



Voorkomen en opheffen van bodemverdichting

Literatuuronderzoek en casestudie Flevoland

G. Bakema, J.J.H. van den Akker, F. van Egmond



WAGENINGEN
UNIVERSITY & RESEARCH

Voorkomen en opheffen van bodemverdichting

Literatuuronderzoek en casestudie Flevoland

G. Bakema, J.J.H. van den Akker, F. van Egmond

Dit onderzoek is uitgevoerd door Wageningen Environmental Research in opdracht van de provincie Flevoland en het waterschap Zuiderzeeland in het kader van het Raak-Pro-project.

Wageningen Environmental Research
Wageningen, maart 2021

Gereviewd door:
Marius Heinen, Wetenschappelijk onderzoeker bodemfysica (WENR)

Akkoord voor publicatie:
Mirjam Hack-ten Broeke, teamleider van BWL

Rapport 3069
ISSN 1566-7197

Bakema, G., J.J.H. van den Akker, en van F. van Egmond, 2021. *Voorkomen en opheffen van bodemverdichting; Literatuuronderzoek en casestudie Flevoland*. Wageningen, Wageningen Environmental Research, Rapport 3069. 42 blz.; 16 fig.; 2 tab.; 55 ref.

Dit rapport richt zich op de wijze waarop bodemverdichting van de ondergrond (30-60 cm -mv) kan worden voorkomen en opgeheven. Nadrukkelijk is hierbij gezocht naar de wetenschappelijke basis voor de diverse maatregelen. Die basis is niet altijd gevonden, omdat het bestaande onderzoek sterk gedateerd is, niet is uitgevoerd onder Nederlandse condities of omdat het met name was gericht op de bovengrond. Verder wordt naar een aantal maatregelen nog onderzoek gedaan. Daar waar mogelijk zijn de maatregelen specifiek gemaakt voor de Flevolandse bodem.

This report focuses on the way in which soil compaction of the subsoil (30 - 60 cm below ground level) can be prevented and eliminated. The scientific basis for the various measures was explicitly sought. This basis was not always found because the existing research is outdated, was not carried out under Dutch conditions or because it was mainly focused on the topsoil.

Trefwoorden: bodemverdichting, bodemdegradatie, Flevoland.

Dit rapport is gratis te downloaden van <https://doi.org/10.18174/542089> of op www.wur.nl/environmental-research (ga naar 'Wageningen Environmental Research' in de grijze balk onderaan). Wageningen Environmental Research verstrekt *geen* gedrukte exemplaren van rapporten.

© 2021 Wageningen Environmental Research (instituut binnen de rechtspersoon Stichting Wageningen Research), Postbus 47, 6700 AA Wageningen, T 0317 48 07 00, www.wur.nl/environmental-research. Wageningen Environmental Research is onderdeel van Wageningen University & Research.

- 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.

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



Wageningen Environmental Research werkt sinds 2003 met een ISO 9001 gecertificeerd kwaliteitsmanagementsysteem. In 2006 heeft Wageningen Environmental Research een milieuzorgsysteem geïmplementeerd, gecertificeerd volgens de norm ISO 14001. Wageningen Environmental Research geeft via ISO 26000 invulling aan haar maatschappelijke verantwoordelijkheid.

Wageningen Environmental Research Rapport 3069 | ISSN 1566-7197

Foto omslag: Guido Bakema, Verdichte kopakker maisveld.

Inhoud

	Verantwoording	5
	Woord vooraf	7
	Samenvatting	9
1	Bodemverdichting, ondergrond en bovengrond	11
2	Trends in Bodemverdichting	12
	2.1 Bodemverdichting Flevoland	12
	2.1.1 Risico bodemverdichting	12
	2.1.2 Bodemverdichting gemeten	15
	2.2 Mechanisatie	17
	2.3 Intensivering	18
	2.4 Toekomstige ontwikkeling bodemverdichting	18
3	Effecten van bodemverdichting	20
	3.1 Beperking bewortelingsdiepte	20
	3.2 Vermindering waterdoorlatendheid	20
	3.3 Verminderde opbrengst	21
4	Voorkomen en opheffen	23
	4.1 Optimaliseren waterhuishouding	23
	4.2 Verbeteren en in stand houden van bodemstructuur	26
	4.2.1 Zwellen en krimpen van kleigronden	26
	4.2.2 Op peil houden of verhogen organische stof	27
	4.2.3 Diep wortelende gewassen.	27
	4.2.4 Woelen/diepploegen	27
	4.2.5 Gaten prikken of boren	28
	4.3 Vruchtwisseling en bouwplan	28
	4.4 Verminderde belasting	29
	4.4.1 Wiellast, bandenspanning en bandentype	29
	4.4.2 Nieuwe landbouwconcepten	31
	4.4.3 Aangepaste bewerkingen	32
	4.5 Technisch handelingsperspectief	33
	4.6 Sociaaleconomisch handelingsperspectief	34
5	Samenvattende beschouwingen	36
	Literatuur	38

Verantwoording

Rapport: 3069

Projectnummer: 5200043298

Wageningen Environmental Research (WENR) hecht grote waarde aan de kwaliteit van zijn eindproducten. Een review van de rapporten op wetenschappelijke kwaliteit door een referent maakt standaard onderdeel uit van ons kwaliteitsbeleid.

Akkoord Referent die het rapport heeft beoordeeld,

functie: Wetenschappelijk onderzoeker bodemfysica

naam: Marius Heinen

datum: 11 februari 2021

Akkoord teamleider voor de inhoud,

naam: Mirjam Hack-ten Broeke

datum: 19 februari 2021

Woord vooraf

De Flevolandse bodem is sterk in ontwikkeling. De kwaliteit voor agrarisch gebruik was goed, maar kent een dalende trend. Dit komt voor een belangrijk deel door bodemdaling (inklinking, rijping en veenoxidatie) en bodemverdichting (aantasting van de bodemstructuur en afname van poriënvolume en doorlatendheid door agrarische praktijken). Hiermee dreigt de (voedsel)productiecapaciteit terug te lopen in een provincie waar de productiestructuur voornamelijk is gericht op agribusiness (Van Os, 2016).

Bodemverdichting en -daling zijn ook bepalend voor het waterbergend vermogen, de af- en uitspoeling van nutriënten en gewasbeschermingsmiddelen naar grond- en oppervlaktewater en de biodiversiteit van het bodemleven. Dit zijn dan ook belangrijke factoren in het beleid rondom duurzaam bodem- en waterbeheer. In het kader van het project Raak-pro wordt onderzoek gedaan naar het verkrijgen van meer kennis van achterliggende mechanismen, ontwikkeling en validatie van innovatieve meettechnieken om bodemverdichting en -daling in kaart te brengen, inzicht in ruimtelijke variabiliteit (en achterliggende oorzaken) en gevolgen van bodemverdichting en -daling (landbouwkundig, hydrologisch, biologisch). Raak-pro is een project dat geïnitieerd is door de provincie Flevoland en het Waterschap Zuiderzeeland. Het consortium dat het project uitvoert, bestaat uit: Aeres Hogeschool, Saxion Hogeschool, Aequator, Wageningen Environmental Research, Wageningen Universiteit, Acacia Institute en Medusa.

Dit rapport richt zich, naast de belangrijkste oorzaken en gevolgen van bodemverdichting, op de wijze waarop bodemverdichting van de ondiepe ondergrond (30-60 cm -mv) kan worden voorkomen en opgeheven. Het gaat hierbij om bodemverdichting die ontstaan is door niet-natuurlijke processen.

Er is in het onderzoek gezocht naar de wetenschappelijke basis voor de diverse maatregelen. Die basis is niet altijd gevonden, omdat het bestaande onderzoek sterk gedateerd is, niet uitgevoerd is onder Nederlandse condities of omdat het met name was gericht op de bovengrond. Verder wordt naar een aantal maatregelen nog onderzoek gedaan. Daar waar mogelijk zijn de maatregelen specifiek gemaakt voor de Flevolandse bodem.

Delen van hoofdstuk 1, 2 en 3 zijn gebaseerd op de factfinding bodemverdichting (Van den Akker, 2020) dat geschreven werd voor het rapport *De bodem bereikt* door de Raad voor de leefomgeving en infrastructuur (2020).

Samenvatting

Bodemverdichting wordt gedefinieerd als verdichting en vervorming van de bodemstructuur, gewoonlijk als gevolg van mechanische spanningen. Deze spanningen worden in het algemeen veroorzaakt door wiellasten van landbouwvoertuigen. Ondiepe bodemverdichting kan worden opgeheven door grondbewerking. Voor de diepere ondergrond (> 30 cm-mv) is dit niet of zeer beperkt mogelijk en krijgt een eenmaal opgetreden verdichting een permanent karakter. Dit heeft tot gevolg dat bewortelbaarheid van gewassen afneemt en er oogtschade optreedt (10 tot 40%). Daarnaast beperkt een verdichte ondergrond de infiltratie van regenwater waardoor er meer wateroverlast kan ontstaan. Ook beperkt dit het waterbergend vermogen van de bodem, waardoor meer droogteschade zal ontstaan. In dit literatuuronderzoek is gekeken naar de mogelijkheden om bodemverdichting te voorkomen en op te heffen. Daar waar mogelijk is dit specifiek gemaakt voor de situatie in Flevoland.

De kans op bodemverdichting is hoog in Flevoland, doordat er relatief veel teelten worden gebruikt met late oogstmomenten en zware machines. Doordat de ondergrond voor een belangrijk deel bestaat uit kleien die, onder relatief droge omstandigheden, veel belasting kunnen hebben, wordt het risico wel vermindert. Op basis van relatief beperkt veldonderzoek is vastgesteld dat tussen de 25 en 45% van de gronden in Flevoland daadwerkelijk verdicht is.

Voorkomen blijft het allerbelangrijkst, omdat het opheffen van ondergrondverdichting een zeer traag proces is (zwellen/krimpen van klei), de methoden niet effectief zijn (woelen, diepspitten), de effectiviteit van methoden nog niet voldoende is aangetoond (teelt van diep wortelende gewassen zoals sorghum) en/of erg kostbaar zijn (gaten prikken). Voor landbouwers en loonwerkers is belangrijk dat zij zich bewust zijn welke invloed bepaalde bewerkingen of oogsten op bodemverdichting kunnen hebben. Daarvoor kan o.a. de risicotool Terranimo worden gebruikt. Omdat verlaging van wiellast/bandenspanning met de huidige vorm van mechanisatie niet altijd mogelijk is of omdat de oogst vrijwel altijd onder natte condities plaatsvindt, zal er ook meer aandacht moeten zijn voor andere manieren van landbouwmechanisatie of grondbewerking. Van deze methoden zoals bovenover ploegen, niet-kerende grondbewerking, vaste rijpaden en drukwisselsystemen is bekend dat ze bodemverdichting kunnen verminderen.

Het opheffen van de bodemverdichting door middel van diepploegen of woelen wordt vanwege verstoring van de gehele bodemstructuur afgeraden. Het meeste perspectief op herstel zijn methoden waarbij het zwel- en krimpproces wordt bevorderd. Dit kan door het verbeteren van de ontwatering waardoor er diepe scheuren kunnen ontstaan. Deze methode kan alleen werken voor gronden met een voldoende hoog kleigehalte (lutumgehalte > 17%). Waar verlaging onvoldoende kan plaatsvinden of waar de kleigehaltes te laag zijn, kan de bodemverdichting worden opgeheven door diep wortelende gewassen zoals sorghum.

Het huidige economisch perspectief voor de agrarische sector dat bepaald wordt door lage marges en de hoge prijs voor landbouwgrond (en hoge pachtprizen) laat weinig ruimte om bodemverdichting te voorkomen. Andere teelten en andere bewerkingswijzen leveren minder kans op bodemverdichting, maar zijn economisch minder aantrekkelijk. In het kader van het maatschappelijk en economisch belang van een langjarige gezonde en productieve bodem, zouden er mogelijkheden moeten worden geboden van een financiële compensatie of van hogere marktprijzen. Hierin ligt een rol weggelegd voor landeigenaren, voedselverwerkende industrie en overheden.

Dit onderzoek maakt duidelijk dat er meer technologisch onderzoek gedaan moet worden naar de mate van bodemverdichting en de wijze waarop dit technologisch kan worden opgelost. Dit zal echter voor het daadwerkelijk toepassen van de geschetste maatregelen niet voldoende zijn. Er zal nadrukkelijk ook aandacht moeten zijn voor de sociaaleconomische en maatschappelijke aspecten van de hele productieketen bij het voorkomen en opheffen van bodemverdichting. Kennisoverdracht en bewustwording zijn belangrijke factoren die veranderingen in de agrarische sector in gang kunnen zetten.

1 Bodemverdichting, ondergrond en bovengrond

Bodemverdichting wordt gedefinieerd als verdichting en vervorming van de bodemstructuur, gewoonlijk als gevolg van mechanische spanningen. Deze spanningen worden in het algemeen veroorzaakt door wiellasten van landbouwvoertuigen. Deze wiellasten zijn niet alleen verticaal, maar vooral bij aangedreven wielen treden ook horizontale afschuifspanningen op, om bijvoorbeeld de trekkracht te leveren bij ploegen. Verdichting veroorzaakt een afname van de totale en luchtgevulde porositeit door het ineendrukken van het bodemvolume. Vervorming veroorzaakt structuurverlies, waarbij de continuïteit van doorgaande poriën wordt verstoord en er een structuurloze grond ontstaat. Belangrijke bodemeigenschappen zoals water- en luchtdoorlatendheid, infiltratiecapaciteit, berging van water, bewortelbaarheid en zuurstofvoorziening door diffusie nemen door verdichting sterk af. Daardoor heeft verdichting een verlagende werking op de productiviteit (10-40%, zie paragraaf 3.3) en biologische activiteit van de bodem, treden bovendien verliezen van nutriënten op en wordt circulaire landbouw slechter mogelijk. Door de afgenomen infiltratiecapaciteit en doorlatendheid voor water bestaat er een verhoogd risico op bodemerosie en verlies van voedingsstoffen als gevolg van afstroming en denitrificatie (Van der Salm et al., 2015).

Bij de meeste gronden kunnen een bovengrond en een ondergrond worden onderscheiden, waarbij de bovengrond zich ten opzichte van de ondergrond kenmerkt door een hoger organischestofgehalte, veel meer beworteling en bodemleven en een lossere structuur. Bij landbouwgronden die jaarlijks worden geploegd of losgemaakt, is dit onderscheid het duidelijkst. De **bovengrond** is de belangrijkste bodemlaag voor de planten, aangezien het grootste deel van hun wortels in de bovengrond groeit en daar het meeste water en nutriënten worden onttrokken. Ook wisselwerkingen van de bodem met de atmosfeer (zuurstofvoorziening en vorming en uitwisseling van gas) vinden voornamelijk plaats in de bovengrond. De bovengrond heeft daarnaast als taak om de inwerking van regendruppels en wind te absorberen en het regenwater vast te houden en bij overmaat naar diepere bodemlagen te transporteren zonder afstroming via het oppervlak.

