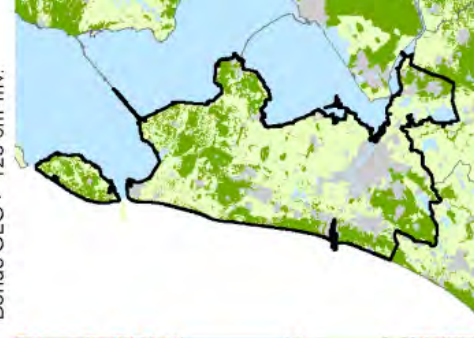
Bonus kleiige ondergrond



Malus GHG < 40 cm-mv.



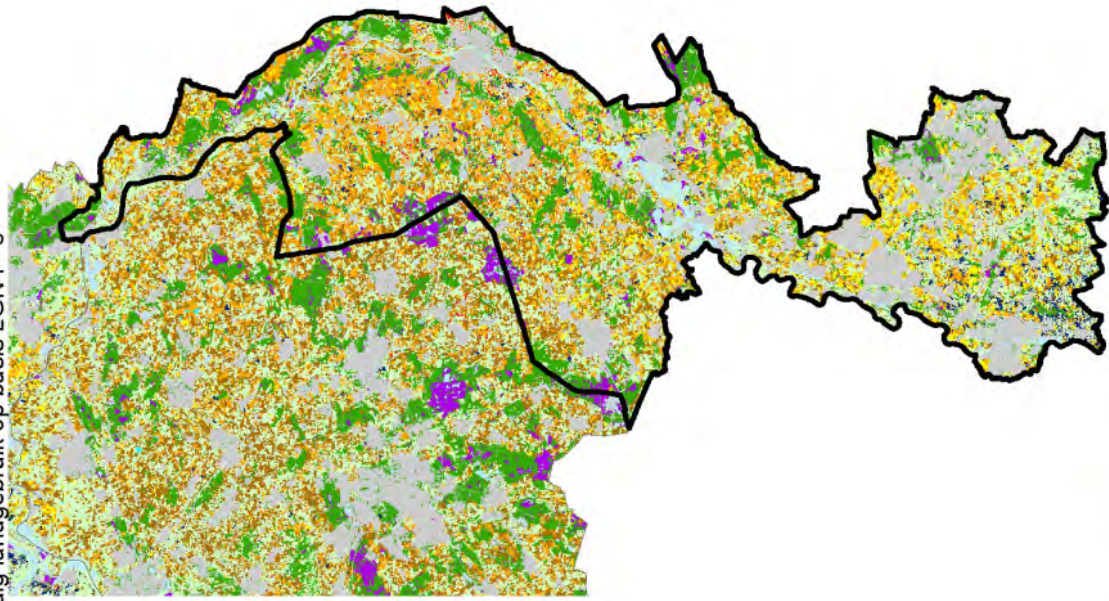
Bonus GLG > 120 cm-mv.





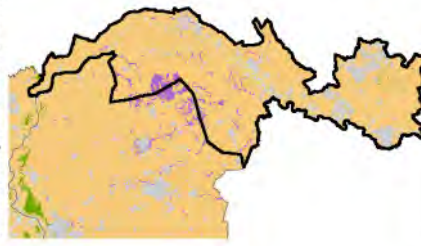


Provincie Limburg  
Huidig landgebruik op basis LGN4 - 6

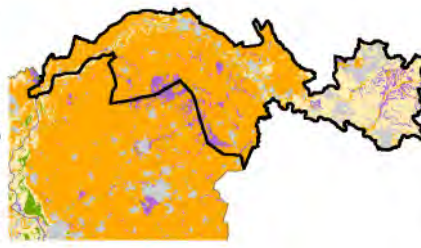


- Gras
- Maïs
- Graan
- Rooivruchten
- Bollen
- Boomgaard
- Glasuinbouw
- Bos
- Heide en natuurgrasland
- Bebouwing
- Water

Sterkte eerste bodemiaag onder de bouwvoor in vochtige en natte toestand bij verschillend landgebruik



