

De invloed van bodemverdichting op de water- en luchthuishouding in de bodem en op de plantontwikkeling

Literatuuronderzoek

Guido Bakema, Gerben Bakker, Joost Cruijsen, Fenny van Egmond, Erik van den Elsen, Marius Heinen, Hannah Schneider



WAGENINGEN
UNIVERSITY & RESEARCH



De invloed van bodemverdichting op de water- en luchthuishouding in de bodem en op de plantontwikkeling

Literatuuronderzoek

Guido Bakema¹, Gerben Bakker¹, Joost Cruijssen¹, Fenny van Egmond¹, Erik van den Elsen¹, Marius Heinen¹, Hannah Schneider²

1 Wageningen Environmental Research

2 Centre for Crop Systems Analysis, Wageningen University

Dit onderzoek is uitgevoerd door Wageningen Environmental Research in het kader van het onderzoeksprogramma Bodemverdichting Verdiept (BoVer).

BoVer is een driejarig onderzoeksprogramma gesubsidieerd door de TKI Deltatechnologie.

Wageningen Environmental Research

Wageningen, januari 2023

Gereviewd door:

Simone Verzandvoort, onderzoeker Bodem, Water en Landgebruik (WENR)

Akkoord voor publicatie:

Mirjam Hack-ten Broeke, teamleider Bodem, Water en Landgebruik

Rapport 3225

ISSN 1566-7197

Bakema, G., G. Bakker, J. Cruijsen, F. van Egmond, E. van den Elsen, M. Heinen, H. Schneider, 2023. *De invloed van bodemverdichting op de water- en luchthuishouding in de bodem en op de plantontwikkeling; Literatuuronderzoek*. Wageningen, Wageningen Environmental Research, Rapport 3225. 76 blz.; 16 fig.; 3 tab.; 76 ref.

Dit rapport geeft de resultaten van een literatuurstudie dat bij aanvang van het project Bodemverdichting Verdiept (BoVer) is uitgevoerd. Op basis hiervan zijn ideeën voor vervolgonderzoek afgeleid.

Trefwoorden: bodemverdichting, doorlatendheidskarakteristiek, droge bulkdichtheid, waterretentiekarakteristiek, wortelontwikkeling, zuurstofdiffusie

Dit rapport is gratis te downloaden van <https://doi.org/10.18174/583342> 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.

© 2023 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 3225 | ISSN 1566-7197

Foto omslag: Verdichte bodem als gevolg van het oogsten onder te natte omstandigheden, Guido Bakema (2022)

Inhoud

Verantwoording	5
Woord vooraf	7
Samenvatting	9
1 Inleiding	11
1.1 Aanleiding	11
1.2 Probleemstelling	11
1.3 Doelstelling project BoVer	13
1.4 Opzet literatuuronderzoek	14
2 Het verdichtingsproces	15
2.1 Verdichting van bodems door machines	15
2.2 Implicaties voor vervolgonderzoek	17
3 De invloed van verdichting op de water- en luchthuishouding	18
3.1 Waterhuishouding	18
3.2 Luchthuishouding	21
3.3 Implicaties voor vervolgonderzoek	23
4 De gevolgen van bodemverdichting voor de wortelontwikkeling	24
4.1 Bodemverdichting beïnvloedt plantengroei en de beschikbaarheid van water en nutriënten	24
4.2 Reacties van individuele wortels op bodemverdichting	25
4.3 Reacties van volledige wortelstelsels op bodemverdichting	27
4.4 Ontrafelen van de responsen op beschikbaarheid van water, zuurstof en bulkdichtheid in verdichte bodems	28
4.5 Reacties van wortels op harde, droge bodems kunnen inzicht geven in reacties op bodemverdichting	29
4.6 Implicaties voor vervolgonderzoek	29
5 Laboratorium- en veldmetingen aan verdichte gronden	30
5.1 Laboratoriummetingen aan verdichte monsters	30
5.1.1 Verdichtingsproeven	30
5.1.2 Penetrologger	32
5.1.3 Zuurstofdiffusie	32
5.1.4 Waterretentie en doorlatendheid	33
5.2 Veldmetingen in verdichte bodems	34
5.2.1 Bodemorganische stof/koolstof	34
5.2.2 Penetratieweerstand en bulkdichtheid	35
5.2.3 Bodemvocht	36
5.2.4 Zuurstofgehalte en zuurstofdiffusie	38
5.2.5 Waarnemen van wortelgroei in kuilen	38
5.3 Implicaties voor vervolgonderzoek	39
6 Grenswaarden aan bodemverdichting	40
6.1 Grenswaarden	40
6.1.1 Bulkdichtheid	40
6.1.2 Luchtgevulde poriënvolume	41
6.1.3 Verzadigde doorlatendheid	41
6.1.4 Indringingsweerstand	41

	6.2	Implicaties voor vervolgonderzoek	42
7		Conclusies en aanbevelingen voor vervolgonderzoek	43
		Literatuur	46
Bijlage 1		Root System Responses to Soil Compaction	54
Bijlage 2		Bulkdichtheid	59

Verantwoording

Rapport: 3225

Projectnummer: 5200046430

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: Onderzoeker Bodem, Water en Landgebruik (WENR)

naam: Simone Verzandvoort

datum: december, 2022

Akkoord teamleider voor de inhoud,

naam: Mirjam Hack-ten Broeke, teamleider Bodem, Water en Landgebruik

datum: december, 2022

Woord vooraf

Bodemverdichting wordt gezien als een van de (inter)nationale bodembedreigingen. Een bekend voorbeeld van bodemverdichting is de ondergrondverdichting als gevolg van samendrukking door zware landbouwmachines; denk aan de term ploegzool. Vaak wordt in algemene termen het nadelige effect hiervan beschreven, zoals invloed op de water- en luchthuishouding en de beperking voor wortelgroei en gewasopbrengst.

Omdat er behoefte is om hierover meer kwantitatief inzicht te verkrijgen, is in 2021 door Wageningen Environmental Research (WENR) in samenwerking met diverse marktpartijen een voorstel ingediend bij het Topconsortium voor Kennis en Innovatie (TKI) Deltatechnologie voor het uitvoeren van een verdiepend onderzoek naar bodemverdichting. Dit project, genaamd Bodemverdichting Verdiept (BoVer), is in november 2021 goedgekeurd door de TKI-commissie. De partijen hebben hun samenwerking bekrachtigd via een samenwerkingsovereenkomst die getekend is op 1 mei 2022. Dit rapport is het resultaat van het vooronderzoek, waarin aanbevelingen zijn opgesteld voor het vervolg van het meerjarige onderzoeksproject.

Bij het vooronderzoek zijn de (tussentijdse) bevindingen en aanbevelingen voor verder onderzoek besproken met de betrokken partners: Departement Bodemfysica en Landbeheer van Wageningen Universiteit, Aequator Groen & Ruimte, Medusa Explorations, Cumela, Eijkelkamp Soil & Water, provincie Noord-Brabant, Cosun Beet Company, LTO Noord en IRS (kennis- en onderzoekscentrum voor de suikerbietenenteelt in Nederland).

Met dank aan Simone Verzandvoort voor de grondige review en de daarin gemaakte (tekstuele) suggesties en hulp bij het redigeren van de vertaling van Bijlage 1.

Samenvatting

Bodemverdichting wordt gezien als één van de (inter)nationale bodembedreigingen, ook in Nederland. Een bekend voorbeeld is de ondergrondverdichting door berijden met zware landbouwmachines (bijvoorbeeld ploegzool). Vaak wordt in algemene termen het nadelige effect hiervan beschreven, zoals invloed op de water- en luchthuishouding en de beperking voor wortelgroei en gewasopbrengst. Als opstart voor een meerjarig TKI-project is een literatuurstudie uitgevoerd op basis waarvan onderzoeksvragen zijn afgeleid voor het vervolg van dit project.

Over het algemeen kan gesteld worden dat het niet mogelijk is (gebleken) om vast te stellen welk deelproces – wateroverlast, zuurstoftekort, doorworteling – het dominantst is in de vaak waargenomen negatieve effecten van bodemverdichting op gewasontwikkeling. Het zal zeer waarschijnlijk een samenspel van factoren zijn die bepalen wat het nadelige effect op het gewas zal zijn. Het onderzoeken van dit samenspel zal dus ook lastig zijn. Daarom wordt voorgesteld om enkele deelaspecten nader te onderzoeken voor Nederlandse bodems en omstandigheden.

In de internationale literatuur zijn gegevens gepubliceerd waaruit duidelijk wordt dat de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken veranderen bij veranderde droge bulkdichtheid. Er zijn eenvoudige relaties voorgesteld die de vormparameters van deze karakteristieken beschrijven. Deze kunnen worden aangepast indien de droge bulkdichtheid verandert. Daarom wordt voorgesteld om voor een paar Nederlandse bodems na te gaan in hoeverre deze relaties ook hier van toepassing zijn. Wanneer deze relaties ook hier gelden, kunnen bestaande relaties, zoals in de Staringreeks, hierop aangepast worden en kunnen met behulp van simulatiemodellen de effecten van verdichting op de waterhuishouding van de bodem onderzocht worden.

Ook de zuurstofdiffusiecoëfficiënten van bodems worden beïnvloed door verandering van de droge bulkdichtheid, omdat het aandeel luchtgevulde poriën zal verminderen bij verdichting. Hiervoor zijn voor Nederlandse bodems in het verleden al relaties afgeleid. Deze kunnen dan worden meegenomen in simulatiemodellen om de invloed van bodemverdichting op zuurstofbeschikbaarheid in de wortelzone te simuleren.

Over het algemeen verminderen verdichte bodems de wortellengte en vergroten ze de worteldiameter. Dat kan gevolgen hebben voor de opname van water, nutriënten en zuurstof en kan leiden tot verminderde bovengrondse groei van het gewas.

Naast karakterisering van de hydrofysische eigenschappen in het laboratorium (inclusief zuurstofdiffusiecoëfficiënten) en de scenarioanalyses met simulatiemodellen (d.w.z. situaties zonder en met bodemverdichting met elkaar vergelijken), blijft het belangrijk om ook registraties in het veld (of soms in kassen) uit te voeren. Dat kan zijn het monitoren van water- en zuurstofgehalten in situaties met en zonder verdichting, het meten van de droge bulkdichtheid samen met de indringingsweerstand en registraties van effecten op de beworteling.

Het bepalen van de mate en de ernst van bodemverdichting wordt veelal gekoppeld aan de gevolgen voor de diverse bodemfuncties. Vaak wordt dan gekeken naar het luchtgevulde poriënvolume, de verzadigde doorlatendheid, de bulkdichtheid, pakkingsdichtheid en porositeit. Hiervoor worden in de literatuur grenswaarden voorgesteld, maar deze zijn vaak beperkt onderbouwd en meetwaarden zijn soms afhankelijk van de vochttoestand in de bodem.

De literatuurstudie heeft geresulteerd in de volgende conclusies en aanbevelingen voor vervolgonderzoek:

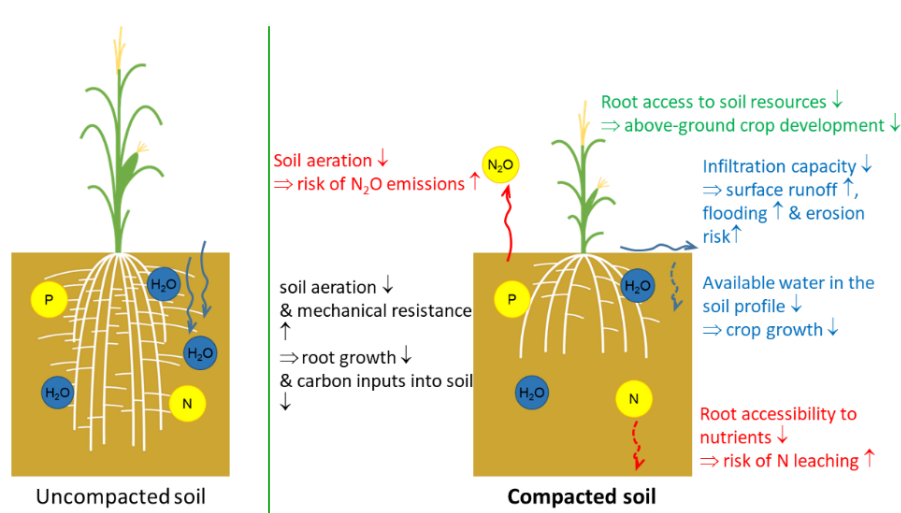
- De invloed van de verandering van droge bulkdichtheid op zuurstofdiffusie is voor Nederlandse bodems voldoende onderzocht.
- Aanvullende metingen zijn wenselijk van waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken bij zowel niet-verdichte als verdichte omstandigheden voor enkele Nederlandse gronden.
- Laboratoriumtesten onder geconditioneerde omstandigheden kunnen gevolgen van verdichtingsprocessen ontrafelen.
- Nieuwe meetmethoden zijn noodzakelijk om gevolgen van verdichting te meten.
- Veldexperimenten moeten relaties leggen tussen gewasontwikkeling en bodemfysische veranderingen.
- Koppeling tussen veld- en laboratoriumonderzoek moet duidelijk maken welke veldmetingen relevant zijn voor het aantonen van bodemverdichting.
- Verdichtingsproeven in het laboratorium moeten gerelateerd worden aan belastingspatronen in het veld.
- Invloed van verdichting op wortelgroei moet worden gemeten onder geconditioneerde omstandigheden.
- Grenswaarden voor bodemverdichting moeten meer gerelateerd worden aan gewasopbrengst.
- Scenarioberekeningen met simulatiemodellen, waarbij situaties zonder en met bodemverdichting worden vergeleken, geven inzicht in de invloed van bodemverdichting op de waterbalans in de bodem.

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Bodemverdichting is een van de belangrijkste bedreigingen voor het goed functioneren van de bodem voor de landbouw.¹ Verdichting zorgt voor een afname in kwaliteit van belangrijke bodemeigenschappen voor plantengroei, zoals water- en luchtdoorlatendheid, infiltratiecapaciteit, berging van water, bewortelbaarheid en zuurstofvoorziening. Hierdoor verminderen de productiviteit, gezondheid en biologische activiteit van de bodem en kunnen verliezen optreden van nutriënten en agrochemicaliën naar het oppervlaktewater. Verder zorgt de verslechterde doorlatendheid van de ondergrond ervoor dat bij heftige buien meer water oppervlakkig afstroomt en dat bij langdurige droogte planten worden belemmerd in hun groei (Figuur 1).

Door toename van de mechanisatie en intensivering van het landgebruik is bodemverdichting een proces dat voortduurt en waarvan de economische schade nu en in de toekomst steeds groter wordt.² Omdat het herstellen van een eenmaal verdichte bodem, met name van het gedeelte dat niet door grondbewerking wordt beïnvloed (30-50 cm -mv), niet of beperkt mogelijk is, is het belangrijk dat verdere bodemverdichting in de landbouw zo veel mogelijk wordt voorkomen. Preventie en opheffen van bodemverdichting vereisen mogelijk andere teelt- en oogstwijzen. Dit maakt het noodzakelijk om het proces van bodemverdichting en de gevolgen daarvan op de plantontwikkeling en waterhuishouding goed te begrijpen en te voorspellen.



Figuur 1 Effecten van bodemverdichting op bodemprocessen gerelateerd aan bodemfuncties (achter =>). Verwacht wordt dat zowel het drogere als het nattere toekomstige klimaat de verdichtingseffecten op de wortelgroei zal versterken als gevolg van ofwel een hogere mechanische weerstand van de bodem en verminderde waterbeschikbaarheid (verdichting in combinatie met droogte) ofwel een verminderde bodembeluchting (verdichting en natte periodes) (EJP Soil, SoilCOMPC, 2022).

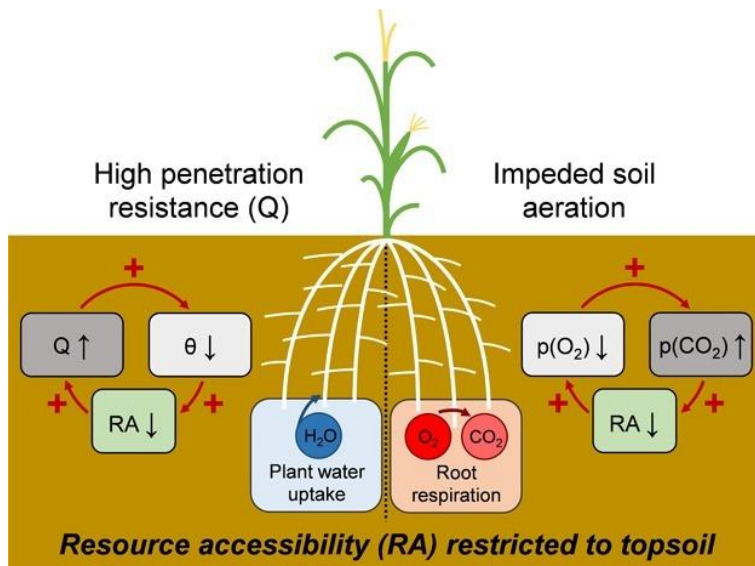
1.2 Probleemstelling

Het verdichten van de bodem heeft invloed op de gewasgroei. Deze kan worden gehinderd door beperking van de water- en luchthuishouding en bewortelbaarheid (Figuur 2 en Figuur 3). Welke van deze drie factoren

¹ In dit rapport ligt de focus op landbouw. Maar veel van de bevindingen kunnen ook gelden voor andere situaties, zoals in bosbouw, natuurgebieden, stadsparken etc.

² Zie o.a. <https://www.proeftuinprecisielandbouw.nl/maatregelen-tegen-bodemverdichting-verhogen-opbrengst-met-13/>

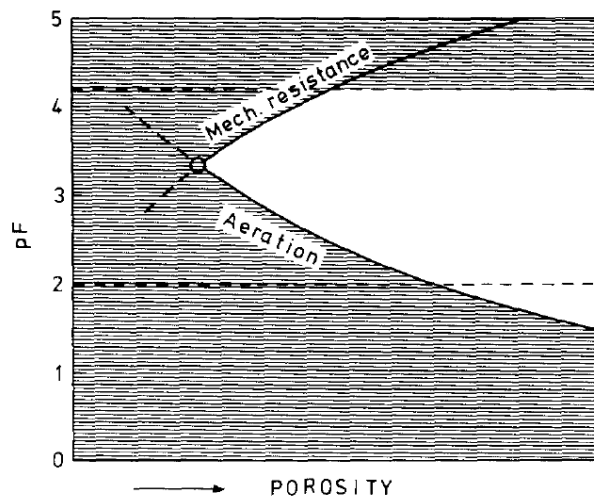
hierin het meest bepalend is en hoe deze verschillen voor de diverse grondsoorten en gewassen, is beperkt bekend. Boone (1988) en Håkansson and Lipiec (2000) hebben in hun onderzoeken al wel indicaties gegeven van hoe de diverse factoren afhankelijk zijn van de waterspanning en dichtheid/porositeit (Figuur 4, Figuur 5). Als onvoldoende bekend is welke factoren de plantengroei remmen, is het ook niet mogelijk om goed te kunnen beoordelen of een bodem als verdicht kan worden beschouwd en of dit geldt voor alle gewassen. Nu wordt in het veld bodemverdichting veelal bepaald aan de hand van droge bulkdichtheid en indringingsweerstand. Het blijkt echter dat deze twee waarden de vermindering van de plantengroei niet goed kunnen verklaren. Ook omdat, mits voorzien van voldoende water en nutriënten, planten zelfs in sterk verdichte gronden goed kunnen groeien.



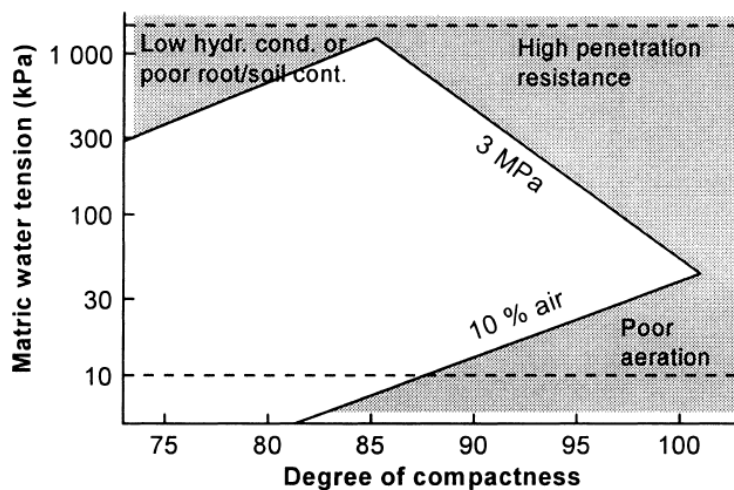
Figuur 2 Illustratie van terugkoppelingen tussen bodemfysische eigenschappen, d.w.z. indringingsweerstand en beluchting, en wortel-fysiologische processen in een verdichte bodem (pijl omhoog: neemt toe; pijl omlaag: neemt af). Wortelgroei en de beschikbaarheid van water en zuurstof zijn beperkt tot ondiepe bodemlagen. Dit beïnvloedt wateropname en wortelademhaling in de bovengrond (Colombi and Keller, 2019).



Figuur 3 Ondiepe beworteling en zuurstoftekort (blauwkleuring) als gevolg van verdichting (Foto: Aequator, 2021).



Figuur 4 Relatie tussen de porositeit en waterspanning (in pF) waarbij de luchthuishouding ('aeration') en mechanische weerstand ('mechanical resistance') de wortelgroei kunnen belemmeren. Wortelgroei is onvoldoende in het grijze gebied, boven pF 4,2 onmogelijk (Boone, 1988).



Figuur 5 Relatie tussen relatieve dichtheid (%) en waterspanning (in kPa) gerelateerd aan grenswaarden voor bodemverdichting. Het grijze gebied is de zone waarin er schade aan de plantengroei kan optreden als gevolg van lage waterdoorlatendheid, een slecht contact tussen wortelwand en bodem, een hoge indringingsweerstand of door slechte beluchting (Håkansson and Lipiec, 2000).

1.3 Doelstelling project BoVer

Het doel van het project Bodemverdichting Verdiept (BoVer) is het bepalen van de gevolgen die bodemverdichting op de plantengroei en op de water- en luchthuishouding heeft, waardoor:

- er beter voorspeld kan worden welke droogte- en natschade gewassen oplopen bij verdere bodemverdichting;
- er beter kan worden bepaald en gemeten welke bodems in welke mate zijn verdicht of gevoelig zijn voor verdichting;
- er gerichte maatregelen kunnen worden aangegeven om verdere bodemverdichting door landbouwvoertuigen en de negatieve gevolgen voor plantengroei te voorkomen.

Met als afgeleide doelen:

- Het ontwikkelen van een set veldmetingen (al dan niet in combinatie met laboratoriummetingen) om bodemverdichting in het veld vast te stellen.
- Het ontwikkelen en testen van laboratoriumexperimenten om de gevolgen van bodemverdichting op de waterretentie, zuurstofbeschikbaarheid en bewortelbaarheid te bepalen.
- Het op basis van laboratoriumexperimenten en modelberekeningen onderscheiden van de gevolgen van bodemverdichting voor de plantengroei door veranderingen in de waterretentiekarakteristiek, zuurstofbeschikbaarheid/zuurstofdiffusie en de bewortelbaarheid.
- Het bepalen van de gevolgen van bodemverdichting voor verschillende gewassen, verschillende gronden en bij diverse klimaatscenario's, met behulp van modelberekeningen van waterhuishouding en plantgroei (SWAP) en van verdichtingsrisico's (Terranimo).
- Het ontwikkelen van een set grenswaarden van bodemparameters waarmee kan worden bepaald in hoeverre een bodem is verdicht.

1.4 Opzet literatuuronderzoek

Naast het onderzoek binnen WENR wordt er internationaal veel onderzoek gedaan naar bodemverdichting en de gevolgen die dit heeft voor de plantengroei en de waterhuishouding. Het vooronderzoek is bedoeld om een overzicht te maken van de belangrijkste bevindingen, kennishiaten en onderzoeksmethoden voor de hoofdonderwerpen van het onderzoek. Dit helpt het BoVer-onderzoek meer richting te geven en te focussen op de belangrijkste hiaten en daarnaast om het onderzoek specifiek te maken voor Nederlandse omstandigheden. Het vooronderzoek is niet bedoeld om een uitputtende literatuurreview op te leveren. Via een scan van de belangrijkste literatuur is gepoogd om de belangrijkste feiten op een rijtje te zetten, waaruit vervolgens onderwerpen benoemd kunnen worden die nader onderzocht kunnen worden voor Nederlandse omstandigheden.

Daarnaast is ook een link gelegd met lopend onderzoek naar bodemverdichting binnen Nederlandse en Europese projecten, zoals:

- KLIMAP: In-situmeting van waterretentie op verdichte en niet-verdichte gronden (2021-2023);
- Raak-Pro/KIEM: Grootschalig onderzoek naar het meten van verdichting in Flevoland (2020-2022);
- EJP SOIL SOILCOMP: Internationaal onderzoek naar de gevolgen van verdichting op klimaatverandering (2021-2024);
- Bodemindicatoren voor Nederlandse Landbouwgronden (BLN): indicatoren voor fysieke kenmerken;
- Bedrijvennetwerk Bodemmetingen (BNBM): 32 percelen op 16 bedrijven in Nederland zijn gedurende meerdere jaren bemeten op bodemkwaliteit, incl. managementregistratie; testen van verschillende meettechnieken voor bulkdichtheid en vocht;
- Sensing the Soil, project van Plant Research (Randwijk) gericht op het meten van bodemeigenschappen in de boomteelt met 'nieuwe' technieken.

Leeswijzer

In dit vooronderzoek is in eerste instantie gekeken naar de grondmechanische processen die optreden tijdens belasting van de bodem in veld (hoofdstuk 2). Welke invloed die grondmechanische processen hebben op de water- en luchthuishouding in de bodem is beschreven in hoofdstuk 3. Hoofdstuk 4 gaat in op de invloed van de veranderende water- en luchthuishouding, in combinatie met een verhoogde mechanische weerstand op de wortelontwikkeling van planten. Vervolgens wordt in hoofdstuk 5 beschreven hoe de verdichting en de gevolgen daarvan voor de plantengroei in het laboratorium en in het veld kunnen worden aangetoond. Vervolgens wordt in hoofdstuk 6 weergegeven welke grenswaarden aan bodemfysische kenmerken worden gesteld om aan te tonen dat een bodem al dan niet als verdicht kan worden beschouwd. Ten slotte wordt in hoofdstuk 7 een vertaling gemaakt van de conclusies van dit vooronderzoek naar het vervolg van het BoVer-onderzoek. Hoofdstuk 4 over de plantontwikkeling was oorspronkelijk geschreven in het Engels; de originele tekst is opgenomen in Bijlage 1. Bijlage 2 is een weergave van een separaat onderzoek (niet eerder gepubliceerd) dat in 2021 is uitgevoerd naar de relatie tussen droge bulkdichtheid en bodemverdichting.

2 Het verdichtingsproces

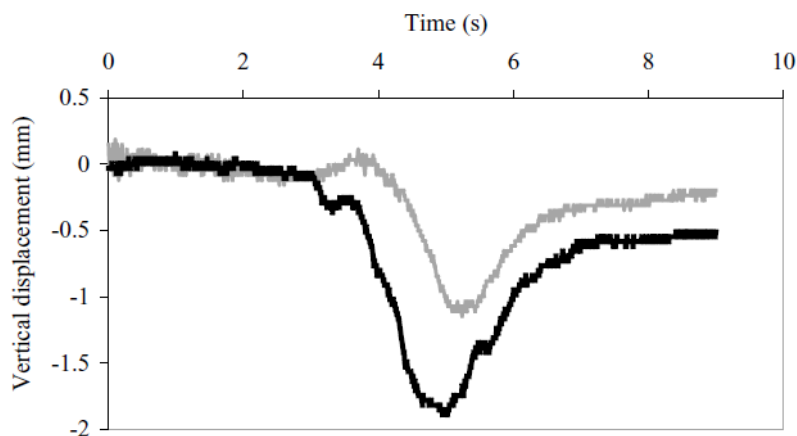
2.1 Verdichting van bodems door machines

Bodemstructuur is de onderlinge rangschikking en samenhang van de vaste bodemdelen; de luchtfractie tussen de vaste delen is het poriënstelsel (porositeit). De droge bulkdichtheid van een bodem is gedefinieerd als de massa van de bodem gegeven een bekend volume: g cm^{-3} . De rangschikking en samenhang kan op diverse manieren verstoord worden. Door ploegen of andere grondbewerkingen wordt de grond losser gemaakt en neemt de dichtheid af. Daarna zal door natuurlijke zetting en de impact van neerslag de dichtheid langzaam weer toenemen. Dat proces wordt meestal consolidatie genoemd. Wanneer door externe belasting de rangschikking en samenhang veranderen, bijvoorbeeld door het berijden met landbouwvoertuigen of door vertrapping van vee, neemt de dichtheid toe. Dit wordt bodemverdichting genoemd. In eerste instantie zal bij verdichten het aandeel poriën kleiner worden (afname porositeit). Dat deelproces wordt aangeduid met compactie (Eng: *compaction*) en gaat gepaard met een toename in droge bulkdichtheid. Bij verdere belasting kan ook de samenhang tussen de vaste bodemdelen veranderen. Dat deelproces wordt aangeduid met verschuiving of afschuiving (Eng: *shear*) en gaat meestal niet gepaard met een duidelijke verandering in droge bulkdichtheid. Het project BoVer richt zich vooral op het deelproces bodemverdichting waarbij de dichtheid verandert (compactie). Verdichting in het bovenste deel van een bodemprofiel kan makkelijk verholpen worden door grondbewerking (bovengrond), maar verdichting onder de gangbare grondbewerkingsdiepte (ondergrond) is permanenter van karakter en kan daarmee langer van invloed zijn op het functioneren van de bodem. In BoVer ligt de nadruk op die ondergrondverdichting.