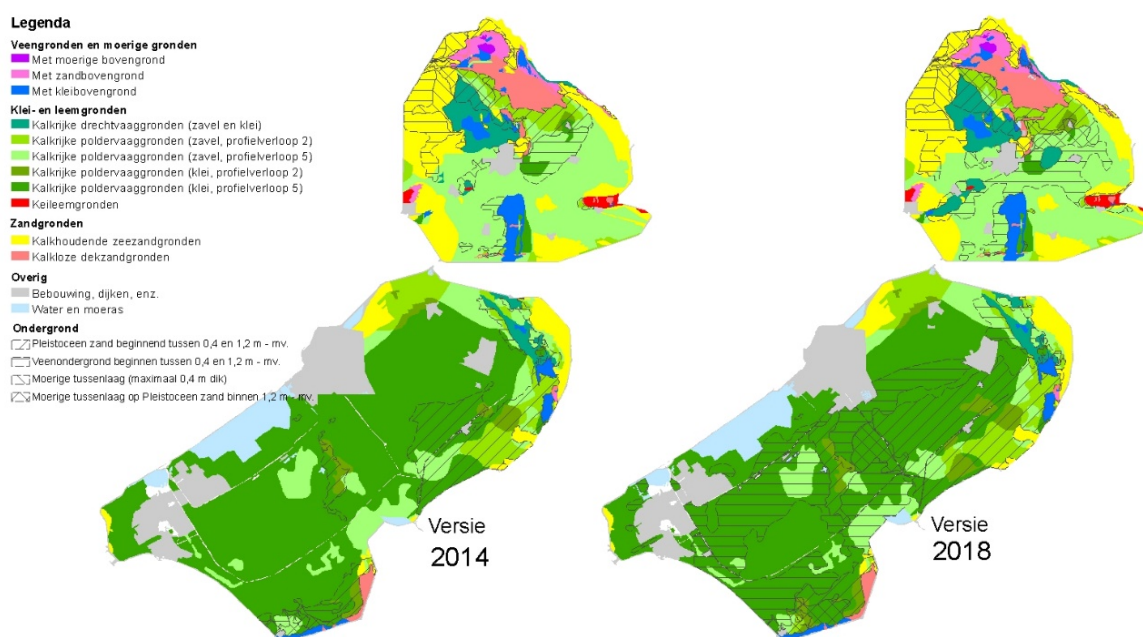
Het is noodzakelijk dat een aantal plantenwortels in **de ondergrond** doordringen om in droge perioden de grond te exploiteren voor water, om de uit de bovengrond uitgespoelde voedingsstoffen te onttrekken en om nieuwe macroporiën (kanalen) voor watertransport te vormen. De tweede belangrijke functie van de ondergrond is de uitwisseling van overtollig regenwater of de aanvoer van grondwater naar de wortelzone, de capillaire nalevering. Verdichting van de ondergrond heeft een negatief effect op zowel bewortelingsdiepte (direct) als infiltratiecapaciteit (indirect).

Het bovenste gedeelte van de ondergrond heeft vaak een hogere dichtheid dan de geploegde bovengrond; dit wordt aangeduid met de term ploegzool. **De ploegzool** wordt vaak veroorzaakt door tractorbanden die tijdens het ploegen over de ondergrond rijden en door hoge wiellasten, vooral als daarnaast ook de bandenspanningen hoog zijn en er onder te natte omstandigheden wordt gereden. Hierbij zal er naast verdichting door berijden van te natte grond sprake zijn van slip, wat een oppervlakkige verdichting van de bereden bodemlaag veroorzaakt. De ploegzool kan veel slechter doordringbaar zijn voor wortels, water en zuurstof dan de daaronder gelegen grond en beperkt daardoor het functioneren van de ondergrond. Anders dan de bovengrond wordt de ondergrond niet jaarlijks losgemaakt, omdat de kosten hoog zijn, goede (droge) omstandigheden voor losmaken van de ondergrond zeldzaam zijn en vaak negatieve effecten kunnen worden verwacht. Ondergrondverdichting is daarom een doorlopend cumulatief proces dat op de lange duur resulteert in een verdichte ondergrond. De weerstand van de ondergrond tegen verdichting is laag en verdichting van de ondergrond is ten minste deels blijvend. Een essentieel aspect van bodemverdichting is dat herstel van een verdichte bodem een langdurig proces is, waarbij de diepere ondergrond praktisch niet meer herstelt. Daarom is voorkomen van verdichting van de ondergrond een essentiële factor voor duurzame landbouw op de lange termijn (Van den Akker, 2020).

2 Trends in Bodemverdichting

2.1 Bodemverdichting Flevoland

Het risico op bodemverdichting wordt bepaald door de grondsoort (sterkte) en door de mechanisatie (belasting). Een indicatie van de grondsoort van de eerste 1,2 m wordt gevonden in de bodemkaart (Figuur 1). In zuidelijk en oostelijk Flevoland zijn voornamelijk kleigronden te vinden met in het midden de zwaarste gronden (25-45% lutum) en naar de rand toe steeds lichter wordend (< 25% lutum). De bodem van de Noordoostpolder is gevarieerder en er komen lichtere gronden voor (zavelgronden). Hier komen naast kleigronden, ook veengronden, (Pleistocene) zandgronden en keileemgronden voor.



Figuur 1 Bodemkaart Flevoland oude en nieuwe versie (Brouwer et al., 2018).

2.1.1 Risico bodemverdichting

Zandgronden hebben weinig extra belasting nodig om te dicht te worden: dichtheid > 1,6 g cm⁻³). Dit 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'. Verder bezitten zandgronden weinig cohesie. Hierdoor treedt er bij verdichting niet alleen compactie (in elkaar duwen) op, maar ook vervorming, waardoor de grote doorgaande bioporiën en oude wortelgangen verloren gaan. Het natuurlijk herstel door zwellen en krimpen is bij zandgronden zeer beperkt. Ook door kunstmatig losmaken (woelen) zijn zandondergronden zeer moeilijk te herstellen, omdat ze gemakkelijk herverdichten. Dit alles maakt de gevoeligheid en het risico op ondergrondverdichting zo groot. Wel draineren zandgronden over het algemeen goed, waardoor ze minder vochtig zijn en een grote bodemsterkte hebben (zie paragraaf 4.1.2).

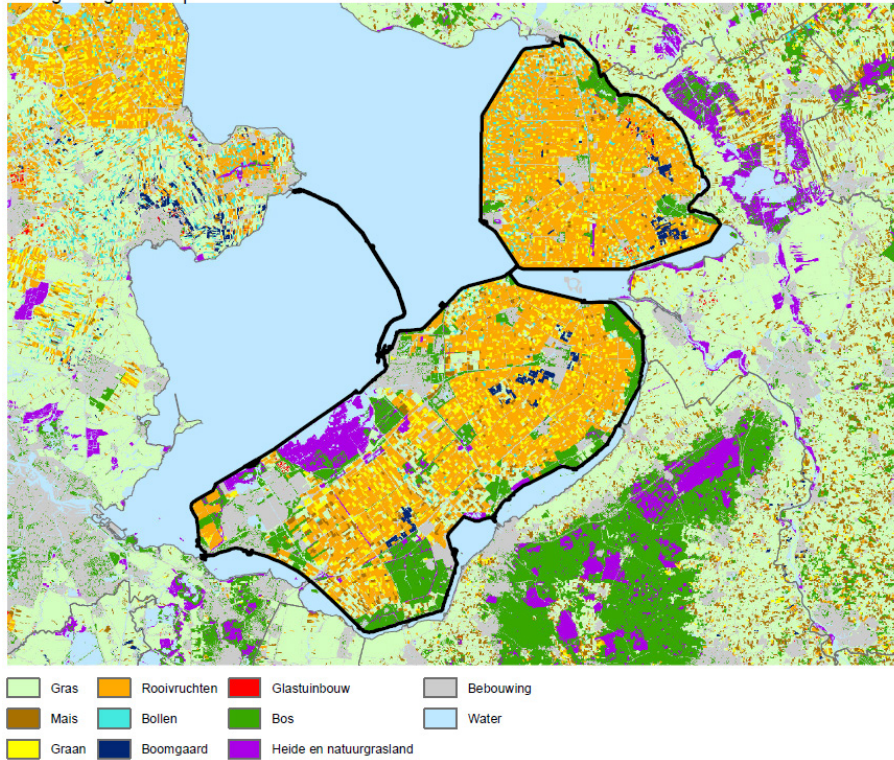
Klei heeft een sterke samenhang wanneer het uitdroogt, terwijl het onder natte condities meer plastisch is. Dit maakt een goed uitgedroogde kleigrond vele malen sterker dan een zandgrond. Bij de toename van het lutumgehalte neemt de sterkte toe. Het nadeel van kleihoudende gronden is dat ze

onder natte omstandigheden langer vochtig blijven waardoor de tijd waarin deze gronden kunnen worden bewerkt, zonder de ondergrond te verdichten, beperkt is. Het voordeel van kleigronden is dat ze de eigenschap hebben sterk te krimpen bij uitdroging en te zwellen bij bevochting. Hierdoor is het mogelijk dat een eventueel verdichte kleilaag zijn oorspronkelijk doorlatendheid weer gedeeltelijk terugkrijgt (zie paragraaf 4.2.1).

Veenondergronden zijn veerkrachtig en gaan eerder bezwijken en plastisch vervormen dan dat ze te veel worden verdicht. Door de vervorming verslechteren de bodemfysische eigenschappen wel, maar daar staat tegenover dat ze een groot herstelvermogen hebben. Veengronden zonder minerale afdeklaag worden daardoor als niet-verdichtingsgevoelig beschouwd. De ervaring leert echter dat graslanden op veengronden die onder natte omstandigheden worden gemaaid of beweid soms langdurig te kampen hebben met verdichting (Van den Akker et al., 2013a). 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.

Ten slotte wordt op een aantal plaatsen in de Noordoostpolder keileem aangetroffen. Deze gronden zijn van nature erg dicht en er wordt weinig biologische activiteit in aangetroffen.

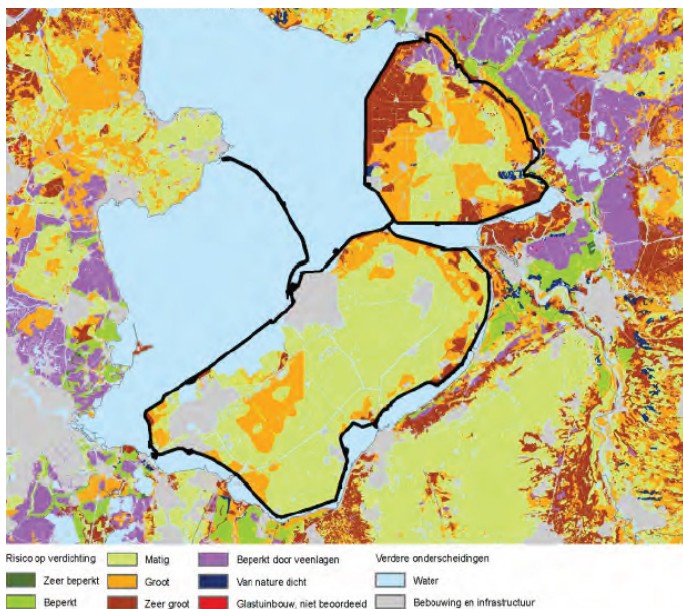
Flevoland kent een landgebruik dat voor het grootste gedeelte uit rooivruchten bestaat (Figuur 2). Dit landgebruik kent natte oogstmomenten en oogstmachines met hoge wiellasten (zie hoofdstuk 4). In 2013 is een risicobeoordeling op bodemverdichting uitgevoerd voor heel Nederland (Van den Akker et al., 2013b). De basis van de systematiek is dat er 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. De berekening van de grondspanningen en de vergelijking met de sterkte van de ondergrond werden gedaan met het bodemverdichtingsmodel SOCOMO (Van den Akker, 2004). In veel gevallen levert dit op dat de ondergrond te zwaar wordt belast en ondergrondverdichting zal optreden. Daarnaast werd ook gekeken naar het herstelvermogen van de ondergrond. Door het kleigehalte en de goede drainagetoestand is deze herstelcapaciteit in Flevoland in het algemeen redelijk tot goed. Voor het grootste gedeelte van Flevoland levert deze systematiek vanwege deze redelijke tot goede herstelcapaciteit een matig risico op bodemverdichting op. In gebieden met een slechte ontwateringssituatie en meer lichtere gronden neemt dit risico toe naar sterk. Het grootste risico op bodemverdichting wordt gevonden op de zandgronden in de Noordoostpolder (Figuur 3). Dit risico gaat echter met name uit van de grondsoort. Als ook gekeken wordt naar de vochtsituatie, komt er een genuanceerder beeld naar voren. Omdat zandgronden beter draineren, worden de oogstbewerkingen vaak onder drogere omstandigheden uitgevoerd waardoor het risico op bodemverdichting vermindert. Kleigronden worden vaak onder vochtiger omstandigheden bewerkt waardoor het risico juist toeneemt. Dit is waarneembaar in het veld, waarbij de meeste verdichting wordt gevonden bij kleigronden en komt ook overeen met de praktijk van agrariërs in Flevoland (Van Essen, 2021).



Figuur 2 Landgebruik in 2013 (Van den Akker et al., 2013).

Een specifieke bodemconditie in Flevoland zijn de gediepploegde percelen. Vanaf de jaren negentig van de vorige eeuw is in totaal circa 3.000-3.500 ha gediepploegd. Dit is 3-3,5% van de oppervlakte aan landbouwgrond in de provincie Flevoland (Staps et al., 2015). Bij het diepploegen zijn er twee verschillende manieren gebruikt om een beter bewerkbare grond te krijgen: door een laag naar boven te ploegen die een lager kleigehalte heeft of door een laag naar boven te ploegen die een hoger organischestofgehalte heeft. Afhankelijk van de ondergrond is in sommige gevallen puur humusarm zand naar boven geploegd en is op andere plaatsen klei met een hoger organischestofgehalte naar boven geploegd. In een enkel geval is zowel een lager kleigehalte alsook een hoger organischestofgehalte naar boven geploegd.

Door de meeste landbouwers wordt het diepploegen als positief beoordeeld, met name vanwege de verbeterde bewerkbaarheid en de mogelijkheid om meer teelten te verbouwen (Staps et al., 2015). Daarentegen wordt erop gewezen dat diepploegen op korte termijn voordelen oplevert, maar dat deze niet opwegen tegen de langetermijnnadelen (Visscher et al., 2008). Zo zullen de doorlatendheid en de infiltratiecapaciteit afnemen en zal een nieuwe drainage moeten worden aangebracht met drains op kortere afstanden dan eerst. De losgemaakte grond is erg verdichtingsgevoelig en eventuele rijpingsscheuren in kleiondergronden worden vernield en verdwijnen, wat ook leidt tot extra bodemdaling en een verlaging van het perceel. Of diepploegen daadwerkelijk tot meer ondergrondverdichting heeft geleid, is niet onderzocht.



Figuur 3 Risico op bodemverdichting bij huidige grondgebruik (Van den Akker et al., 2013).

2.1.2 Bodemverdichting gemeten

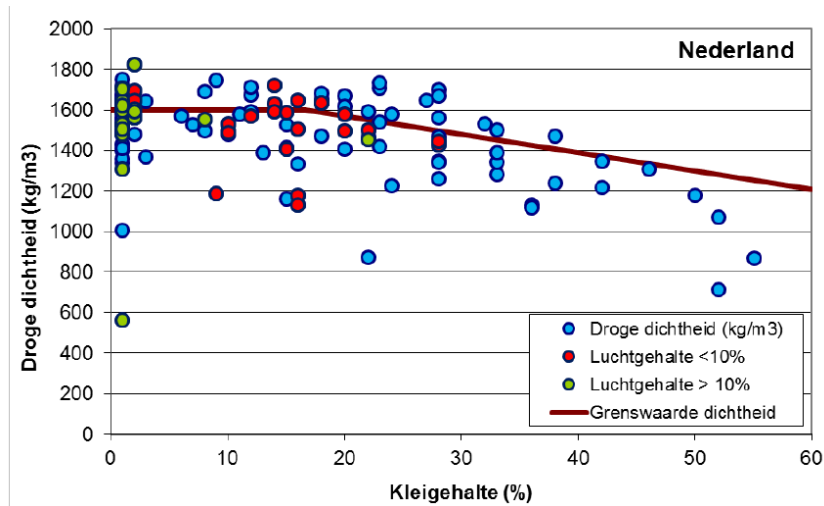
Een goed opgezette systematische inventarisatie van voldoende grootte van de verspreiding en de ernst van bodemverdichting heeft in Nederland nooit plaatsgevonden.