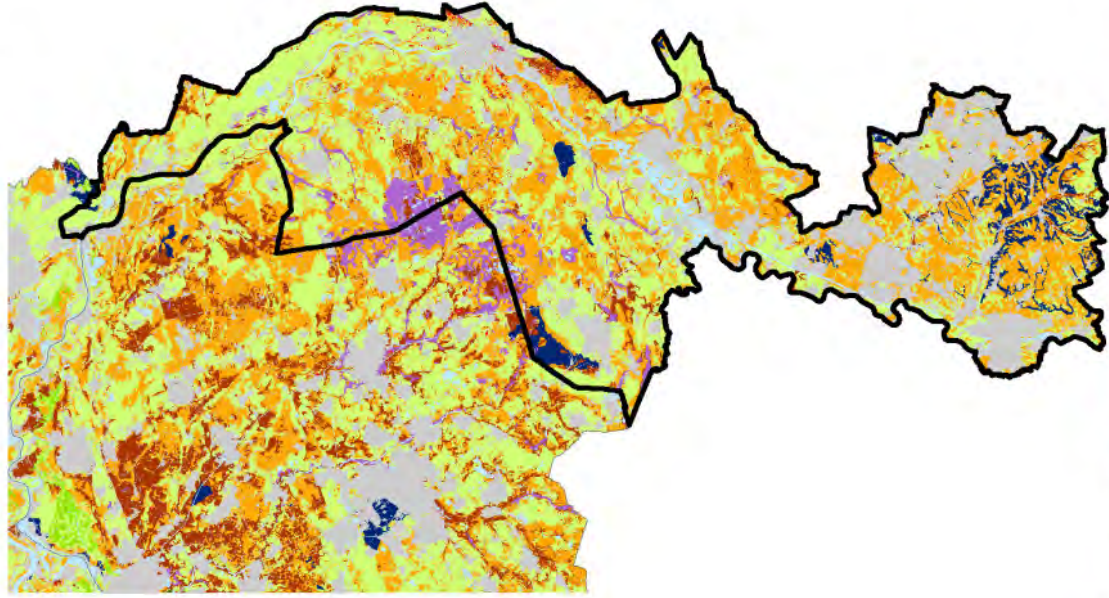
Malus voor sterkte ondergrond op ca. 40 cm-mv., afhankelijk van het landgebruik



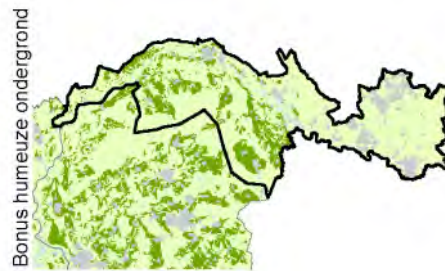
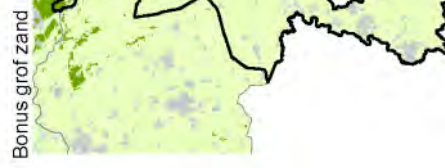
Sterkte eerste laag in vochtige en natte toestand (kaartje links)									
gras-land	maïs	graan	rooivruchten	maïs vruchten	colleen	boomgaard	bos	avengende natuur	avengende natuur
++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1

- 1
- 0

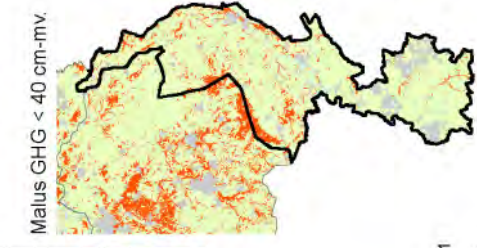
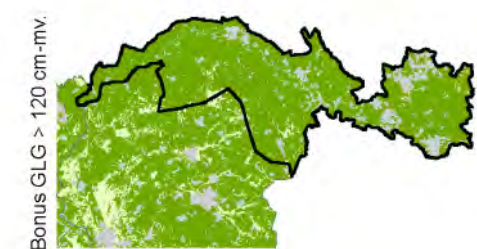
Risico op ondergrondverdichting bij huidig landgebruik