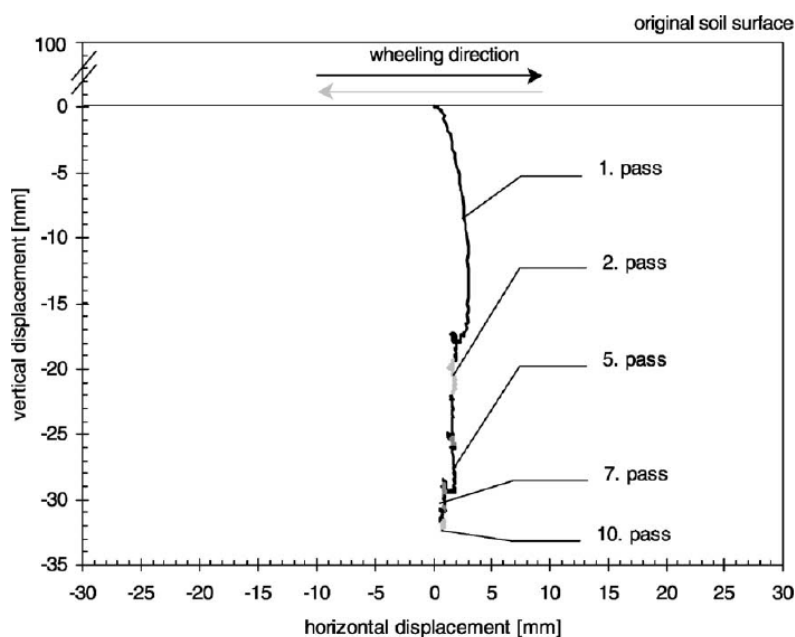
Bodemverdichting is het samendrukken van de bodem onder invloed van druk. Dit proces vindt plaats in ruimte en tijd en kan zowel elastisch als plastisch zijn (Schjønning et al., 2015). Bodems met intensief landgebruik ervaren vaak een grotere druk met zwaardere verdichtingsgraden tot gevolg (Håkansson, 1990). Deze verdichting wordt vaak veroorzaakt door machines en andere veldwerkzaamheden in de landbouw. Daarom wordt intensieve landbouw gezien als een van de grootste oorzaken van bodemverdichting (Håkansson, 1990; Hamza and Anderson, 2005; Batey, 2009).

Keller et al. (2004) laten zien dat het proces van indrukking en opveren van de bodem als gevolg van een passage van zware machines slechts enkele seconden duurt en dat een deel van de verdichting permanent (plastisch) (Figuur 6) kan zijn. Bij een herhaalde belasting zal de bodem steeds verder samengedrukt worden (Horn et al., 2003), waarbij de verticale verplaatsing veel groter is dan de horizontale verplaatsing (Figuur 7). In de eerste fase van verdichting bestaat het verdichtingsproces vooral uit het verminderen van het poriënvolume (compactie); later in het verdichtingsproces kunnen schuifspanningen ervoor zorgen dat de bodemstructuur gaat veranderen (vervorming). Het verschil in deformatie kan verschillende gevolgen hebben voor de water- en luchthouding (Figuur 8). Compactie (*strain* in Figuur 8) zorgt voor hogere dichtheden, terwijl schuifspanning (*shear* in Figuur 8) de bodemstructuur kan veranderen zonder verdere vergroting van de bulkdichtheid. Een eerste indicatie daarvoor wordt gevonden in het onderzoek van Whalley et al. (2012). Zij hebben door middel van tri-axiaaltesten in het laboratorium aangetoond dat de waterdoorlatendheid bij verzadiging sterker afneemt voor gronden die onderhevig zijn aan schuifspanning dan voor gronden die alleen zijn samengedrukt.

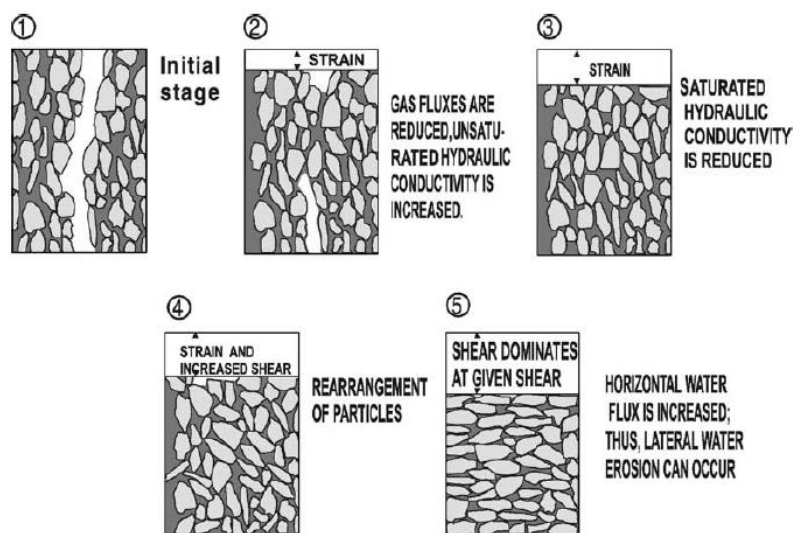
Naast compactie en schuifspanning kunnen ook trillingen van machines van invloed zijn op het verdichtingsproces in de bovengrond, veelal onder natte omstandigheden (Wong and Preston-Thomas, 1983; Shah et al., 2017)). Dit fenomeen is relatief weinig onderzocht voor ondergronden; wel wordt trillen toegepast bij het versnellen van verdichting van zandlichamen. Voor de diepere ondergrond ($> 0,3 \text{ m}$) wordt verondersteld dat trillingen weinig tot geen invloed te hebben op de verdichting (Van den Akker, 2022, persoonlijke mededeling).



Figuur 6 Verticale verplaatsing in de bodem als gevolg van een korte wielbelasting op 0,5 m -mv (grijs) en 0,7 m -mv (zwart), bij een wiellast van 4 MPa en bandenspanning van 1,4 bar (bron: Keller et al., 2004).



Figuur 7 Horizontale en verticale verplaatsing in de bodem op 15 cm diepte als gevolg van herhaalde belasting (aantal passages) in een 'Hiwassee clay', bij $pF = 3$. (bron: Horn et al., 2003).



Figuur 8 Verandering van fysische eigenschappen als gevolg van verschillende deformatieprocessen; strain: compactie en shear: vervorming als gevolg van schuifspanning (bron: Horn et al., 2003).

2.2 Implicaties voor vervolgonderzoek

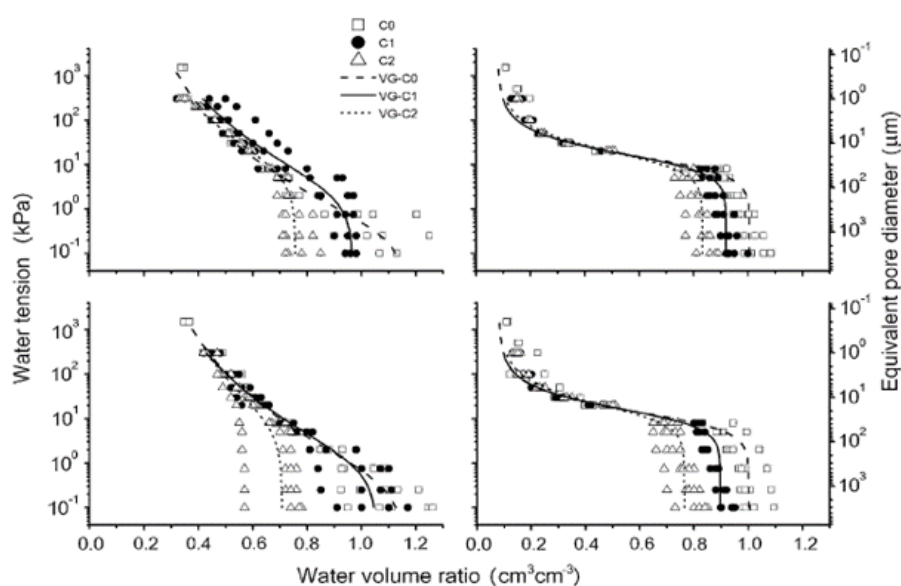
De wijze waarop een bodem wordt verdicht, is van grote invloed op de bodemeigenschappen. Bij verdichting door machines gaat het om een snelle belasting die herhaaldelijk wordt uitgevoerd. Ook heeft de bodem de mogelijkheid na de snelle belasting weer op te veren. Dit belastingspatroon is sterk afwijkend van een belasting door een permanente last, zoals een zandlichaam. Dit betekent dat de laboratorium- en veldtesten die gedaan worden in het project BoVer het te onderzoeken belastingspatroon moeten volgen. Ook zal in de testen de belasting moeten aansluiten bij de krachten die in de bodem kunnen optreden (zie ook paragraaf 5.1).

3 De invloed van verdichting op de water- en luchthuishouding

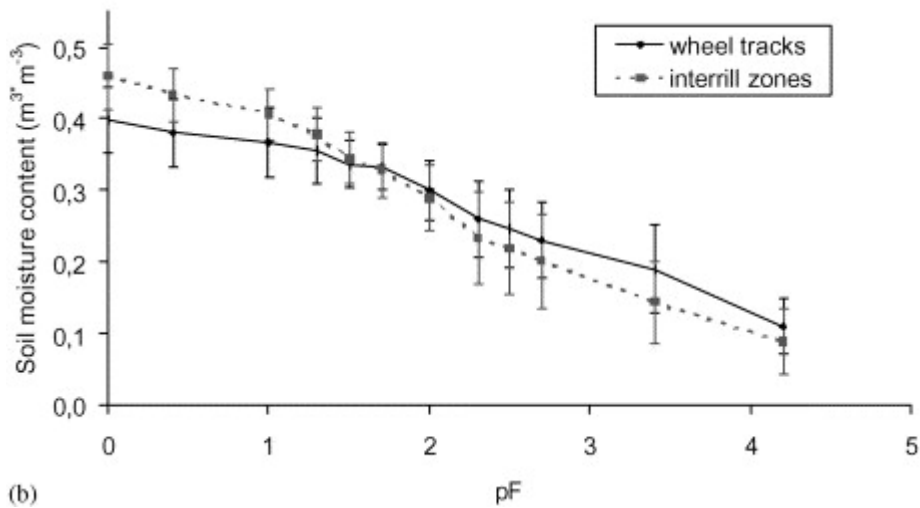
3.1 Waterhuishouding

Verdichting verandert de fysieke eigenschappen van de bodem, zoals de porositeit en de droge bulkdichtheid (Håkansson and Lipiec, 2000; Nawaz et al., 2013; Van den Akker et al., 2013; Van den Akker, 2019). Deze parameters beïnvloeden de waterhuishouding van bodems (Schaap and Van Genuchten, 2006; Assouline, 2006a, b). Hamza and Anderson (2005) hebben aangetoond dat bodemverdichting door landgebruik negatieve effecten kan hebben op het landgebruik zelf, bijvoorbeeld door afnemende gewasopbrengsten en wateroverlast.

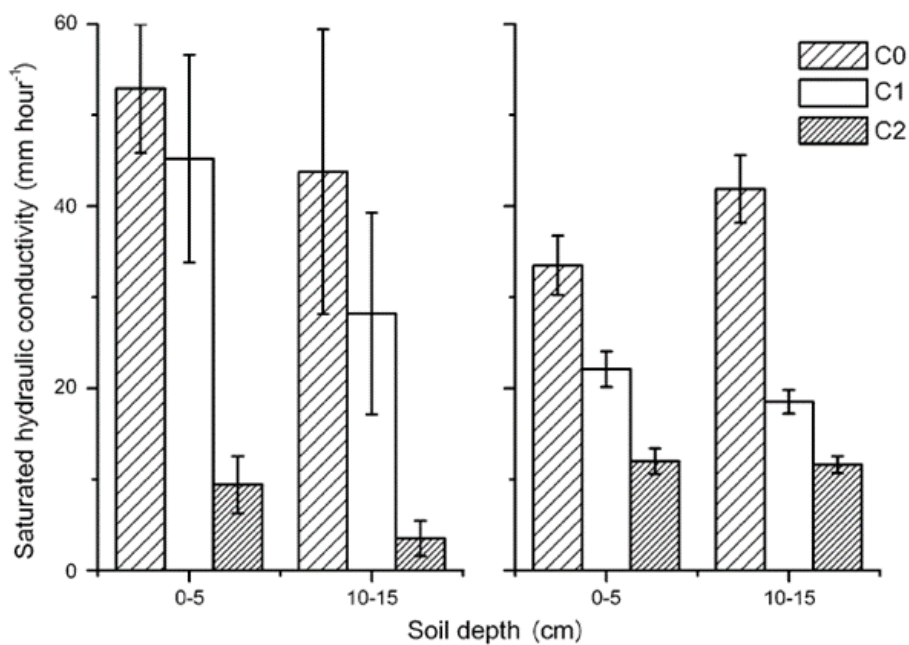
Veranderingen in droge bulkdichtheid en porositeit als gevolg van bodemverdichting leiden ook tot veranderingen in waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken. Zhang et al. (2006) laten bijvoorbeeld zien dat verschillen in droge bulkdichtheid vooral leiden tot verschillen in waterretentie nabij verzadiging (Figuur 9). De gefitte Van Genuchten-curves wijken daar af, maar komen weer dicht bij elkaar in het droge deel van de waterretentiekarakteristiek. De verdichting had vooral impact op de Van Genuchtenparameters θ_s en α (Van Genuchten, 1980): beide worden kleiner bij een toename in de droge bulkdichtheid. Van Dijck and van Asch (2002) lieten zien dat de onder bandesporen de watertentiekarakteristiek op vergelijkbare wijze verandert (Figuur 10). De waterdoorlatendheid bij verzadiging nam duidelijk af bij toename in de dichtheid (Figuur 11). De curves die de onverzadigde doorlatendheid beschrijven (gemeten met de hete-luchtmethode), laten minder uitgesproken verschillen zien tussen de situaties met verschillende droge bulkdichtheid (Figuur 12).



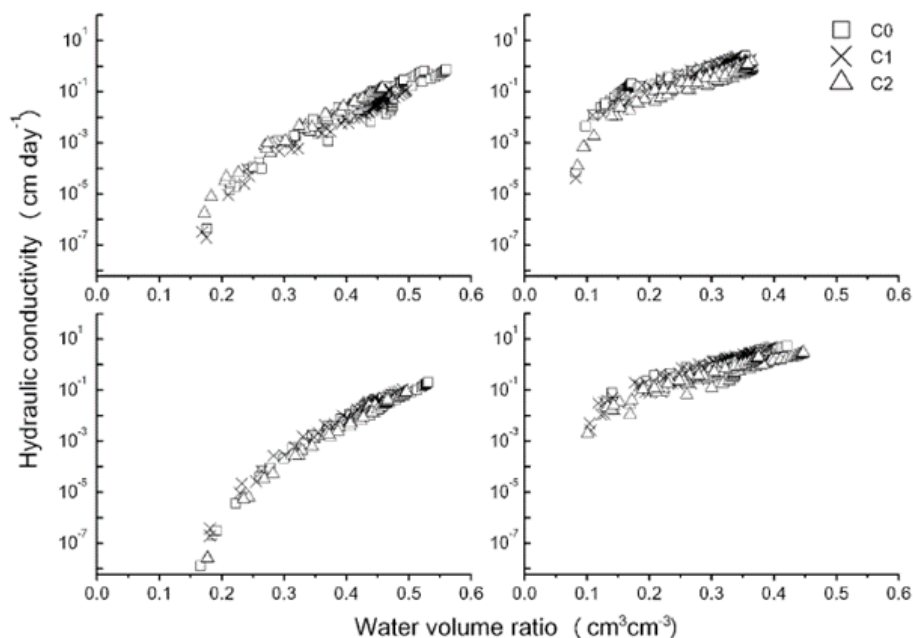
Figuur 9 Gemeten (symbolen) waterretentiekarakteristieken (4-voud) voor twee bodems (kolommen) op twee dieptes (bovenste rij: 0-5 cm, onderste rij: 10-15 cm) bij drie droge bulkdichtheden (C0: controle; C1: +10% van de droge bulkdichtheid bij C0; C2: +20%). De lijnen zijn gefitte Van Genuchten-relaties per droge bulkdichtheid (Bron: Zhang et al., 2006, Figure 1).



Figuur 10 Gemeten waterretentiecurves in monsters genomen onder een bandespoor (wheel track) en tussen bandensporen (interrill zone) (Bron: Van Dijck and Van Asch, 2002, Figure 7b).



Figuur 11 Gemeten doorlatendheid bij verzadiging voor twee bodems op twee dieptes bij drie droge bulkdichtheden (C0: controle; C1: +10% van de droge bulkdichtheid bij C0; C2: +20%) (Bron: Zhang et al., 2006, Figure 2).



Figuur 12 Gemeten onverzadigde doorlatendheid als functie van het watergehalte voor twee bodems op twee dieptes bij drie droge bulkdichtheden (C0: controle; C1: +10% van de droge bulkdichtheid bij C0; C2: +20%) (Bron: Zhang et al., 2006, Fig. 3).

Uit bovengenoemde onderzoeksresultaten valt op te maken dat bodemverdichting vooral impact heeft op de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken in het natte traject (bijvoorbeeld voor drukhoogten in de range 0 tot 100 cm). Dat past bij de bevindingen van anderen, zoals Ngo-Cong et al. (2021), Panayiotopoulos et al. (2003), Matthews et al. (2010) en Stange and Horn (2005). In de literatuur wordt ook aandacht besteed aan hoe de mate van verdichting kan worden gebruikt om de beschrijvende relaties voor deze karakteristieken (bijv. De Mualem (1976)-Van Genuchten (1980) relaties) hierop aan te passen; zie bijv. Assouline (2006a, b), Tian et al. (2018; 2019), Kool et al. (2019), Ngo-Cong et al. (2021), Zhang et al. (2006), Stange and Horn (2005) (zie Tabel 1). Daarnaast worden deze parameters soms via pedotransferfuncties berekend op basis van onder meer de droge bulkdichtheid (bijvoorbeeld Tian et al., 2021; zie ook Wösten et al., 2001).

In Nederland worden de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken gemeten aan in-situ monsters (d.w.z. bij de heersende droge bulkdichtheid) en deze worden beschreven met de Mualem-Van Genuchten-relaties (Bakker, 2022). Voor monsters die tot dezelfde textuurklasse behoren, zijn hieruit gemiddelde relaties berekend: de Staringreeks (Heinen et al., 2020). Bij het afleiden van de Staringreeks worden monsters met verschillende droge bulkdichtheden gemiddeld. Het is niet duidelijk wat het effect hiervan is op het middelingsproces.

Wanneer de hydrofysische eigenschappen van de bodem veranderen, veranderen daaruit afgeleide kengetallen ook, zoals beschikbaar water voor de planten, de kritieke z-afstand of de kritieke flux (Heinen et al., 2021).

Tabel 1 Voorbeeld van enkele relaties in de literatuur voor verandering van de Mualem(1976)-Van Genuchten (1980) parameters (θ_r , θ_s , α , n , K_s , λ) bij toename van de droge bulkdichtheid ρ (verdichting). Het subscript c verwijst naar de verdichte situatie. θ_r is het residueel volumetrisch watergehalte ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), θ_s is het volumetrisch watergehalte bij verzadiging ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), α is een vormparameter (cm^{-1}), n is een vormparameter (dimensieloos), K_s is de doorlatendheid bij verzadiging (cm d^{-1}) en λ is een vormparameter (dimensieloos).

Parameter	Relatie	Referentie en opmerking
θ_r	$\theta_{r,c} = \theta_r \frac{\rho_c}{\rho}$	Assouline (2006a); Tian et al. (2018); Kool et al. (2019); Ngo-Cong et al. (2021)
θ_s	$\theta_{s,c} = \theta_s \left(\frac{\rho_s - \rho_c}{\rho_s - \rho} \right)$ $= \theta_s \left(\alpha - \beta \left(\frac{\rho_c}{\rho} \right) \right)$	Assouline (2006a); Tian et al. (2018); Kool et al. (2019); Ngo-Cong et al. (2021) $\beta = \frac{1}{\frac{\rho_s}{\rho} - 1}$; $\alpha = \frac{\rho_s}{\rho} \beta$
α	$\alpha_c = \alpha \left(\frac{\rho_c}{\rho} \right)^{-\omega}$	Tian et al. (2018), Kool et al. (2019); zij geven $\omega = 3.97$ Volgens Ngo-Cong et al. (2021), Zhang et al. (2006) en Stange and Horn (2005) neemt α af bij toenemende ρ
n	$(n_c - 1) = (n - 1) \left(\frac{\rho_c}{\rho} \right)^\varepsilon$	Tian et al. (2018), Kool et al. (2019); zij geven $\varepsilon = -0.97 + 1.28 f_{\text{silt}}/f_{\text{clay}}$ Volgens Ngo-Cong et al. (2021) verandert n nauwelijks of niet bij toenemende ρ Volgens Zhang et al. (2006) nam n iets toe bij lichte toename van ρ , maar nam vervolgens weer af bij verdere toename van ρ Volgens Stange and Horn (2005) is bij toenemende ρ er soms sprake van toename in n , soms van een lichte toename gevolgd door lichte afname, en soms van slecht minimale verandering in n
	$n_c = n + (\rho_c - \rho) \left(\frac{n - n_{\text{match}}}{\rho - \rho_{\text{match}}} \right)$	Kool et al. (2019); vraagt om extra metingen om n_{match} bij ρ_{match} vast te stellen
	$n = A\rho + B$	Tian et al. (2018); voldeed minder goed dan de eerste vergelijking voor n (NB Er worden geen waarden voor A en B gegeven)
K_s	$K_{s,c} = K_s \left(\frac{\theta_{s,c}}{\theta_s} \right)^3 \left(\frac{\rho_c}{\rho} \right)^{\delta-7}$	Assouline (2006b): hierin worden ook enkele andere relaties gegeven; voor zijn data vond hij $\delta = 4$ Andere relaties: Tian et al. (2019); Ngo-Cong et al. (2021)
λ	$\lambda_c = \lambda$	Geen literatuur gevonden waarin deze parameter wordt bijgesteld. Dit veronderstelt impliciet dat de vorm van de poriëngrootteverdeling nauwelijks verandert bij verdichting.

3.2 Luchthuishouding

De hiervoor genoemde verandering in droge bulkdichtheid en porositeit is ook van invloed op de luchthuishouding van de bodem. Verdichting veroorzaakt een lagere connectiviteit en continuïteit van de poriën met gereduceerd luchttransport als gevolg (Keller et al., 2017; Kuncoro et al., 2014). Dit kan leiden tot lagere zuurstofconcentraties in de bodemlucht (Horn and Smucker, 2005; Tracy et al., 2011; Kuncoro et al., 2014; Keller et al., 2017). Planten kunnen meerdere keren per jaar last ondervinden van de fysieke weerstand en lagere zuurstofconcentraties (Colombi et al., 2018; Stepniewski et al., 1994) en kunnen binnen uren tot dagen reageren op deze weerstand uit de bodem of zuurstofstress in de bodemlucht (Benghough et al., 2011; Young et al., 1997; Dresboll et al., 2013). Deze beperkingen kunnen leiden tot minder lengtegroei, het oppervlakkig(er) groeien en het uitstellen van de groei van zijwortels (Botta et al., 2010; Colombi et al., 2018; Colombi and Walter, 2015). Het is moeilijk een restrictie in de groei van een plant door luchtbelemmering te onderscheiden van een restrictie door fysieke weerstand. Daarom is het belangrijk om alle mogelijke belemmeringen voor wortels te begrijpen, zowel fysieke belemmeringen als belemmeringen in de beschikbaarheid van water en lucht (zie verder hoofdstuk 4).

De luchtgevulde porositeit en de gasdiffusiecoëfficiënt zijn wellicht de beste indicatoren voor de bodemluchthuishouding in het veld (Stepniewski et al., 1994). Hiernaast is de luchtdoorlatendheid een goede indicator voor hoe gevoelig de macroporiën zijn voor verdichting (Stepniewski et al., 1994).

Door Pulido Mancado et al. (2020) is gekeken naar de invloed van verdichting op de luchtgevulde porositeit. Zij lieten zien dat verdichting het luchtgevulde volume in de bodem en de poriën betrokken in transport verkleinde. Er werd tevens aangetoond dat na verdichting verticale arteriële³ poriën meer van belang worden in het transport, met als mogelijke reden dat overige poriën verdicht zijn geraakt of afgesneden zijn. Dit is in overeenstemming met gegevens uit Schjonning et al. (2019). Het duidt ook op het anisotrope karakter van de luchtdoorlatendheid (Dorner and Horn, 2009).

Voor Nederlands akkerbouwgronden hebben Bakker et al. (1987) relaties afgeleid voor de zuurstofdiffusiecoëfficiënt als functie van het luchtgevulde poriënvolume. Hoe lager het luchtgevulde poriënvolume, des te geringer is de zuurstofdiffusiecoëfficiënt. Zij vonden dat dit sterk niet-lineaire afhankelijkheden betrof, die goed door machtsrelaties beschreven konden worden (Tabel 2). In duidelijk krimpemde en scheurende gronden past geen van deze relaties. Hier kan één volumeprocent scheuren de diffusiecoëfficiënt doen toenemen van nul tot waarden die ruimschoots voldoende zijn voor het normaal noodzakelijke gastransport (Bakker et al., 1987).

In deze relaties is steeds ook de zuurstofdiffusiecoëfficiënt in vrije lucht aanwezig: $D_0 = 0.2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. De temperatuurafhankelijkheid kan worden meegenomen door D_0 te beschouwen als een functie van de temperatuur. Bakker et al. (1987) geven daarvoor de factor $(T/T_{\text{ref}})^{1.72}$, waarbij T in Kelvin en $T_{\text{ref}} = 293 \text{ K}$. Bartholomeus et al. (2008) gebruikten daarvoor de factor $(T/T_{\text{ref}})^3$. Diffusie van zuurstof via de waterfase wordt verwaarloosd, omdat de diffusiecoëfficiënt voor zuurstof in water vele malen kleiner is dan die in de luchtfase (circa $0.2 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$).

Tabel 2 Relaties voor de zuurstofdiffusiecoëfficiënt in Nederlandse akkerbouwgronden zoals gerapporteerd door Bakker et al. (1987), met D de zuurstofdiffusiecoëfficiënt ($\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$, bij 20°C ; waarbij ter vergelijking de D in vrije lucht gelijk is aan $D_0 = 0.2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) en ϕ het luchtgevuld poriënvolume ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$).

Bodemsoort	Relatie
Enkelkorrelstructuren van humus en humusarme zanden	$D = 0.3 \cdot 10^{-4} \phi^3$
Enkelkorrelstructuren van lemige zanden en lichtere zavel	$D = 1.5 \cdot 10^{-4} \phi^4$
	of
	$D = 0.2 \cdot 10^{-4} \left(\frac{(\phi - 0.1)}{(1 - 0.1)} \right)^2$
Zwak en matig geaggregeerde bouwvoren van zavel en humeuze zanden en ondergronden van zavel	$D = 0.5 \cdot 10^{-4} \phi^3$
	of
	$D = 0.2 \cdot 10^{-4} \left(\frac{(\phi - 0.05)}{(1 - 0.05)} \right)^2$
Duidelijk geaggregeerde zavel en klei	$D = 0.4 \cdot 10^{-4} \phi^{2.5}$
	of
	$D = 0.2 \cdot 10^{-4} \left(\frac{(\phi - 0.025)}{(1 - 0.025)} \right)^2$
Verdichte zavel en klei waarin gangen en scheurtjes voorkomen, zoals in ploegzolen en langdurig niet-bewerkte bouwvoren	$D = 0.06 \cdot 10^{-4} \phi^{1.5}$

Pulido Mancado et al. (2020) lieten ook zien dat de gasdiffusiecoëfficiënt van de bodem exponentieel toeneemt met luchtgevulde porositeit. Hiernaast hebben zij ook gekeken naar de verhouding tussen de Darcy- en non-Darcy-luchtdoorlatendheid bij een verdichte situatie en een controlesituatie. De Darcy-luchtdoorlatendheid was in alle gevallen groter dan de non-Darcy-luchtdoorlatendheid en werd alleen maar

³ Er wordt gesproken over 'arterial' en 'marginal' pore space. De eerste slaat op poriën die zich in een systeem van grotere aders bevinden en 'marginale' slaat op de overalporositeit.

groter naarmate de doorlatendheid van de bodem steeg. De verhouding tussen deze doorlatendheden kan mogelijk ook van belang zijn om luchthuishouding te beoordelen.