In het kader van het PRISMA-project 'Bodemverdichting kwetsbare gebieden' is een beperkte inventarisatie uitgevoerd om de ondergrondverdichting in het veld vast te stellen (Van den Akker et al. 2013b). Op 129 punten zijn op enkele centimeters onder de ploegdiepte grondmonsters genomen van de verdichte ondergrond waarvan de dichtheid is bepaald. Het zwaartepunt van de bemonstering lag daarbij op de provincies Noord-Brabant, Gelderland en Zeeland. Van alle monsters is de relatieve dichtheid bepaald door deze te toetsen aan drempelwaarden. De maximaal toelaatbare droge bulkdichtheid (drempelwaarde) is $1,6 \text{ g/cm}^3$ voor zand en lichte zavel met een laag organischestofgehalte (zoals in het algemeen het geval is bij deze ondergronden). Een lichte zavel is de overgang van zandgrond naar kleigrond en heeft maximaal een kleigehalte van 17,5%. Zwaardere gronden (met een kleigehalte $> 17,5\%$) met een hoge droge bulkdichtheid zijn aanzienlijk massiever en ondoordringbaarder voor wortels dan een zandgrond met dezelfde dichtheid. Daarom ligt de drempelwaarde voor verdichting lager voor kleihoudende gronden. Voor zwaardere gronden is de drempelwaarde: $1,75 - 0,009C$, waarin C het kleigehalte in procenten is. Dit is grafisch aangegeven in Figuur 4. Door de gevonden droge bulkdichtheid in een punt te delen door de drempelwaarde wordt de relatieve dichtheid berekend. Een relatieve dichtheid groter dan 1.0 betekent dat de grond verdicht is.

Het onderzoek geeft aan dat voor Flevoland tussen 45 en 60% van ondergrond verdicht is (Figuur 5). Hierbij moet wel worden bedacht dat het aantal locaties waarop in Flevoland is gemeten erg beperkt (< 10) is en er veelal gecorreleerd is aan vergelijkbare gronden in andere provincies; de betrouwbaarheid is dus vrij laag.

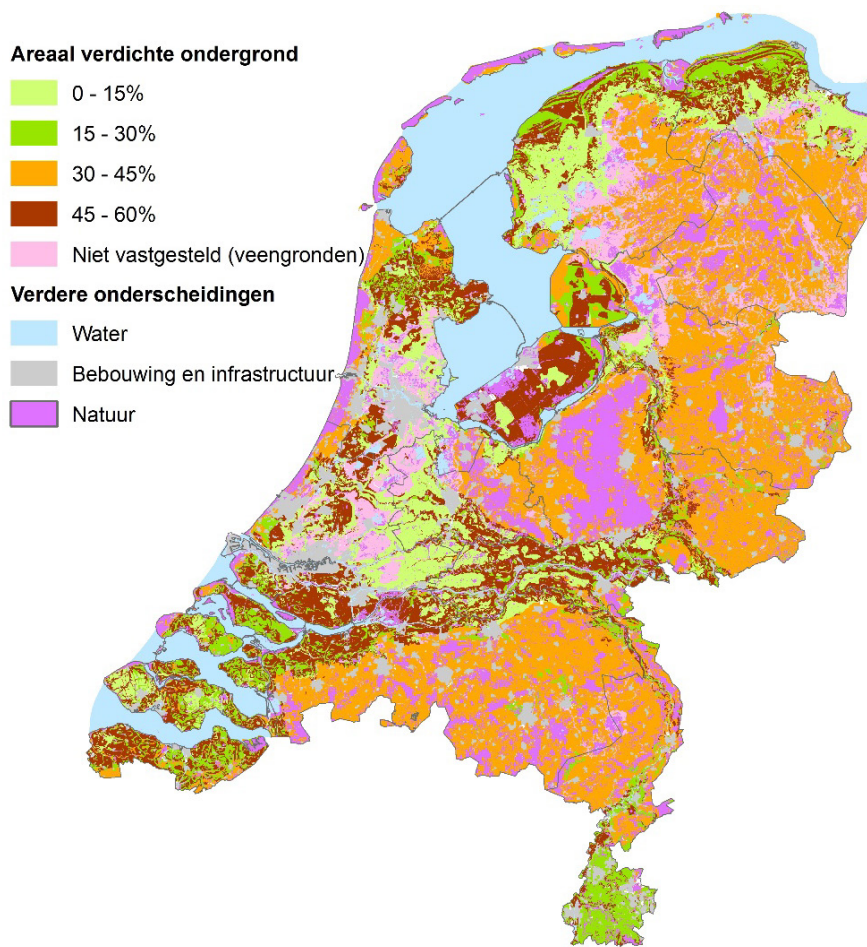
Lamberink (2013) deed onderzoek naar bodemverdichting op 16 bedrijven op klei- en zavelgronden in Oost-Flevoland. Het kleigehalte van die gronden ligt tussen de 20 en 35%. Op de percelen werden hoofdzakelijk suikerbieten, consumptieaardappelen, uien en wintertarwe geteeld. Op basis van gemeten droge bulkdichtheden en berekende pakkingsdichtheid ($PD = \text{droge bulkdichtheid} + 9C$) is een verdichte ploegzool (niet bewortelbaar) op 20% van de bedrijven aangetoond. Op de kopackers is zelfs sprake dat 40% van de ploegzolen is verdicht en zelfs de ondergrond is in 20% van de gevallen dusdanig verdicht dat beworteling niet goed mogelijk is. Een duidelijke relatie tussen het kleigehalte en de mate van verdichting is niet aangetoond, hetgeen in tegenspraak is met de studie van Van den Akker (2013b). Wel is gebleken dat hoe intensiever (teelten met groot risico op bodemverdichting) de gronden zijn gebruikt de afgelopen vijf jaar, hoe hoger de mate van verdichting.

Op basis van het onderzoek wordt verondersteld dat 25% van de klei- en zavelgronden in Oost-Flevoland te veel is verdicht.



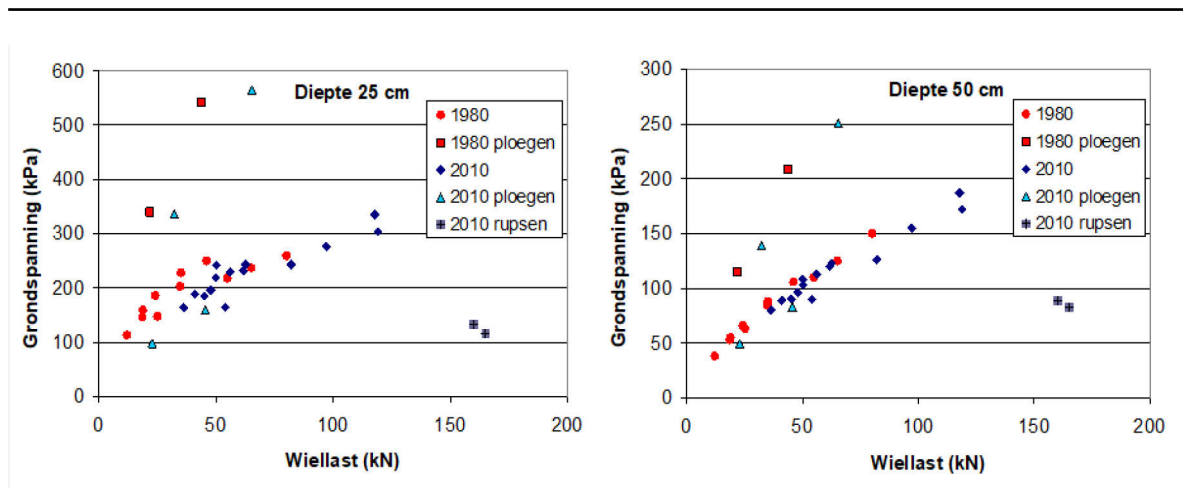
Figuur 4 Droge bulkdichtheid uitgezet tegen het kleigehalte. Onder de rode lijn is de dichtheid nog onder de grenswaarde en niet verdicht. Bij de rode en de groene punten zijn de dichtheid en het luchtgehalte bij relatief natte grond gemeten. Bij de rode punten is het luchtgehalte te laag (< 10%) en bestaat gevaar voor zuurstofproblemen (Van den Akker et al., 2013b).

2.2 Mechanisatie



Figuur 5 Areaal verdichte ondergrond (Van den Akker et al. 2014) Gebaseerd op 128 veldmetingen met de nadruk op Gelderland, Noord-Brabant en Zeeland. Het aantal punten waarop de kaart is gebaseerd is beperkt en de percentages zijn indicatief.

De belangrijkste oorzaak van de toename van bodemverdichting is de verdergaande mechanisatie en intensivering van de landbouw. De mechanisatie heeft geresulteerd in een toename van de wiellasten. Daar wordt tegenovergesteld dat tegenwoordig grote en brede lagedrukbanden en soms rupsen worden gebruikt. Door Vermeulen et al. (2013) is een vergelijking gemaakt van de bodembelasting bij agrarisch veldwerk in 1980 en 2010. Voor het meest voorkomende landgebruik zijn de in 1980 en 2010 veelgebruikte zware landbouwmachines met elkaar vergeleken wat betreft wiellasten en gebruikte banduitrusting met de daaruit volgende minimaal noodzakelijke bandspanning. Vervolgens is met het bodemverdichtingsmodel SOCOMO (Van den Akker, 2004) berekend wat de maximale grondspanningen zijn op 25 en 50 cm diepte. Dit is dus op ploegzoldiepte en de diepte net onder de ploegzool (Figuur 6).



Figuur 6 Toename van de verticale grondspanningen berekend met SOCOMO als functie van de wiellasten voor situaties in 1980 en 2010 op een diepte van 25 cm en 50 cm. NB De verticale assen met grondspanningen verschillen (uit Vermeulen et al., 2013). Let op de sterk verhoogde grondspanningen bij het ploegen in de open voor.

Afgezien van de duidelijke afwijkende grondspanning bij het ploegen en bij de toepassing van rupsen op oogstmachines is de algemene trend dat in de periode 1980-2010 de wiellasten en grondspanningen flink zijn toegenomen. Wel zijn meer en meer bredere banden met lagere drukken toegepast, maar die banden maakten het mogelijk om de machines groter te maken, wat echter tot gevolg had dat ook de bandspanningen moesten verhoogd om die grotere wiellast te dragen. Hoewel in het algemeen de bandspanningen in 2010 wel iets lager zijn dan in 1980, blijken uiteindelijk de grootste grondspanningen op een diepte van 25 en 50 cm in 2010 duidelijk hoger te zijn dan in 1980. Uit Figuur 6 blijkt ook dat in de open voor rijden tijdens het ploegen tot zeer hoge grondspanningen leidt op 25 en 50 cm diepte. Toepassing van rupsbanden kan resulteren in lagere grondspanningen. Wel is het zo dat de grondspanning onder een rups met de diepte minder snel afneemt dan onder een band. De hogere grondspanningen in 2010 leidden onvermijdelijk tot meer ondergrondverdichting. Dit is in overeenstemming met de gevonden trend van toenemende bodemdichtheid die werd gevonden in de analyse van de dichtheidsgegevens uit het Bodemkundig Informatie Systeem (BIS) (Van den Akker en Hoogland, 2011).

2.3 Intensivering

Naast de sterke mechanisering van de landbouw is er ook een druk om meer opbrengst (en dus geld) van een hectare land te krijgen, al was het maar om de mechanisering en schaalvergroting te betalen, terwijl er anderzijds een voortdurende druk bestaat op productprijzen. Daarnaast wordt de druk van de afnemers van de producten steeds groter, waarbij tijd-is-geld en niet te vroeg en niet te laat leveren een hoofdrol speelt. Levertijden worden steeds krappere en anderzijds moeten veelal loonwerkers worden ingeschakeld om het product op dat specifieke moment van het land te krijgen. De afstemming van landbouwer, afnemer en loonwerker moet nauw op elkaar aansluiten, waarbij voorbij wordt gegaan aan het feit of de grond wel belast kan worden. Het wordt daardoor steeds onvermijdelijker dat ook onder minder gunstige (nattere) en soms zelfs slechte omstandigheden wordt geogst met diepe verdichting en structuurbederf tot gevolg (Van den Akker, 2020) (zie paragraaf 4.6). Daarnaast veroorzaakt schaalvergroting ook dat steeds grotere machines worden ingezet om met minder arbeid de grotere arealen te bewerken.

2.4 Toekomstige ontwikkeling bodemverdichting

Mogelijkerwijs stopt de trend van steeds verdergaande ondergrondverdichting, want in de landbouw wordt men zich steeds meer bewust van de nadelen van ondergrondverdichting (Van den Akker, 2020). Er is ook veel aandacht voor bodembeheer in de agrarische sector de laatste jaren.

De beperktere bewortelingsdiepte en infiltratiecapaciteit leiden bij extremere klimaatomstandigheden tot meer en grotere droogte- en natschade (zie hoofdstuk 3). Oplossingen in de vorm van meer beregening, meer nutriënten (stikstof), meer drainage en diepere slootpeilen en snellere afvoer van water, stuiten steeds meer op bezwaren en beperkingen. Er worden ook steeds meer eisen gesteld aan de kwaliteit van het product en een betere bodemkwaliteit levert in het algemeen meer en kwalitatief betere producten. Een circulaire landbouw vergt steeds meer een efficiënt gebruik en beperking van verliezen van water en nutriënten. Daarnaast zijn er nieuwe ontwikkelingen op het gebied van preventie van bodemverdichting, zoals ultraflexibele lagedrukbanden, rupsbanden, centrale luchtdruksystemen om snel de bandspanning aan te passen, rijbanenteelt, niet-kerende-grondbewerking (NKG), bovenover ploegen (niet meer in de open voor rijden, maar dus boven over ploegen), lichtere machines en robotisering (zie hoofdstuk 4). Ook buiten de landbouw wordt men steeds meer bewust dat een achteruitgang van de bodemkwaliteit grote effecten heeft op het waterbeheer, zowel wat betreft waterkwantiteit (aan- en afvoercapaciteit) als waterkwaliteit: bij hevige neerslag leidt een slechte waterinfiltratiecapaciteit niet alleen tot een snelle afvoer van veel water, maar ook van nutriënten, agrochemicaliën en grond.

Bij het ombuigen van de trend van voortdurend toenemende verdichting van de ondergrond naar een trend met meer herstel en wellicht zelfs lagere dichtheden, moet men zich ervan bewust zijn dat sommige grondsoorten, zoals zand en lichte zavel, zich niet of erg moeizaam herstellen. Indien deze ondergronden zo dicht zijn dat beworteling nagenoeg onmogelijk is voor de meeste cultuurgewassen, dan is een aanpak met agressief diepwortelende gewassen, wellicht losmaken en in ieder geval preventie van herverdichting noodzakelijk. Zwaardere ondergronden herstellen beter, vooral omdat deze bij uitdrogen kunnen krimpen, maar een volledig herstel kennen ook deze gronden niet.

3 Effecten van bodemverdichting

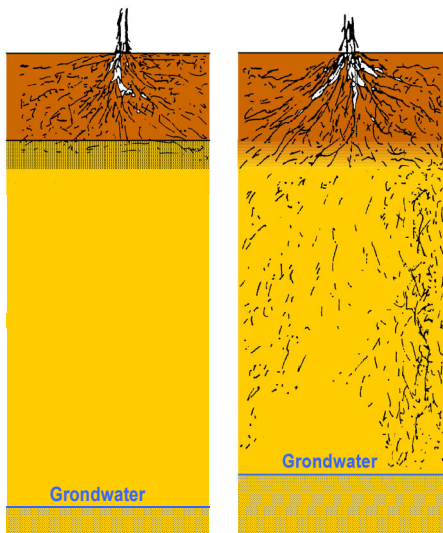
3.1 Beperking bewortelingsdiepte

Het beperken van de bewortelingsdiepte is een belangrijk effect van ondergrondverdichting. De beperking van de bewortelingsdiepte wordt in drogere perioden veroorzaakt door een te hoge indringingsweerstand en in natte perioden door zuurstofgebrek in de dichte en slecht gestructureerde ploegzool of zelfs al in de bovengrond als water op de ploegzool stagneert. De beperkte bewortelingsdiepte kan zelfs al bij matige droogte tot een lagere opbrengst leiden en bij hevige droogte tot grote verliezen. Een voorbeeld hiervan wordt door Alblas et al. (1994) gegeven, waar snijmaïsoogstverliezen tot 38% werden geconstateerd in de situatie links in Figuur 7 ten opzichte van de referentiesituatie rechts, waar de snijmaïsoopbrengst uitstekend was. Door te beregenen, kan veel droogteschade worden voorkomen (Groenendijk et al., 2017). De beperkte bewortelingsdiepte en de lagere snijmaïsoopbrengst hebben ook tot gevolg dat minder nutriënten worden opgenomen en deels uitspoelen.