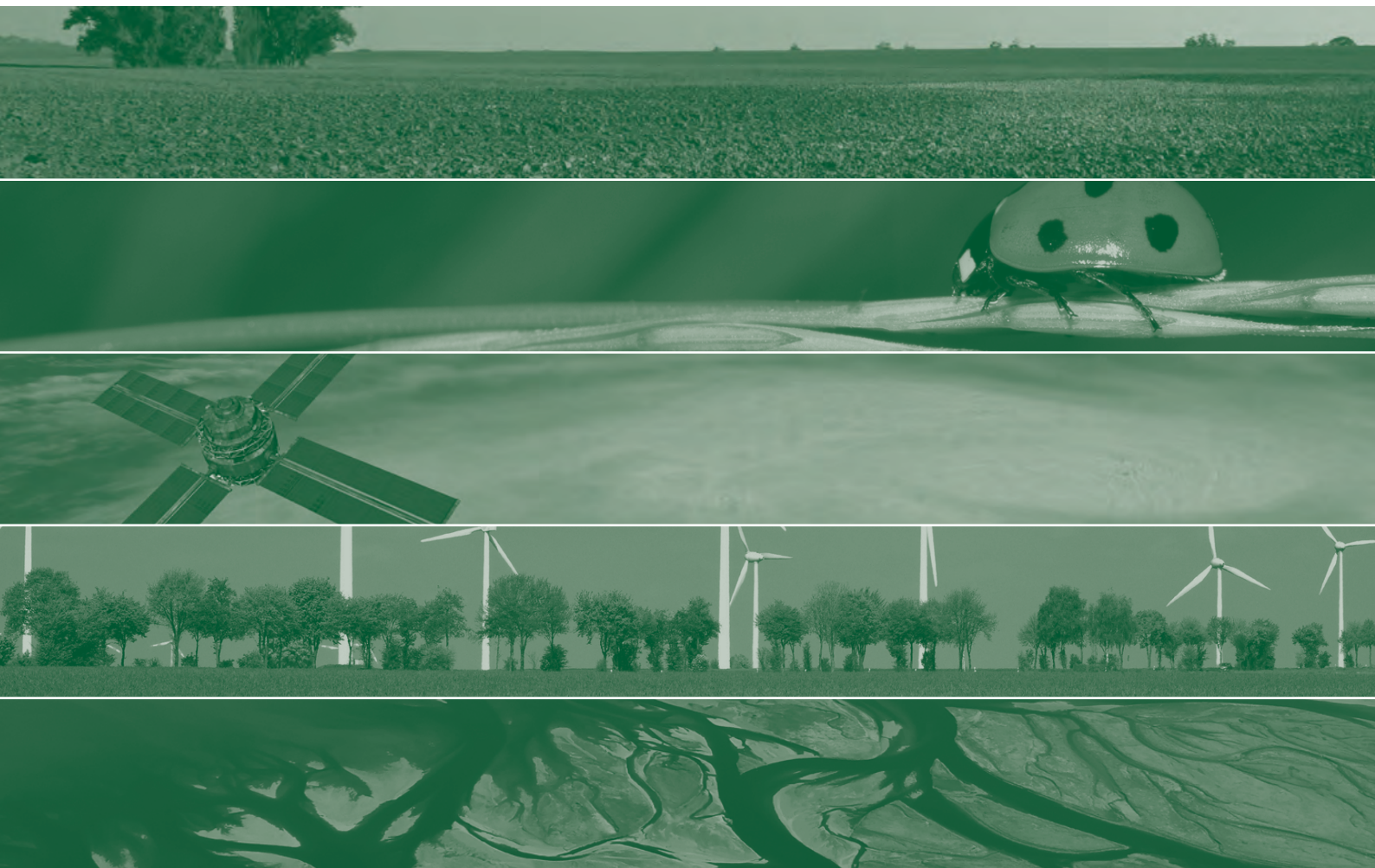
- Risico op verdichting
- Zeer beperkt
- Beperkt
- Matig
- Groot
- Zeer groot
- Beperkt door veenlagen
- Van nature dicht
- Glasuinbouw, niet beoordeeld
- Verdere onderscheidingen
- Water
- Bebouwing en infrastructuur



- 0
- 1
- Water
- Bebouwing







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

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

Meer informatie: [www.wageningenUR.nl/alterra](http://www.wageningenUR.nl/alterra)