In paragraaf 6.1.2 worden grenswaarden gegeven voor minimale en gewenste zuurstofdiffusiecoëfficiënten en luchtgevulde poriënvolumes.

3.3 Implicaties voor vervolgonderzoek

Verdichting verandert fysiek de eigenschappen van de bodem met als gevolg een hogere bulkdichtheid. Deze verhoging in bulkdichtheid verandert de manier waarop water en lucht door de bodem kunnen bewegen en beïnvloedt zo ook mogelijk de ontwikkeling van de plant.

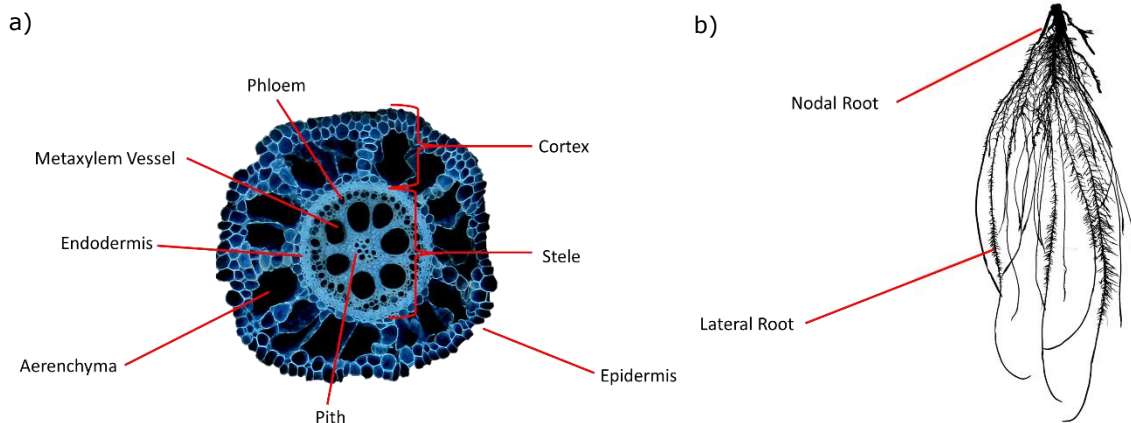
De fysieke veranderingen veranderen ook de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van de bodem. De relatie tussen verandering in bulkdichtheid en de verandering van deze karakteristieken is reeds onderzocht in andere landen, maar is nog niet gevalideerd voor situaties in Nederland. Met behulp van gegevens uit het laboratorium (zie paragraaf 5.1) en het veld (zie paragraaf 5.2), aangevuld met modelleerexercities, kunnen de elders gevonden relaties gevalideerd dan wel aangepast worden zodat deze ook bruikbaar worden voor bodems in Nederland. Veldmetingen van watergehaltes en/of drukhoogtes kunnen vervolgens gebruikt worden om modelvoorspellingen te toetsen. Indien blijkt dat de invloed van een veranderde droge bulkdichtheid door dergelijke functionele relaties kan worden beschreven, dan kunnen die ook voor andere bodemlagen in Nederland worden toegepast in scenarioberekeningen met een simulatiemodel (zie bijvoorbeeld Groenendijk et al., 2017).

De Staringreeks is samengesteld op basis van waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van individuele grondmonsters (Heinen et al., 2020). Elk monster heeft daarbij een eigen droge bulkdichtheid. Binnen een bouwsteen van de Staringreeks zijn meerdere karakteristieken beschikbaar die onderling een spreiding vertonen. Met de in de literatuur gevonden invloed van droge bulkdichtheid op deze karakteristieken kan worden nagegaan of de spreiding binnen bouwstenen voor een deel kan worden verklaard door de verschillen in droge bulkdichtheid door deze karakteristieken te normaliseren voor een standaard droge bulkdichtheid. Als een dergelijke standaardisatie leidt tot veranderingen in de gemiddelde Staringreeks hydrofysische eigenschappen, dan zal vervolgens nagegaan moeten worden of dit invloed heeft op de fysische kengetallen op basis waarvan de bodemfysische eenhedenkaart (BOFEK; Heinen et al., 2021) is afgeleid.

Omdat voor Nederlandse gronden reeds uitgebreid de relatie tussen zuurstofdiffusie en luchtgevuld poriënvolume is bestudeerd (Bakker et al., 1987), is er geen noodzaak om hiervoor aanvullende laboratoriummetingen uit te voeren. Wel is het goed om in het veld zuurstofgehaltes te meten, zodat deze gebruikt kunnen worden om modelvoorspellingen van zuurstofgehaltes te toetsen. Voor het simuleren van de zuurstofconcentratie in de bodem met het model SWAP (Kroes et al., 2017) is het van belang dat de macroscopische zuurstofdiffusie dynamisch wordt uitgevoerd (huidig: sequentie van statische zuurstofprofielen) en dat rekening wordt gehouden met de bodemtemperatuur; immers, de diffusiecoëfficiënt is temperatuurafhankelijk.

4 De gevolgen van bodemverdichting voor de wortelontwikkeling

Onderstaande tekst is een geredigeerde DeepL-vertaling (<https://www.deepl.com/translator>) van de oorspronkelijke Engelstalige tekst zoals opgenomen in Bijlage 1. In de tekst worden enkele specifieke wortelfysiologietermen worden gebruikt die zijn afgebeeld in Figuur 13.



Figuur 13 Duiding van enkele specifieke wortelfysiologische termen in a) dwarsdoorsnede en b) lengte.

4.1 Bodemverdichting beïnvloedt plantengroei en de beschikbaarheid van water en nutriënten

Opbrengstverliezen door verdichting worden geschat op 25% bij eenjarige gewassen (Barken et al., 1987; Arvidsson, 1999). Bodemverdichting heeft echter meestal meer invloed op de groei van wortels dan van scheuten (Correa et al., 2022). Lagere opbrengsten zijn een gevolg van verminderde wortelgroei door fysieke beperkingen in de bodem en een daardoor verminderde water- en nutriëntenopname door wortels (Passioura, 2002; Lipiec et al., 2012; Grzesiak et al., 2013). Mechanische belemmering van de wortelgroei treedt op als er beperkte poriënruimte is om bodemdeeltjes op te nemen die verplaatst worden doordat de punt van de wortel groeit (Hamza en Anderson, 2005; Batey, 2009; Valentine et al., 2012; Suzuki et al., 2013; Hernandez-Ramirez et al., 2014). Een mechanische belemmering in de bodem kan de uitgroei en het langer worden van wortels onderdrukken. Daardoor worden de doorworteling, de opname van water en nutriënten en de productiviteit van agro-ecosystemen beperkt (Yamaguchi en Tanaka, 1990; Lipiec en Hatano, 2003; Batey, 2009). Behalve een belemmerde wortelgroei is er in verdichte bodems ook invloed op de waterdoorlatendheid van de bodem, de waterbergingscapaciteit, de diffusie en doorlatendheid voor gassen, de nutriëntencyclus en de habitat van bodemorganismen (Tracy et al., 2011; Keller et al., 2019).

Planten zoeken naar nutriënten en water in de matrix van bodemdeeltjes. Deze heeft een structuur die heterogeen is in de ruimte en die verandert in de tijd. De indringingsweerstand bepaalt hoe toegankelijk de bodem is voor plantenwortels en welke energie nodig is om water en nutriënten op te nemen. Water en nutriënten verschillen in hun mobiliteit in de bodem; in het algemeen kunnen ze worden ingedeeld als 'mobiel' of 'immobiel'. Water verplaatst zich gemakkelijk door landbouwgronden en is over het algemeen meer aanwezig op grotere diepte in de bodem (behalve bij periodieke droogtestress en in geïrrigeerde landbouw in droge gebieden). Nutriënten die in water oplosbaar zijn en niet gemakkelijk door de bodem worden gebonden, zoals sulfaat en nitraat, spoelen gemakkelijk uit. Deze nutriënten zijn over het algemeen op grotere diepte beschikbaar. Fosfor is echter immobiel in de bodem. Het hoopt zich op in de bovengrond en spoelt nauwelijks uit naar de ondergrond. Het maakt dus uit of de wortelgroei wordt verhinderd in de

bovengrond of in de ondergrond in hoeverre water en specifieke nutriënten in de bodem toegankelijk zijn voor planten (Barber, 1995).

Een mechanische weerstand van $>0,8\text{--}2\text{ MPa}$ is over het algemeen voldoende om het langer worden van wortels en het ontstaan van axiale en nodale wortels te verhinderen bij zowel een- als tweezaadlobbige plantensoorten. Wortelgroei kan volledig stoppen bij een weerstand van $\sim 5\text{ MPa}$ (Atwell, 1993; Passioura, 2002; Bengough et al., 2011; Coelho Filho et al., 2013; Grzesiak et al., 2013; Pfeifer et al., 2014b; Colombi and Walter, 2015). Bij waarden van de (droge) bulkdichtheid van $1,39\text{--}1,49\text{ g cm}^{-3}$ in kleigronden en $1,69\text{ g cm}^{-3}$ in zandgronden begint de wortelgroei te verminderen (Pierce et al., 1983). Wortels kunnen niet meer groeien of indringen in de bodem bij waarden van de bulkdichtheid tussen $\sim 1,47\text{--}1,58\text{ g cm}^{-3}$ in kleigronden (afhankelijk van het percentage klei) en $1,85\text{ g cm}^{-3}$ in zandgronden (Pierce et al., 1983). Als wortels op een verdichte bodemlaag stuiten, zoals een ploegzool, zijn er drie mogelijkheden: 1) wortels groeien zijwaarts om de laag heen, 2) wortels dringen zich in de verdichte bodem en groeien in de lengte of 3) wortels stoppen met groeien (Dexter en Hewitt, 1978; Clark et al., 2003). Reacties op mechanische weerstand van individuele wortels en van wortelstelsels worden hierna besproken.

4.2 Reacties van individuele wortels op bodemverdichting

De meeste studies van hoe wortels verdichte bodems binnendringen, gaan alleen over de wortels van zaailingen. Daarom begrijpen we minder goed hoe het vermogen tot indringen varieert tussen volwassen wortels of tussen wortelsystemen van volwassen planten. Het karakteriseren van dit vermogen voor verschillende typen wortels is echter relevant om de strategieën van wortelstelsels voor het zoeken naar voedingsstoffen te begrijpen. Verschillende typen wortels worden gekenmerkt door verschillen in worteldiameter. Daardoor varieert het vermogen van wortels om in de bodem te dringen en ook de wortelanatomie, die weer de capaciteit van de wortel voor het opnemen van water en nutriënten beïnvloedt (Ahmed et al., 2018; Schneider et al., 2020; Lynch et al., 2021).

Het vermogen van wortels om de bodem in te dringen, wordt beïnvloed door zowel de diameter als door anatomische kenmerken van de wortel. Tot de laatste behoren de diameter van de stengel van de plant en de vorming van luchtkanalen (*aerenchyma*) (Colombi et al., 2017; Vanhees et al., 2021). Bij gelijke worteldiameter bleken primaire wortels van erwtenplanten een grotere maximale lengtegroei te hebben dan zijwortels (Misra, 1997). Daarom kan variatie in het indringingsvermogen van verschillende worteltypen belangrijke effecten hebben op hoe wortelstelsels de bodem doorwortelen op zoek naar voedingsstoffen in de ruimte en in de tijd. Het indringingsvermogen van zijwortels kan bijvoorbeeld belangrijk zijn, omdat dit worteltype het grootste deel van de lengte van het wortelstelsel in de meeste bedektzadigen (angiospermen) uitmaakt (Zobel et al., 2007; Schneider et al., 2017). Het indringingsvermogen van axiale wortels bepaalt echter uiteindelijk hoe deze zijwortels van een hogere orde in tijd en ruimte verdeeld zijn in de bodemmatrix (Strock et al., 2022).

In reactie op verdichte bodems is er bij de groeitop van wortels een afname van de celdeling (Clark et al., 2003) en een afname van de flux naar de weefselcellen (Croser et al., 1999). Vervolgens vergroten wortels hun diameter (Logsdon et al., 1987; Atwell, 1993; Iijima et al., 2000; Tracy et al., 2012; Pfeifer et al., 2014a; Colombi en Walter, 2015; Colombi en Keller, 2019; Vanhees et al., 2020) en vertragen ze de snelheid waarmee ze langer worden (Atwell, 1993; Gregory, 2006). In verdichte bodems wordt een toename van de worteldiameter in het algemeen gezien als een aanpassing van de plant, omdat het de weerstand tegen wortelknikken verhoogt (Whiteley et al., 1982; Clark et al., 2003; Chimungu et al., 2015). Daarnaast vermindert een toename van de worteldiameter de stress bij de groeitop door verplaatsing en vervorming van de grond nabij de wortelpunt (Abdalla et al., 1969; Hettiaratchi, 1990; Atwell, 1993; Kirby and Bengough, 2002; Bengough et al., 2006; Gregory, 2006) en helpt een toename van de worteldiameter bij het verplaatsen van grotere bodemdeeltjes en aggregaten (Whiteley and Dexter, 1984).

Recentelijk is echter aangetoond dat het indringingsvermogen van wortels beter kan worden geschat uit een toename van de dikte en het oppervlak van de cortex celwand, het aantal corticale cellen en de diameter van de stengel van de plant dan uit de worteldiameter (Chimungu et al., 2015; Vanhees et al., 2020; Schneider et al., 2021). Het vergroten van de worteldiameter maakt het weliswaar mogelijk voor planten om door te dringen in verdichte bodems, maar deze veranderingen in de wortels kosten de plant meer energie voor het

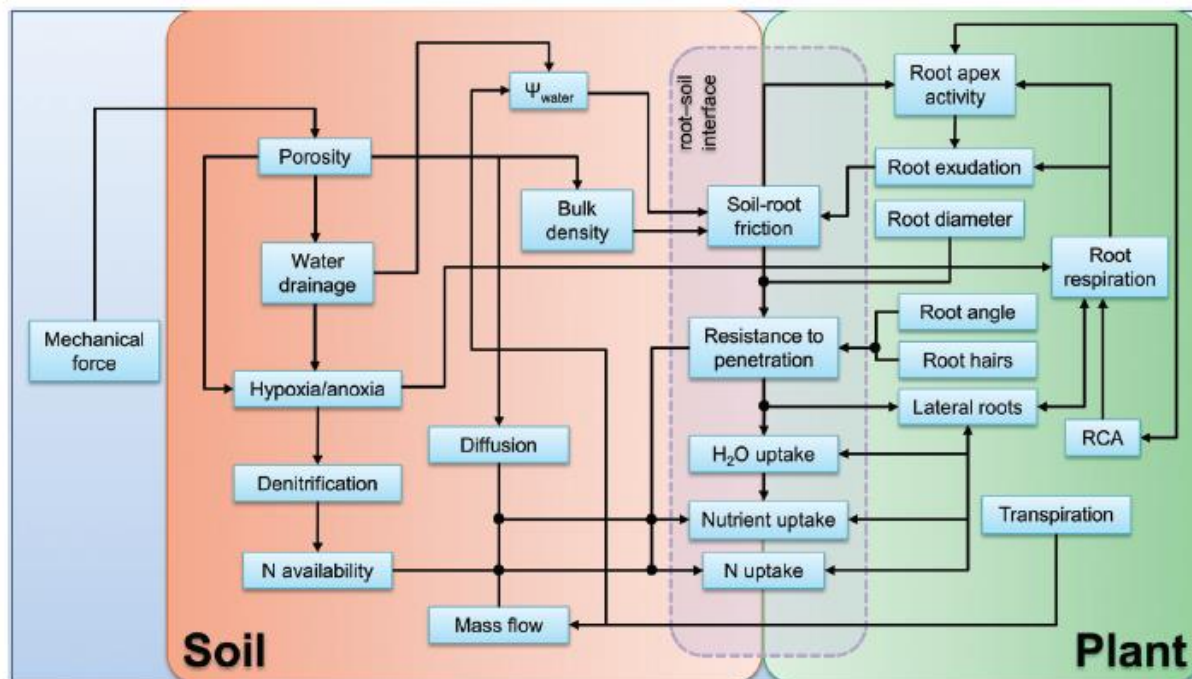
produceren en onderhouden van wortellengte, stofwisseling en voor het opnemen van water en nutriënten (Atwell, 1993; Iijima et al., 2003; Bengough et al., 2011; Ruiz et al., 2015; Colombi en Keller, 2019).

Er wordt verondersteld dat een grotere axiale worteldiameter een aantal gunstige mechanische eigenschappen oplevert, zoals een grotere wortelgroeidruk (in de lengterichting), zijwaartse uitbreiding van het wortelstelsel en een grotere potentiële groeisnelheid (Materechera et al., 1992; Atwell, 1993; Clark et al., 1999). Als gevolg daarvan kunnen dikkere wortels makkelijker voedingsstoffen vinden in verdichte grond (Bengough et al., 2011). Om bodemdeeltjes te kunnen verplaatsen, moeten wortels een groeidruk uitoefenen die groter is dan de wrijving die ze ondervinden en moeten zich blijven verlengen in de bodem. Genetische variatie in het vermogen om in verdichte bodems te dringen, bepaalt verschillen in groeidruk en worteldiameter, die weer van invloed zijn op het vermogen van de wortel om door te buigen of te knikken (Clark et al., 2003). Wortels met grotere diameters kunnen doordringen in substraten met een grotere indringingsweerstand bij dezelfde druk van de wortels (Popova et al., 2016).

Naast het feit dat wortels met grotere diameters beter bestand zijn tegen knikken, kunnen grotere diameters ook de verankering van wortels in verdichte bodems vergemakkelijken. Wortels kunnen zich vastzetten door wrijving tussen de bodemdeeltjes en rijpend weefsel in wortelharen en zijwortels achter het gedeelte van de wortel dat langer wordt. Een betere verankering van de wortels kan de maximale groeidruk (d.w.z. de groeikracht die door de wortel per eenheid van dwarsdoorsnede wordt uitgeoefend) ondersteunen. Deze maximale groeidruk wordt grotendeels bepaald door de turgordruk in de groeiende cellen van de zone waar de wortel langer wordt. Deze druk duwt de wortel verder in verdichte bodems (Bengough et al., 2011).

Wortels groeien vaak door bioporiën en scheuren in de bodem, ze zijn een flexibel orgaan en hebben de neiging om te muteren (zich spontaan aan te passen) als ze kronkelige paden door de bodem volgen, vermoedelijk op zoek naar de weg van de minste weerstand. Worteltortuositeit kan worden omschreven als de kronkeligheid van het wortelgroeipatroon (Popova et al., 2016) en is afhankelijk van zowel de bulkdichtheid als van het bodemtype (Tracy et al., 2012; Popova et al., 2016). Voor tomaat en maïs werden grotere waarden gevonden van tortuositeit voor planten gekweekt in verdichte grond, vooral in gronden met een grovere textuur, in vergelijking met losse grond (Tracy et al., 2012; Popova et al., 2016). Daarnaast beïnvloedt ook de groeihoek van de wortel – of de invalshoek van een wortel op een bodemlaag – het indringingsvermogen van wortels. Een steilere wortelhoek is positief gecorreleerd met de wortellengtedichtheid op 30 tot 60 cm diepte in zowel verdichte (indringingsweerstand van $\sim 1,8$ MPa) als niet-verdichte (0-0,5 MPa) grond (Ramalingam et al., 2017). Als de worteldiameter en de wortelgroeihoeek niet dik en steil genoeg zijn als wortels op een verdichte bodemlaag stuiten, kunnen wortels horizontaal afbuigen tijdens de groei (Correa et al., 2019).

Een aantal andere eigenschappen van wortels beïnvloedt het indringingsvermogen van de wortel. In tritcale (tarwe) werd een afname gevonden van de zaadwortellengte, van het aantal en de lengte van zijwortels en van het aantal en de lengte van de nodale wortels bij hogere bulkdichtheden ($1,5 \text{ g cm}^{-3}$ versus $1,33 \text{ g cm}^{-3}$) in een 1:1:3 mengsel van tuingrond, turf en zand (Grzesiak et al., 2013). Bij wintertarwe werd een kleiner aantal axiale- en zijwortels waargenomen in reactie op bodemverdichting (bodemkolom $1,6 \text{ g cm}^{-3}$) (Colombi en Walter, 2017). Het ontstaan van zijwortels wordt vertraagd in verdichte grond in tomaat (Tracy et al., 2012), tarwe (Colombi en Walter, 2017), tritcale en soja (Colombi en Walter, 2015). Daarnaast zijn de vorm van de wortelpunt (Bengough et al., 1997a; Colombi et al., 2017), de wortelharen, wortelslijm en andere wortellexudaten (Bengough et al., 1997b) én de anatomie van wortels (Schneider et al., 2021; Vanhees et al., 2021) allemaal van invloed op het indringingsvermogen van wortels (Figuur 14).



Figuur 14 Schema van de belangrijkste interacties tussen de fysisch-chemische eigenschappen van de bodem en de functie en structuur van de wortels, waargenomen onder omstandigheden van bodemverdichting. Ψ_{water} , waterpotentiaal; RCA, luchtkanaal (aerenchyma). De pijl (\rightarrow) geeft de invloed aan van één eigenschap op een andere, waarvan de interactie van synergetische of antagonistische aard kan zijn (uitgelegd in de hoofdttekst); een pijl in twee richtingen (\rightleftarrows) geeft een wederzijdse invloed aan tussen twee eigenschappen; een zwart bolletje (-) geeft een convergerende invloed aan tussen twee of meer eigenschappen op de volgende eigenschap; als twee of meer pijlen een snijpunt hebben zonder bolletje, is er geen directe interactie tussen de pijlen aangegeven (Correa et al., 2019).

4.3 Reacties van volledige wortelstelsels op bodemverdichting

Veel van de processen die gaan over het vermogen van individuele wortels om in de bodem te dringen zijn goed onderzocht, maar over de interacties tussen bodemverdichting en de respons van hele wortelstelsels is minder bekend. Empirische gegevens over het verband tussen bodemkenmerken en de dichtheid van de beworteling zijn schaars, omdat veld- of bodemmetingen, die nodig zijn om deze interacties te begrijpen, complex en bewerkelijk zijn. De belangrijkste invloed van een belemmering van de wortelgroei door bodemverdichting is een afname van de totale wortellengte (Bingham et al., 2010; Grzesiak et al., 2013; Pfeifer et al., 2014a) en een toename van de worteldiameter (Rich en Watt, 2013; Popova et al., 2016). Zo produceerden sorghumplanten die in verdichte grond werden gekweekt 35% minder wortelmasse en 47% minder wortellengte. Dit werd vooral veroorzaakt door een afname in de groei van fijne wortels (Correa et al., 2022).

Als apicale assen worden blootgesteld aan bodemverdichting worden zijwortels die vrij in lossere grond kunnen doordringen, veel langer dan in wortelstelsels die helemaal niet gehinderd worden door bodemverdichting. Deze compenserende groei van zijwortels kan echter het effect van verdichte grond op de axiale wortelpunten maskeren, omdat de totale wortellengte of het totale wortelgewicht in beide situaties vergelijkbaar kan zijn (Goss, 1977). In een experiment met verticaal gesplitste wortels (*split-root boxes*) bij gerst werden compenserende reacties op bodemverdichting waargenomen van het hele wortelstelsel. Wortels van gerst bleken dieper te groeien, hadden een langere wortellengte en zijwortels ontstonden eerder in het niet-verdichte compartiment van de behandeling met de gesplitste wortels (met een verdicht en niet-verdicht compartiment) in vergelijking met een behandeling waarin beide compartimenten uniform waren (verdicht of niet verdicht) (Pfeifer et al., 2014a).

In het veld en in agro-ecosystemen kan de variatie in de wortellengte veranderd worden door de bodemstructuur in situaties waarin de bovengrond uitdroogt (De Moraes et al., 2018) en, in gronden die niet geploegd worden, met een hoge bulkdichtheid in de bovengrond (Ehlers et al., 1983). Dit komt doordat in beide situaties de wortelgroei in de bovengrond een grotere mechanische belemmering ondervindt dan in diepere horizonten. Met computersimulaties is aangetoond dat de bewortelbare diepte beperkt werd in bodems met een hoge bulkdichtheid dieper in het profiel. Er was ook minder uitspoeling van nitraat en daardoor kwamen wortellengte en de aanwezigheid van stikstof beter overeen. Het vergroten van het indringingsvermogen van zowel axiale als laterale wortels leverde wortelstelsels van vergelijkbare lengte op. Een betere indringing in de bodem van axiale wortels leidde echter tot een grotere wortellengtedichtheid in de ondergrond, waardoor de stikstofopname en de biomassa van scheuten toenamen (Strock et al., 2022).

Veranderingen in de verhoudingen tussen wortels en scheuten worden vaak waargenomen als reactie op bodemverdichting. Deze veranderingen zijn echter variabel en afhankelijk van de genetische achtergrond van de plant en van de mate van bodemverdichting (Atwell, 1990; Masle, 1992; Hoffmann en Jungk, 1995; Tubeileh et al., 2003). Veranderingen in wortel-scheutverhoudingen bij bodemverdichting kunnen ook verward worden met ontogenetische of allometrische effecten, omdat planten die onder stress worden gekweekt een achterstand in ontwikkeling kunnen oplopen (Correa et al., 2019). Er is nog weinig bekend over hoe de fotosynthese-partitionering naar wortelgroei varieert in ruimte en tijd onder druk van bodemverdichting.

4.4 Ontrafelen van de responsen op beschikbaarheid van water, zuurstof en bulkdichtheid in verdichte bodems

De indringingsweerstand van de bodem en de zuurstofconcentratie in de bodemlucht worden sterk beïnvloed door het bodemvochtgehalte. Daarom beïnvloeden het lokale bodemklimaat en kortdurende neerslag- en temperatuurverschijnselen de wortelgroei. Naarmate bodems uitdrogen, neemt de indringingsweerstand toe en in zeer natte bodems is het risico op een lage zuurstofconcentratie in de bodemlucht groot (Batey, 2009; Bengough et al., 2011; Tracy et al., 2011; Grzesiak et al., 2013; Colombi et al., 2018).

Omdat natte en droge perioden voorkomen in de bodem, wordt verondersteld dat de wortelgroei wordt beperkt door de indringingsweerstand van de bodem, de lage concentratie zuurstof in de bodemlucht en door de beschikbaarheid van water (Colombi en Keller, 2019). Als wortels door de bodem groeien, veranderen de fysieke omstandigheden rond de wortelpunt en de groeizone voortdurend en daarom past de wortel telkens het wortelfenotype aan. Er zijn echter kunstmatige groeisystemen ontwikkeld die de reacties van wortel op indringingsweerstand en zuurstofconcentratie van elkaar kunnen scheiden (Sjulgård et al., 2021). In de studie van Sjulgård et al. (2021) werd gevonden dat door kortstondige blootstelling aan zuurstofloosheid en een verhoogde indringingsweerstand de snelheid afnam waarmee wortels langer worden bij erwtenplanten en tarwe. Als de stress werd opgeheven, herstelden de groeisnelheid en de worteldiameter zich bij erwtenplanten, maar niet bij tarwe (Sjulgård et al., 2021).

Verschillende vormen van stress in de bodem, waaronder een hoge indringingsweerstand en lage zuurstofconcentratie in de bodemlucht, resulteren in vergelijkbare reacties van wortels. Voorbeelden zijn een verminderde groeisnelheid in de lengte, ondiepere wortelgroei en een vertraagde vorming van zijwortels (Barracough en Weir, 1988; Materechera et al., 1992; Grzesiak et al., 2013; Colombi en Walter, 2015; Colombi et al., 2018; Sjulgård et al., 2021). Meer onderzoek is nodig om de complexiteit van bodemfysische eigenschappen en de relatie met wortelgroei te begrijpen.

4.5 Reacties van wortels op harde, droge bodems kunnen inzicht geven in reacties op bodemverdichting

Droogte kan bodemfysische omstandigheden veroorzaken die vergelijkbaar zijn met bodemverdichting. Inzicht in de reacties van wortels op droge, harde bodems kan inzicht geven in hoe wortels zich aanpassen aan bodemverdichting. Zo is sorghum, in vergelijking met maïs en andere granen, over het algemeen beter bestand tegen droogte omdat het langer groen kan blijven, wat zorgt voor een grotere toevoer van assimilaten tijdens de graanvulperiode. Ook superieure eigenschappen van wortels bij sorghum maken het mogelijk om in harde, droge bodems door te dringen en in sommige gevallen ook dieper in het bodemprofiel te wortelen (Singh et al., 2010; Schittenhelm en Schroetter, 2014; Rajendra Prasad et al., 2021). Maar ook in een door droogte verdichte bodem lijkt sorghum beter te groeien dan maïs en andere gewassen (Correa et al., 2022). De algemene opbouw van sorghum is typisch die van eenjarige eenzaadlobbigen (monocotylen). Sorghum heeft één zaadwortel die uit het zaad tevoorschijn komt, gevolgd door bundels knolwortels die uit het stengelweefsel komen vanaf het 4^e-5^e bladstadium. Maïs daarentegen heeft 3-7 zaadwortels die uit het zaad tevoorschijn komen, gevolgd door knolwortels in het tweede bladstadium (Singh et al., 2010). Men vermoedt dat wortels van sorghum beter kunnen indringen in harde (en droge) bodems, omdat sorghum een dieper wortelstelsel heeft met dikkere wortels en een grotere dichtheid van zijwortels, die iets later in de ontwikkeling ontstaan (Wojciechowski and Kant, 2021). Het superieure vermogen van sorghumwortels om in harde, droge bodems door te dringen maakt de plant droogtetolerant. Sorghum kan daardoor ook in verdichte bodems dringen en daarbij bioporiën maken om stress door bodemverdichting in het volgende groeiseizoen te verlichten (Lynch et al., 2021a). Hoewel bekend is dat sorghum toleranter is voor droogte dan veel eenjarige gewassen, zijn de betere prestaties onder bodemverdichting en het vermogen om diepe bioporiën te maken nog niet goed onderzocht. Inzicht in hoe wortels zich aanpassen aan droogte kan ook inzicht geven in hoe wortels reageren op bodemverdichting.