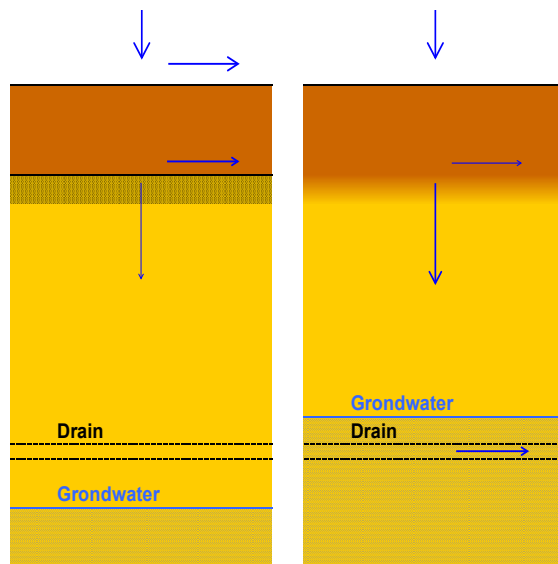
3.2 Vermindering waterdoorlatendheid

De waterdoorlatendheid van een verdichte ondergrond kan zo laag zijn dat bij hevige en veel regenval het water op deze laag stagneert en de bovengrond volledig verzadigd wordt. Dit treedt ook bij anders goed tot redelijk doorlatende zandgronden op. Door de bovengrond, maar vooral over een verzadigde ondergrond kan veel neerslag horizontaal afstromen naar sloten, greppels of laagliggende delen van het perceel. Uit modelberekeningen blijkt dat de 4-uurs afvoerpiek door een hevige regenbui naar het oppervlaktewater door ondergrondverdichting ongeveer verdubbelt (Groenendijk et al., 2017). Naast water spoelen nutriënten, agrochemicaliën en grond af naar sloten en open water. De verzadigde grond leidt gemakkelijk tot structuurverlies en verslemping, waardoor de bodemeigenschappen van de bovengrond sterk verslechteren. De natschade die optreedt, kan zeer groot zijn en zelfs leiden tot oogstverlies. Deze natschade wordt door een aantal problemen veroorzaakt:

1. De bovengrond blijft langer te nat voor bewerking en berijding, zodat het aantal werkbare dagen afneemt en de groeiperiode wordt bekort.
2. Zware regenval in het groeiseizoen kan resulteren in anaerobe situaties in de bodem en verstikking van de plantenwortels, met als ultieme consequentie het verlies van de oogst.
3. Een te natte bovengrond maakt oogsten bijna onmogelijk. Oogsten op natte gronden is desastreuus voor de structuur van de bodem.



Figuur 7 Gemeten wortelprofiel van maïs proefveld Westerhoven (Alblas et al., 1994) bij een sterk verdichte ondergrond (links, bewortelingsdiepte ca. 35-40 cm) en een niet-verdichte ondergrond (rechts, bewortelingsdiepte ca. 130 cm) (Bron: Van den Akker en Hendriks, 2015).



Figuur 8 Schematische voorstelling van het effect van een sterk verdichte ondergrond (links) op infiltratieproblemen en afstroming. Zonder dichte ploegzool kan een groot deel van de regen infiltreren (rechts), terwijl boven een verdichte ploegzool de bouwvoor verzadigd raakt, waarna veel water hierover afstroomt. (Bron: Van den Akker en Hendriks, 2015).

3.3 Verminderde opbrengst

Praktijkonderzoek naar het effect van ondergrondverdichting op opbrengsten is vrij beperkt en in Nederland vaak van wat oudere datum (Van den Akker, 2020). Een belangrijk probleem is daarbij dat niet altijd duidelijk is welk deel van de opbrengstderving toegeschreven kan worden aan bovengrondverdichting en welk deel aan ondergrondverdichting. Een ander probleem is dat de ondergrond al verdicht is ten gevolge van eerdere belasting.

Lamers et al. (1986) vonden dat op conventioneel bereiden grond de gewasopbrengst tot 10% lager was dan op onbereiden grond. Toepassing van een lagedrukberijdingssysteem met maximaal 40 kPa bandenspanning in het voorjaar en maximaal 80 kPa in de rest van het jaar, leverde tot 6% opbrengstverhoging op (Vermeulen et al., 1988; Vermeulen et al., 1993). Alblas et al. (1994) concludeerden dat wiellasten van 50 kN de opbrengst van snijmaïs in Nederland met gemiddeld 15% verminderden, met een maximale opbrengstvermindering van 38% in een droog jaar op de grond met een diepe grondwaterspiegel en ernstig verdichte ondergrond. In een uitgebreide studie in België is men uiteindelijk tot de conclusie gekomen dat de opbrengstderving bij ondergrondverdichting, afhankelijk van de weersomstandigheden, 10-35% bedraagt, waarbij dit in enkele extreme gevallen van droogte- en natschade en onmogelijke oogstomstandigheden kan oplopen tot 50-100% (Van den Akker, 2021). Een vergelijking tussen 'toptelers' met 20% meer suikerbietenopbrengst en de 'gemiddelde telers' laat zien dat toptelers significant betere doorlatendheid van de ondergrond hebben en grotere worteldieptes (Hanse et al., 2011).

Håkansson en Reeder (1994) voerden een uitgebreide reeks van veldproeven uit waarbij eenmalig een perceel wiel-aan-wiel viermaal is bereiden met wiellasten van 50 kN en een bandenspanning van 300 kPa. In de daaropvolgende jaren is met wiellasten van 25 kN gereden om het herstel van de bodem te kunnen bestuderen. Herstel van de ploegzool is zeer beperkt; de gewasopbrengstreductie bedroeg 5%. Na 15 jaar was er nog steeds een opbrengstreductie waarneembaar.

Inmiddels zijn de wiellasten van tegenwoordig nog hoger en kunnen meer dan 130 kN zijn. De schade aan de bodem zal dan ook groter zijn dan Håkansson en Reeder (1994) aangeven. Voorhees (2000) voerde in Minnesota (USA) dezelfde veldproeven uit, maar dan met wiellasten van 90 kN in plaats van 50 kN. Dit resulteerde in een permanente langetermijnafname van de maïsopbrengst van 6%. Ook hier zal de ploegzool nauwelijks herstellen, zodat geschat wordt dat de min of permanente ondergrondverdichting leidt tot een opbrengstderiving van circa 10%.

Ruwweg kan worden geconcludeerd dat ondergrondverdichting minstens 10% opbrengst kost en dat dit in droge of natte jaren sterk kan oplopen tot 40% (Tabel 1).

Tabel 1 Voorbeelden van experimenten met de oogstreductie door bodemverdichting bij diverse teelten.

Onderzoek	Gewas	Land	Bewerking	Opbrengst
Vermeulen et al. (1988)		Nederland	Max wiellast 40 kN voorjaar, max 80 kN rest van het jaar	+ 6%
Håkansson & Reeder (1994)		Meerdere internationale locaties	Eenmalige berijding 50 kN, aanvullende jaren 25 kN wiellast	-5%
Niet gepubliceerd		België		-10-35%
Alblas et al. (1994)	mais	Nederland	25 kN wiellast	- 4%
			50 kN wiellast	-15%
			50 kN wiellast en lage waterstand	-13 – 38%
			50 kN en hoog organischestofgehalte	- 6%
Voorhees (2000)	mais	USA	90 kN	-6%
Radford et al. (2001)	graan, sorghum, mais	Australië	60 kN natte grond	-13%
			100 kN natte grond	-23%
			60 kN droge grond	- 1%
Hanse et al. (2011)	suikerbieten	Nederland	Vergelijking telers	- 4-6%

4 Voorkomen en opheffen

4.1 Optimaliseren waterhuishouding

Het voorkómen van ondergrondverdichting – naast eventueel natuurlijk herstel – zal bijdragen aan een goede ontwatering (drainage) van het perceel. De mechanische sterkte van natte of vochtige grond is laag en is daardoor veel verdichtingsgevoeliger dan een drogere grond. Een natte grond zal ook eerder en meer versmeren bij plastische vervorming en daarbij zijn structuur totaal verliezen. Een natte, dichte en slecht gestructureerde grond kan maar moeizaam natuurlijk herstellen, vooral op wat grotere diepte. Een groot deel van de beworteling en het bodemleven overleeft een langere periode van verzadigde grond niet. In natte perioden kan de beworteling door zuurstofgebrek niet functioneren en in de natte ondergrond dringen, terwijl bij enige uitdroging de dichte grond al snel te hard wordt en de indringweerstand voor de wortels te hoog wordt. Dit beperkt de bewortelingsdiepte en de mogelijkheid van goed uitdrogen door vochtonttrekking door planten van de ondergrond, waardoor de natuurlijke herstelmogelijkheden beperkt blijven.

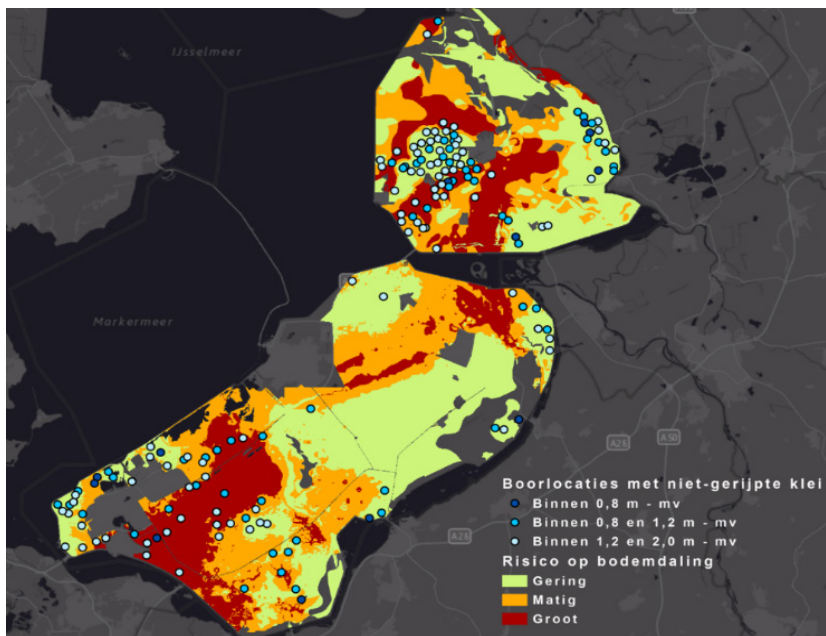
Optimaliseren van waterbeheer op boerderijniveau is niet altijd mogelijk, aangezien boeren zeer afhankelijk zijn van de waterschappen. De precieze manier waarop waterbeheer kan worden geoptimaliseerd, verschilt per locatie en wat 'optimaal waterbeheer' is, hangt af van het perspectief van de verschillende belanghebbenden.

De meeste gronden in Flevoland zijn goed gedraineerd om verzadiging van de grond en plasvorming te voorkomen. Dit is niet alleen belangrijk voor een gezonde gewasgroei, maar zorgt er ook voor dat er voldoende werkbare dagen zijn om de noodzakelijke gemechaniseerde veldbewerkingen uit te voeren. Bij de inpoldering van Flevoland is uitgebreid rekening gehouden met de landbouwkundige ontwatering en afwatering. De inrichting in de landbouwgebieden is hier helemaal op gericht. Dit vertaalt zich in droogleggingsnormen die optimaal zijn voor de voorkomende gronden. Er is bij het ontwerp zelfs rekening gehouden met de mate van (toekomstige) klink van kleigronden. Echter door verdergaande maaiveldaling zijn er wel (of komen er wel) gebieden bij die een minder optimale droogtelegging hebben (zie Figuur 9).

In Flevoland gaat de bodem door veenoxidatie en het rijpen, krimpen en klinken van klei- en veenlagen verder dalen. De kans daarop is het grootst in gebieden waar ondiep veen wordt aangetroffen en waar de veenlaag dik is (Figuur 9). Om het proces van veenoxidatie en het rijpen en inklinken van klei te voorkomen, is het belangrijk de grondwaterstanden zo hoog mogelijk te houden. Daarnaast kunnen er nieuwe vormen van waterbeheer komen, waarbij landbouwpercelen worden gebruikt als waterbuffer tijdens extreme weersomstandigheden of natuurgebieden worden beschermd tegen droogte. Dit heeft stijgende grondwaterniveaus tot gevolg.

Het tegengaan van bodemdaling en het creëren van meer buffercapaciteit zorgt voor nattere omstandigheden in het veld. Hierdoor gaan de bewerkingsmogelijkheden achteruit en neemt de kans op bodemverdichting toe. Ook de mogelijkheid tot herstel van de bodemstructuur neemt af.

Bodemdaling en bodemverdichting vergroten voor Flevoland de urgentie om te zoeken naar oplossingen voor rendabel en duurzaam watergebruik voor de agrarische sector. Een deel van de oplossing om bodemdaling tegen te gaan, kan gevonden worden in oplossingen op perceelniveau, zoals onderwaterdrainage. Het is belangrijk dat bij het zoeken naar oplossingen ook het voorkomen van bodemverdichting wordt meegenomen.



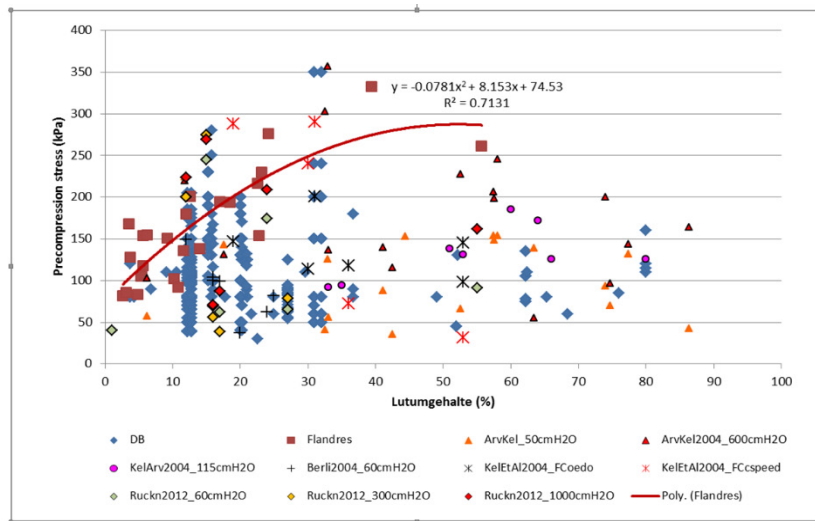
Figuur 9 Kans op bodemdaling (Brouwer et al., 2018).

Om het risico op bodemverdichting te bepalen, wordt gekeken in hoeverre de belasting op de ondergrond (grondspanning of effectieve spanning) de sterkte (belastbaarheid van de ondergrond) overschrijdt. De belastbaarheid van de ondergrond wordt veelal gedefinieerd als het punt waarop de bodemvervorming overgaat van elastisch (tijdelijk) naar plastisch (permanent) (Schjønning et al., 2015). Deze zogenaamde precompressiesterkte (kPa) zou bij grondbewerking of berijding niet mogen worden overschreden (Bakema en Van den Akker, 2021). Precompressiesterkte wordt bepaald door middel van uni-axiaal proeven in het laboratorium aan in het veld gestoken (ongestoorde?) grondmonsters. Omdat het niet mogelijk is om de pre-compressiesterkte van elke bodem onder elk vochtgehalte te bepalen, wordt gebruikgemaakt van pedotransferfuncties. Met deze functies wordt een relatie gelegd tussen de karakteristieken van de bodem (bijvoorbeeld droge bulkdichtheid, vochtgehalte etc.) en de precompressiesterkte van de bodem. Voor de Nederlandse ondergrond zijn geen pedotransferfuncties beschikbaar en wordt vooralsnog gebruikgemaakt van gegevens van Vlaamse bodems (Van de Vreken et al., 2009). Hierbij blijkt een sterke relatie te zijn tussen het kleigehalte en de bodemsterkte (Figuur 10). Dit sluit aan bij internationale studies (Schjønning & Lamandé, 2018), waaruit blijkt dat de belangrijkste parameters die de bodemsterkte bepalen de droge dichtheid, het kleigehalte en de vochtspanning zijn.