4.6 Implicaties voor vervolgonderzoek

Mechanische weerstand van de bodem heeft invloed op veel aspecten van plantengroei en productiviteit. Mechanische weerstand beïnvloedt de bulkdichtheid, het watergehalte van de bodem en de beschikbaarheid van zuurstof, en daarmee ook de wortelgroei en de mogelijkheid om water en voedingsstoffen op te nemen. De reacties van eigenschappen van individuele wortels op bodemverdichting worden beter begrepen dan reacties van het hele wortelstelsel. Over het algemeen vermindert in verdichte bodems de wortellengte en wordt de worteldiameter groter. Er zijn nog maar weinig studies waarin reacties van wortels op bulkdichtheid, zuurstofloosheid en watergehalte afzonderlijk bekeken zijn. Het ontkoppelen en begrijpen van de reacties van het wortelsysteem op stress veroorzaakt door de toestand in de bodem zijn belangrijk voor fundamenteel plantonderzoek en de plantenveredeling. In het vervolgonderzoek zal worden nagegaan in hoeverre potproeven kunnen worden toegepast om de invloed van ondergrondverdichting op de wortelverdeling inzichtelijk te maken.

5 Laboratorium- en veldmetingen aan verdichte gronden

Uit voorgaande beschrijvingen is duidelijk dat verdichte bodems of bodemlagen impact hebben op de water- en luchthuishouding en van invloed kunnen zijn op het gedrag van de plantenwortels. Om na te gaan wat de precieze invloed is van dichtheid op het gedrag van water, zuurstof en plantenwortels kunnen gerichte proeven onder geconditioneerde omstandigheden behulpzaam zijn. Dat betreft veelal metingen aan kleine, verdichte monsters in het laboratorium of soms in potproeven (zoals voorgesteld in hoofdstuk 4). Omdat dit vaak situaties betreft die buiten de context van een natuurlijke bodem zijn vastgesteld, is het daarnaast gewenst om ook in het veld op locaties met zowel verdichte als niet-verdichte plots metingen te doen. Dit hoofdstuk beschrijft kort enkele laboratorium- (paragraaf 5.1) en veldmetingen (5.2) die kunnen worden uitgevoerd.

5.1 Laboratoriummetingen aan verdichte monsters

5.1.1 Verdichtingsproeven

In het laboratorium willen we meten hoe bodemeigenschappen gaan veranderen onder invloed van verschillende belastingen. Dit zou kunnen door deze eigenschappen te meten in uit het veld gestoken grondmonsters uit bodemlagen die meer en minder verdicht zijn. Het nadeel van gebruik van in het veld verdichte gronden is dat niet duidelijk is wat de exacte relatie is tussen een aangebrachte belasting(en) en de hierdoor veroorzaakte deformatie. De omstandigheden kunnen op korte afstand sterk van elkaar verschillen.

In het laboratorium kunnen monsters worden verdicht door middel van uni-axiaal-, tri-axiaal- of proctorproeven.⁴ De uni- en tri-axiaal testen kunnen toegepast worden op zowel ongestoorde als verstoorde monsters, de proctorproef wordt normaal gesproken toegepast op verstoorde monsters. Omdat structuurverandering een belangrijk proces is in het verdichtingsproces, worden bij voorkeur onverstoord monsters gebruikt voor axiaalproeven in het laboratorium. De proctorproef heeft het voordeel dat het verstoorde monster goed gemengd kan worden en daarmee een monstersamenstelling krijgt die minder wordt beïnvloed door monsternamen en lokale omstandigheden. De proctorproef heeft als nadeel dat niet exact wordt gemeten welke krachten op het monster worden uitgeoefend tijdens het verdichtingsproces.

Whally et al. (2012) gebruikten een tri-axiaalapparaat waarbij de monsters eerst isotroop (in alle richtingen hetzelfde) werden belast (compactie) en daarna werden vervormd (verschuiving) door het aanbrengen van een verticale kracht. In de eerste fase van het proces behield het monster zijn cilindrische vorm, in de tweede fase kreeg het een 'kuip'-vorm. Bij de proeven werd voor beide verdichtingsprocessen de verzadigde doorlatendheid bepaald door het meten van het waterverlies tijdens de proef. Doordat bij tri-axiaal testen een belangrijke horizontale verschuiving plaatsvindt, zijn de monsters nadien slecht bruikbaar om waterretentie en waterdoorlatendheid te meten.

Uni-axiaal proeven worden veel gebruikt om de pre-compressiesterkte te bepalen. Pre-compressiesterkte wordt verondersteld een maat te zijn voor de overgang tussen het elastisch en plastisch gedrag van de bodem, ofwel het punt waarop de bodem niet meer soepel meebeweegt met de aangebrachte kracht, maar scheuren gaat vertonen. Om bodemverdichting te voorkomen, zou de pre-compressiesterkte niet moeten worden overschreden. Tang et al. (2008) en Keller (2011) gebruiken beide een vergelijkbare procedure waarbij een bodemonster onder gestandaardiseerde vochtcondities ($pF = 2$) steeds met een toenemende kracht wordt belast (in stappen van 10 tot 800 kPa gedurende 10 tot 30 min per stap). Bij elke stap wordt de verticale verplaatsing gemeten en aan het eind van de test de droge bulkdichtheid. Hoewel de

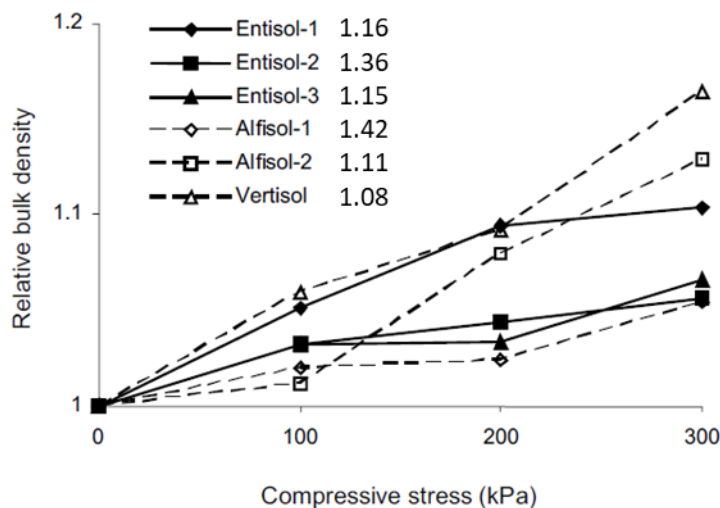
⁴ Zie bijvoorbeeld <https://www.royaleijkamp.com/nl/producten/laboratoriumapparatuur/bodemfysisch-onderzoek/samendrukking-en-afschuif-testen/>

proeven van Keller (2011) aangeven dat de pre-compressiesterkte niet duidelijk de overgang van elastisch naar plastisch gedrag aangeeft, wordt wel verondersteld dat bij het overschrijden van die sterkte, bodemverdichting de bodemfuncties sterk beïnvloedt (zie bijv. Bakema en Van den Akker, 2021).

Panayiotopoulos et al. (2003) hebben uni-axiaal proeven uitgevoerd op een zestal Griekse bodems. Hierbij werden de monsters op veldcapaciteit gebracht en daarna gedurende 1 minuut belast met 100, 200 of 300 kPa. De belasting heeft tot een toename van de droge bulkdichtheid geleid (Figuur 15), al is die toename wel sterk afhankelijk van de oorspronkelijke dichtheid: een bodem is minder sterk te verdichten als deze al een hoge dichtheid heeft. Toenames in dichtheid van meer dan 15% worden niet gevonden.⁵ Dit komt overeen met de resultaten van uni-axiaal proeven met een korte belasting zoals uitgevoerd door Van den Akker et al. (2018).

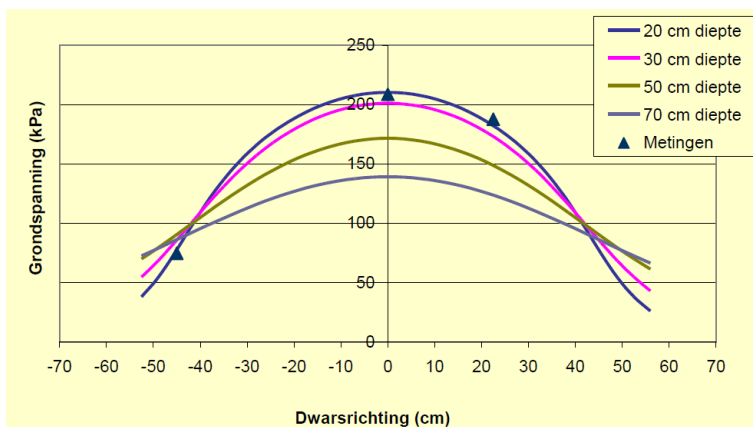
Uit diverse veldproeven (Keller et al., 2004; van den Akker, 2013; van den Akker et al., 2018) blijkt dat de krachten die op een diepere ondergrond worden uitgeoefend bij zeer zware belasting door zware landbouwvoertuigen niet boven de 300 kPa uitkomen (Figuur 16). Dit is in lijn met de range aan belastingen die door Panayiotopoulos et al. (2003) zijn toegepast.

Om in het laboratorium monsters te verdichten en zo veel mogelijk te laten lijken op het verdichtingsproces tijdens de passage van een zwaar voertuig en de ervaringen met eerdere onderzoeken, wordt voorgesteld om via uni-axiaal proeven de grondmonsters te verdichten met een snelle belasting (enkele seconden). De belasting wordt een aantal keer herhaald. Door de belasting tussen de monsters te variëren van 100 tot 300 kPa worden verschillende gradaties van verdichting gecreëerd.



Figuur 15 Verandering van de relatieve droge bulkdichtheid bij verschillende belastingen voor zes verschillende gronden (Panayiotopoulos et al., 2003). De getallen in de legenda geven de uitgangsdichtheid (g cm^{-3}) voor de zes monsters.

⁵ Vraag is dus of in het veld bodems nog een hogere dichtheid krijgen dan de +15% of dat ze bij verdere belasting juist meer gaan vervormen (zonder dat de dichtheid verder toeneemt). Als dit zo is, dan heeft het in het lab weinig zin om monsters te creëren die een onnatuurlijke dichtheid hebben.



Figuur 16 Berekende grondspanning (met het model SOCOMO (Van den Akker, 2004)) en metingen van grondspanning op verschillende dieptes en afstanden bij een belasting met 14 ton (Van den Akker, 2013).

5.1.2 Penetrologger

Een penetrologger⁶ (of penetrometer) wordt doorgaans gebruikt voor veldmetingen en meet de indringingsweerstand van een bodem tot 80 cm diepte. De meting wordt beïnvloed door bodemfysische eigenschappen, zoals watergehalte, dichtheid, samendrukbaarheid, bodemsterkte, bodemstructuur en zand- en kleigehalte, en door apparaateigenschappen, zoals de hoek, diameter en ruwheid van de conus en de snelheid van penetratie (Lowery and Morrison, 2002; Vaz et al., 2011; zie ook paragraaf 5.2.2).

Panayiotopoulos et al. (2003) beschrijven een laboratoriummethode om de indringingsweerstand onder gecontroleerde omstandigheden te meten. Een metalen sonde (diameter 2,5 mm) met een conisch uiteinde (kegelhoek 60° en basisdiameter 3 mm) werd bevestigd aan een compressietestmachine (Wykeham Farrance Eng. Ltd) en werd gebruikt als penetrometer. De snelheid van de penetratie werd constant gehouden op 1,52 mm min⁻¹. De penetratieweerstand werd berekend als de kracht uitgeoefend door de penetrometer, gedeeld door zijn dwarsdoorsnede, wanneer de conische punt een diepte van 10 mm bereikte (Whiteley et al., 1981). Panayiotopoulos et al. (2003) vonden dat de indringingsweerstand toenam bij toenemende dichtheid, waarbij de verschillen duidelijker waren onder drogere omstandigheden.

Deze opstelling proberen we voor het onderzoek in project BoVer na te bouwen en te gebruiken om de penetratieweerstanden te meten aan homogene bodemmonsters die gecontroleerd verdicht en bevochtigd zijn. Deze laboratoriummetingen zullen vergeleken worden met metingen in het veld (zie paragraaf 5.2.2).

5.1.3 Zuurstofdiffusie

In hoofdstuk 3 is aangegeven dat voor de lucht- of zuurstofhuishouding in de bodem diffusie een belangrijk proces is. Voor de beschrijving van diffusie is de diffusiecoëfficiënt een belangrijke eigenschap. Deze eigenschap is ook meetbaar (zie o.a. Rolston and Moldrup, 2002).

Voor Nederlandse bodems is in het verleden een dataset opgebouwd met diffusiecoëfficiënten voor Nederlandse akkerbouwgronden (Bakker et al., 1987; zie paragraaf 3.2). Hierin is de diffusiecoëfficiënt per monster gemeten bij verschillende fracties luchtgevulde poriënvolumes en zijn wiskundige relaties afgeleid die deze relaties goed beschrijven. In alle gevallen geldt dat de diffusiecoëfficiënt lager is bij lagere luchtgevulde poriënvolumes. Verdichting van een bodemlaag zal ertoe leiden dat de totale porositeit afneemt en dat de bodem mogelijk meer water vasthoudt, zodat er vaak sprake zal zijn van lagere luchtgevulde poriënvolumes. Daarmee wordt zuurstofdiffusie in die laag (sterk) beperkt.

De meetmethode die Bakker et al. (1987) gebruikten, staat bekend als de Currie-methode (Rolston and Moldrup, 2002). Een bodemmonster (in ring) wordt aan één zijde afgesloten met een kap en aan de andere zijde staat het monster in contact met de atmosfeer (met een constante zuurstofconcentratie). Afhankelijk

⁶ Zie bijvoorbeeld <https://www.royaleijkelkamp.com/nl/producten/veldmeetapparatuur/indringingsweerstand/>

van de gehanteerde zuurstofconcentratie in de kap zal zuurstof door het monster diffunderen: naar buiten indien in de kap een hoge zuurstofconcentratie wordt ingesteld of naar binnen indien de zuurstofconcentratie in de kap nihil is. Via de snelheid van verandering van de gemeten zuurstofconcentratie in de afgesloten kap kan dan de diffusiecoëfficiënt berekend worden uit de eerste wet van Fick (Bakker et al., 1987).

Omdat Bakker et al. (1987) voor meerdere Nederlandse akkerbouwgronden de diffusiecoëfficiënt als functie van het luchtgevulde poriënvolume hebben gemeten (zie ook hoofdstuk 3), is er voorlopig nog geen behoefte aan aanvullende metingen.

De luchtgevulde porositeit is te bepalen met een luchtpycnometer zoals gebruikt in Flint and Flint (2002) of door de totale porositeit minus het residuele watergehalte te nemen zoals in Pulido Mancado et al. (2020). Schjonning and Koppelaar (2017) hebben op verschillende luchtdrukken de Darcy-luchtdoorlatendheid berekend met de Forchheimer-benadering. Pulido Mancada et al. (2020) hebben de non-Darcy luchtdoorlatendheid berekend bij 5 hPa. De gasdiffusiecoëfficiënt is te bepalen met de 1-kamer-1-gasmethode zoals in Schjonning et al. (2013). Hiernaast is er door Kuncuro and Koga (2012) ook een methode gebruikt om een gecombineerde meting te doen voor de diffusiecoëfficiënt en luchtdoorlatendheid.

5.1.4 Waterretentie en doorlatendheid

Waterretentie en waterdoorlatendheid worden in de vakgebieden bodemfysica en (agro)hydrologie veelvuldig gemeten om de hydraulische eigenschappen van bodemlagen te kwantificeren. Een overzicht van meetmethoden is beschikbaar in *Methods of Soil Analysis. Part 4 – Physical Methods* (Dane and Topp, 2002). In Nederland zijn methoden omschreven in NEN-normen (zie Bakker, 2022). In het kader van de Basisregistratie Ondergrond worden de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken volgens standaardmethoden bepaald, zoals beschreven in Bakker et al. (2020). Hieronder volgen korte omschrijvingen van de methoden die voor de Basisregistratie Ondergrond gebruikt worden. Deze zullen in project BoVer worden gebruikt voor zowel niet-verdichte als verdichte bodemonsters.

Doorlatendheid bij verzadiging

De doorlatendheid bij verzadiging wordt gemeten aan een ongestoord monster ($L = 10$ cm, $D = 20$ cm, $V \approx 3140$ cm³). Dit wordt in een meetopstelling geplaatst en langzaam van onderaf verzadigd. Daarna wordt een constant waterlaagje boven op het monster gehandhaafd, waardoor water door het monster gaat stromen. Na verloop van tijd ontstaat een constant debiet dat, gedeeld door het doorstroomde oppervlak, gelijk is aan de doorlatendheid bij verzadiging.

Simultaan meten van waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken met de verdampingsmethode

De ringmonsters ($L = 8$ cm, $D \approx 10$ cm, $V \approx 630$ cm³) worden eerst langzaam van onderaf verzadigd waarna ze weer uitlekken, totdat de onderkant net niet meer verzadigd is. De monsters worden op een meetopstelling geplaatst op een weegschaal en voorzien van vier tensiometers, verdeeld over de monsterhoogte. De monsters gaan water verdampen aan de bovenzijde. De afname van het gewicht (door verdamping) en de drukhoogten worden gemeten. De meting wordt beëindigd op het moment dat de tensiometers doorslaan, waarna het rest-vochtgehalte en de droge bulkdichtheid worden gemeten. Na afloop worden de metingen analytisch verwerkt tot $\theta(h)$ - en $K(h)$ -gegevens. Vervolgens worden deze data gefit aan de Mualem-Van Genuchten-vergelijkingen.

Zandbak

Voor het drukhoogtetraject $h = 0$ cm tot $h = -100$ cm kunnen ongestoorde ringmonsters ($L = 5$ cm, $D \approx 5$ cm, $V = 100$ cm³) op een zandbak geplaatst worden. In de zandbak kunnen dan stapsgewijs verschillende drukhoogten worden opgelegd aan de ringmonsters, waarvan het volumetrisch watergehalte wordt bepaald door wegen. Na afloop wordt de droge bulkdichtheid van het monster gemeten. De metingen worden toegevoegd aan de data die verkregen zijn met de verdampingsmethode om een betere benadering te krijgen van de Mualem-van Genuchten-vergelijkingen in het natte bereik.

Drukpan

Aanvullende $\theta(h)$ -data voor zeer negatieve drukhoogten worden verkregen door gestoorde grondmonsters in een drukpan (overdruk = - drukhoogte) te plaatsen. Nadat evenwicht is verkregen, wordt het bijbehorende

watergehalte gemeten door weging. Meestal worden hiertoe drukhoogten van -300, -1000, -3000 en -14000 cm aangehouden. De metingen worden toegevoegd aan de data die verkregen zijn met de verdampingsmethode om een betere proxy te krijgen van de Mualem- van Genuchten-vergelijkingen in het droge bereik.

Luchtdroog

Een gestoord monster wordt in het laboratorium aan de lucht gedroogd. Luchtdroge grond heeft onder die omstandigheden een drukhoogte van circa -10^6 cm. De metingen worden toegevoegd aan de data die verkregen zijn met de verdampingsmethode om een betere proxy te krijgen van de Mualem- van Genuchten-vergelijkingen in het hele droge bereik.

Organischestofgehalte

Het gehalte aan organische stof wordt bepaald volgens de gloeiverliesmethode. Hiertoe wordt een gestoord monster verhit tot 550 °C waardoor de aanwezige organische stof verbrandt, wat leidt tot een gewichtsverlies. Na afloop kan een correctie toegepast worden voor aanwezigheid van lutum en vrij ijzer. De gegevens worden uitgedrukt als een gewichtsfractie.

Textuurverdeling

De textuurverdeling geeft de verdeling van gewicht over korrelgroottefracties weer van de bodemdeeltjes. Hierbij worden de volgende klassen onderscheiden (eenheid: μm): 0-2, 2-16, 16-50, 50-63, 63-105, 105-150, 150-210, 210-420, en 420-2000. De eerste drie klassen worden gemeten met de pipetmethode, de klasse 50-63 wordt gemeten met de natte zeefmethode en de overige vijf klassen met de droge zeefmethode. De gegevens worden uitgedrukt als een gewichtsfractie.

Onverzadigde doorlatendheid (K_{0-50})

Bij deze meting wordt hetzelfde monster gebruikt als voor de 'doorlatendheid bij verzadiging'. De onderkant van het monster wordt op een te kiezen kleine zuigspanning gebracht ($-100 \text{ cm} < h < 0 \text{ cm}$) en de flux die aan de onderzijde van het monster uittreedt, wordt gemeten. Aan de bovenkant wordt op gecontroleerde wijze een uniforme waterflux aangebracht via een spraysysteem. Deze influx wordt zodanig afgeregeld dat de in- en uitflux aan elkaar gelijk zijn. Op dat moment is stationaire stroming bereikt en zijn het vochtgehalte en zuigspanning over het monster constant. Onder die condities kan de doorlatendheid bij de ingestelde zuigspanning worden berekend. De methode die gebruikt wordt, is gebaseerd op de methode van Dirksen and Matula (1994). Deze meetopstelling is als prototype beschikbaar, maar wordt nog niet toegepast voor standaardonderzoek.

5.2 Veldmetingen in verdichte bodems

Metingen in het laboratorium geven inzicht in de verbanden tussen verschillende bodemeigenschappen bij verdichting of belasting. Tegelijkertijd is het ook van belang om juist in het veld verdichting en de verandering in bodemeigenschappen die hiervan het gevolg is, vast te stellen. Daarbij kunnen we gebruikmaken van bestaande methoden en technieken. Hoewel naar verschillende technieken afzonderlijk onderzoek is uitgevoerd, is niet van alle technieken de nauwkeurigheid en toepasbaarheid van deze technieken voor het opsporen van bodemverdichting bekend. In het project BoVer willen wij 1) de nauwkeurigheid en toepasbaarheid van bestaande technieken vaststellen, 2) mogelijke verbeteringen in de methoden voorstellen en 3) de interpretatie van de metingen verbeteren aan de hand van de kennis die wordt verkregen in de laboratoriummetingen.

5.2.1 Bodemorganische stof/koolstof

Samen met de textuur van de bodem (zand-, silt-, kleigehalte) beïnvloedt het gehalte aan bodemorganische stof de gevoeligheid van de bodem voor verdichting. Over het algemeen geldt dat lage bodemorganischestofgehaltes de bodem vatbaarder maken voor bodemverdichting. Organische stof (plantenresten en residuen) die gehecht is aan bodemdeeltjes (vooral kleideeltjes) zorgt ervoor dat bodemdeeltjes niet verdichten. Organische stof bindt microaggregaten en macroaggregaten in de bodem. Een laag bodem-

organischestofgehalte maakt de bodem gevoeliger voor bodemverdichting (Wortman en Jasa, 2003; zie ook Bijlage 2, punt 7).

Op dit moment is de meest voor de hand liggende keuze voor het meten van organische stof of koolstof in de bodem een meting met behulp van sensoren. Deze gebruiken infraroodreflectie of -absorptie in het zichtbare (VIS), nabije (NIR) en of midden-infrarode (MIR) deel van het elektromagnetisch spectrum (VNIR: 200-2500 nm; MIR: 400-6000 cm^{-1}).⁷ Het licht reageert op de chemische (en mechanische) componenten in de bodem, zoals (an)organische verbindingen en textuur. Daarbij heeft iedere component of type verbinding in de bodem één of meer specifieke absorptiepieken in het spectrum bij specifieke golflengtes. De mate van aanwezigheid van de component heeft invloed op de hoogte van de absorptiepieken. Het gemeten spectrum is een optelsom van deze afzonderlijke spectrale signaturen, afhankelijk van de samenstelling van de bodem, en kan daarom als een vingerafdruk van die bodem worden gezien.

Door een 'bibliotheek' of kalibratieset te maken van spectra en van in het laboratorium gemeten bodemeigenschappen van dezelfde monsters, kunnen (spectrale) modellen worden afgeleid die bodemeigenschappen kunnen voorspellen of schatten op basis van nieuw gemeten spectra in bodemonsters met vergelijkbare bodemeigenschappen als gebruikt in de kalibratieset (Shepherd et al., 2022). De kwaliteit van het resultaat hangt af van de kwaliteit en toepasbaarheid van de bibliotheek, de kwaliteit van de gebruikte spectrometer, de omstandigheden (veld of laboratorium), de voorspelbaarheid van de bodemeigenschap en het aantal monsters dat in de bibliotheek is opgeslagen. Over het algemeen zijn de volgende bodemeigenschappen goed te voorspellen: bodemorganische koolstof (Soil Organic Carbon, SOC), bodemorganische stof (Soil Organic Matter, SOM), totaal koolstofgehalte Total Carbon (Total Carbon, TC), klei, silt, zand, pH, carbonaten, CEC, totaal stikstofgehalte (Total Nitrogen, TN) en extraheerbare Ca en P (Dangal et al., 2019; Terhoeven-Urselmans et al., 2010; Soriano-Disla et al., 2013). De kwaliteit van de voorspelling voor nutriënten is variabel.

Er bestaan VNIR- en MIR-instrumenten die geschikt zijn voor bodemanalyse in het laboratorium en handmatige toepassing in het veld. In het veld is VNIR veel meer beschikbaar en wordt daarom toegepast. Doorgaans hebben laboratoriummetingen een hogere nauwkeurigheid vanwege het verwijderen van ruis veroorzaakt door vocht, oppervlakteruwheid of (droge) vegetatieresten. MIR-instrumenten geven doorgaans een hogere nauwkeurigheid dan VNIR.⁸

Naast de 'handheld-instrumenten' voor in het veld zijn ook VNIR-instrumenten beschikbaar die op gesleepte apparatuur of een ploegschaar over het veld worden getrokken of stilstaand op een stang in de grond worden gestoken. Ook worden VNIR-instrumenten toegepast op drone-, vliegtuig- en satellietplatformen als kale grond zichtbaar is. De penetratiediepte van alle instrumenten is minder dan 1 cm. Alle rijdende en vliegende toepassingen zijn daardoor waarschijnlijk minder relevant voor ondergrondverdichting. Wanneer op diepte of in het laboratorium wordt gemeten, is deze techniek wel relevant voor ondergrondverdichting. De keuze van het instrument is een balans tussen nauwkeurigheid, meetconditie-eisen, de aanwezigheid van een bibliotheek en kosten (Smith et al., 2020).

5.2.2 Penetratieweerstand en bulkdichtheid

Een verdichte bodem(laag) heeft in het algemeen een grotere droge bulkdichtheid vanwege de dichtere pakking van de individuele bodemdeeltjes. De mechanische weerstand die een metalen conus ondervindt terwijl die verticaal in de bodem wordt geduwd, is de indringingsweerstand. Deze is gerelateerd aan de dichtheid van die bodem en de weerstand die wortels ondervinden in de bodem. Het meten van de indringingsweerstand kan met een penetrometer of een penetrologger, de meer geavanceerde uitvoering van de penetrometer. Het meetprincipe is gelijk, maar bij een penetrologger wordt de meting opgeslagen, bij een penetrometer kan deze alleen worden afgelezen tijdens de meting.

Het principe van de meting is het met constante snelheid en kracht verticaal in de grond drijven van een stang met een conus van bekende afmeting aan het uiteinde, terwijl de druk en de diepte simultaan worden

⁷ Merk op dat VIS en NIR worden uitgedrukt in golflengte (nm) en dat MIR wordt uitgedrukt in golfnummer (cm^{-1}).

⁸ Dit is het gevolg van de aanwezigheid van meer directe absorptiekenmerken van bodemeigenschappen in het MIR-bereik. In het VNIR-bereik zijn de absorptiepieken deels overtonen van de pieken in het MIR-deel van het spectrum.

gemeten. Op deze manier kan een weerstandsprofiel worden opgebouwd. De meting wordt beïnvloed door bodemfysische eigenschappen, zoals watergehalte, dichtheid, samendrukbaarheid, bodemsterkte, bodemstructuur en zand- en kleigehalte en door apparaateigenschappen, zoals de hoek, diameter en ruwheid van de conus en de snelheid van penetratie (Lowery and Morrison, 2002; Vaz et al., 2011). Een hogere indringingsweerstand hoeft dus niet direct te duiden op een verdichting, het kan ook een (scherpe) overgang in textuur of vochtgehalte betekenen.

Om de invloed van het vochtgehalte te verminderen, wordt geadviseerd om metingen uit te voeren wanneer de bodem op veldcapaciteit is (veldvochtig, pF 2.0). Bij deze uniforme drukhoogte kan in diverse bodemtypen het volumetrisch vochtgehalte verschillen, omdat de waterretentiecurve anders is (zie Van den Elsen et al., 2020, Bijlage 9). In de praktijk kan aan de eis om de meting bij veldcapaciteit uit te voeren niet altijd tot meestal niet worden voldaan. Ook zal de vochttoestand met de diepte meestal variëren, waardoor het meten van de indringingsweerstand in de praktijk slechts met een beperkte nauwkeurigheid kan worden uitgevoerd.

Metingen worden in de praktijk vaak in vijfvoud uitgevoerd, om ruimtelijke variatie van bodemeigenschappen op korte afstand voor een groot deel uit te middelen. Een veel gehanteerde vuistregel is dat wortels gehinderd worden als de indringingsweerstand groter wordt dan $>0,8\text{--}2$ MPa en onmogelijk wordt als de indringingsweerstand groter wordt dan 5 MPa, afhankelijk van het gewas (Atwell, 1993; Passioura, 2002; Bengough et al., 2011; Coelho Filho et al., 2013; Grzesiak et al., 2013; Pfeifer et al., 2014b; Colombi and Walter, 2015). In de praktijk wordt als vuistregel een indringingsweerstand van 3 MPa als grens voor wortelgroei gehanteerd (Camp and Lund, 1968; Van Dam en Hulshof, 1967; Houben, 1972; Taylor and Gardner, 1963; zie ook hoofdstuk 4).

Het meten van de bulkdichtheid van de bodem, het gewicht van de bodem in een bepaald volume, wordt normaliter gedaan door het steken van Copecky-ringen van 100 cm^3 en deze in het laboratorium te wegen, drogen en wegen om de veldbulkdichtheid, de droge bulkdichtheid en het vochtgehalte te bepalen. Dit is echter tijdrovend, verstoort de bodem door het graven van een kuil en de doorlooptijd is lang.

De MS-Rho bulkdichtheidssensor meet op elke gewenste diepte tot 100 cm diepte en per 5 cm diepte de werkelijke of veldbulkdichtheid op minerale gronden. De laatste versie van de sensor heeft ook een bodemvochtsensor, waardoor de veldbulkdichtheid kan worden omgerekend naar droge bulkdichtheid. De bulkdichtheidsmeting is gebaseerd op de afname of absorptie van een bekende hoeveelheid gammastraling door het materiaal rondom de sensor, in dit geval de bodem en het aanwezige bodemvocht. De sensor zendt een bekende en kleine hoeveelheid gammastraling uit en een detector 5 cm daarboven meet hoeveel van het signaal over is nadat het door de bodem is gegaan. Omdat het volume dat de straling kan bereiken, bekend is en de massa van het materiaal rondom de hoeveelheid absorptie wordt bepaald, kan uit de afname van het signaal de veldbulkdichtheid van de bodem worden afgeleid. Het aangepaste ontwerp van de sensor, volgend op een ontwerp uit 2009 (Jacobs et al., 2009) tot 100 cm diepte, is voorlopig gevalideerd op verschillende grondsoorten in Nederland. De analyse van een deel van deze data is nog in volle gang (Van Egmond et al., 2022; in druk).

5.2.3 Bodemvocht

Bodemvocht is op verschillende manieren een belangrijke indicator wanneer we de effecten van bodemverdichting op gewasteelt onderzoeken. Vanuit de grondmechanica gezien zal de kans op verdichting toenemen naarmate een bodem natter is bij het berijden door een landbouwvoertuig. Voor de gewasgroei is het bodemvochtgehalte belangrijk voor de wortelontwikkeling en het bodemvochtgehalte is ook van invloed op de zuurstofdiffusie en het zuurstofgehalte in de bodem. Ook bij het meten van de penetratieweerstand door middel van een penetrologger heeft het bodemvochtgehalte een grote invloed. Het is om diverse redenen dus belangrijk om het bodemvochtgehalte in verschillende fasen van het onderzoek nauwkeurig te kunnen meten.

In de afgelopen jaren is er een toenemend aantal in-situ-bodemvochtsensoren beschikbaar gekomen. De meeste methoden zijn gebaseerd op een meting van de diëlektrische permittiviteit K_s van de bodemmatrix (een mengsel van minerale delen, organische delen, water en lucht). Omdat de diëlektrische permittiviteit K_s

van de bodemmatrix sterk afhankelijk is van de water-component (water: $K_w = 80$, lucht: $K_l = 1$, minerale delen: $K_s = 2-4$, organische stof: $K_{os} = 1-8$), is een bodemvochtsensor het gevoeligst voor het volumetrisch vochtgehalte van de bodemmatrix (Topp and Davis, 1985). Maar de andere bestanddelen – lucht, minerale delen en organische stof – hebben ook invloed op de meting; hoewel deze over het algemeen constant blijven tijdens een meetcyclus, kunnen deze wel veranderen op een andere locatie in het veld of bij een andere grondsoort. Daarom is ijkning van een sensor voor een bepaalde grondsoort van belang voor betrouwbare resultaten. Ook secundaire factoren als temperatuur, geleidbaarheid, textuur etc. hebben invloed op de (nauwkeurigheid van de) meting. In de diëlektrische bodemvochtsensoren kunnen twee hoofdgroepen worden onderscheiden: TDR en FDR.

Time Domain Reflectometry (TDR) wordt algemeen erkend als de nauwkeurigste methode. Het meet de looptijd en reflectie van een elektromagnetische puls over de lengte van twee metalen pennen in de bodem en relateert die looptijd aan de resulterende diëlektrische permittiviteit, en dus het vochtgehalte in de bodem. De gebruikte techniek is relatief ongevoelig voor andere mogelijke invloeden op het signaal, zoals textuur, opgeloste zouten (die leiden tot elektrische geleidbaarheid in de bodem), organischestofgehalte etc. De lengte en de onderlinge afstand van de pennen hangt af van de uitvoering en fabricaat. De apparaten zijn veel kostbaarder dan FDR-sensoren vanwege de complexiteit van de gebruikte techniek. TDR is minder gevoelig voor dichtheidsveranderingen in de bodem, maar er kunnen wel meetverschillen ontstaan door dichtheidsvariëaties in eenzelfde veld. Voorbeelden van fabrikanten van TDR-apparatuur zijn TRASE (USA) en Trime (GER).

Frequency Domain Reflectometry (FDR) is gebaseerd op hetzelfde principe als TDR, waarbij de diëlektrische permittiviteit wordt gemeten, die sterk afhankelijk is van het vochtgehalte. FDR werkt in het frequentiedomein in plaats van het tijdsdomein. FDR werkt niet met een elektromagnetische puls, maar met een continu wisselspanningssignaal van een bepaalde frequentie, waarbij de diëlektrische permittiviteit van het bodemmengsel de oscillatiefrequentie van het wisselspanningssignaal bepaalt en dus een maat is voor het vochtgehalte. Bij FDR is de gebruikte meetfrequentie (of frequenties) relevant voor de nauwkeurigheid, omdat de resulterende diëlektrische permittiviteit K_a ook weer afhankelijk is van de gebruikte frequentie van het meetsignaal. Modernere FDR-sensoren kunnen met twee frequenties meten om bepaalde afwijkingen te kunnen compenseren. FDR is, sterker dan TDR, afhankelijk van textuur (bodemtype), opgeloste zouten, organische stof en dichtheid, maar ook van de ruimtelijke vochtverdeling (Van den Elsen et al., 2014). Een goede kalibratie voor deze zaken is bij FDR essentieel. Op FDR gebaseerde sensoren zijn o.a. die van Dacom, SensoTerra, Delta-T en Metergroup.

De uitvoeringsvormen zijn grotendeels onder te verdelen in sensoren die op een enkele diepte het bodemvochtgehalte meten en sensoren die een reeks metingen kunnen doen in een bodemprofiel. Het laatste type bestaat vaak uit een staaf waarin op vaste afstand meerdere sensoren zijn aangebracht. Kalibratie is nodig om het effect van textuur en porositeit of bulkdichtheid op de meetwaarde uit te sluiten. Grote veranderingen in de zoutconcentratie worden in Nederlandse omstandigheden verondersteld niet op te treden, maar enige voorzichtigheid bij het interpreteren van meetwaarden na het bemesten is wel aan te raden. FDR-sensoren zijn ook gevoeliger voor luchtspleten dan TDR-sensoren: FDR-profielsensoren zijn gevoelig voor luchtspleten tussen de meetstaaf en de bodem en sensoren met pennen zijn gevoelig voor luchtspleten rondom de pennen. Deze situaties dienen zo veel mogelijk te worden voorkomen, omdat anders grote meetfouten het gevolg zijn. FDR is relatief goedkoop, omdat de meettechniek simpeler is. Er is een (grote) variatie aan nauwkeurigheid in de beschikbare apparatuur.

Naast in situ (op een vaste plek) meten komen er ook steeds meer methoden om bodemvocht ruimtelijk te meten. Sommige van dergelijke methoden worden bediend vanaf een quad, drone of vliegtuig, andere op een satelliet. Het meetprincipe van Synthetic Aperture Radar (SAR) dat wordt gebruikt op satellieten zoals Sentinel 1 is gebaseerd op radar, wat betekent dat een elektromagnetisch signaal wordt uitgezonden, reflecteert op een object, in dit geval de bodem of het aardoppervlak, en de reflectie wordt weer opgevangen door de antenne. Het ontvangen signaal wordt bij kale grond beïnvloed door oppervlakteruwheid en bodemvocht. SAR heeft verschillende banden met verschillende frequenties, elk met verschillende penetratiekenmerken. Typisch dringt een signaal van een satelliet ongeveer 5 cm de grond in. De resolutie op een satellietplatform is beperkt en hoger in een vliegtuig.

Er bestaan verschillende indices en modellen om schattingen van bodemvocht af te leiden uit zichtbare en infrarode satellietbeelden. Ook voor bodemvochtindicaties wordt steeds vaker gebruikgemaakt van thermische satellietbeelden. Het basisprincipe is dat een vochtige grond een lagere temperatuur heeft dan een droge grond. Het heeft wel nadelen, bijvoorbeeld de invloed van wolken op de bodemtemperatuur. Ook passieve en actieve microgolfverstrooiing wordt steeds vaker toegepast. Elk model heeft zijn voor- en nadelen. De belangrijkste principes en schattingstechnieken worden geïllustreerd door Zhang and Zhou (2016). Voor alle satellietgebaseerde of gevlogen methoden is de penetratiediepte van het signaal in de bodem beperkt tot de eerste 1 tot 5 cm.

5.2.4 Zuurstofgehalte en zuurstofdiffusie

Niet alleen de mechanische indringingsweerstand ten gevolge van verdichting vormt een belemmering voor wortelgroei, ook de afwezigheid van (voldoende) zuurstof kan een belangrijke reden hiervoor zijn, hoewel plantenwortels in staat zijn inwendige luchtkanalen te ontwikkelen, de zogenaamde aerenchyma, om op die manier een onvoldoende aanvoer van zuurstof door de bodem te compenseren (Colombi et al., 2017; Vanhees et al., 2021). Dit vergt wel weer extra energie van de plant die niet in de vruchtontwikkeling kan worden gestoken, wat weer negatief werkt op de opbrengst. Bovendien zijn niet alle gewassen even goed in staat aerenchyma te creëren en dit is soms ook weer afhankelijk van het groeistadium van het gewas (Van Noordwijk and Brouwer, 1993). Zoals al in paragraaf 3.2 is geconcludeerd, wordt de bodemluchthuishouding sterk beïnvloed door eventuele verdichting van de bodem en beïnvloedt op deze manier de omgeving waarin planten wortelen. Voor plantenwortels is aanwezigheid van zuurstof in de bodem belangrijk. Dit betekent dat zowel aanwezigheid van zuurstof en het transport van die zuurstof naar de plek waar de plantenwortels groeien, potentieel belangrijke parameters zijn om te meten. In de literatuur worden relatief weinig publicaties over zuurstofdiffusie en zuurstofgehalte gevonden, omdat de metingen relatief lastig en kostbaar zijn.

Gastransport – en dus ook zuurstoftransport – in de bodem vindt plaats via gasdiffusie van het grensvlak atmosfeer-bodem (maaiveld) naar de plantenwortel. Eventuele verdichte bodemlagen vormen een belemmering voor deze gasdiffusie. Twee parameters zijn binnen dit mechanisme dus van belang: de absolute hoeveelheid (of concentratie) van zuurstof aanwezig op een bepaalde diepte in de bodem en de capaciteit van zuurstoftransport vanuit de atmosfeer naar die bepaalde diepte, de zuurstofdiffusie. De hoeveelheid zuurstof die door plantenwortels wordt geconsumeerd (het 'verbruik'), is bepalend voor hoe groot de transportcapaciteit in de bodem – ofwel de Oxygen Diffusion Rate (ODR) – dient te zijn. Deze ODR kan worden gemeten met een ODR-meter.⁹

Het zuurstofgehalte kan worden gemeten met een zogenaamde bodemzuurstofmeter. Deze meter kan met behulp van een priksonde het zuurstofgehalte van een bepaalde diepte in het bodemprofiel meten. Er zijn diverse soorten commercieel verkrijgbaar; bijvoorbeeld de bodemzuurstofmeter van Riken Keiki.¹⁰ Dit type kan met een priksonde het zuurstofgehalte tot 1 meter diepte bepalen.

5.2.5 Waarnemen van wortelgroei in kuilen

Veldexperimenten in plots met en zonder een verdichte bodemlaag kunnen gebruikt worden om na te gaan of de bewortelingsprofielen verschillen. Er zijn verschillende methodes om de hoeveelheid wortels in de bodem te meten (Oliveira et al., 2000; Van Noordwijk et al., 2000; Smit et al., 2000). Deze variëren van het nemen van steekmonsters, het nemen van intacte grote bodemmonsters (spijkerbord) waaruit wortels worden vrijgespoeld tot het visueel beoordelen in kuilen. Omdat dit vaak bewerkelijke en destructieve methodes betreft, is het aannemelijk dat dit slechts op één moment in het groeiseizoen kan plaatsvinden, bijvoorbeeld door een visuele waarneming van de bewortelingsdiepte voor beide plots.

⁹ Eijkelpark produceert en levert een Oxygen Diffusion Meter.

¹⁰ Onder andere verkrijgbaar bij Eijkelpark.

5.3 Implicaties voor vervolgonderzoek

Laboratoriumonderzoek is van belang, omdat in het laboratorium veel randeffecten kunnen worden vermeden. Hierbij kan gedacht worden aan regenbuien, bemestingsverschillen, zonlichtvariaties, grondwaterfluctuaties, bodembioologische effecten, interacties tussen boven- en onderlagen, structuurverschillen. Op deze wijze zijn de resultaten eenduidig toe te schrijven aan de te onderzoeken componenten. De resultaten zijn toepasbaar in hydrologische modellen voor scenariostudies.

Laboratoriumproeven staan uiteindelijk wel ten dienste van de praktijk. Bij het inrichten van de proeven is het belangrijk daarmee rekening te houden om de doorvertaling van laboratorium naar veld te kunnen maken. In het veld is een grotere verscheidenheid aan grondsamenstellingen aanwezig, bijvoorbeeld gronden met scheurvorming en verschillende structuur en textuur. In het BoVer-project is ruimte om voor één of twee bodems de relaties af te leiden tussen bijvoorbeeld dichtheid, waterretentie en doorlatendheid, zuurstofdiffusie en wortelontwikkeling. Het kan gezien worden als een *proof of concept* om de mate van gewasgroevermindering aan te tonen bij verschillende verdichtingsgraden. Het ligt voor de hand om bij bevredigende resultaten de experimenten voort te zetten voor andere gronden, zodat een doorvertaling naar meerdere praktijksituaties mogelijk wordt. Een spin-off van dit project is dat de K0-50-methode wordt uitontwikkeld en toegepast en dat er een laboratoriumopstelling komt voor penetrometermetingen onder sterk gecontroleerde condities. Dit kan interpretaties van in het veld uitgevoerde metingen vergemakkelijken en inzichten geven voor het verbeteren ervan.

In tegenstelling tot laboratoriumonderzoek, waar we de invloed van diverse versturende factoren willen uitsluiten, is bij veldonderzoek van belang dat we gaan kijken hoe gewassen zich gedragen bij een verdichte bodemlaag in het profiel onder veldomstandigheden. Onder veldomstandigheden spelen de invloed van klimaat (temperatuur, neerslag), veldvariabiliteit (verschillen in textuur, dichtheid, vochtgehalte, bemesting, etc.) nadrukkelijk mee en we kunnen daar waarnemen hoe verdichting in de praktijk uitpakt voor de wortelontwikkeling, gewasontwikkeling en gewasopbrengst.

Belangrijk is om niet alleen dat te monitoren waarin we uiteindelijk geïnteresseerd zijn: gewasparameters (opbrengst en wortelontwikkeling), maar ook zaken die daarop van invloed kunnen zijn, zoals lucht- en bodemtemperatuur, bodemvochtgehalte, neerslag, zuurstofgehalte en zuurstofdiffusie, dichtheid, mate van verdichting en indringingsweerstand. Integratie, of in ieder geval koppeling, van laboratorium- en veldmetingen is gewenst: van de zaken die in het laboratorium worden geconstateerd en geconcludeerd n.a.v. de proeven willen we in het veld graag zien of, en in welke mate, ze in de praktijk ook optreden en of de laboratoriumdata kunnen helpen om de velddata beter te interpreteren. De combinatie van laboratorium- en veldmetingen moet dan uiteindelijk helpen bij het kwantificeren van (afname van) gewasontwikkeling en opbrengstderving ten gevolge van ondergrondverdichting, de mate waarin dit optreedt, bij welk gewas en onder welke omstandigheden. Ook moeten de veldmetingen en de combinatie van laboratorium- en veldmetingen uitwijzen welke veldmetingen relevant en toepasbaar zijn voor het vaststellen van bodemverdichting en het risico hierop.

6 Grenswaarden aan bodemverdichting

6.1 Grenswaarden

Het bepalen van de mate en de ernst van bodemverdichting wordt veelal gekoppeld aan de gevolgen voor de diverse bodemfuncties. Lebert et al. (2007) onderscheiden drie categorieën bodemfuncties (luchthuishouding, waterhuishouding en plantengroei) en koppelen daar diverse individuele bodemparameters aan. Van deze bodemparameters zien zij het luchtgevulde poriënvolume, de verzadigde doorlatendheid en de bulkdichtheid, pakkingsdichtheid en porositeit als belangrijkste indicatoren voor bodemverdichting. Huber et al. (2008) voegen hieraan nog indringingsweerstand en wortelgroei (visuele beoordeling) toe. In het onderstaande is een overzicht gegeven van de waarde van diverse bodemparameters, waarbij de bodem als verdicht wordt verondersteld. Hierbij ligt de focus op de parameters die kunnen worden gemeten in het laboratorium of veld en niet op de visuele beoordeling.

6.1.1 Bulkdichtheid

De droge bulkdichtheid is een van de meest gebruikte parameters om de mate van bodemverdichting te duiden. Uit een literatuuronderzoek naar bulkdichtheid (zie Bijlage 2) blijkt dat de bulkdichtheid een parameter is die bepaald wordt door diverse andere bodemparameters, zoals porositeit, organischestofgehalte en soortelijke dichtheden van de minerale delen. Dit maakt bulkdichtheid een complexe doorgronden parameter, die niet goed te beoordelen is in relatie tot het bodemgebruik/probleem, zonder iets te weten van de onderliggende parameters. Verder blijkt er een sterke relatie te zijn tussen de porositeit en de droge bulkdichtheid. Om te weten welke invloed een verlaagde porositeit op hydraulische eigenschappen heeft, moet duidelijk zijn welke poriën worden beïnvloed door de samendrukking (verhoogde bulkdichtheid). Met name de afname van macroporiën ($> 50 \mu\text{m}$) is daarin belangrijk. Het bepalen van de hoeveelheid macroporiën als aanvulling op het meten van bulkdichtheid kan meer zicht geven op de invloed van een veranderende bulkdichtheid. Ook blijkt bulkdichtheid, zeker voor de bovenste 30 cm, over de tijd geen constante parameter en kan onder invloed van klimaat, plantengroei en grondbewerking sterk verschillen. Dit geldt extra voor gronden met een hoog kleigehalte die gaan zwellen en krimpen als gevolg van uitdroging/vernatting.

De grenswaarden voor bodemverdichting die aan droge bulkdichtheid worden gesteld, zijn veelal gerelateerd aan de mate waarin een grond gevoelig is voor (verdere) verdichting. Zo wordt door Renger (1970) de term *Lagerungsdichte* of *Packing density* geïntroduceerd. De (effectieve) *Lagerungsdichte* wordt in het veld vastgesteld en is ingedeeld in een vijftal klassen (Renger et al., 2014):

- zeer gering: $< 1,3 \text{ g cm}^{-3}$
- gering: $1,3 - 1,55 \text{ g cm}^{-3}$
- gemiddeld: $1,55 - 1,75 \text{ g cm}^{-3}$
- groot: $1,75 - 1,95 \text{ g cm}^{-3}$
- zeer groot: $> 1,95 \text{ g cm}^{-3}$

Deze *Lagerungsdichte* kan in het laboratorium worden bepaald op basis van een droge bulkdichtheid die gecorrigeerd is voor het klei- en siltgehalte (zie Bijlage 2).

Renger (1970) heeft van diverse gronden in Duitsland de droge bulkdichtheid en het kleigehalte bepaald en heeft op basis daarvan een relatie ontwikkeld tussen beide grootheden. Vervolgens is van alle monsters op basis van visuele waarneming bepaald wat de structuur is (al dan niet verdicht). Op basis daarvan is een verdeling van de *packing density* gemaakt: $< 1400 \text{ kg m}^{-3}$ niet verdicht, $1400\text{-}1750 \text{ kg m}^{-3}$ licht verdicht, $> 1750 \text{ kg m}^{-3}$ sterk verdicht. Door Van den Akker en De Groot (2008) zijn de grenswaarden van Renger omgezet naar grenswaarden voor kleigronden (lutum $> 17,5\%$). Voor zandgronden, met een laag organischestofgehalte, wordt door Van den Akker en De Groot (2008) op basis van een minimaal poriëngehalte van 40% de grenswaarde voor droge bulkdichtheid waarboven sprake is van verdichting, op

1600 kg m⁻³ gesteld. Uit verdichtingsproeven op bloembollenvelden blijkt dat een minimaal poriëngehalte van 40% nodig is voor het goed functioneren van het wortelstel (Van de Valk en De Haan, 1974).

De grenswaarden die in Nederland veelal worden gesteld aan droge bulkdichtheid zijn dus gebaseerd op relaties uit onderzoek aan een beperkt aantal Duitse gronden uit de jaren zeventig van de vorige eeuw. Omdat er in Nederland geen onderzoeken zijn gedaan om deze grenswaarden te verifiëren, moeten de grenswaarden voor bulkdichtheid voor Nederlandse gronden met de nodige terughoudendheid worden gebruikt. Zeker voor zandgronden is de wetenschappelijke basis erg beperkt. Verder wordt in Nederland geen rekening gehouden met het organischestofgehalte.

6.1.2 Luchtgevulde poriënvolume

Huber et al. (2008) concluderen op basis van diverse bronnen dat het luchtgevulde poriënvolume in de bodem groter moet zijn dan 10% in verband met de zuurstofvoorziening aan plantenwortels. Het blijkt dat deze waarde met name gebaseerd is op onderzoek voor bovengrond. Lebert et al. (2007) komen op basis van Duits onderzoek tot de conclusie dat voor de diepere ondergrond deze waarde lager mag liggen; zij stellen een ondergrens van 5%. Daarnaast is het belangrijk te realiseren dat de grenswaarde voor het luchtgevulde poriënvolume sterk afhankelijk is van de zuigspanning. Huber et al. (2008) geven aan dat hun grenswaarde van 10% alleen geldt bij een zuigspanning van $pF = 2,5$.

Huber et al. (2008) baseerden hun conclusies onder meer op het werk van Bakker et al. (1987; zie ook paragraaf 3.2). Daarin wordt gesteld dat plantenwortels geen zuurstofproblemen ondervinden als de zuurstofdiffusiecoëfficiënt groter is dan $30 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ en dat ernstige zuurstofproblemen optreden indien deze kleiner is dan $1.5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (Bakker et al., 1987, Figuur 3). Mede op basis hiervan geven Huber et al. (2008) minimale en gewenste luchtgevulde poriënvolumes waarboven geen negatieve zuurstofstress (anaërobie) mag worden verwacht (Tabel 3).

Tabel 3 Minimale en gewenste luchtgevulde poriënvolumes voor diverse klassen bodemstructuur (Bron: Huber et al., 2008, Tabel 7.3).

Bodemstructuur	Minimaal luchtgevuld poriënvolume	Gewenst luchtgevuld poriënvolume
Excellent	> 2%	> 14%
Goed	> 5%	> 15%
Matig	> 8%	> 17%
Slecht of structuurloos	> 12%	> 21%

6.1.3 Verzadigde doorlatendheid

Lebert et al. (2007) komen op basis van onderzoeken uit de jaren zestig van de vorige eeuw naar stagnerende zones tot een minimale waarde voor de verzadigde doorlatendheid van 10 cm d^{-1} . Zij geven hierbij aan dat deze grenswaarde voor stagnatie sterk afhankelijk is van de mate waarin de structuur van de ondergrond wordt beïnvloed door natuurlijke processen, zoals bevriezen/dooien en drogen/vernatten. Huber et al. (2008) komen mede gebaseerd op andere onderzoeken ook tot de conclusie dat 10 cm d^{-1} een bruikbare grenswaarde is.

6.1.4 Indringingsweerstand

De grenswaarden voor bodemverdichting die gevonden worden voor de indringingsweerstand lopen sterk uiteen; van 2 tot 5 MPa (Huber et al., 2008). Dit wordt veroorzaakt doordat er geen eenduidige relatie is tussen de indringingsweerstand en de mogelijkheid van de wortels om door een verdichte laag heen te groeien (zie ook paragraaf 4.1 en 5.2.2). Sommige gronden met een hoge indringingsweerstand hebben nog steeds een zodanig structuur dat daarin wortelgroei mogelijk is.

6.2 Implicaties voor vervolgonderzoek

De onderzoeken naar grenswaarden voor de bodemindicatoren die bodemverdichting kenmerken, zijn beperkt onderbouwd. Veelal zijn grenswaaredebepalingen terug te voeren op enkele, veelal decennia oude onderzoeken; vervolgens wordt getracht deze te bevestigen met meer recente onderzoeken. Deze werkwijze leidt ertoe dat er een vorm van consensus over de grenswaarden ontstaat waarvan de gebruikers niet meer weten hoe die zijn bepaald, wat het toepassingsgebied is en met welke onzekerheden die zijn omgeven. Nederlands onderzoek naar grenswaarden is vrijwel niet uitgevoerd; wel zijn veel onderzoeken gedaan waarbij de gemeten waarden van de indicatoren van bodemverdichting werden vergeleken met de hier genoemde grenswaarden.

Verder zijn veel grenswaarden terug te voeren op onderzoek in de bovengrond (de bovenlaag die door groundbewerking wordt beïnvloed) en maar beperkt op de ondergrond. Daarnaast zijn veel grenswaarden sterk afhankelijk van het vochtgehalte in de bodem op het moment van beoordeling. Dit geldt met name voor de indringingsweerstand en het luchtgevulde poriënvolume.

Ten slotte geven Lebert et al. (2007) aan dat de diverse grenswaarden in samenhang moeten worden gezien. Zij stellen dat een ondergrond alleen als verdicht kan worden beschouwd als alle hier genoemde grenswaarden (met uitzondering van de indringingsweerstand) worden overschreden.

Zoals in de inleiding van dit onderzoek al is aangehaald, zijn veel van de grenswaarden beperkt gerelateerd aan planten-/wortelgroei en hebben ze een sterk bodemfysisch of grondmechanisch karakter. Verder zijn grenswaarden veelal vastgesteld voor specifieke bodem- en plantcondities, maar worden ze vaak zeer generiek toegepast. In het vervolg van het onderzoek is het belangrijk niet te snel een directe relatie te leggen met de hier genoemde grenswaarden.

7 Conclusies en aanbevelingen voor vervolgonderzoek

Verdichting in een bodemlaag betekent dat de structuur verandert. Dat heeft gevolgen voor de waterretentie-, doorlatendheids- en zuurstofdiffusie-eigenschappen van die bodemlaag. Tevens zal het gewas hinder kunnen ondervinden om die laag te bewortelen of doorwortelen. Via een literatuuronderzoek is nagegaan wat er over deze onderwerpen zoal bekend is. Over het algemeen kan gesteld worden dat het niet mogelijk is (gebleken) om vast te stellen welk deelproces (wateroverlast, zuurstoftekort, doorworteling) het dominantst is in de vaak waargenomen negatieve effecten van bodemverdichting op gewasontwikkeling. Het zal zeer waarschijnlijk een samenspel van factoren zijn die bepalen wat het nadelige effect op het gewas zal zijn.