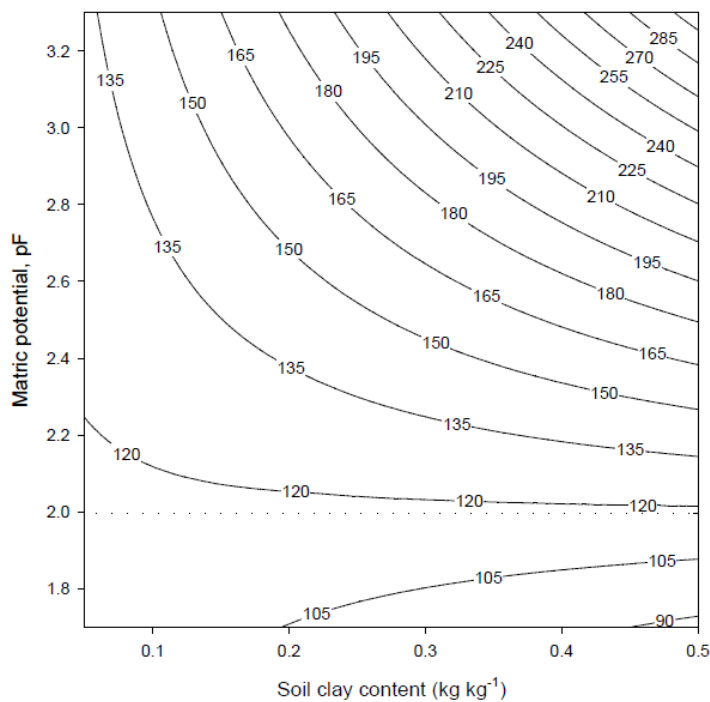
Een toename van de droge bulkdichtheid levert een verhoging van de bodemsterkte. In zijn algemeenheid hebben zandgronden de hoogste dichtheid en neemt de dichtheid met de toename van het kleigehalte af. In Nederland liggen de waarden voor onverdichte zandgronden en zavelen tussen de 1,5 en 1,6 kg/m³ en voor zware kleigronden tussen 1,2 en 1,3 kg/m³ (Brus & Van den Akker, 2018). Wel wordt uit metingen van verdichting in het veld duidelijk dat er, door de toename van de mechanisatie, de dichtheid van de ondergrond geleidelijk is toegenomen (Van den Akker en Hoogland, 2011). Vanuit een bodemsterkte oogpunt is een meer verdichte bodem gunstig, maar vanuit worteling en infiltratie juist nadelig.

De bodemsterkte neemt sterk toe bij een afname van de drukhoogte. De relatie tussen het vochtgehalte en de drukhoogte wordt vastgelegd in waterretentiecurves en verschilt per grondsoort. Vanwege de sterke verschillen in waterretentie geeft drukhoogte een veel betere correlatie met de bodemsterkte dan het vochtgehalte (Schjønning & Lamandé, 2018). Dit betekent dat het bepalen van de sterkte van de bodem op basis van alleen het vochtgehalte geen betrouwbare indicatie is. In zijn algemeenheid zijn drogere gronden sterker dan natte gronden. Zandige gronden zijn echter ook bij droge condities veel minder sterk dan kleigronden (Schjønning & Lamandé, 2018) (zie Figuur 11). De toename van de sterkte van de bodem bij drogere condities is bij zware klei veel groter dan bij lichtere

kleien en zand. Klei heeft een sterke structuur wanneer het uitdroogt, terwijl het onder natte condities meer plastisch is.



Figuur 10 Precompressie-sterkten van ondergronden uit de literatuur en uit een database samengesteld in het kader van een Europese Concerted Action on Subsoil Compaction (Trautner et al., 2003). Voor Nederlandse bodems worden veelal Vlaamse data als uitgangspunt gekozen.



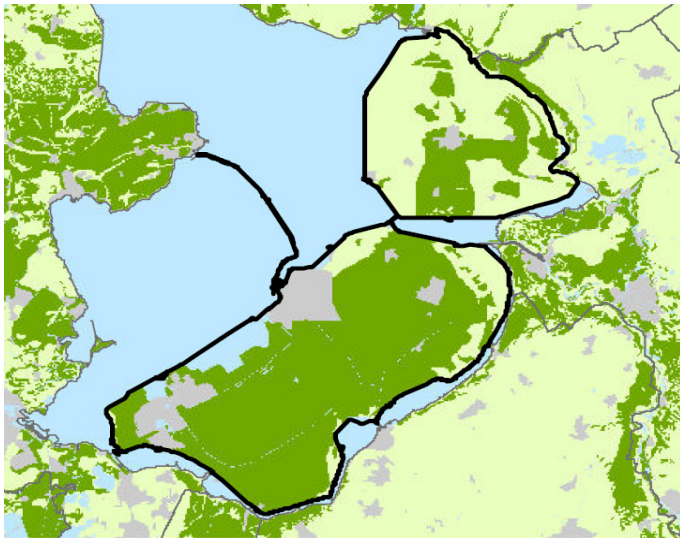
Figuur 11 Contourplot van de voorspelling van de precompressiesterkte als functie van kleigehalte (x-as) en de logaritme van de absolute drukhoogte (y-as) bij een droge bulkdichtheid van $1,46 \text{ kgm}^{-3}$ voor een bovengrond (Schjønning et al., 2018).

4.2 Verbeteren en in stand houden van bodemstructuur

4.2.1 Zwellen en krimpen van kleigronden

Het bijzondere aan kleigronden is dat als ze uitdrogen, het volume afneemt. Dit resulteert in krimpscheuren en maaiveldvaling. Bij bevochtiging van een uitgedroogde kleigrond zwellen de scheuren weer gedeeltelijk of geheel dicht en komt het maaiveld omhoog. Het zwellen en krimpen kan leiden tot sneller transport van water en opgeloste stoffen en een toename van het waterbergend vermogen van de bodem. Ook zou het zwel- en krimpproces in staat moeten zijn om de structuur van verdichte lagen weer te verbeteren. Hoewel er in Nederland weinig onderzoek is gedaan naar het natuurlijk herstelvermogen is de verwachting dat dit effect met name zal optreden bij gronden met een lutumgehalte boven de 17% (Van den Akker, 2020). Het volledig herstel van de oorspronkelijke situatie wordt echter niet verwacht. Dit is in overeenstemming met internationale projecten waarin het effect van ondergrondverdichting op onder andere kleigronden laat zien dat het zelfherstellend vermogen niet altijd effectief en efficiënt is en dat een deel van de verdichting zeer hardnekkig is (Allakukku, 2000; Håkansson, 1994; Håkansson et al., 1987; Voorhees, 2000). Ook een langjarig experiment bij zware kleigronden in Finland laat zien dat na een belasting van 29 jaar geleden er nog steeds veel minder doorgaande macroporiën in de ondergrond worden gevonden dan bij de gronden die niet zijn belast (Schjønning & Lamandé, 2018).

In hoeverre het beperkte herstelvermogen gemeten in internationale projecten ook geldt voor verdichte Nederlandse kleigronden, is beperkt onderzocht. De Nederlandse kleigronden hebben in vergelijking met buitenlandse kleigronden een sterk zwel- en krimpvermogen (Bronswijk, 1991). Verder toont het onderzoek van Bronswijk (1991) ook het belang van een goede ontwatering aan. Bij het verbeteren van de drainage worden er tot op grotere diepte (30-70 cm -mv) en meer (tot 50% toename) krimpscheuren aangetroffen (Bronswijk, 1991).



Figuur 12 Ondergrond (30 cm -mv) met een lutumgehalte boven de 17,5% (Van den Akker et al., 2013).

In 2009 is een aantal experimenten uitgevoerd op verdichte kleigronden in Anna Paulowna en zavelgronden in Lelystad (De Leeuw, 2009). Door een vergelijking te maken tussen de verzadigde doorlatendheid voor en na het krimpen en zwellen, is een beeld ontstaan of en in welke mate verdichting kan worden opgeheven. Voor de kleigronden in Anna Paulowna werd, hoewel niet geheel eenduidig, een verbetering van verzadigde doorlatendheid gevonden; voor de zavels in Lelystad is het effect niet aangetoond.

Voor Flevoland zijn de condities voor het natuurlijk herstel van verdichte kleigronden gunstig. Met uitzondering van de Noordoostpolder bestaat de ondergrond (30-50 cm) voor het grootste gedeelte uit

sterk kleihoudende gronden (lutum > 17,5%) (Figuur 12). Daarnaast is er een goede ontwatering, waardoor de kleigronden voldoende kunnen uitdrogen. Door de vergaande bodemdaling staat een goede ontwatering wel onder druk.

4.2.2 Op peil houden of verhogen organische stof

In tegenstelling tot kleigronden krimpen zandgronden en lichte zaveln niet of zeer beperkt. Hierdoor is het herstelvermogen van deze lichte gronden sterk beperkt. Organische stof kan deze lichte gronden krimp- en zwelvermogen geven en dat geeft deze gronden letterlijk veerkracht bij belasting. Organische stof bevordert bovendien het bodemleven en maakt beworteling eerder mogelijk. Het organischestofgehalte in de ondergrond in Flevoland is echter in de meeste gevallen te laag om effectief te zijn; met uitzondering van het noordelijke gedeelte van de Noordoostpolder, is het organischestofgehalte overal lager dan 2,5%. Mogelijk kan het organischestofgehalte in de ondergrond worden verhoogd door diep wortelende gewassen, maar dat zal vele jaren duren. Daarnaast worden – lokaal – veenhoudende lagen omhoog gewerkt door diepploegen.

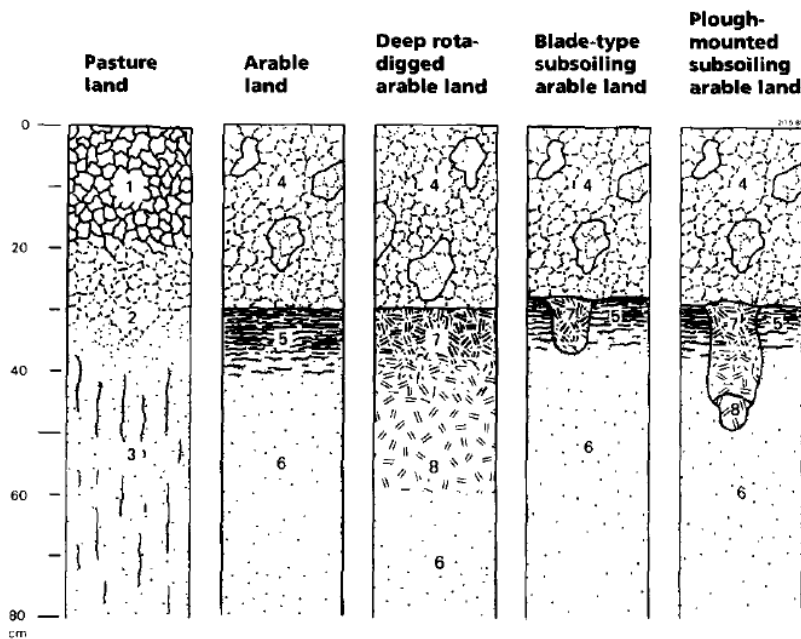
4.2.3 Diep wortelende gewassen.

Diep wortelende gewassen kunnen een verdichte ondergrond doorbreken en hebben als extra voordeel dat ze minder verdrogingsgevoelig zijn. Er zijn in het verleden diverse gewassen getest zoals groenbemesters met diepe penwortels (radijs en luzerne), koolzaad, vezelhennep en rogge (CLM, 2016). Daarnaast is onderzoek gedaan naar sorghum, dat gebruikt kan worden als aanvulling of wisselgewas van mais. Duits onderzoek waarbij op een sterk verdichte zandige leem mais wordt vergeleken met diverse soorten sorghum laten positieve resultaten zien. Naast een veel diepere beworteling dan mais, laat sorghum veel meer wortelresten (50-80% op een diepte tussen de 20 en 100 cm -mv) achter in de bodem (Schittenheim en Schroetter, 2014). In Nederland is op proefvelden in Lielde (lemig fijn zand) een vergelijking gemaakt tussen mais en diverse soorten sorghum, waarbij naast opbrengst ook is gekeken naar de beworteling. In vergelijking met mais waren op een diepte tussen de 25-40 cm -mv 40% meer wortels aanwezig. Verder werd er op grotere diepte beworteling aangetroffen (Deru et al., 2018). In het algemeen is het onderzoek van sorghum met name gericht op het selecteren op opbrengst en droogteresistentie; specifieke selectie op het doorbreken van verdichte lagen is beperkt uitgevoerd. Een veldproef binnen het project Lumbricus laat zien dat sorghum weliswaar een fijner en intensiever wortelstelsel heeft dan mais en ook een hogere wortelmasse kan hebben in diepere lagen (tot 50 cm gemeten), maar dat dit zich niet vertaalt in vermindering van ondergrondverdichting. De variatie in beworteling was bij sorghum ras-afhankelijk (met name biomassa-typen met geringe voederwaarde hebben een diepere beworteling). Daarnaast lijkt de sorghum gevoelig voor lage bodemtemperatuur of te droge bovengrond na het zaaien en tijdens de kiemingsfase, waardoor de plant zich met name in de extreem droge zomers van 2018 en 2019 niet optimaal ontwikkelde (Heinen (red.), 2021).

4.2.4 Woelen/diepploegen

Een methode om verdichting op te heffen, is door middel van het woelen van de ondergrond. Uit diverse onderzoeken blijkt echter dat aan woelen veel nadelen zijn verbonden (Schjønning et al., 2015). Een van de nadelen is dat door het woelen de bestaande macroporiënstructuur beschadigd raakt. Planten kunnen daardoor slechter wortelen en zijn gevoeliger voor droogte doordat de capillaire werking van de bodem is verstoord. Verder tonen experimenten in Denemarken met leemhoudende zanden aan dat, wanneer het landgebruik niet wordt gewijzigd, de ondergrondverdichting na drie tot vier jaar weer op het oude niveau is teruggekeerd (Olesen & Munckholm, 2007). Dit is in overeenstemming met een grootschalig onderzoek naar het opheffen van bodemverdichting in de jaren tachtig van de vorige eeuw in Nederland (Kooistra en Boersma, 1994). Hierbij werd op een groot aantal locaties met lichte zavelgronden een drietal woeltechnieken onderzocht en vergeleken met de oorspronkelijk verdichte situatie (Figuur 13). Na het eerste jaar trad een verbetering op in het waterbergend vermogen en de doorlatendheid van de ploegzool (25-45 cm -mv). Na drie jaar is de verbetering tenietgedaan en in een aantal gevallen zijn de condities nog slechter dan bij de oorspronkelijk verdichte laag. Bij het gebruik van een woeler aan de ploeg (*plough mounted subsoiling*) wordt herverdichting nog het meest voorkomen. De toegenomen bodemverdichting door

woelen wordt ook bevestigd door onderzoek naar maisteelt op leemhoudende zandgronden waar tot 75 cm -mv de grond werd losgemaakt (Wanink et al., 1990). Vier jaar na het woelen werd een 30% lagere opbrengst gemeten en stopte de beworteling al op 40 cm -mv. In het onderzoek van Visscher et al. (2008) naar de kosten en baten en de effectiviteit op duurzaam bodemgebruik wordt geadviseerd de ondergrond niet los te maken vanwege de negatieve langetermijneffecten.



Figuur 13 Structuur van de ondergrond bij verschillende woeltechnieken na drie jaar. 5: de oorspronkelijke ploegzool, 7: de nieuwe ploegzool. (Kooistra en Boersma, 1994).

4.2.5 Gaten prikken of boren

Het opheffen van de ondergrondverdichting via gaten prikken of boren is, net als agressief diep wortelende gewassen, een methode in ontwikkeling. Het boren van gaten heeft als voordeel dat grond uit de verdichte laag wordt weggehaald, zodat een zekere ontspanning in de verdichte laag optreedt en de indringweerstand voor wortels van de grond naast het gat wellicht lager wordt. Bij prikken geldt juist het omgekeerde, omdat plaatselijk de dichtheid iets wordt verhoogd. Het ontstane gat kan al dan niet worden opgevuld met organische stof of mest.