Het vooronderzoek heeft richting gegeven aan het vervolgonderzoek in project BoVer dat in het veld, laboratorium en door middel van modelberekeningen kan worden uitgevoerd. De belangrijkste aanbevelingen zijn hieronder beschreven.

- **Invloed verandering droge bulkdichtheid op zuurstofdiffusie is voor Nederlandse bodems voldoende onderzocht**

In het verleden zijn zuurstofdiffusiecoëfficiënten als functie van het luchtgevulde poriënvolume vastgesteld voor diverse Nederlandse bodems. Omdat bij toename van de droge bulkdichtheid de porositeit afneemt en daarmee het aandeel luchtgevulde poriën snel kleiner wordt, is daarmee dus al kennis beschikbaar over de invloed van verandering van droge bulkdichtheid op zuurstofdiffusie.

- **Aanvullende metingen van waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken zijn wenselijk bij zowel niet-verdichte als verdichte omstandigheden voor enkele Nederlandse gronden**

In de internationale literatuur is aandacht besteed aan de invloed van verandering van droge bulkdichtheid op de vorm van de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken. Er zijn zelfs functionele relaties voorgesteld voor hoe de parameters van de Mualem-Van Genuchten-relaties, die deze karakteristieken beschrijven, veranderen bij verandering van de droge bulkdichtheid. Het ligt voor de hand om dergelijke relaties te toetsen door voor enkele Nederlandse bodemlagen de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken te meten onder zowel niet-verdichte als verdichte omstandigheden. Dat kan het best gebeuren onder laboratoriumomstandigheden. Als blijkt dat de invloed van een veranderde droge bulkdichtheid door dergelijke functionele relaties kan worden beschreven, kunnen die ook voor andere bodemlagen in Nederland worden toegepast in een simulatiemodel.

- **Laboratoriumtesten onder geconditioneerde omstandigheden kunnen gevolgen van verdichtingsprocessen helpen ontrafelen**

Laboratoriumonderzoek is van belang, omdat in het laboratorium veel randeffecten kunnen worden vermeden. Voorbeelden van randeffecten zijn regenbuien, bemestingsverschillen, zonlichtvariaties, grondwaterfluctuaties, bodembioologische effecten, interacties tussen boven- en onderlagen en structuurverschillen. Op basis van metingen onder laboratoriumomstandigheden zijn de resultaten eenduidig toe te schrijven aan de te onderzoeken componenten. De resultaten zijn toepasbaar in hydrologische modellen voor scenariostudies. In dit onderzoek is ruimte om van een enkele grond de relaties af te leiden tussen dichtheid, waterretentie en doorlatendheid, zuurstofdiffusie en wortelontwikkeling. Het kan gezien worden als een *proof of concept* om de mate van gewasgroei- en vermindering aan te tonen bij verschillende verdichtingsgraden. Het ligt voor de hand om bij bevredigende resultaten de experimenten voort te zetten voor andere gronden, zodat een doorvertaling naar meerdere praktijksituaties mogelijk wordt.

- **Nieuwe meetmethoden noodzakelijk om gevolgen van bodemverdichting te meten**

Een spin-off van dit project is dat de K0-50-methode wordt uitontwikkeld en getest en dat er een laboratoriumopstelling komt voor penetrometermetingen onder sterk gecontroleerde condities. Dit kan interpretaties van in het veld uitgevoerde metingen vergemakkelijken en inzichten geven voor het verbeteren ervan.

- **Veldexperimenten moeten relatie leggen tussen gewasontwikkeling en bodemfysische veranderingen**

In tegenstelling tot laboratoriumonderzoek, waar we de invloed van diverse versturende factoren willen uitsluiten, is bij veldonderzoek van belang dat we gaan kijken hoe gewassen zich gedragen bij een verdichte bodemlaag in het profiel onder veldomstandigheden. Onder veldomstandigheden spelen de invloed van klimaat (temperatuur, neerslag), veldvariabiliteit (verschillen in textuur, dichtheid, vochtgehalte, bemesting etc.) nadrukkelijk mee en we kunnen daar waarnemen hoe verdichting in de praktijk uitpakt voor de wortelontwikkeling, gewasontwikkeling en gewasopbrengst. Belangrijk is om niet alleen dat te monitoren waarin we uiteindelijk geïnteresseerd zijn: gewasparameters (opbrengst en wortelontwikkeling), maar ook zaken die daarop van invloed kunnen zijn, zoals lucht- en bodemtemperatuur, bodemvochtgehalte, neerslag, zuurstofgehalte en zuurstofdiffusie, dichtheid, mate van verdichting en indringingsweerstand.

- **Koppeling veld- en labonderzoek moet duidelijk maken welke veldmetingen relevant zijn voor het aantonen van bodemverdichting**

Integratie, of in ieder geval koppeling, van laboratorium- en veldmetingen is gewenst: van de zaken die in het laboratorium worden geconstateerd en geconcludeerd n.a.v. de proeven willen we in het veld graag zien of, en in welke mate, ze in de praktijk ook optreden en of de laboratoriumdata kunnen helpen om de velddata beter te interpreteren. De combinatie van laboratorium- en veldmetingen moet dan uiteindelijk helpen bij het kwantificeren van (afname van) gewasontwikkeling en opbrengstderving ten gevolge van ondergrondverdichting, de mate waarin dit optreedt, bij welk gewas en onder welke omstandigheden. Ook moeten de veldmetingen en de combinatie van laboratorium- en veldmetingen uitwijzen welke veldmetingen relevant en toepasbaar zijn voor het vaststellen van bodemverdichting en het risico hierop.

- **Verdichtingsproeven in het laboratorium moeten gerelateerd worden aan belastingspatronen in het veld**

De wijze waarop een bodem wordt verdicht, is van grote invloed op de bodemeigenschappen. Bij verdichting door machines gaat het om een snelle belasting die herhaaldelijk wordt uitgevoerd. Ook heeft de bodem de mogelijkheid na de snelle belasting weer op te veren. Dit betekent dat de laboratorium- en veldtesten die gedaan worden, dit specifieke belastingspatroon moeten volgen. Ook zal de belasting moeten aansluiten bij de krachten die in de bodem kunnen optreden. Ten slotte is het belangrijk voor de gevolgen van verdichtingsproces om te weten of de verdichting leidt tot vervorming of ook tot afschuiving. Omdat we in dit onderzoek met name geïnteresseerd zijn in de ondergrondverdichting (> 30 cm -mv), wordt voorts nog verondersteld dat met name vervormingsprocessen actief zijn op die grotere diepte. Dit impliceert dat laboratoriumtesten zich kunnen richten op de verticale en niet op de horizontale verplaatsing.

- **Invloed van verdichting op wortelgroei meten onder geconditioneerde omstandigheden**

Mechanische weerstand beïnvloedt de bulkdichtheid, het watergehalte en de zuurstofbeschikbaarheid van de bodem, en daarmee ook de wortelgroei en de verwerving van bodemhulpbronnen. De reacties van individuele worteleigenschappen en individuele wortelassen op verdichting worden beter begrepen dan de bredere compensatiereacties van het gehele wortelsysteem. Over het algemeen verminderen verdichte bodems de wortellengte en vergroten ze de worteldiameter. In het vervolgonderzoek zal met potproeven de invloed van ondergrondverdichting op de wortelverdeling inzichtelijk worden gemaakt.

- **Grenswaarden voor bodemverdichting meer relateren aan gewasopbrengst**

Veel van de grenswaarden voor bodemverdichting zijn beperkt gerelateerd aan planten-/wortelgroei en hebben een sterk bodemfysisch of grondmechanisch karakter. Verder zijn grenswaarden veelal vastgesteld voor specifieke bodem- en plantcondities, maar worden ze vaak zeer generiek toegepast.

- **Scenarioberekeningen met simulatiemodel**

Omdat we niet voor alle bodem-gewascombinaties metingen in het laboratorium en in het veld kunnen uitvoeren, is het gewenst om het effect van verdichte ondergrond ook met simulatiemodellen (bijvoorbeeld SWAP-WOFOST) te beschouwen. De uit te voeren laboratorium- en veldwerkzaamheden zijn dan ook zo geformuleerd dat ze gegevens opleveren (met name effect op waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken) die gebruikt kunnen worden als invoer voor dergelijke modellen. Door simulaties uit te voeren voor situaties met en zonder verdicht bodemlagen (scenarios) kan dan nagegaan worden wat de invloed van de aanwezigheid van een verdichte laag is op de waterbalans in de onverzadigde zone. In het huidige model SWAP-WOFOST wordt de macrodiffusie voor zuurstof beschreven als een sequentie van stationaire zuurstofprofielen. Omdat de dynamiek van watergehaltes, en dus ook luchtgehaltes, vrij groot kan zijn in de praktijk, lijkt een dergelijke aanpak niet realistisch. Voorgesteld wordt om macrodiffusie in SWAP-WOFOST te beschrijven volgens een dynamische diffusievergelijking.

Literatuur

- Abdalla, A.M., Hettiaratchi, D.R.P., and Reece, A.R. 1969. The mechanics of root growth in Granular media. *J. Agric. Eng. Res.* 14, 236–248. doi:10.1016/0021-8634(69)90126-7.
- Ahmed, M.A., Zarebanadkouki, M., Meunier, F., Javaux, M., Kaestner, A., and Carminati, A. 2018. Root type matters: measurement of water uptake by seminal, crown, and lateral roots in maize. *J. Exp. Bot.* 69, 1199–1206. doi:10.1093/jxb/erx439.
- Arvidsson, J. 1999. Nutrient uptake and growth of barley as affected by soil compaction. *Plant Soil* 208, 9–19. doi:10.1023/A:1004484518652.
- Assouline, S. 2006a. Modeling the Relationship between Soil Bulk Density and the Water Retention Curve. *Vadose Zone Journal* 5(2): 554–563. doi:10.2136/vzj2005.0083.
- Assouline, S. 2006b. Modeling the Relationship between Soil Bulk Density and the Hydraulic Conductivity Function. *Vadose Zone Journal* 5(2): 697–705. doi: 10.2136/vzj2005.0084.
- Atwell, B. 1990. The effect of soil compaction on wheat during early tillering: III. Fate of carbon transported to the roots. *New Phytol.* 115, 43–49. doi:10.1111/j.1469-8137.1990.tb00920.x.
- Atwell, B.J. 1993. Response of roots to mechanical impedance. *Environ. Exp. Bot.* 33, 27–40. doi:10.1016/0098-8472(93)90053-I.
- Bakema, G. en van den Akker, J.J.H. 2021. Terranimo - risicotool bodemverdichting, versie Nederland. Rapport 3063, Wageningen Environmental Research. <https://edepot.wur.nl/542087>
- Bakker, G. 2022. Hydrofysische gegevens van de bodem. Uitbreiding gegevens in 2021 en overdracht naar de Basisregistratie Ondergrond. WOt-technical report 216, Wageningen Environmental Research. <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/563651>
- Bakker, J.W., Boone, F.R., Boekel, P. 1987. Diffusie van gassen in grond en zuurstofdiffusiecoëfficiënten in Nederlandse akkerbouwgronden. Rapport 20, Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, Wageningen.
- Bakker, G., Heinen, M., Gooren, H.P.A., de Groot, W.J.M., Peters, P.D. 2020. Hydrofysische gegevens van de bodem in de Basisregistratie Ondergrond (BRO) en het Bodemkundig Informatie Systeem (BIS); Update 2019. WOt-technical report 186. Wageningen Environmental Research, Wageningen. <https://edepot.wur.nl/526509>
- Barber, S. 1995. Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach. New York, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Barken, L., Borresen, T., and Njos, A. 1987. Effect of soil compaction by tractor traffic on soil structure, denitrification, and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.). *J. Soil Sci.* 38, 541–552. doi:10.1111/j.1365-2389.1987.tb02289.x.
- Barracough, P.B., and Weir, A.H. 1988. Effects of a compacted subsoil layer on root and shoot growth, water use and nutrient uptake of winter wheat. *J. Agric. Sci.* 110, 207–216. doi:10.1017/S0021859600081235.
- Bartholomeus, R.P., Witte, J.P.M., van Bodegom, P.M., van Dam, J.C., Aerts, R. 2008. Critical soil conditions for oxygen stress to plant roots: substituting the Feddes-function by a process-based model. *Journal of Hydrology* 360: 147–165.
- Batey, T. 2009. Soil compaction and soil management - A review. *Soil Use Manag.* 25, 335–345. doi:10.1111/j.1475-2743.2009.00236.x.
- Bengough, A.G., Bransby, M.F., Hans, J., McKenna, S.J., Roberts, T.J., and Valentine, T.A. 2006. Root responses to soil physical conditions; growth dynamics from field to cell. *J. Exp. Bot.* 57, 437–447. doi:10.1093/jxb/erj003.
- Bengough, A.G., Croser, C., and Pritchard, J. 1997a. A biophysical analysis of root growth under mechanical stress. 155–164.
- Bengough, A.G., McKenzie, B.M., Hallett, P.D., and Valentine, T. A. (2011). Root elongation, water stress, and mechanical impedance: A review of limiting stresses and beneficial root tip traits. *J. Exp. Bot.* 62, 59–68. doi:10.1093/jxb/erq350.
- Bengough, A.G., Mullins, C.E., and Wilson, G. 1997b. Estimating soil frictional resistance to metal probes and its relevance to the penetration of soil by roots. *Eur. J. Soil Sci.* 48, 603–612. doi:10.1111/j.1365-2389.1997.tb00560.x.
- Bingham, I.J., Bengough, A.G., and Rees, R.M. 2010. Soil compaction-N interactions in barley: Root growth and tissue composition. *Soil Tillage Res.* 106, 241–246. doi:10.1016/j.still.2009.10.008.

- Boone, F.R. 1988. Weather and other environmental factors influencing crop responses to tillage and traffic. *Soil Tillage Research* 11: 283-324.
- Botta, G.F., Tolon-Becerra, A., Lastra-Bravo, X., and Tourn, M. 2010. Tillage and traffic effects (planters and tractors) on soil compaction and soybean (*Glycine max* L.) yields in Argentinean pampas. *Soil and Tillage Research*, 110(1), 167-174.
- Camp, C.R. and J.F. Lund 1968 Effect on mechanical impedance on cotton root growth. *Transactions of the A.S.A.E.*, vol.11, 2: 188-190.
- Chimungu, J., Loades, K., and Lynch, J. 2015. Root anatomical phenes predict root penetration ability and biomechanical properties in maize (*Zea Mays*). *J. Exp. Bot.* 66, 3151–3162. doi:10.1093/jxb/erv121.
- Clark, L.J., Bengough, A.G., Whalley, W.R., Dexter, A.R., and Barraclough, P.B. 1999. Maximum axial root growth pressure in pea seedlings : effects of measurement techniques and cultivars. 101–109.
- Clark, L., Whalley, W., and Barraclough, P. 2003. How do roots penetrate strong soil? *Plant Soil* 255, 93–104. doi:10.1023/A.
- Coelho Filho, M.A., Colebrook, E.H., Lloyd, D.P.A., Webster, C.P., Mooney, S.J., Phillips, A.L., et al. 2013. The involvement of gibberellin signalling in the effect of soil resistance to root penetration on leaf elongation and tiller number in wheat. *Plant Soil* 371, 81–94. doi:10.1007/s11104-013-1662-8.
- Colombi, T., and Keller, T. 2019. Developing strategies to recover crop productivity after soil compaction—A plant eco-physiological perspective. *Soil Tillage Res.* 191, 156–161. doi:10.1016/j.still.2019.04.008.
- Colombi, T., and Walter, A. 2015. Root responses of triticale and soybean to soil compaction in the field are reproducible under controlled conditions. *Funct. Plant Biol.* 43, 114–128. doi:10.1071/FP15194.
- Colombi, T., and Walter, A. 2017. Genetic Diversity under Soil Compaction in Wheat: Root Number as a Promising Trait for Early Plant Vigor. *Front. Plant Sci.* 8, 1–14. doi:10.3389/fpls.2017.00420.
- Colombi, T., Kirchgessner, N., Walter, A., and Keller, T. 2017. Root tip shape governs root elongation rate under increased soil strength. *Plant Physiol.* 174, 2289–2301. doi:10.1104/pp.17.00357.
- Colombi, T., Torres, L.C., Walter, A., and Keller, T. 2018. Feedbacks between soil penetration resistance, root architecture and water uptake limit water accessibility and crop growth – A vicious circle. *Sci. Total Environ.* 626, 1026–1035. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.01.129.
- Correa, J., Postma, J.A., and Wojciechowski, T. 2022. Phenotypic response to soil compaction varies among genotypes and correlates with plant size in sorghum. *Plant Soil*. doi:10.1007/s11104-021-05160-z.
- Correa, J., Postma, J.A., Watt, M., and Wojciechowski, T. 2019. Root system architectural plasticity and soil compaction: a review. *J. Exp. Bot.* 70, 6019–6034. doi:10.1093/jxb/erz383.
- Croser, C., Bengough, A.G., and Pritchard, J. 1999. The effect of mechanical impedance on root growth in pea (*Pisum sativum*). I. Rates of cell flux, mitosis, and strain during recovery. *Physiologia Plantarum*, 107(3), 277-286.
- Dane, J.H., Topp, G.C. (eds.). 2002. *Methods of Soil Analysis. Part 4 – Physical Methods*. Soil Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin, USA.
- Dangal, S.R.S., Sanderman, J., Wills, S., Ramirez-Lopez, L. 2019. Accurate and Precise Prediction of Soil Properties from a Large Mid-Infrared Spectral Library. *Soil Syst.* 3, 11. doi/10.3390/soilsystems3010011
- De Moraes, M.T., Bengough, A.G., Debiasi, H., Franchini, J.C., Levien, R., Schnepf, A., Leitner, D. 2018. Mechanistic framework to link root growth models with weather and soil physical properties, including example applications to soybean growth in Brazil. *Plant Soil* 428, 67–92. doi:10.1007/s11104-018-3656-z.
- Dexter, A.R., and Hewitt, J.S. 1978. The deflection of plant roots. *J. Agric. Eng. Res.* 23, 17–22. doi:10.1016/0021-8634(78)90075-6.
- Dirksen, C. and Matula, S. 1994. Automatic Atomized Water Spray System for Soil Hydraulic Conductivity Measurements. *Soil Science Society of America Journal* 58: 319-325. <https://doi-org.ezproxy.library.wur.nl/10.2136/sssaj1994.03615995005800020009x>
- Dörner, J., and Horn, R. 2009. Direction-dependent behaviour of hydraulic and mechanical properties in structured soils under conventional and conservation tillage. *Soil and Tillage Research*, 102(2), 225-232.
- Dresbøll, D.B., Thorup-Kristensen, K., McKenzie, B.M., Dupuy, L.X., and Bengough, A.G. 2013. Timelapse scanning reveals spatial variation in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) root elongation rates during partial waterlogging. *Plant and Soil*, 369(1), 467-477.
- Ehlers, W., Köpke, U., Hesse, F., and Böhm, W. 1983. Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soil. *Soil Tillage Res.* 3, 261–275. doi:10.1016/0167-1987(83)90027-2.
- EJP SOIL. 2022. SOILCOMPC Mapping and alleviating soil compaction in a climate change context, project proposal.
- Flint, L.E., and Flint, A.L. 2002. 2.3 Porosity. *Methods of Soil Analysis: Part 4 Physical Methods*, 5, 241-254.
- Goss, M.J. 1977. Effects of mechanical impedance on root growth in barley, *Hordeum vulgare* L.: II. Effects on cell development in seminal roots. *J. Exp. Bot.* 28, 1216–1227. doi:10.1093/jxb/28.5.1216.

- Gregory, P.J. 2006. Roots, rhizosphere and soil: The route to a better understanding of soil science? *Eur. J. Soil Sci.* 57, 2–12. doi:10.1111/j.1365-2389.2005.00778.x.
- Groenendijk, P., Schipper, P., Hendriks, R., van den Akker, J., Heinen, M. 2017. Effecten van verbetering bodemkwaliteit op waterhuishouding en waterkwaliteit. Deelstudies Goede Grond voor een duurzaam watersysteem. Rapport 2811 (STOWA rapport 2017-020), Wageningen Environmental Research, Wageningen. <https://edepot.wur.nl/418283>
- Grzesiak, S., Grzesiak, M.T., Hura, T., Marcińska, I., and Rzepka, A. 2013. Changes in root system structure, leaf water potential and gas exchange of maize and triticale seedlings affected by soil compaction. *Environ. Exp. Bot.* 88, 2–10. doi:10.1016/j.envexpbot.2012.01.010.
- Håkansson, I. 1990. A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. *Soil and tillage research*, 16(1-2), 105-120.
- Håkansson, I., and Lipiec, J. 2000. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. *Soil and Tillage Research*, 53(2), 71-85.
- Hamza, M.A., and Anderson, W.K. 2005. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil Tillage Res.* 82, 121–145. doi:10.1016/j.still.2004.08.009.
- Heinen, M., Bakker, G., and Wösten, J.H.M. 2020. Waterretentie-en doorlatendheidskarakteristieken van boven-en ondergronden in Nederland: de Staringreeks: Update 2018 (No. 2978). Wageningen Environmental Research.
- Heinen, M., Brouwer, F., Teuling, K., Walvoort, D. 2021. BOFEK 2020 – Bodemfysische schematisatie van Nederland. Update bodemfysische eenhedenkaart. WENR rapport 3056, Wageningen Environmental Research. <https://edepot.wur.nl/541544>
- Hernandez-Ramirez, G., Lawrence-Smith, E.J., Sinton, S.M., Tabley, F., Schwen, A., Beare, M.H., et al. 2014. Root Responses to Alterations in Macroporosity and Penetrability in a Silt Loam Soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 78, 1392–1403. doi:10.2136/sssaj2014.01.0005.
- Hettiaratchi, D.R.P. 1990. Soil compaction and plant root growth. *Philos. Trans. - R. Soc. London, B* 329, 343–355. doi:10.1098/rstb.1990.0175.
- Hoffmann, C., and Jungk, A. 1995. Growth and phosphorus supply of sugar beet as affected by soil compaction and water tension. *Plant Soil* 176, 15–25. doi:10.1007/BF00017671.
- Horn, R., and Smucker, A. 2005. Structure formation and its consequences for gas and water transport in unsaturated arable and forest soils. *Soil and Tillage Research*, 82(1), 5-14.
- Horn, R., T. Way, J. Rostek, 2003. Effect of repeated tractor wheeling on stress/strain properties and consequences on physical properties in structured arable soils. *Soil Till. Res.* 73, 101 – 106.
- Houben, J.M.M.Th. 1972. Wortelontwikkeling en bodemgesteldheid. *Bedrijfsontwikkeling* 5_, 2: 141-148.
- Huber, S., Prokop, G., Arrouays, D., Banko, G., Bispo, A., Jones, R.J.A., Kibblewhite, M.G., Lexer, W., Möller, A., Rickson, R.J., Shishkov, T., Stephens, M., Toth, G. Van den Akker, J.J.H., Varallyay, G., Verheijen, F.G.A., Jones, A.R. (eds.). 2008. Environmental Assessment of Soil for Monitoring: Volume I Indicators and Criteria. EUR 23490 EN/1, Office for the Official Publications of the European Luxembourg, 339pp. <http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/projects/envasso/>
- Iijima, M., Griffiths, B., and Bengough, A.G. 2000. Sloughing of cap cells and carbon exudation from maize seedling roots in compacted sand. *New Phytol.* 145, 477–482. doi:10.1046/j.1469-8137.2000.00595.x.
- Iijima, M., Higuchi, T., Barlow, P.W., and Bengough, A.G. 2003. Root cap removal increases root penetration resistance in maize (*Zea mays* L.). *J. Exp. Bot.* 54, 2105–2109. doi:10.1093/jxb/erg226.
- Jacobs, W., Eelkema, M., Limburg, H., Winterwerp, J. C. 2009. A new radiometric instrument for in situ measurements of physical sediment properties. *Marine and Freshwater Research*, 60(7), 727. <https://doi.org/10.1071/MF08056>
- Keller, T., Arvidsson, J., Dawidowski, J.B., Koolen, A.J., 2004. Soil precompression stress. II. A comparison of different compaction tests and stress – displacement behaviour of the soil during wheeling. *Soil Till. Res.* 77, 97 – 108.
- Keller, T., Colombi, T., Ruiz, S., Manalili, M.P., Rek, J., Stadelmann, V., Wunderli, H., Breitenstein, D., Reiser, R., Oberholzer, H., Schymanski, S., Romero-Ruiz, A., Linde, N., Weisskopf, P., Walter, A., and Or, D. 2017. Long-term soil structure observatory for monitoring post-compaction evolution of soil structure. *Vadose Zone Journal*, 16(4), 1-16.
- Keller, T., Lamandé, M., Schjønning, P., Dexter, A. 2011. Analysis of soil compression curves from uniaxial confined compression tests. *Geoderma*. 163. 13-23. 10.1016/j.geoderma.2011.02.006.
- Keller, T., Sandin, M., Colombi, T., Horn, R., and Or, D. 2019. Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. *Soil Tillage Res.* 194, 104293. doi:10.1016/j.still.2019.104293.

- Kirby, J.M., and Bengough, A.G. 2002. Influence of soil strength on root growth: Experiments and analysis using a critical-state model. *Eur. J. Soil Sci.* 53, 119–127. doi:10.1046/j.1365-2389.2002.00429.x.
- Kool, D., Tong, B., Tian, Z., Heitman, J.L., Sauer, T.J., and Horton, R. 2019. Soil water retention and hydraulic conductivity dynamics following tillage. *Soil and Tillage Research*, 193, 95–100.
- Kroes, J.G., van Dam, J.C., Bartholomeus, R.P., Groenendijk, P., Heinen, M., Hendriks, R.F.A., Mulder, H.M., Supit, I., and van Walsum, P.E.V. 2017. SWAP version 4. Theory description and user manual. Report 2780, Wageningen Environmental Research, Wageningen, the Netherlands. <https://edepot.wur.nl/416321>
- Kuncoro, P.H., and Koga, K. 2012. A simple and low cost method for measuring gas diffusivity and air permeability over a single soil cylinder. *Journal of the Japanese Society of Soil Physics*, 120, 55–60.
- Kuncoro, P.H., Koga, K., Satta, N., and Muto, Y. 2014. A study on the effect of compaction on transport properties of soil gas and water I: Relative gas diffusivity, air permeability, and saturated hydraulic conductivity. *Soil and Tillage Research*, 143, 172–179.
- Lebert, M., Holger, B., and Glante, F. 2007 Soil compaction—indicators for the assessment of harmful changes to the soil in the context of the German Federal Soil Protection Act *Journal of Environmental Management* 82 (2007) 388–397
- Lipiec, J., and Hatano, R. 2003. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. *Geoderma* 116, 107–136. doi:10.1016/S0016-7061(03)00097-1.
- Lipiec, J., Horn, R., Pietrusiewicz, J., and Siczek, A. 2012. Effects of soil compaction on root elongation and anatomy of different cereal plant species. *Soil Tillage Res.* 121, 74–81. doi:10.1016/j.still.2012.01.013.
- Logsdon, S.D., Parker, J.C., and Reneau, R.B. 1987. Root growth as influenced by aggregate size. *Plant Soil* 99, 267–275. doi:10.1007/BF02370873.
- Lowery, B., Morrison Jr, J.E. 2002. 2.8 Soil Penetrometers and Penetrability. *In*: Dane, J.H., Topp, G.C. (eds.). 2002. *Methods of Soil Analysis. Part 4 – Physical Methods*, pp. 363–398. Soil Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin, USA.
- Lynch, J.P., Schneider, H.M., Mooney, S.J., and Strock, C.F. 2021a. Future roots for future soils. *Plant. Cell Environ.*, 1–17. doi:10.1111/pce.14213.
- Lynch, J.P., Strock, C.F., Schneider, H.M., Klein, S.P., and Hanlon, M.T. 2021b. Root anatomy and soil resource capture. *Plant Soil* 466, 21–63. doi:10.1007/s11104-021-05010-y.
- Masle, J. 1992. Genetic Variation in the Effects of Root Impedance on Growth and Transpiration Rates of Wheat and Barley. *Funct. Plant Biol.* 19, 109. doi:10.1071/pp9920109.
- Materechera, S.A., Alston, A.M., Kirby, J.M., and Dexter, A.R. 1992. Influence of root diameter on the penetration of seminal roots into a compacted subsoil. *Plant Soil* 144, 297–303. doi:10.1007/BF00012888.
- Matthews, G.P., Laudone, G.M., Gregory, A.S., Bird, N.R.A., de G. Matthews, A.G., Whalley, W.R. 2010. Measurement and simulation of the effect of compaction on the pore structure and saturated hydraulic conductivity of grassland and arable soil. *Water Resources Research* 46, W05501, doi:10.1029/2009WR007720
- Misra, R.K. 1997. Maximum axial growth pressures of the lateral roots of pea and eucalypt. *Plant Soil* 188, 161–170. doi:10.1023/A:1004257516696.
- Mualem, Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12: 513–522.
- Nawaz, M.F., Bourrie, G., and Trolard, F. 2013. Soil compaction impact and modelling. A review. *Agronomy for sustainable development*, 33(2), 291–309.
- Ngo-Cong, D., Antille, D.L., van Genuchten, M.Th., Nguyen, H.Q., Tekeste, M.Z., Baillie, C.P., and Godwin, R.J. 2021. A modeling framework to quantify the effects of compaction on soil water retention and infiltration. *Soil Science Society of America Journal* 85(6): 1931–1945.
- Oliveira, M.R.G., van Noordwijk, M., Gaze, S.R., Brouwer, G., Bona, S., Mosca G., Hairah, K. 2000. Auger Sampling, Ingrowth Cores and Pinboard Methods. *In*: A.L. Smit, A.G. Bengough, C. Engels, M. van Noordwijk, S. Pellerin and S.C. van de Geijn, *Root Methods. A Handbook*. Chapter 6, pp. 175–201. Springer. Available at: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-04188-8>
- Panayiotopoulos K., Salonikiou E., Siaga K., Germanopoulou V., Skaperda S. 2003. Effect of uniaxial compression on water retention, hydraulic conductivity and the penetration resistance of six Greek soils. *Int. Agrophys.* 2003;17(4):191–197.
- Passioura, J. 2002. Soil conditions and plant growth. *Plant. Cell Environ.* 25, 311–318.
- Pfeifer, J., Faget, M., Walter, A., Blossfeld, S., Fiorani, F., Schurr, U., et al. 2014a. Spring barley shows dynamic compensatory root and shoot growth responses when exposed to localised soil compaction and fertilisation. *Funct. Plant Biol.* 41, 581–597. doi:10.1071/FP13224.

- Pfeifer, J., Kirchgessner, N., and Walter, A. 2014b. Artificial pores attract barley roots and can reduce artifacts of pot experiments. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 177, 903–913. doi:10.1002/jpln.201400142.
- Pierce, F., Larson, W., Dowdy, R., and Graham, W. 1983. Productivity of soils: assessing long-term changes due to erosion. *J. Soil Water Conserv.* 38, 39–44.
- Popova, L., Van Dusschoten, D., Nagel, K.A., Fiorani, F., and Mazzolai, B. 2016. Plant root tortuosity: An indicator of root path formation in soil with different composition and density. *Ann. Bot.* 118, 685–698. doi:10.1093/aob/mcw057.
- Pulido-Moncada, M., Schjønning, P., Labouriau, R., and Munkholm, L.J. 2020. Residual effects of compaction on the subsoil pore system—A functional perspective. *Soil Science Society of America Journal*, 84(3), 717–730.
- Rajendra Prasad, V.B., Govindaraj, M., Djanaguiraman, M., Djalovic, I., Shailani, A., Rawat, N., et al. 2021. Drought and high temperature stress in sorghum: Physiological, genetic, and molecular insights and breeding approaches. *Int. J. Mol. Sci.* 22. doi:10.3390/ijms22189826.
- Ramalingam, P., Kamoshita, A., Deshmukh, V., Yaginuma, S., and Uga, Y. 2017. Association between root growth angle and root length density of a nearisogenic line of IR64 rice with DEEPER ROOTING 1 under different levels of soil compaction. *Plant Prod. Sci.* 20, 162–175. doi:10.1080/1343943X.2017.1288550.
- Reichert, J.M., Suzuki, L., Reinert, D.J., Horn, R., and Håkansson, I. 2008. Reference bulk density and critical degree of compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil and Tillage*, 102 (2009), 242–254.
- Renger M, K. Bohne and G. Wessolek, 2014. Bestimmung und Aussagemöglichkeiten der effektiven Lagerungsdichte. In: Wessolek G., Kaupenjohann M., Renger M. (eds.) *Bodenphysikalische Kennwerte und Berechnungsverfahren für die Praxis, Teil II*. TU Berlin, Berlin.
- Renger, M., 1970. Über den Einfluss der Dränung auf das Gefüge und die Wasserdurchlässigkeit bindiger Böden. *Mitteilungen Deutschen Bodenkundlich 12 Gesellschaft* 11, 23–28.
- Rich, S.M., and Watt, M. 2013. Soil conditions and cereal root system architecture: review and considerations for linking Darwin and Weaver. *J. Exp. Bot.* 64, 1193–208. doi:10.1093/jxb/ert043.
- Rolston, D.E., Moldrup, P. 2002. Gas Diffusivity. In: J.H. Dane, G.C. Topp (eds.), *Methods of Soil Analysis. Part 4 – Physical Methods*, pp. 1113–1139. Soil Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin, USA.
- Ruiz, S., Or, D., and Schymanski, S.J. 2015. Soil penetration by earthworms and plant roots - Mechanical energetics of bioturbation of compacted soils. *PLoS One* 10, 1–26. doi:10.1371/journal.pone.0128914.
- Sanderman, J., Savage, K., Dangal, S.R.S. 2020. Mid-infrared spectroscopy for prediction of soil health indicators in the United States. *Soil Science Society of America Journal*, 84:251–261. doi:10.1002/saj2.20009
- Schaap, M.G., and Van Genuchten, M.Th. 2006. A modified Mualem–van Genuchten formulation for improved description of the hydraulic conductivity near saturation. *Vadose Zone Journal*, 5(1), 27–34.
- Schittenhelm, S., and Schroetter, S. 2014. Comparison of Drought Tolerance of Maize, Sweet Sorghum and Sorghum-Sudangrass Hybrids. doi:10.1111/jac.12039.
- Schjønning, P., and Koppelgaard, M. 2017. The Forchheimer approach for soil air permeability measurement. *Soil Science Society of America Journal*, 81(5), 1045–1053.
- Schjønning, P., Eden, M., Moldrup, P., and de Jonge, L.W. 2013. Two-chamber, two-gas and one-chamber, one-gas methods for measuring the soil-gas diffusion coefficient: Validation and inter-calibration. *Soil Science Society of America Journal*, 77(3), 729–740.
- Schjønning, P., Lamandé, M., Berisso, F.E., Simojoki, A., Alakukku, L., and Andreasen, R.R. 2013. Gas diffusion, non-Darcy air permeability, and computed tomography images of a clay subsoil affected by compaction. *Soil Science Society of America Journal*, 77(6), 1977–1990.
- Schjønning, P., Pulido-Moncada, M., Munkholm, L.J., and Iversen, B.V. 2019. Ratio of non-Darcian to Darcian air permeability as a marker of soil pore organization. *Soil Science Society of America Journal*, 83(4), 1024–1031.
- Schjønning, P., van den Akker, J.J., Keller, T., Greve, M.H., Lamandé, M., Simojoki, A., ... and Breuning-Madsen, H. 2015. Driver-pressure-state-impact-response (DPSIR) analysis and risk assessment for soil compaction—a European perspective. *Advances in agronomy*, 133, 183–237.
- Schneider, H.M., Postma, J.A., Kochs, J., Daniel, P., Lynch, J.P., and van Dusschoten, D. 2020. Spatio-Temporal Variation in Water Uptake in Seminal and Nodal Root Systems of Barley Plants Grown in Soil. *Front. Plant Sci.* 11, 1–13. doi:10.3389/fpls.2020.01247.
- Schneider, H.M., Strock, C.F., Hanlon, M.T., Vanhees, D.J., Perkins, A.C., Ajmera, I.B., et al. 2021. Multiseriate cortical sclerenchyma enhance root penetration in compacted soils. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 118. doi:10.1073/pnas.2012087118.

- Schneider, H., Postma, J., Wojciechowski, T., Kuppe, C., and Lynch, J.P. 2017. Root cortical senescence improves barley growth under suboptimal availability of N, P, and K. *Plant Physiol.* 174, 2333–2347. doi:10.1104/pp.17.00648.
- Shah, A.N., Tanveer, M., Shahzad, B., Yang, G., Fahad, S., Ali, S., et al. 2017. Soil compaction effects on soil health and crop productivity: An overview. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(11), 10056–10067
- Shepherd, K.D., Ferguson, R., Hoover, D., van Egmond, F., Sanderman, J., Ge, Y. 2022. A global soil spectral calibration library and estimation service. *Soil Security* 7. doi/10.1016/j.soisec.2022.100061
- Singh, V., Oosterom, E.J., Jordan, D.R., Messina, C.D., Cooper, M., and Hammer, G.L. 2010. Morphological and architectural development of root systems in sorghum and maize. *Plant Soil* 333, 287–299. doi:10.1007/s11104-010-0343-0.
- Sjulgård, H., Iseskog, D., Kirchgessner, N., Bengough, A.G., Keller, T., and Colombi, T. 2021. Reversible and irreversible root phenotypic plasticity under fluctuating soil physical conditions. *Environ. Exp. Bot.* 188, 104494. doi:10.1016/j.envexpbot.2021.104494.
- Smit, A.L., George, E., Groenwold, J. 2000. Root observations and measurements at (transparent) interfaces with soil. In: A.L. Smit, A.G. Bengough, C. Engels, M. van Noordwijk, S. Pellerin and S.C. van de Geijn, *Root Methods. A Handbook*. Chapter 8, pp. 235–271. Springer. Available at: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-04188-8>
- Smith, P., Soussana, J.-F., Angers, D., Schipper, L., Chenu, C., Rasse, D.P., Batjes, N.H., van Egmond, F., McNeill, S., Kuhnert, M., Arias-Navarro, C., Olesen, J.E., Chirinda, N., Fornara, D., Wollenberg, E., Álvaro-Fuentes, J., Sanz-Cobena, A., Klumpp, K. 2020. How to measure, report and verify soil carbon change to realize the potential of soil carbon sequestration for atmospheric greenhouse gas removal. *Glob Change Biol.* 26: 219– 241. <https://doi.org/10.1111/gcb.14815>
- Soriano-Disla, J.M., Janik, L.J., Viscarra Rossel, R.A., MacDonald, L.M., McLaughlin, M.J. 2014. The Performance of Visible, Near-, and Mid-Infrared Reflectance Spectroscopy for Prediction of Soil Physical, Chemical, and Biological Properties, *Applied Spectroscopy Reviews*, 49:2, 139–186, DOI:10.1080/05704928.2013.811081
- Stange, C.F. and Horn, R. 2005. Modeling the soil water retention curve from conditions of variable porosity. *Vadose Zone Journal* 4: 602–613. doi: 10.2136/vzj2004.0150
- Stepniewski, W., Gliński, J., and Ball, B.C. 1994. Effects of compaction on soil aeration properties. In *Developments in agricultural engineering* (Vol. 11, pp. 167–189). Elsevier.
- Strock, C.F., Rangarajan, H., Black, C.K., Schäfer, E.D., and Lynch, J.P. 2022. Theoretical evidence that root penetration ability interacts with soil compaction regimes to affect nitrate capture. *Ann. Bot.* 129, 315–330. doi:10.1093/aob/mcab144.
- Suzuki, L.E.A.S., Reichert, J.M., and Reinert, D.J. 2013. Degree of compactness, soil physical properties and yield of soybean in six soils under no-tillage. *Soil Res.* 51, 311–321. doi:10.1071/SR12306.
- Tang, A., Cui, Y., Eslami, Y., Défossez, P. 2008. Analysing the form of the confined uniaxial compression curve of various soils. *Geoderma*, Elsevier, 2009, 148 (3–4), pp.282–290.
- Taylor, H.M. and Gardner, H.R. 1963. Penetration of cotton seedling taproots as influenced by bulk density, moisture content and strength of soil. *Soil Sci.* 96: 153–156.
- Terhoeven-Urselmans, T., Vagen, T., Spaargaren, O. and Shepherd, K.D. 2010. Prediction of Soil Fertility Properties from a Globally Distributed Soil Mid-Infrared Spectral Library. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 74: 1792–1799. <https://doi.org/10.2136/sssaj2009.0218>
- Tian, Z., Chen, J., Cai, C., Gao, W., Ren, T., Heitman, J.L., Horton, R. 2021. New pedotransfer functions for soil water retention curves that better account for bulk density effects. *Soil and Tillage Research* 205, doi:10.1016/j.still.2020.104812.
- Tian, Z., Kool, D., Ren, T., Horton, R., and Heitman, J.L. 2019. Approaches for estimating unsaturated soil hydraulic conductivities at various bulk densities with the extended Mualem-van Genuchten model. *Journal of Hydrology* 572: 719–731. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.03.027
- Tian, Z., Gao, W., Kool, D., Ren, T., Horton, R., and Heitman, J.L. 2018. Approaches for estimating soil water retention curves at various bulk densities with the extended van Genuchten model. *Water Resources Research*, 54(8), 5584–5601.
- Topp, G.C., and Davis, J.L. 1985. Measurement of soil water content using time-domain reflectometry (TDR): A field evaluation. *Soil Science Society of America Journal*, 49(1), 19–24.
- Tracy, S.R., Black, C.R., Roberts, J.A., and Mooney, S.J. 2011. Soil compaction: a review of past and present techniques for investigating effects on root growth. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 91(9), 1528–1537.

- Tracy, S.R., Black, C.R., Roberts, J.A., and Mooney, S.J. 2011. Soil compaction: A review of past and present techniques for investigating effects on root growth. *J. Sci. Food Agric.* 91, 1528–1537. doi:10.1002/jsfa.4424.
- Tracy, S.R., Black, C.R., Roberts, J.A., Sturrock, C., Mairhofer, S., Craigon, J., et al. 2012. Quantifying the impact of soil compaction on root system architecture in tomato (*Solanum lycopersicum*) by X-ray micro-computed tomography. *Ann. Bot.* 110, 511–519. doi:10.1093/aob/mcs031.
- Tubeileh, A., Groleau-Renaud, V., Plantureux, S., and Guckert, A. 2003. Effect of soil compaction on photosynthesis and carbon partitioning within a maize-soil system. *Soil Tillage Res.* 71, 151–161. doi:10.1016/S0167-1987(03)00061-8.
- Valentine, T.A., Hallett, P.D., Binnie, K., Young, M.W., Squire, G.R., Hawes, C., et al. 2012. Soil strength and macropore volume limit root elongation rates in many UK agricultural soils. *Ann. Bot.* 110, 259–270. doi:10.1093/aob/mcs118.
- Van Dam, J.G.C. en Hulshof, J.A. 1967. De penetrometer als instrument voor het onderzoek naar de geschiktheid van de grond voor aspergeteelt. *Med. Dir. Tuinb.* 30, 5: 186-190.
- Van den Akker, J.J.H. 2004. SOCOMO: A soil compaction model to calculate soil stresses and the subsoil carrying capacity. *Soil and Tillage Research* 79: 113-127. doi:10.1016/j.still.2004.03.021.
- Van den Akker, J.J.H. en de Groot, W.J.M. 2008. Een inventariserend onderzoek naar de ondergrondverdichting van zandgronden en lichte zavel, Alterra-rapport 1450, Alterra, Wageningen. <https://edepot.wur.nl/60379>
- Van den Akker, J.J.H., de Vries, F., Vermeulen, G.D., Hack-ten Broeke, M.J.D., and Schouten, T. 2013. Risico op ondergrondverdichting in het landelijk gebied kaart (No. 2409). Alterra, Wageningen-UR.
- Van den Akker, J.J. 2013. Rups is milder voor de bodem dan IF-band. *De Boerderij* no. 13.
- Van den Akker, J., Vermeulen, B., Verwijs, B., de Groot, W., Pleijter, M., van Balen, D. 2018. Bodemverdichting, een sluipend probleem. Voordracht themadag beter bodembeheer, Wageningen. <https://edepot.wur.nl/413366>
- Van den Akker, J.J.H. 2019. Bodemverdichting: ondergrond en bovengrond. https://www.rli.nl/sites/default/files/fact_finding_paper_4_bodemverdichting_undergrond_en_bovengrond_-_jan_van_den_akker_wur.pdf
- Van den Elsen, E., van Tol-Leenders, D., Teuling, K., Römkens, P., de Haan, J., Korthals, G., Reijneveld, A. 2020. De staat van de Nederlands landbouwbodems in 2018. Op basis van beschikbare landsdekkende dataset (CC-NL) en bodem-indicatorenlijst (BLN). Rapport 3048, Wageningen Environmental Research. <https://edepot.wur.nl/537281>
- Van der Valk, G.G.M. en de Haan F.A.M. 1974. Invloed van bodemverdichting op de productie van bloembollen op duinzandgronden. Rapport 21, Laboratorium voor Bloembollenonderzoek, Lisse.
- Van Dijck, S.J.E. and van Asch, Th.W.J. 2002. Compaction of loamy soils due to tractor traf@c in vineyards and orchards and its effect on in@ltration in southern France. *Soil and Tillage Research* 63: 141-153. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(01\)00237-9](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(01)00237-9)
- Van Egmond, F.M., Koomans, R., Teuling, K., Tijs, M., Staats, G., Pepers, K., de Haan, J., van Os, G. 2022. Validating a new in-situ soil bulk density sensor, abstract for World Congress of Soil Science 2022 and report. *In press*.
- Van Genuchten, M.Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* 44(3): 892-898.
- Van Noordwijk, M., Brouwer, G. 1993. Gas-filled root porosity in response to temporary low oxygen supply in different growth stages. *Plant and Soil* 152: 187-199,
- Van Noordwijk, M., Brouwer, G., Meijboom, F., do Rosari, M., Oliveira, G. Bengough, A.G. 2000. Trench profile techniques and core break methods. In: A.L. Smit, A.G. Bengough, C. Engels, M. van Noordwijk, S. Pellerin and S.C. van de Geijn, *Root Methods. A Handbook*. Chapter 7, pp. 211-233. Springer. Available at: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-04188-8>
- Vanhees, D., Loades, K., Bengough, G., Mooney, S., and Lynch, J. 2020. Root anatomical traits contribute to deeper rooting of maize (*Zea mays* L.) under compacted field conditions. *J. Exp. Bot.* 71, 4243–4257.
- Vanhees, D., Schneider, H., Loades, K., Bengough, A., Bennett, M., Pandey, B., et al. 2021. Genotypic variation in soil penetration by maize roots is negatively related to ethylene-induced thickening. *bioRxiv*.
- Vaz, C.M.P., Manieri, J.M., de Maria, I.C., Tuller, M. 2011. Modeling and correction of soil penetration resistance for varying soil water content, *Geoderma*, Volume 166, Issue 1, Pages 92-101. ISSN 0016-7061, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.07.016>.
- Whalley, W.R., Matthews, G.P. and Ferraris, S. 2012. The effect of compaction and shear deformation of saturated soil on hydraulic conductivity. *Soil and Tillage Research*. 125, pp. 23-29. <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.05.020>

- Whiteley, G.M., and Dexter, A.R. 1984. Displacement of soil aggregates by elongating roots and emerging shoots of crop plants. *Plant Soil* 77, 131–140. doi:10.1007/BF02182917.
- Whiteley, G.M., Hewitt, J.S., and Dexter, A.R. 1982. The buckling of plant roots. *Physiol. Plant.* 54, 333–342. doi:10.1111/j.1399-3054.1982.tb00268.x.
- Whiteley G.M., Utomo W.H., and Dexter A.R. 1981. A comparison of penetrometer pressures and pressures exerted by roots. *Plant and Soil*, 61, 351–364.
- Wojciechowski, T., and Kant, J. 2021. How sorghum root traits can contribute to cereal yield increase. In: *Cereal Grants*, ed. A. Goyal (IntechOpen).
- Wong, J.Y. and Preston-Thomas, J. 1983. On the characterization of the shear stress-displacement relationship of terrain. *J. Terramech.*, 19: 225-234.
- Wortman, C., and P. Jasa. 2003. Management to minimize and reduce soil compaction. NebGuide G896. University of Nebraska Extension, Lincoln.
- Wösten, J.H.M., Veerman, G.J., de Groot, W.J.M., and Stolte, J. 2001. Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks Vernieuwde uitgave 2001. Alterra rapport 153, Alterra, Wageningen.
- Yamaguchi, J., and Tanaka, A. 1990. Quantitative observation on the root system of various crops growing in the field. *Soil Sci. Plant Nutr.* 36, 483–493. doi:10.1080/00380768.1990.10416917.
- Young, I.M., Montagu, K., Conroy, J., and Bengough, A.G. 1997. Mechanical impedance of root growth directly reduces leaf elongation rates of cereals. *The New Phytologist*, 135(4), 613-619.
- Zhang, S., H. Grip, L. Lövdahl. 2006. Effect of soil compaction on hydraulic properties of two loess soils in China. *Soil Tillage Research* 90: 117-125. doi:10.1016/j.still.2005.08.012
- Zhang, D.; Zhou, G. 2016. Estimation of Soil Moisture from Optical and Thermal Remote Sensing: A Review. *Sensors* 16, 1308. <https://doi.org/10.3390/s16081308>
- Zobel, R., Kinraide, T., and Baligar, V. 2007. Fine root diameters can change in response to changes in nutrient concentrations. *Plant Soil* 297, 243–254. doi:10.1007/s11104-007-9341-2.

Overig (niet geciteerd in hoofdstekst):

- Alaoui, A., Rogger, M., Peth, S., and Blöschl, G. 2018. Does soil compaction increase floods? A review. *Journal of hydrology*, 557, 631-642.
- Connelly, J., Jensen, W., and Harmon, P. 2008. Proctor compaction testing.
- De Willigen, P. and van Noordwijk, M. 1987. Roots, plant production and nutrient use efficiency. PhD Thesis, Wageningen Agricultural University.
- Jones, R.J.A., Spoor, G. and Thomasson, A.J. 2003. Vulnerability of subsoils in Europe to compaction: preliminary analysis. *Soil and Tillage Research*, 73, 131-143.
- Koorevaar, P., Menelik, G., and Dirksen, C. 1983. Elements of soil physics. *Developments in soil science* 13. Elsevier. Amsterdam.
- LTO Noord. 2020. <https://www.akkerbouwbedrijf.nl/duurzaamheid/bodembeheer/bodemverdichting-checklists-helpt-boer-bewuste-keuze-maken/>, (accessed last: 2-9-2021)
- Van den Elsen, H.G.M., Ritsema, C.J., Seeger, M., and Keesstra, S.D. 2014. Averaging performance of capacitance and time domain reflectometry sensors in nonuniform wetted sand profiles. *Vadose Zone Journal*, 13(12), 1-13.
- Xing, X., Li, Y., and Ma, X. 2018. Water retention curve correction using changes in bulk density during data collection. *Engineering Geology*, 233, 231-237.

Bijlage 1 Root System Responses to Soil Compaction

Originele Engelstalige tekst (auteur: Hannah Schneider, Centre for Crop Systems Analysis, Wageningen University; August, 2022; referenties zijn vermeld in de sectie Literatuur van de hoofdtekst).

Soil compaction impacts plant growth and soil resource acquisition

Yield losses from compaction have been estimated to be 25% in annual crop species (Barken et al., 1987; Arvidsson, 1999). However, soil compaction typically affects root growth more than shoot growth (Correa et al., 2022). These lower yields are a result of reduced root growth due to soil physical constraints and subsequently reduced water and nutrient uptake by roots (Passioura, 2002; Lipiec et al., 2012; Grzesiak et al., 2013). Mechanical impedance to root growth occurs when there is reduced pore space to accommodate displaced soil particles by the growing root apex (Hamza and Anderson, 2005; Batey, 2009; Valentine et al., 2012; Suzuki et al., 2013; Hernandez-Ramirez et al., 2014). Mechanical impedance may suppress root emergence and elongation and therefore restrict soil exploration, resource capture, and the productivity of agroecosystems (Yamaguchi and Tanaka, 1990; Lipiec and Hatano, 2003; Batey, 2009). However, beyond the direct impedance of root growth, compacted soils also affect soil hydraulic conductivity, water storage capacity, gas diffusivity, and permeability, nutrient cycling, and the habitat of soil organisms (Tracy et al., 2011; Keller et al., 2019).

Plants forage for resources in a spatiotemporal dynamic and heterogeneously structured matrix in which penetration resistance is a primary factor in determining both the accessibility and energetic cost of soil resource acquisition, including water and nutrients. Soil resources differ in their mobility in the soil; generally, soil resources can be classified as mobile or immobile. Water readily moves through agricultural soils and generally tends to be more abundant at greater soil depths (except for intermittent drought stress and irrigated dryland systems). Therefore, nutrients soluble in water and not readily bound by the soil, including sulfate and nitrate, leach with water and are generally more available at depth. In contrast, phosphorus, an immobile nutrient in the soil, accumulates in the topsoil due to the continual deposition of decaying plant matter at the soil surface and has negligible leaching to the subsoil. Therefore, whether root growth is impeded in the topsoil or the subsoil influences access to specific soil resources (Barber, 1995).

A mechanical impedance of >0.8-2 MPa is generally sufficient to inhibit root elongation and the emergence of axial and nodal roots in both monocot and dicot species. Root growth may arrest completely at a resistance of ~5 MPa (Atwell, 1993; Passioura, 2002; Bengough et al., 2011; Coelho Filho et al., 2013; Grzesiak et al., 2013; Pfeifer et al., 2014b; Colombi and Walter, 2015). Bulk density values of 1.39-1.49 g cm⁻³ in clay texture soils and 1.69 g cm⁻³ in sandy texture soils start to reduce root growth (Pierce et al., 1983). Root growth and penetration cease at bulk densities of ~1.47-1.58 g cm⁻³ in clay texture soils (depending on the percentage of clay) and 1.85 g cm⁻³ in sandy texture soils (Pierce et al., 1983). When roots encounter a compacted soil layer, such as a plow pan, they have three options: 1) circumvent it through deflecting sideways, 2) penetrate it to continue to grow and elongate through the strong soil, or 3) stop growing (Dexter and Hewitt, 1978; Clark et al., 2003). The responses of individual root axes and whole root systems to mechanical impedance will be discussed below.

Responses to individual root axes to compaction

The majority of studies focused on root penetration of compacted soils only study seedling roots and therefore our understanding of how penetration ability varies among mature roots or root systems of mature plants is limited. The characterization of the penetration ability of different root types is limited, however relevant to understanding the broader foraging strategies of the root system. Different root types are partly characterized by differences in root diameter, resulting in variable penetration abilities and anatomy that influences the capacity for water and nutrient uptake (Ahmed et al., 2018; Schneider et al., 2020; Lynch et al., 2021b). Root class specific penetration ability is influenced by both diameter and anatomical traits including stele diameter and the formation of root cortical aerenchyma (Colombi et al., 2017; Vanhees et al., 2021). Controlling for root diameter, primary roots in pea were capable of a greater maximum axial growth

force compared to lateral roots (Misra, 1997). Therefore, variation in penetration ability of different root types may have significant effects on the spatial and temporal distribution of root system foraging. For example, the penetration ability of lateral roots may be important as this root type constitutes the bulk of root system length in most angiosperms (Zobel et al., 2007; Schneider et al., 2017). However, the penetration ability of axial roots ultimately determines the spatial and temporal placement and distribution of these higher-order lateral roots in the soil matrix (Strock et al., 2022).

In response to compacted soils, at the root apex, there is a decrease in the rate of cell division (Clark et al. 2003), a reduction in the flux in the cells out of the meristem (Croser et al. 1999), and subsequently, roots increase their diameter (Logsdon et al., 1987; Atwell, 1993; Iijima et al., 2000; Tracy et al., 2012; Pfeifer et al., 2014a; Colombi and Walter, 2015; Colombi and Keller, 2019; Vanhees et al., 2020), and slow their elongation rates (Atwell, 1993; Gregory, 2006). In mechanically impeded soils, an increase in root diameter is widely framed as an adaptive response to plant fitness as it increases resistance to root buckling (Whiteley et al., 1982; Clark et al., 2003; Chimungu et al., 2015), reduces stress at the root apex through displacing and deforming the soil near the root tip (Abdalla et al., 1969; Hettiaratchi, 1990; Atwell, 1993; Kirby and Bengough, 2002; Bengough et al., 2006; Gregory, 2006), and helps displace larger soil particles and aggregates (Whiteley and Dexter, 1984). However, recently it has been shown that increases in cortical cell wall thickness and area, cortical cell count, and stele diameter may be better predictors of root penetration ability than root diameter (Chimungu et al., 2015; Vanhees et al., 2020; Schneider et al., 2021). Nevertheless, while increasing root diameter may enable penetration of individual root axes in strong soils, these modifications of the root result in an increased cost of producing and maintaining root length, ultimately influencing the metabolic expenditure and cost of soil exploration and resource acquisition (Atwell, 1993; Iijima et al., 2003; Bengough et al., 2011; Ruiz et al., 2015; Colombi and Keller, 2019).

Increased axial root diameter is thought to result in favorable mechanical properties such as greater axial root growth pressure, radial expansion, and potential growth rate (Materechera et al., 1992; Atwell, 1993; Clark et al., 1999), and consequently, thicker roots have a greater ability to forage in hard soil (Bengough et al., 2011). In order to displace soil particles, roots must exert growth pressure to overcome friction and continue to elongate in the soil. Genetic variation in the ability to penetrate compacted soils is related to differences in growth pressure and root diameter, which influence the ability of the root to deflect or buckle (Clark et al., 2003). Increased root diameters may allow the root to penetrate substrates with greater penetration resistance at the same root penetration pressure (Popova et al., 2016).