In Zwitserland zijn experimenten uitgevoerd waarbij in een verdichte bodem gaten van 1,25 mm (diameter) tot 20-30 cm -mv zijn gemaakt (Colombi et al., 2016). Er is een duidelijke verbetering van de plantgroei geconstateerd veroorzaakt door een verlaagde indringingsweerstand voor de wortels en verbetering van de luchtdoorlatendheid. In het kader van het project PPS Klimaatadaptatie Open Teelt worden in Lelystad proeven uitgevoerd met het boren van gaten om de ondergrondverdichting op te heffen. De gaten worden gevuld met een mengsel van klei en potgrond.

4.3 Vruchtwisseling en bouwplan

Het behoud en herstel van de bodemstructuur vereist een ander type vruchtwisseling. Zo zouden er meer dieper wortelende gewassen en groenbemesters kunnen worden toegepast. Ook teelten/rassen met een vroeg oogstmoment en/of een laat zaaimoment voorkomen dat het land onder te natte condities wordt bewerkt.

De oogst van rooigewassen in natte perioden in het najaar veroorzaakt een verslechtering van de bodemstructuur. Als ook de structuur van de ondergrond negatief wordt beïnvloed, dan is deze schade

moeilijk te herstellen. Sommige gewassen kunnen eerder worden geoogst, bij beter weer en betere bodemomstandigheden. Het nadeel van deze benadering is dat de opbrengst lager kan zijn of, in het geval van suikerbieten, dat een langere opslag bewaarverliezen veroorzaakt. Een voordeel van een vroegere oogst is dat dit de mogelijkheid kan scheppen om vervolgens een wintergewas of een groenbemester te verbouwen. Het verbouwen van een wintergewas of groenbemester heeft extra positieve effecten op de bodemstructuur en op het gehalte organische stof in de bodem.

Een vruchtwisseling moet zijn ontworpen om het gehalte organische stof in de bodem te vergroten en de bodemstructuur te verbeteren. Enkele praktische regels om dit te realiseren, zijn: een minimum van 25% diepwortelende maaigewassen (bijvoorbeeld granen, luzerne en koolzaad), een maximum van 30% snijmaïs en uitsluiting van voortdurende verbouw van hetzelfde gewas (Van den Akker et al., 2006).

Het kiezen van de juiste vruchtwisseling vanuit het perspectief van bodemkwaliteit kan moeilijk zijn in de praktijk, in het bijzonder op bedrijven met op dit moment een grote verhouding van gewassen die nadelig zijn voor de bodemkwaliteit. Voor een goede afweging tussen de verminderde opbrengst door een andere teelt of ras en de verbeterde opbrengst door het behoud of herstel van de bodemstructuur, ontbreekt het op dit moment aan goede data.

4.4 Verminderde belasting

4.4.1 Wiellast, bandenspanning en bandentype

De mate waarin een bepaalde belasting doorwerkt in de ondergrond is afhankelijk van de wiellast, de bandenspanning en het bandentype. De afgelopen decennia zijn de wiellasten sterk toegenomen (Figuur 14). Om bodemverdichting te voorkomen, zijn er steeds bredere banden gebruikt. Hierdoor kon de bandenspanning naar beneden. Omdat er limieten zijn aan de breedte van de band zijn bij de hoge wiellasten (> 7 kN) juist weer hogere bandenspanningen nodig (Vermeulen et al., 2013). De toename van de wiellast en beperkte afname van de bandenspanning heeft daardoor geleid tot een toename van de ondergrondverdichting.

In Denemarken zijn veldexperimenten uitgevoerd op een lichte zavelgrond met een drukhoogte rond veldcapaciteit ($pF = 2$). De grond werd belast met verschillende wiellasten en bandenspanningen (-breedtes). De resultaten laten zien dat de verlaging van de bandenspanning leidt tot een sterke beperking van de grondspanning in de bovengrond (Figuur 15). Voor de diepere lagen (>0,3 m) leidt de verlaging van de bandenspanning wel tot een reductie van de grondspanning in de ondergrond, maar dit wordt steeds minder met toenemende diepte. Het blijkt dat de wiellast de meest bepalende factor is voor de verdichting van de ondergrond (Schjønning & Lamandé, 2018). Deze uitkomsten zijn in overeenkomst met veldexperimenten uit Vlaanderen waarin met de berijding door een trekker-mestinjector (bandentype 800/60R32) de toename van de verdichting bij verschillende bandenspanningen en vochtgehalten is gemeten. In de bovengrond meten zij bij het verlagen van de bandenspanning van 3 bar naar 1 bar bij vochtige omstandigheden een verhoging van de bandenafdruk met 19% (van 0,4 naar 0,5 m²) en een verlaging van de insporing en bodemdruk met respectievelijk 35% en 16%. In de ploegzool (en dieper) verwachten zij door een verlaging van de bandenspanning o.a. een minder hoge indringingsweerstand (D'Hose et al., 2017). Er werd echter geen significante wijziging aangetroffen. Mogelijk werd dit veroorzaakt doordat de ploegzool in de uitgangssituatie al hoge indringingsweerstand (3-4 MPa) had.

Voor het beperken van de verdichting van de bovengrond zijn het verminderen van de bandenspanning en het verbreden van de bandafdruk de belangrijkste beheersmaatregelen. Voor de ondergrond is dat echter niet voldoende; hier zal ook nadrukkelijk moeten worden gekeken naar het limiteren van de wiellast.

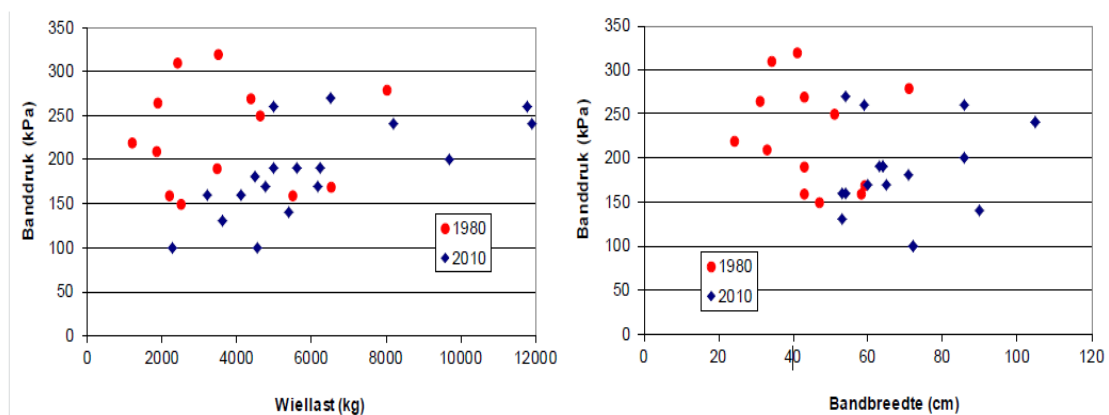
Tabel 2 Maximale wiellast bij maximale grondspanning van 50 kN op 50m cm -mv voor verschillende type banden (Schjønning et al., 2015).

Contact oppervlakte (m ²)	Bandbreedte (m)	Bandvolume (m ³)	Maximale Wiellast kN
0,2	0,44	0,2	21
0,4	0,60	0,5	27
0,6	0,74	0,9	32
0,8	0,86	1,3	38
1,0	0,96	1,6	44
1,2	1,05	2,0	50
1,4	1,14	2,4	56
1,6	1,22	2,8	62
0,8	1,28	3,1	69
2,0	1,36	3,5	75

In de literatuur worden diverse vuistregels gebruikt voor de maximale bandenspanning en wiellast. Vermeulen en Perdok (1994) stellen dat voor de meeste gronden een grondspanning, op het contactpunt met de band, kleiner dan 100 kPa bij normale veldcondities (droog) het risico op bodemverdichting minimaliseert. Wel geven ze aan dat dit criterium sterk kan variëren met bodemtype en bodem- en vochtcondities. Voor situaties met slechtere veldcondities (nat) adviseren zij een maximale gronddruk van 50 kPa. Een grondspanning van 50 en 100 kPa resulteert in een bandenspanning van respectievelijk 0,8 bar en 0,4 bar. Voor de in de jaren negentig van de vorige eeuw verkrijgbare bandtypen kon met een maximale gronddruk van 100 kPa 100 kN (10 ton) wiellast worden geaccepteerd.

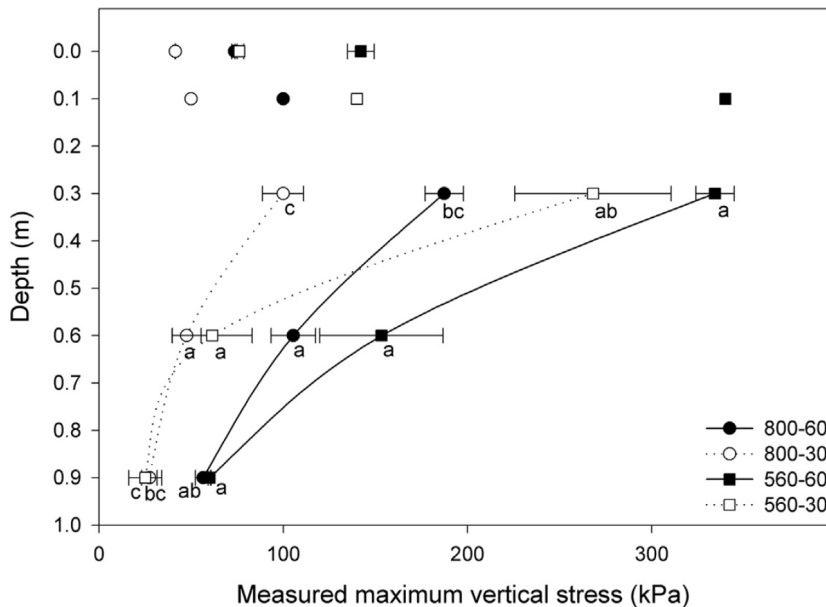
Schjønning & Lamandé (2018) hanteren voor elk type (Deense) bodem bij veldspanning ($p_f = 2$) een maximale grondspanning van 50 kPa op 50 cm -mv (de 50-50-stelregel). Deze stelregel hebben ze verder vertaald naar de 8-8-stelregel. Dit houdt in dat de diepte van de 50 kPa isobar met 8 cm in de diepte toeneemt door elke aanvullende ton wiellast of door een verdubbeling van de bandenspanning (Schjønning et al., 2012).

Het 50-50-criterium is door Schjønning & Lamandé (2018) gebruikt om uit te rekenen welke wiellast gehanteerd mag worden bij een bepaald type band (contactoppervlakte) (Tabel 2). Voor het meest gangbare type band met 0,6 tot 0,8 contactoppervlakte betekent dit een maximale wiellast van circa 35 kN. De wiellast kan worden verhoogd naar 50 kN wanneer de grootste in de handel te krijgen banden worden gemonteerd. Een vergelijking met de dagelijkse praktijk (Figuur 6 en Figuur 14) laat zien dat de vuistregels bij veel bewerkingen en oogsten sterk worden overschreden.



Figuur 14 Voorkomende wiellasten en bandenspanningen in 1980 en 2010 (Vermeulen et al., 2013).

De vuistregels gaan voorbij aan specifieke bodem- en veldcondities en maken geen onderscheid in het te gebruiken landbouwvoertuig. Met de tool Terranimo (www.terranimo.dk) kan het risico op bodemverdichting nauwkeuriger worden bepaald. Dit model is een risico-beoordelingstool en het berekent geen verdichting. Om het risico laag te houden, hanteert de Deense versie van het model een maximale grondspanning van 50 kPa in de ondergrond. Er is in 2020 een Nederlandse versie van Terranimo op de markt gekomen waarin de belangrijkste Nederlandse bodems en hun vocht karakteristieken zijn opgenomen (Bakema en Van den Akker, 2021; zie www.terranimo.dk).



Figuur 15 Maximale grondspanning gemeten op verschillende dieptes bij experimenten met twee verschillende bandsoorten en twee verschillende wiellasten (Lamandé & Schjøning, 2011a).

4.4.2 Nieuwe landbouwconcepten

Het verlagen van wiellasten en bandenspanning van bestaande landbouwvoertuigen kan het risico op bodemverdichting beperken. De vanuit preventie gewenste wiellasten/bandenspanning en de wiellasten in de dagelijkse praktijk laten echter een groot verschil zien. Dit is aanleiding om te denken aan nieuwe landbouwconcepten. Binnen het SMARAGD-programma wordt een nieuw landbouwconcept ontworpen voor de teelt van hoogsalderende akkerbouw- en vollegrondsgroentegewassen, waarin zware en grootschalige mechanisatie vervangen wordt door lichte, autonome, innovatieve technologieën (www.smaragd-smartfarming.nl/). Het gaat om een systeemontwerp waarin alle bewerkingen (grondbewerking, zaaien/planten, gewasverzorging, oogst) in een teelt worden beschouwd. Technieken die worden onderzocht, zijn: meerdere autonome, kleinschalige en lichte voertuigen (swarms), (vaste?) rijpadensysteem, sensing technieken (o.a. onkruid- en ziekteherkenning) en plaats-specifieke behandeling.

Een specifiek probleem is de oogst van het product en dan vooral de afvoer van het product van de kavel. Bij de oogst van rooigewassen, zoals suikerbieten, aardappelen, uien en winterwortelen gaat het om hoeveelheden tot 100 ton per ha of meer. Bij rooimachines waarin het product in de rooier gebufferd en op de kopakker geleegd wordt (zgn. bunkerrooiers), gaat het om gewichten tot 45-55 ton. Een alternatief is een rooier met kleine bunker, die vaker lost. Binnen het landbouwcollectief H-WodKa is dit idee verder uitgewerkt (H-WodKa, 2016). Hierbij wordt het feitelijke oogsten en transport van het geogste product middels een bunker gescheiden. De capaciteit van de oogstmachine hoeft hierdoor niet af te nemen. De taak van de bunker kan overgenomen worden door de lastvoertuigen voor veldtransport. Deze lastvoertuigen of 'product carriers' zijn geschikt voor het veldtransport van alle geogste producten. Voor de overslag bij de perceelrand zijn verschillende systemen denkbaar. Bovendien kunnen functies toegevoegd worden, zoals bufferen en nareinigen. Het transport over de

openbare weg kan door opleggers met een groot laadvermogen uitgevoerd worden, getrokken door landbouwtrekkers of vrachtwagens (H-Wodka, 2016).

4.4.3 Aangepaste bewerkingen

De Boer (2004) noemt een groot aantal maatregelen om bodemverdichting van de boven- en ondergrond te voorkomen. Een deel van die maatregelen is gericht op een andere manier van grondbewerking. Het onderzoek naar deze technieken is veelal gericht op de structuurverbetering van de bovengrond, de ontwikkeling van de plantengroei en onkruidbestrijding. De effectiviteit van deze technieken op de ondergrondverdichting is beperkt onderzocht.

4.4.3.1 Niet-kerende grondbewerking

Niet-kerende grondbewerking geeft een betere draagkracht. Door de bodem minder intensief en minder diep te bewerken, ontstaat een stabielere bodemstructuur. Ook is er minder bodemverdichting door niet te ploegen.

4.4.3.2 Bovenover ploegen

Ploegen is een van de kritische bewerkingen voor ondergrondverdichting. Ploegen gebeurt gewoonlijk onder relatief natte bodemomstandigheden, twee van de tractorwielen lopen in de ploegvoor en het trekken van de ploeg vereist zowel een hoge wiellast als een hoog koppel bij het achterwiel dat in de voor loopt. Door 'bovenover' te rijden bij het ploegen (met een daarvoor geschikte ploeg), is preventie van deze ondergrondverdichting mogelijk. Bovenover ploegen maakt het ook mogelijk om bredere banden te gebruiken of eventueel rupsbanden. Om een goede aansluiting van de ploegsnedes te verkrijgen, is bij bovenover ploegen RTK-gps-besturing nodig. Een nadeel is kans op 'drijven' van de trekker onder natte omstandigheden, omdat de trekker bovenop minder grip heeft dan in de voor.

4.4.3.3 Vaste rijpaden

Met gebruik van vaste rijpaden wordt de bodem tussen de wielsporen verder ontzien. Vaste rijpaden wil zeggen dat de rijpaden van trekkers en andere werktuigen altijd en elk jaar op dezelfde plek liggen in een perceel en de grond ertussen niet bereden wordt. De wielsporen zelf hebben uiteindelijk een slechte structuur, omdat deze jaar op jaar bereden worden en de bodem hier nauwelijks de kans krijgt om te herstellen. Aangezien er een deel van het oppervlak door de vaste rijpaden in beslag wordt genomen, zal er gekozen moeten worden voor een zo efficiënt mogelijke benutting van de resterende oppervlakte. Vandaar een zo groot mogelijke spoorbreedte. In de praktijk wordt over het algemeen in dit systeem in Nederland gebruikgemaakt van een spoorbreedte van 315 of 320 cm, omdat met deze trekkers en werktuigen vervoer over de weg nog mogelijk is. Naast deze spoorbreedte zijn natuurlijk ook 150 cm of 225 cm spoorbreedtes mogelijk, maar dit kost meer oppervlakte aan rijpaden. Wel moeten alle machines worden afgestemd op de gekozen werkbreedte. Een mogelijkheid om toch gebruik te maken van rijpaden en de bodemoppervlakte optimaal te benutten, is het gebruik van vaste rijpaden in combinatie met een grotere werkbreedte. Hiervoor is er geen (dure) aanpassing nodig van de spoorbreedte van de trekker.

Uit onderzoek en ervaring blijkt dat rijpadenteelt een positief effect heeft. Bij permanente rijpaden (gewasverzorging, oogst en grondbewerking) kan volgens diverse nationale onderzoeken een meeropbrengst van ruim 10% worden verwacht (Handboek Bodem en Bemesting, 2016; Folkerts et al., 1981). In een onderzoek bij seizoensgebonden rijpaden in biologische landbouw (oogst en grondbewerking niet op rijpaden) zijn ook diverse voordelen aangetoond. Er is meer mineralisatie, minder emissie van broeikasgassen, een betere waterhuishouding, minder onkruid in biologische systemen en de bodem is eerder bewerkbaar. Voor sommige gewassen is een meeropbrengst vastgesteld. Rijpaden hebben voordelen die zeker voor de biologische teelt zwaar meetellen. Zo is het over het algemeen wat eenvoudiger om de grond goed vlak te krijgen en is mechanische onkruidbestrijding mede daardoor beter af te stellen. Het zaaibed dat ontstaat, is vaak wat homogener waardoor nauwkeuriger zaaien mogelijk is met een homogener opkomst en gewasontwikkeling als gevolg. Het gewas is bij de oogst ook overal even oogstrijp, waardoor er betere afzetmogelijkheden en hogere prijzen zijn.

4.5 Technisch handelingsperspectief

De mate waarin de diverse methoden om bodemverdichting te voorkomen en op te heffen zijn onderzocht, is sterk verschillend. Dit kan worden veroorzaakt door de specifieke condities waarin de onderzoeken hebben plaatsgevonden (bodem- en vochtcondities, mate van belasting), de mate waarin er specifiek naar de effecten op de ondergrond is gekeken, de toepasbaarheid voor Nederlandse condities en de innovativiteit van technieken (diep wortelende gewassen, gaten prikken). Verder ontbreekt in het onderzoek veelal de economisch component waardoor de relatie tussen een te nemen maatregel (kosten) en de verminderde oogstderving (baten) niet eenduidig is. Toch leveren de onderzoeken voldoende aangrijpingspunten om nu en in de toekomst gericht maatregelen te treffen om bodemverdichting te voorkomen en op te heffen.

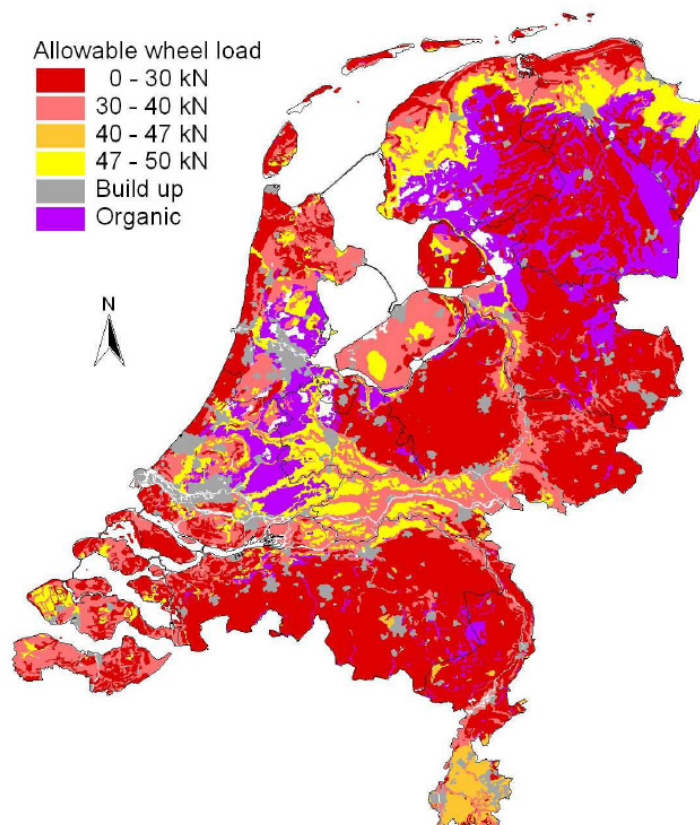
Voorkomen blijft het allerbelangrijkste, omdat het opheffen van ondergrondverdichting een zeer traag proces is (zwellen/krimpen van klei), de maatregelen niet altijd effectief zijn (woelen, diepspitten), de effectiviteit nog niet voldoende is aangetoond (sorghum) en/of erg kostbaar zijn (gaten prikken).

De belangrijkste preventieve maatregelen die met de huidige landbouwvoertuigen en de huidige teelten genomen kunnen worden, zijn:

- Voorkom werken onder te natte condities of op te slappe bodems. Dit kan worden bepaald met de Nederlandse versie van het risicobeoordelingsprogramma Terranimo, waarin ook weersvoorspellingen zijn opgenomen (Bakema en Van den Akker, 2021).
- Maximeer de wiellast en bandenspanning. Voor het voorkomen van ondergrondverdichting is verlaging van de bandenspanning niet voldoende, maar zal er nadrukkelijk gekeken moeten worden naar de verlaging van de wiellast. Mocht het niet mogelijk zijn om met Terranimo te werken of ontbreken de belangrijkste invoerparameters, dan kunnen voorlopig vuistregels worden gehanteerd. Een vuistregel uit de jaren negentig van de vorige eeuw stelt dat, sterk afhankelijk van de vochttoestand en de bodemsoort, de grondspanningen tot 100 kPa en de bandenspanning tot 0,8 bar (80 kPa) beperkt zouden moeten worden. Onder vochtige condities (vroeg voorjaar, late najaar) zal de bandenspanning nog verder verlaagd moeten worden (0,4 bar) en dit heeft als consequentie dat de wiellast verlaagd moet worden. Meer recent onderzoek toont aan dat 100 kN wiellast onder droge omstandigheden nog steeds te hoog kan zijn en dat deze gemaximaliseerd moet worden tot 50 kN (Van den Akker, 2004; Schjønning et al., 2015). Meer specifiek voor Flevoland geldt dat met name op de verdichtingsgevoelige zandgronden van de Noordoostpolder de wiellast zelfs onder de 30 kN zou moeten blijven (Figuur 16) om elke schade te voorkomen.
- Gebruik meer dieper wortelende gewassen en groenmesters. Een andere methode om onder zo droog mogelijke omstandigheden te oogsten en te zaaien, is het gebruik van andere teelten/rassen. Daarnaast kan het verbouwen van wintergewassen de structuur van de bodem verbeteren.

Omdat verlaging van wiellast/bandespanning met de huidige vorm van mechanisatie niet altijd mogelijk is of omdat de oogst vrijwel altijd onder natte condities plaatsvindt, zal er ook meer aandacht moeten zijn voor andere manieren van landbouwmechanisatie of grondbewerking. Dit kan door:

- Bovenover ploegen, niet-kerende grondbewerking en vaste rijpaden. Ook bij deze technieken zal kritisch gekeken moeten worden naar de vochtcondities en het bodemtype waarop de bewerking plaatsvindt.
- Het gebruik van een drukwisselsysteem (Central Tyre Inflation System (CTIS)) waarmee de bandenspanning kan worden aangepast voor veld- en wegcondities.
- Het werken met lichtere, autonome landbouwvoertuigen.
- Het aanpassen van de logistiek op het veld door oogst en transport te scheiden.
- Het bevorderen van het natuurlijk herstel, o.a. door te zorgen voor een goede drainagetoestand.



Figuur 16 Maximale wiellast van een Terra band 73*44.00-32 bij een drukhoogte van $pF = 2.5$ (Van den Akker et al., 2011).

Veel van de nieuwe landbouwmechanisatieconcepten zijn nog in het eerste stadium van hun technologische ontwikkeling en het zal nog wel enkele jaren duren voordat ze inzetbaar zijn op bedrijfsniveau.

4.6 Sociaaleconomisch handelingsperspectief

Het technisch handelingsperspectief maakt o.a. duidelijk er meer technologisch onderzoek gedaan moet worden naar de mate van bodemverdichting en de wijze waarop dit technologisch kan worden opgelost. Dit zal echter voor het daadwerkelijk toepassen van de geschetste maatregelen niet voldoende zijn. Er zal ook aandacht moeten zijn voor de sociaaleconomisch en maatschappelijke aspecten van de hele productieketen van de landbouw (Van Zandbrink, 2019).

Voorlichting en scholing aan agrariërs, voorlichters en loonwerkers moeten een grotere bewustwording rond bodemverdichting creëren. Hierdoor kan bodemverdichting sneller herkend worden en is men zich bewust van de negatieve gevolgen. Daarnaast is het belangrijk kennis te hebben en ervaring op te doen met tools (zoals Terranimo) om te kunnen bepalen welke activiteiten en welke omstandigheden de kans op bodemverdichting kunnen verkleinen. Voorlichting is ook gewenst aan waterbeheerders, zodat zij op de hoogte zijn van de gevolgen van bodemverdichting op hun watersysteem en in welke mate een goed waterbeheer kan bijdragen aan het voorkomen van bodemverdichting. Specifiek voor Flevoland speelt hierin de relatie tussen de huidige bodemverdichting en de maatregelen die genomen worden om bodemdaling en wateroverlast/watertekorten te voorkomen.

Het handelingsperspectief om bodemverdichting te voorkomen, wordt veelal bij de gebruiker van de grond gelegd. In Flevoland is een aanzienlijk deel van de gronden in handen van het Rijk, de provincie en investeringsmaatschappijen. Via reguliere (lange termijn) of geliberaliseerde (1-6 jaar) pacht

worden gebruiksrechten uitgegeven. Bodemverdichting is een traag proces dat moeilijk is te herstellen. Hierdoor kan het voor een langere periode de opbrengst negatief beïnvloeden, waardoor ook de waarde van de landbouwgrond daalt. Voorlichting aan eigenaren moet hen bewust maken van de invloed van bodemverdichting op hun bezit. Wellicht dat zij in hun pachtovereenkomsten voorwaarden kunnen opnemen voor de mate waarin en de omstandigheden waaronder de grond mag worden belast.

Het huidige economisch perspectief voor de agrarische sector wordt bepaald door lage marges en de hoge prijs voor landbouwgrond (en hoge pachtprizen). Gevolg is dat er veelal gekozen moet worden voor hoogproductieve gewassen met korte gewasrotaties, zware machines om het land efficiënt te kunnen bewerken en het oogsten onder soms te natte condities. Andere teelten en andere bewerkingswijzen leveren minder kans op bodemverdichting, maar zijn economisch minder aantrekkelijk. De motivatie om toch over te stappen, zou kunnen liggen in aantoonbaar hogere opbrengsten (betere bodemstructuur en -vruchtbaarheid) op langere termijn (5-15 jaar). Een andere optie is dat er, in het kader van het maatschappelijk en economisch belang van een langjarige gezonde en productieve bodem, mogelijkheden worden geboden voor financiële compensatie of hogere marktprijzen. Mogelijk dat hierin ook een rol is weggelegd voor de voedselverwerkende industrie. Deels is deze sector zich bewust van de gevolgen van bodemverdichting en is bezig met het onderzoeken van oplossingen.

Het optimaliseren van de huidige landbouwmechanisatie door het verbeteren van bandentechnologie, het gebruik van meer-assige voertuigen en rupsen kan de kans op bodemverdichting verkleinen. Dit geldt alleen zolang die innovaties niet worden gebruikt om wiellasten te verhogen of oogsten onder nog nattere condities mogelijk te maken. Om daadwerkelijk een stap te maken naar lagere wiellasten zijn innovaties in de landbouwmechanisatie nodig. Innovaties op de Nederlandse markt zullen veelal pas geïmplementeerd worden op het moment dat er daadwerkelijk een vraag ligt vanuit de markt (agrariërs en loonwerkers). Hierdoor kan het zijn dat innovaties wel worden ontwikkeld (zie www.smaragd-smartfarming.nl) en lokaal worden getest, maar dat de daadwerkelijk marktintroductie vanwege beperkt economisch belang niet plaatsvindt. De vraag zou kunnen worden ondersteund door aantoonbaar hogere gewasopbrengsten (of minder gebruik van gewasbescherming) bij het gebruik van veel minder belastende machines. Een andere manier om vraag te stimuleren, is dat vanuit een maatschappelijk belang (minder verdichte bodems, minder wateroverlast of droogte) de wiellast en de bandenspanningen van machines via wet- en regelgeving worden gemaximeerd.

5 Samenvattende beschouwingen

Het onderzoek naar bodemverdichting in Flevoland is gebaseerd op een review van een groot aantal nationale en internationale onderzoeken. In zijn algemeenheid kan worden gesteld dat er de laatste twintig jaar met name aandacht is geweest voor het bepalen van het risico op bodemverdichting en de wijze waarop dit kan worden verminderd door met andere banden en lagere wiellasten te werken. Onderzoek naar het daadwerkelijk aantonen van bodemverdichting en het bepalen van de gevolgen, zoals oogstschade en een verslechterde waterhuishouding, heeft minder aandacht gekregen. Dit geldt ook voor het beoordelen van maatregelen om bodemverdichting op te heffen, zoals diep wortelende gewassen of mechanische methoden. Dit betekent dat een deel van dit rapport mede gebaseerd is op historisch onderzoek dat in de jaren tachtig en negentig van de vorige eeuw is uitgevoerd. Recente gegevens specifiek voor Flevoland zijn beperkt beschikbaar. Mede daarom worden in het project Raak-Pro meer data verzameld over de mate van bodemverdichting in Flevoland.

Het onderzoek is daar waar mogelijk toegespitst op de specifieke bodemkundige en landgebruikssituatie in Flevoland. De kans op bodemverdichting in Flevoland is hoog, doordat er relatief veel teelten worden toegepast met late oogstmomenten en zware machines. Doordat de ondergrond voor een belangrijk deel bestaat uit klei dat, onder relatief droge omstandigheden, veel belasting kan hebben en bovendien door uitdrogingskrimping in ieder geval gedeeltelijk kan herstellen, wordt het risico wel beperkt. Op basis van relatief beperkt veldonderzoek is vastgesteld dat tussen de 25% en 45% van de bodems in Flevoland daadwerkelijk verdicht is. De verdere intensivering van de landbouw maakt dat de gebruikte landbouwmachines groter worden en dat er onder ongunstige (natte) omstandigheden moet worden geoogst. Dit kan ertoe leiden dat er op meer plaatsen bodemverdichting gaat optreden.

Bij het ombuigen van de trend van voortdurend toenemende verdichting van de ondergrond naar een trend met meer herstel en wellicht zelfs lagere dichtheden, moet men zich ervan bewust zijn dat sommige grondsoorten, zoals zand en lichte zavel, zich niet of erg moeizaam (laten) herstellen. Indien deze ondergronden zo dicht zijn dat beworteling nagenoeg onmogelijk is voor de meeste cultuurgewassen, dan is een aanpak met agressief diep wortelende gewassen, wellicht losmaken en in ieder geval preventie van herverdichting noodzakelijk. Zwaardere ondergronden herstellen beter, vooral omdat deze bij uitdrogen kunnen krimpen, maar een volledig herstel kennen ook deze gronden niet. Dit maakt dat preventie het allerbelangrijkste is bij het voorkomen van verdere bodemverdichting.

Voor landbouwers en loonwerkers is belangrijk dat zij zich bewust zijn van welke invloed bepaalde bewerkingen of oogsten op bodemverdichting kunnen hebben. Die bewustwording kan worden ondersteund door risicobeoordelingstools zoals Terranimo (www.terranimo.dk). Op basis van informatie van deze tool kan besloten worden een bewerking uit te voeren met lagere wiellasten en/of bandenspanningen of een bewerking onder meer drogere omstandigheden uit te voeren. In zijn algemeenheid kan worden gesteld dat, sterk afhankelijk van de vochttoestand en de bodemsoort, de grondspanningen tot 100 kPa en de bandenspanning tot 0,8 bar (80 kPa) beperkt zouden moeten worden. Om schade als gevolg van bodemverdichting te voorkomen, zou de wiellast nog verder verlaagd moeten worden naar 3 ton. Omdat verlaging van wiellast/bandenspanning met de huidige vorm van mechanisatie niet altijd mogelijk is of omdat de oogst vrijwel altijd onder natte condities plaatsvindt, zal er ook meer aandacht moeten zijn voor andere manieren van landbouwmechanisatie of grondbewerking. Van deze methoden zoals bovenover ploegen, niet-kerende grondbewerking, vaste rijpaden en drukwisselsystemen is bekend dat ze bodemverdichting kunnen verminderen.

Het opheffen van de bodemverdichting kan door middel van diepploegen of woelen. Het nadeel van deze methoden is dat de bodemstructuur hiermee volledig wordt verstoord, met als gevolg dat verdichting bij hernieuwde belasting zal terugkeren en in sommige gevallen zal verergeren. Het meeste perspectief op herstel zijn methoden waarbij het zwel- en krimpproces wordt bevorderd. Dit

kan door het verbeteren van de ontwatering, waardoor er diepe scheuren kunnen ontstaan. Deze methode kan alleen werken voor gronden met een hoog kleigehalte. Waar verlaging onvoldoende kan plaatsvinden of waar de kleigehaltes te laag zijn, kan de bodemverdichting worden opgeheven door diepwortelende gewassen zoals sorghum. Of en hoe effectief diepwortelende gewassen zijn, is onderdeel van lopende onderzoeken.

De verantwoordelijkheid voor de preventie en het opheffen van bodemverdichting ligt op dit moment volledig bij de landgebruiker. Het huidige economisch perspectief voor de agrarische sector dat bepaald wordt door lage marges en de hoge prijs voor landbouwgrond (en hoge pachtprizen) laat weinig ruimte om bodemverdichting te voorkomen. Andere teelten en andere bewerkingswijzen leveren minder kans op bodemverdichting, maar zijn economisch minder aantrekkelijk. De motivatie om toch over te stappen, zou kunnen liggen in aantoonbare hogere opbrengsten (betere bodemstructuur en -vruchtbaarheid) en minder nat- en droogteschade (door de betere infiltratiecapaciteit en bewortelingsdiepte) op langere termijn (5-15 jaar). Een andere optie is dat er, in het kader van het maatschappelijk en economisch belang van een langjarige gezonde en productieve bodem, mogelijkheden worden geboden van een financiële compensatie of van hogere marktprijzen. Hierin ligt een rol weggelegd voor landeigenaren, de voedselverwerkende industrie en overheden. Dit brengt bodemverdichting in een veel breder perspectief waarbij de oplossingen niet alleen neergelegd kunnen worden bij de gebruikers (deels eigenaar) van de grond.

Dit onderzoek maakt duidelijk dat er meer technologisch onderzoek gedaan moet worden naar de mate van bodemverdichting en de wijze waarop dit technologisch kan worden opgelost. Dit zal echter voor het daadwerkelijk toepassen van de geschetste maatregelen niet voldoende zijn. Er zal nadrukkelijk ook aandacht moeten zijn voor de sociaaleconomische en maatschappelijke aspecten van de hele productieketen op het voorkomen van bodemverdichting.

Literatuur

- Akker, J.J.H. van den, G.D. Vermeulen, P.H.M. Dekker en A.P. Phillipsen, 2006. Bodemverdichting. Leidraad Bodembescherming, onderdeel 5720. Sdu, Den Haag, 51 p.
- Akker, J.J.H. van den, F. de Vries, G.D. Vermeulen, M.J.D. Hack-ten Broeke en T. Schouten, 2013a. Risico op ondergrondverdichting in het landelijk gebied in kaart. Wageningen, Alterra, Alterra-Rapport 2409, 81 blz.
- Akker, J.J.H. van den; Vries, F. de; Hack-ten Broeke, M.J.D., 2013b. Risico op ondergrondverdichting in kaart: resultaten PRISMA-project 'gevoeligheid voor verdichting'. Bodem 23/1, p. 14 – 15.
- Akker, J.J.H. van den., A. Visser, D. Brus, W.J.M. de Groot, M. Pleijter, L. Schlebbs, F. De Vries, M.J.D. Hack-ten Broeke, 2014. Managementsamenvatting PRISMA onderzoek Bodemverdichting kwetsbare gebieden – Fase 2: Veldwaarnemingen en ervaringen in de praktijk. Website: www.bodemambities.nl/Thema_s/ Verdichting
- Akker, J.J.H. van den, W.J.M. de Groot, M. Pleijter, D.J. Brus, M.J.D. Hack-ten Broeke, L. Schlebbs, F. de Vries, 2014. Bodemverdichting kwetsbare gebieden – Opleveringsnotitie veldwerk Fase 2. Alterra-notitie JvdA2014-1, Alterra Wageningen UR, Wageningen.
- Akker, J.J.H. van den, R.F.A. Hendriks, 2015. Hoe erg is ondergrondverdichting in de landbouw? Een samenvatting en conclusies uit onderzoek naar ondergrondverdichting. Bodem 3-2015, blz. 42-44.
- Akker, J.J.H. van den, 2020. Fact finding paper bodemverdichting. Raad voor de leefomgeving en infrastructuur.
- 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, Hoogland, T., 2011. Comparison of risk assessment methods to determine the subsoil compaction risk of agricultural soils in The Netherlands. Soil & Tillage Res. 114, pp 146-154. doi:10.1016/j.still.2011.04.002.
- Akker, J.J.H van den, 2021. Mondelinge mededelingen.
- Allakukku, L., 2000. Responses of annual crops to subsoil compaction in a field experiment in clay soil lasting 17 years. In: Horn, R., Van den Akker, J.J.H. and Arvidsson, J. (eds.) Subsoil compaction: distribution, processes and consequences. Advances in GeoEcology 32, Catena Verlag, Reiskirchen, Germany, pp. 205-208.
- Ablas, J., Wanink, F., Van den Akker, J.J.H. & Van der Werf, H.M.G., 1994. Impact of traffic-induced compaction of sandy soils on the yield of silage maize in The Netherlands. Soil Tillage Res. 29, 157-165.
- Bakema, G. en J.J.H. van den Akker, 2021. Terranimo, risicotool bodemverdichting versie Nederland. Rapportnummer 3063. Wageningen University and Research. Wageningen
- Bronswijk, J.J.B, 1991. Magnitude, modeling significance of swelling and shrinking processes in clay soils. Doctoral thesis. Wageningen Agricultural University, Wageningen, The Netherlands.
- Brouwer, F, F. de Vries en D.J.J. Walvoort, 2018. Basisregistratie Ondergrond (BRO) Actualisatie bodemkaart Herkartering van de bodem in Flevoland. WOt-technical report 143, Wageningen University and Research.
- Brus, D.J. and van den Akker, J.J.H., 2018. How serious a problem is soil compaction in the Netherlands? A survey based on probability sampling. SOIL, 4, 37-45, 2018. <https://doi.org/10.5194/soil-4-37-2018>
- CLM, 2016. Waarden van bodemmaatregelen. Rapport 912, Culemborg.
- Colombi, T., S. Braun, T. Keller, A. Walter, 2016. Artificial macropores attract crop roots and enhance plant productivity on compacted soils. Science of the Total Environment 574: 1283-1293.
- Deru, J., S. van de Goor, N. van Eekeren, A. De Vliegheer, J. Pannecouque & J. Van Waes, 2018. Sorghum als derde gewas in de melkveehouderij. Louis Bolk Instituut i.s.m. ILVO (Instituut voor Landbouw en Visserijonderzoek), 19 pp.
- De Boer, H.C., 2004. Advies Goede Landbouw- en Milieuconditie Landbouwgronden (GLMC). Praktijkonderzoek van de Animal Science Group (ASG). Lelystad: 38 pp.
- D'Hose, T., R. Lidong, C. Wim and G. Rysschaert, 2017. Effect van bandenspanning en bodemvochtgehalte op bodemverdichting en gewasgroei. ILVO, mededeling 230.

-
- Folkerts, H., J.K Kouwenhoven en U.D. Perdok, 1981. Mogelijkheden voor de rijbanenteelt. *Lansbouwmechanisatie* 32: 499-504.
- Groenendijk, Piet, Peter Schipper, Rob Hendriks, Jan van den Akker en Marius Heinen, 2017. Effecten van verbetering bodemkwaliteit op waterhuishouding en waterkwaliteit. Deelstudies Goede Grond voor een duurzaam watersysteem. Wageningen, Wageningen Environmental Research, Rapport 2811. 128 blz.
- Håkansson, I. (Ed.), 1994. Subsoil compaction by high axle load traffic. *Special Issue Soil Tillage Res.* 29, 105-306.
- Håkansson, I. and Reeder, R.C., 1994. Subsoil compaction by vehicles with high axle load - extent, persistence and crop response. *Soil and Tillage Research* 29, 277-304.
- Håkansson, I., Voorhees, W.B., Elonen, P., Raghavan, G.S.V., Van Wijk, A.L.M., Rasmussen, K. Riley, H., 1987. Effect of high-axle load traffic on subsoil compaction and crop yield in humid regions with annual freezing. *Soil Tillage Res.* 10, 259-268.
- Handboek Bodem en Bemesting, 2016.
<https://www.handboekbodemenbemesting.nl/nl/handboekbodemenbemesting.htm>
- Heinen (red.), M., in prep., 2021. Samenvatting resultaten bodemmaatregelen: Lumbricus Bewuste Bodem. Rapport 3060, Wageningen Environmental Research, Wageningen.
- Hanse, B., G.D. Vermeulen, F.G.J. Tijink, H.-J. Koch, 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.
- H-WodKa, 2016. Visie en plan voor een integrale benadering voor duurzaam bodembeheer. Hoekse Waard.
- Kooistra, M.J. and Boersma, O.H., 1994. Subsoil compaction in Dutch marine sandy loams: loosening practices and effects. *Soil Tillage Res.* 29: 237-247.
- Lamberink, K., 2013. Exploring subsoil compaction on arable farms in East-Flevoland Master Thesis, Wageningen UR.
- Lamers et al., 1986. Controlled traffic systems in the Netherlands. *Soil & Tillage Research* 8: 65-76.
- 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 subsoil's, a case study on loamy and clayey soils in the Netherlands. Master thesis Wageningen University.
- Olesen, J.E. and Munckholm, L.J., 2007. Subsoil loosening in a crop rotation for organic farming eliminated plough pan with mixed effects on drop yield. *Soil Till. Res* 94. 376-385.
- Radford, B. J., Yule, D. F., McGarry, D., & Playford, C., 2001. Crop responses to applied soil compaction and to compaction repair treatments. *Soil and Tillage Research*, 61(3-4), 157-166.
- Schjønning, P., van den Akker, J.J.H., Keller, T., Greve, M.H., Lamandé, M., Simojoki, A., Stettler, M., Arvidsson, J., Breuning-Madsen, H., 2015. Driver-Pressure-State-Impact-Response (DPSIR) Analysis and Risk Assessment for Soil Compaction—A European Perspective. In: Sparks, D.L. (Ed.), *Advances in Agronomy*, Elsevier, pp. 183-237. ISBN: 9780128030523,
- Schjønning, P., M. Lamandé, T. Keller, J. Pedersen, M. Stettler. Rules of thumb for minimizing subsoil compaction. *Soil Use Manage.*, 28 (2012), pp. 378-393
- Schjønning, P. and Lamandé, M., 2018. Models for prediction of soil precompression stress from readily available soil properties.
- Schittenhelm, S. & S. Schroetter, 2014. Comparison of Drought Tolerance of Maize, Sweet Sorghum and Sorghum-Sudangrass Hybrids. *Journal of Agronomy and Crop Science*. Blackwell Verlag GmbH, 200: 46-53
- Staps, J.J.M., C. ter Berg, A. van Vilsteren, E.T. Lammerts van Bueren en T.H. Jetten, 2015. Van bodemdilemma's naar integrale verduurzaming – Casus: Vruchtbaar Flevoland, van bodemdegradatie en diepploegen naar integrale duurzame productie in Flevoland www.ridlv.nl, 58 pp.
- 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 Wateren Bodembeheer, K.U. Leuven. 133 p.

-
- Van Essen, E.A., 2021. Mondelinge mededelingen.
- Van der Salm, C.; Groenendijk, P.; Hendriks, R.; Massop, H.; Renaud, L., 2015. Opties voor benutten van de bodem voor schoon oppervlaktewater. Alterra rapportage.
- Van Os, G., 2016. Flevoland in beweging, projectplan Raak-Pro. Aeres Hogeschool, Dronten.
- Vermeulen, G.D., Verwijs, B.R., van den Akker, J.J.H., 2013. Vergelijking van de bodembelasting bij agrarisch veldwerk in 1980 en 2010. Wageningen, Plant Research International, Rapport 501, 38 pp.
- Vermeulen, G. D., & Perdok, U. D., 1994. Benefits of low ground pressure tyre equipment. *Soil compaction in crop production*, 11: 447-478.
- Vermeulen, G.D., W.B.M. Arts en J.J. Klooster, 1988. Perspective of reducing soil compaction by using a low ground pressure farming system: selection of wheel equipment. *Proc. 11th Conf. Int. Soil Tillage Res. Organ. (ISTRO)*, Edinburgh, U.K., Vol.1, pp. 329-334.
- Vermeulen, G.D., W.B.M. Arts, B.R. Verwijs en J. van Maanen, 1993. Berijdingsmogelijkheden veengrasland. II: Afstemming van bandspanning en draagkracht. In: Snoek, H. (ed.), *Proc. Theme day grasland en berijding (Grassland and Traffic)*, 17 June 1993. Res. Sta. Dairy Farming (PR), Lelystad, Netherlands, pp. 27-33.
- Visscher, J., P.H.M Dekker, H.C. de Boer, 2008. Perspectieven bedrijfsmaatregelen voor duurzaam bodemgebruik, kosten en effectiviteit van vijf maatregelen. Wageningen Universiteit, animal science group, rapport 148.
- Voorhees, W. B., 2000. Long-term effect of subsoil compaction on yield of maize. *Advances in GeoEcology*, 32: 331-338.
- Wanink F.J., J. Alblas, H.M.G. van der Werf en J.J.H. van den Akker, 1990. Snijmaisopbrengst beïnvloed door berijding. *Landbouwmechanisatie* nr. 4, p 28-29.
- Van Zandbrink, G., 2019. Towards action in reducing agricultural subsoil compaction. Master thesis, WUR.

Wageningen Environmental Research
Postbus 47
6700 AA Wageningen
T 0317 48 07 00
www.wur.nl/environmental-research

Wageningen Environmental Research
Rapport 3069
ISSN 1566-7197

De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen Wageningen University en gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 6.500 medewerkers (5.500 fte) en 12.500 studenten behoort Wageningen University & Research wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.



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



Wageningen Environmental Research
Postbus 47
6700 AB Wageningen
T 317 48 07 00
www.wur.nl/environmental-research

Rapport 3069
ISSN 1566-7197

De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen Wageningen University en gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 6.500 medewerkers (5.000 fte) en 12.500 studenten behoort Wageningen University & Research wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.