In addition to rendering roots more resistant to buckling, greater root diameters may also facilitate root anchorage in strong soils. The anchorage of roots may be achieved by friction of the soil particles and maturing tissues through root hairs and lateral roots behind the zone of elongation. Enhanced root anchorage may support the maximum growth pressure (i.e. the growth force exerted by the root per unit cross-sectional area). This maximum growth pressure is largely determined by the turgor pressure in the expanding cells in the root elongation zone to force the root farther into compacted soils (Bengough et al., 2011).

Although roots often grow through biopores and cracks in the soil, they are a flexible organ and have the tendency to nutate as they navigate tortuous paths through the soil, presumably seeking out the path of least resistance. Root tortuosity can be described as the waviness of the root growth pattern (Popova et al., 2016) and depends on both the bulk density and soil type (Tracy et al., 2012; Popova et al., 2016). Both tomato and maize had greater values of tortuosity for plants grown in compacted soil, particularly in coarser textured soils when compared to loose soil (Tracy et al., 2012; Popova et al., 2016). In addition, root growth angle, or the angle of incidence of a root at a soil layer also influences root penetration ability. A steeper root angle is positively correlated with root length density at 30 to 60 cm depth in both compacted (~1.8 MPa) and non-compacted (0-0.5 MPa) soil (Ramalingam et al., 2017). If the root diameter and root growth angle are not thick and steep enough when encountering a compacted soil layer, roots may be horizontally deflected when growth continues (Correa et al., 2019).

A number of other root traits influence penetration ability of the root. In triticale, a decrease in seminal root length, number and length of lateral roots, and number and length of nodal roots was found in higher bulk densities 1.5 g cm⁻³ (vs 1.33 g cm⁻³) in a 1:1:3 mixture of garden soil, peat and sand (Grzesiak et al., 2013).

A reduced axial and lateral root number was observed in winter wheat in response to soil compaction (soil column 1.6 g cm^{-3}) (Colombi and Walter, 2017). The initiation of lateral roots is delayed in compacted soil in tomato (Tracy et al., 2012), wheat (Colombi and Walter, 2017), triticale and soybean (Colombi and Walter, 2015). In addition, the shape of the root tip (Bengough et al., 1997a; Colombi et al., 2017), root hairs, root mucilage and other rhizo-deposits (Bengough et al., 1997b), and root anatomy (Schneider et al., 2021; Vanhees et al., 2021) all influence root penetration ability (Figure B1-1).

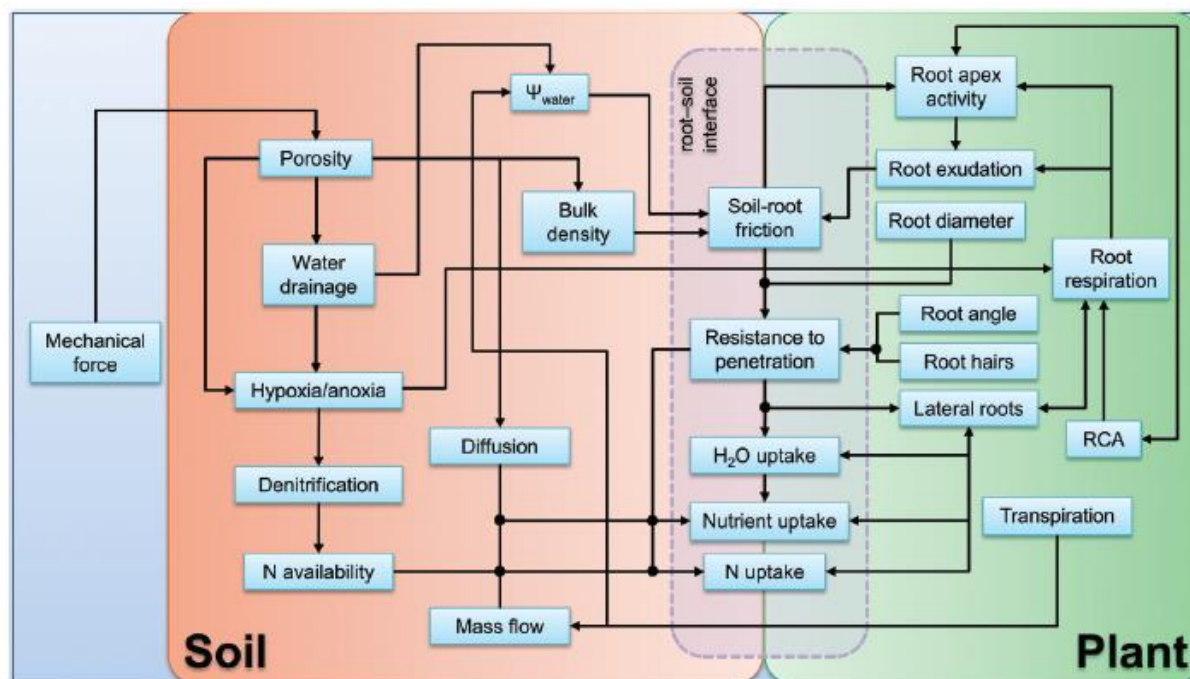


Figure B1-1 Relational diagram of the main interactions among soil physicochemical properties and root function and structure observed under conditions of soil compaction. Ψ water, water potential; RCA, root cortical aerenchyma. The arrow (\rightarrow) indicates the influence of one property on another whose interaction can be of synergistic or antagonistic nature (explained in the main text); a two-way arrow (\leftrightarrow) indicates a reciprocal influence between two properties; a black bullet (\bullet) indicates converging influence between two or more properties on the following property; if two or more arrows have a point of intersection without a bullet, no direct interaction between them is indicated (Correa et al., 2019).

Responses of whole root systems to compaction

Although many of the processes surrounding the penetration ability of individual root axes are well studied, the broader interactions between compaction and whole root system responses are less clear. Empirical data relating soil characteristics and root length density are sparse due to the complex and laborious nature of field- or soil-based measurements required to understand these interactions. The main influence of greater impedance by soil compaction to root growth is a decrease in total root length (Bingham et al., 2010; Grzesiak et al., 2013; Pfeifer et al., 2014a) and an increase in root diameter (Rich and Watt, 2013; Popova et al., 2016). For example, sorghum plants grown in compacted soil produced 35% less root mass and 47% less root length which was primarily driven by a reduction in fine root growth (Correa et al., 2022).

When apical axes were exposed to compaction, the lateral roots that were able to freely penetrate looser soil grew significantly greater root length compared to completely unimpeded root systems. However, this compensatory growth of lateral roots could mask the effect of compacted soil on the axial apices as the total root length or weight may be similar (Goss, 1977). Using vertical split root boxes, compensatory responses of the whole root system in barley were observed in response to compaction. In barley, roots grew deeper, had a longer root length, and lateral roots emerged earlier in the loose compartment of the split-root treatment (in a compacted compartment and loose compartment configuration) compared with uniform treatments (both compartments compacted or loose) (Pfeifer et al., 2014a).

In real-world environments and agroecosystems, soil structure may modify root length distribution in environments with drying topsoil (de Moraes et al., 2018) and no-till systems with high bulk density topsoil (Ehlers et al., 1983), as both environments have greater mechanical impedance to root growth in shallow soil horizons when compared to deeper horizons. *In silico* studies have demonstrated that soils with a high bulk density at depth impeded rooting depth and reduced nitrate leaching and therefore improved the coincidence of nitrogen and root length. Increasing the penetration ability of either axial or lateral roots produced root systems of comparable length. However, improved penetration of axial roots increased root length density in deeper soil, therefore enhancing nitrogen uptake and improving shoot biomass (Strock et al., 2022).

In addition, changes in the root-to-shoot ratios are commonly observed in response to compaction. However, changes in root-to-shoot ratios in response to compaction are variable and dependent on the plant's genetic background and the degree of soil compaction (Atwell, 1990; Masle, 1992; Hoffmann and Jungk, 1995; Tubeileh et al., 2003). Changes in root-to-shoot ratios in compaction may also be confounded with ontogeny or allometric effects as plants grown under stress may lag behind developmentally (Correa et al., 2019). The spatiotemporal dynamics of photosynthate partitioning to root growth under compaction stress remains an open question.

Disentangling responses due to water availability, oxygen availability, and bulk density in compacted soils

Soil penetration resistance and oxygen concentration in the soil air are strongly influenced by soil moisture. Therefore, local pedo-climatic conditions and short-term precipitation and temperature events all influence root growth. As soils dry, penetration resistance increases, however, in very wet soils the risk for low oxygen concentration in soil air is high (Batey, 2009; Bengough et al., 2011; Tracy et al., 2011; Grzesiak et al., 2013; Colombi et al., 2018). It has been speculated that since both wet and dry periods occur spatially and temporally in the soil, root growth is both limited by soil penetration resistance, low concentration of oxygen in soil air, and water availability (Colombi and Keller, 2019). As roots grow through the soil, the physical conditions around the root tip and growth zone are constantly changing and therefore, the root is constantly adjusting the root phenotype. However, artificial growth systems have been developed that can separate root responses due to penetration resistance and oxygen concentration independently (Sjulgård et al., 2021). Both short-term exposure to soil hypoxia and increased penetration resistance reduced elongation rates in both pea and wheat. However, once the stress was released root elongation rates and diameters could recover in pea, but not in wheat (Sjulgård et al., 2021). Many different edaphic stresses including high penetration resistance and low concentration of oxygen in soil air result in similar root responses including reduced elongation rates, more shallow root growth, and delayed emergence of lateral roots (Barracough and Weir, 1988; Materechera et al., 1992; Grzesiak et al., 2013; Colombi and Walter, 2015; Colombi et al., 2018; Sjulgård et al., 2021). Further research is needed to understand the complexity of soil physical properties on root growth.

Root responses to hard, dry soils under drought may provide insight into compaction responses

Drought can cause similar soil physical conditions to soil compaction. Understanding root responses to dry, hard soils may provide insight into adaptive responses for compaction stress tolerance. For example, sorghum, when compared to maize and other cereals, is generally more drought tolerant due to its higher capacity for stay-green, which is important for a greater supply of assimilates during the grain filling period and superior root system traits that allow for penetration of hard, dry soils and in some environments, deeper rooting in the soil profile (Singh et al., 2010; Schittenhelm and Schroetter, 2014; Rajendra Prasad et al., 2021). However, drought-induced hardening of the soil suggests that sorghum may also have superior performance when compared to maize and other crops in compacted soils (Correa et al., 2022). The general structure of sorghum is typically of an annual monocot. Sorghum has a single seminal root emerging from the seed followed by flushes of nodal roots emerging from stem tissue starting at the 4th-5th leaf stage. In contrast, maize has 3-7 seminal roots emerging from the seed followed by the emergence of nodal roots at the 2nd leaf stage (Singh et al., 2010). It is speculated that the deeper root system of sorghum, attributed to thicker roots, with greater lateral branching densities emerging slightly later in ontogeny enable sorghum roots to better penetrate hard (and dry soils) (Wojciechowski and Kant, 2021). The superior ability of sorghum roots to penetrate hard, dry soils for drought tolerance could also enable sorghum to penetrate compacted soil, and create biopores to alleviate compaction stress in the next growing season (Lynch et al., 2021a). While sorghum is known to have enhanced drought tolerance compared to many annual crop

species, its enhanced performance under compaction or its potential for the creation of deep biopores is not well studied. Understanding adaptive root responses to drought may provide insights into root responses to soil compaction.

Conclusions

Soil mechanical impedance impacts many aspects of plant growth and productivity. Mechanical impedance influences soil bulk density, water content, and oxygen availability and therefore root growth and soil resource acquisition. Responses of individual root traits and individual root axes to compaction are better understood than broader compensatory responses of the whole root system. Generally, compacted soils decrease root length and increase root diameters. Very few studies have attempted to uncouple root responses of soil bulk density, hypoxia, and water content. Uncoupling and understanding root system responses to edaphic stress will have application from basic plant research to breeding efforts.

Bijlage 2 Bulkdichtheid

Guido Bakema, 2021, Wageningen Environmental Research, Wageningen (niet gepubliceerd)

1. Inleiding

In 2021 is in het kader van een intern innovatieproject (risicovol idee "Bulkdichtheid zijn gewicht in goud waard") binnen WENR, een onderzoek gedaan naar de bodemparameter "Bulkdichtheid". In deze notitie (niet eerder gepubliceerd, auteur Guido Bakema) is beschreven wat bulkdichtheid is, welke relatie die heeft met andere bodemparameters en hoe deze wordt gebruikt om verdichting van de bodem vast te stellen.

2. Wat is bulkdichtheid van de bodem

De bodem bestaat normaal gesproken uit vier componenten; de minerale fase, de organische fase, de waterfase en de gasfase. De bulkdichtheid van elke fase (ρ_m) wordt bepaald door het gewicht (kg) van de fase te delen door het volume (m^3) van de fase uitgedrukt in $kg\ m^{-3}$. De natte bulkdichtheid of volumetrische dichtheid (ρ_{bn}) wordt bepaald door het gewicht van de bodem te delen door het volume ervan (bulk) en bestaat uit de optelsom van de vier fases (Vergelijking 1) (Koorevaar et al., 1983).

Vergelijking 1 Natte Bulkdichtheid

$$\rho_{bn} = \phi_m \rho_m + \phi_{org} \rho_{org} + \phi_w \rho_w + \phi_g \rho_g$$

waarin:

- ρ_{bn} = natte bulkdichtheid ($kg\ m^{-3}$)
- ϕ_m = volume fractie minerale delen (%)
- ρ_m = dichtheid minerale delen ($kg\ m^{-3}$)
- ϕ_{org} = volume fractie organische delen (%)
- ρ_{org} = dichtheid organische delen ($kg\ m^{-3}$)
- ϕ_w = volume fractie water (%)
- ρ_w = dichtheid water delen ($kg\ m^{-3}$)
- ϕ_g = volume fractie gas delen (%)
- ρ_g = dichtheid gas delen ($kg\ m^{-3}$)

De dichtheden van de fracties liggen in de volgend range: minerale delen $2.600-2.800\ kg\ m^{-3}$, organische delen $800-1.400\ kg\ m^{-3}$, water $1.000\ kg\ m^{-3}$ en gas $1,3\ kg\ m^{-3}$ (Koorevaar et al., 1983). Hieruit blijkt dat bij de bepaling van de bulkdichtheid de gasfractie geen noemenswaardige rol speelt.

De droge bulkdichtheid (ρ_{bd}) bestaat uit de fracties minerale delen en organische delen (Vergelijking 2). Het verschil tussen de natte bulkdichtheid en de droge bulkdichtheid bestaat uit de bijdrage van de waterfractie. In het lab wordt de droge bulkdichtheid bepaald door een monster met bekend volume bij 105° te drogen. Om de minerale fractie te onderscheiden van de organische fractie wordt in het lab het monster gegloeid bij $550\ ^\circ C$.

Vergelijking 2 Droge bulkdichtheid

$$\rho_{bd} = \phi_m \rho_m + \phi_{org} \rho_{org}$$

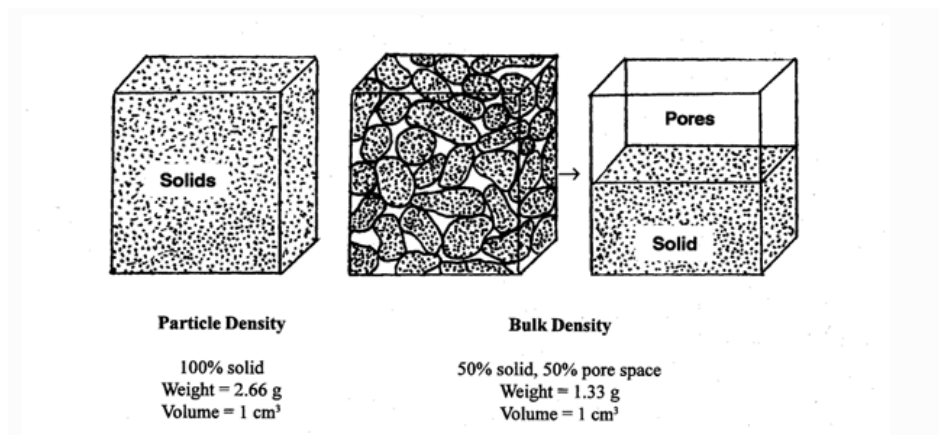
waarin:

- ρ_{bd} = droge bulkdichtheid ($kg\ m^{-3}$)

De droge bulkdichtheid wordt bepaald door de volumefractie organische stof, dichtheid van de minerale en organische delen en de porositeit. De porositeit wordt bepaald door de pakkingsdichtheid (= primaire porositeit) en de bodemstructuur (aggregaatstructuur (= secundaire porositeit)).

3. Dichtheid minerale delen (particle density)

De dichtheid van de bodemdelen is de massa van een eenheidsvolume van sediment vaste stoffen (g cm^{-3} of kg m^{-3}). In het Engels wordt ook wel de term particle density gebruikt. Het verschil met de droge bulkdichtheid is dat deze zowel wordt bepaald door de vaste delen als het poriënvolume terwijl de dichtheid alleen wordt bepaald door de vaste delen (Figuur B2-1).



Figuur B2-1 Schematische weergave verschil particle density en bulk density.

De bodemdelen bestaan uit minerale delen en uit organische delen. De dichtheid van de minerale delen is vrijwel constant, die van de organische delen kan sterk variëren naar gelang het type organische stof en de hoeveelheid organische stof (zie ook hfst over organische stof) (Rühlman et al. 2006). In vergelijking met droge bulkdichtheid is de dichtheid van de bodemdelen een veel eenduidiger en minder tijdsafhankelijke bodemparameter omdat deze niet wordt beïnvloed door de porositeit.

4. Porositeit en droge bulkdichtheid

De porositeit van een bodem (ϕ) wordt bepaald door de fractie water (ϕ_w) en gas (ϕ_g) bij elkaar op te tellen (Vergelijking 3).

Vergelijking 3 Porositeit

$$\phi = \phi_w + \phi_g$$

waarin:

$$\phi = \text{porositeit (\%)}$$

De relatie tussen porositeit en droge bulkdichtheid wordt verkregen door de porositeit in te passen in Vergelijking 2 door ϕ_m te vervangen door $(1 - \phi) - \phi_{org}$. Hierdoor wordt de porositeit bepaald door de droge bulkdichtheid en het organische stofgehalte (Vergelijking 4). Schothorst (1963) vond bij metingen aan zand en veengronden bij natuurlijke (niet verstoord door grondbewerking) graslanden een beperkte afwijking ten opzichte van deze vergelijking (Figuur B2-2). In een studie naar bodemverdichting in Noord-Nederland (van Essen, 2017; Figuur B2-3) is de relatie minder eenduidig, mogelijk doordat hierbij ook gronden zijn bemonsterd die recentelijk zijn bewerkt.

Vergelijking 4 Relatie porositeit en droge bulkdichtheid

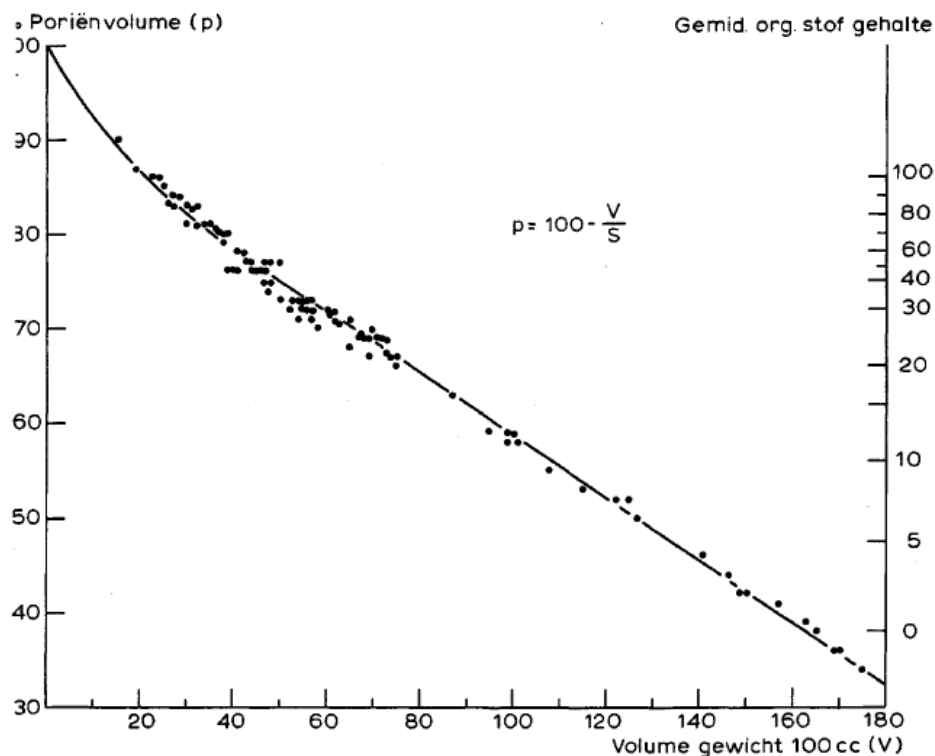
$$\phi = 1 - \frac{\rho_{bd}}{\rho_m} + \phi_{org} \left(\frac{\rho_{org}}{\rho_m} - 1 \right)$$

of (Sonneveld en van den Akker, 2010)

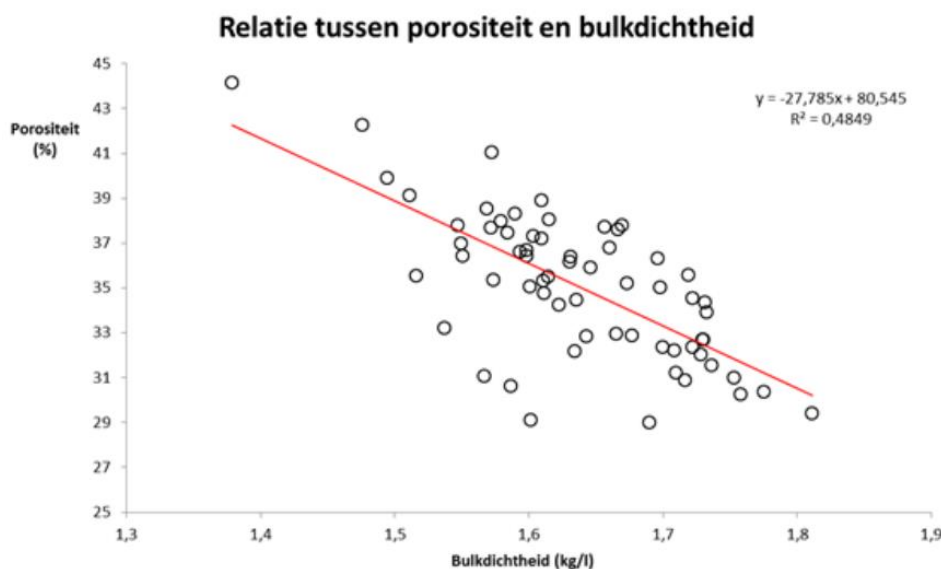
$$\phi = 1 - \frac{\rho_{bd}}{\rho_s}$$

waarin:

$$\rho_s = \text{dichtheid bodemfractie (kg m}^{-3}\text{)}$$



Figuur B2-2 Poriënvolume als relatie van droge bulkdichtheid (volume gewicht) en organisch stofgehalte, zand en veengronden (Schothorst, 1963).



Figuur B2-3 Relatie tussen porositeit en droge bulkdichtheid voor zavelgronden (van Essen, 2017).

5. Poriënverdeling en droge bulkdichtheid

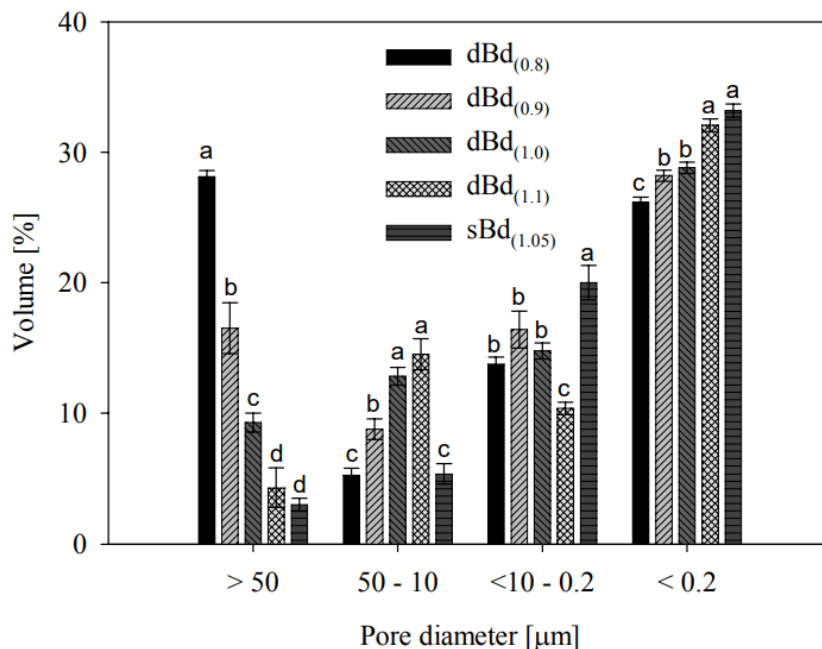
Er is een duidelijke relatie tussen porositeit en droge bulkdichtheid. Om te bepalen welke invloed een dalende porositeit op bv. de hydrologische eigenschappen heeft, is het belangrijk om te weten welke poriën op welke mate veranderen bij een toename van de bulkdichtheid. In de bodem wordt veelal een onderscheid gemaakt tussen wijde grote poriën (macro poriën > 50 µm), smalle grote poriën (50 -10 µm, middelgrote poriën (10 - 2 µm en fijn poriën (micro poriën < 2 µm) (Figuur B2-4). Uit onderzoek van Dörner et al (2010) aan zelf verdichte Chileense kleigronden blijkt dat het volume macroporiën afneemt wanneer de grond wordt verdicht (= hogere bulkdichtheid); de fijne poriën nemen juist toe bij een hogere bulkdichtheid (Figuur B2-5). Zij tonen

verdere aan dat deze verschuiven van de poriënverdeling met name de luchtdoorlatendheid negatief beïnvloed. Dit zou waarschijnlijk ook gelden voor de waterdoorlatendheid.

Het effect dat de toename van de bulkdichtheid leidt tot een vermindering van macroporiën en een toename van de microporiën wordt ook gevonden in andere studies (o.a. Fuentes et al., 2004; Dec et al. 2008).

bodemsoort	wijde grote poriën in %	smalle grote poriën in %	middelgrote poriën in %	fijne poriën in %	waterdoorlaatbaarheid in cm / d
zandgrond	10 - 20	8 - 20	10 - 15	2 - 8	300
siltgrond	0 - 10	5 - 15	10 - 20	10 - 20	30
leemgrond	5 - 10	0 - 10	5 - 15	5 - 20	30
kleigrond	0 - 5	0 - 5	10 - 15	25 - 40	3
veengrond	7 - 30	0 - 10	30 - 55	15 - 25	200

Figuur B2-4 Overzicht generiek poriënverdeling enkele gronden (Bron: <https://nl.wikipedia.org/wiki/Pori%C3%ABnvolume>).



Figuur B2-5 Verandering van de poriënverdeling bij een toename van de droge bulkdichtheid (Dörner et al., 2010).

6. Bulkdichtheid en bodemstructuur

Bodemstructuur is de specifieke rangschikking van de primaire bodemdeeltjes (zand, slib en klei) en andere bodemmaterialen in een bulkvolume in afzonderlijke aggregaten, scheuren of gaten als gevolg van fysische, biologische en chemische activiteit. Dit heeft daarmee ook betrekking op de grootte, vorm en continuïteit van de poriën tussen de deeltjes en aggregaten en daarom op de droge bulkdichtheid. Daarom speelt de bodemstructuur een uiterst belangrijke rol bij de lucht- en waterhuishouding van de bodem en bij de bewortelbaarheid. Bodemstructuur is de resultante van twee tegengestelde processen, namelijk structuuropbouw en structuurverval. Omdat die processen zich op tijdschalen van maanden tot jaren kunnen afspelen, kan de bodemstructuur vrij sterk met de tijd variëren. Zwellen/krimpen van veen/klei, bevriezing, plantengroei, biologische homogenisering en grondbewerking kunnen een structuur opbouwen; mechanische verdichting, vertrapping vee, klink en weersinvloeden kunnen structuur afbreken.

Jones et al. (2003) hebben gekeken naar de gevoeligheid van bepaalde gronden voor structuurbederf als gevolg van verdichting. Hierbij is gebleken dat enkelvoudige, korrelige en een zwak ontwikkelde blokstructuur, zoals veel zandgronden, zeer gevoelig zijn. Zandgronden hebben weinig extra verdichting nodig om te dicht te worden. 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 (Bakema et al., 2021). 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.

Sterk hoekige, prisma-achtige en plaatstructuren, zoals kleihoudende gronden, zijn bij lage vochtgehaltes niet gevoelig voor verdichting maar dit kan verslechteren bij een toename van het vochtgehalte. 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 (Bakema et al., 2021).

Verder zijn er gronden die door de specifieke textuur al van nature al een sterke verdichting hebben. Deze gronden zijn minder vatbaar voor mechanische belasting. Dit laatste is belangrijk om mee te nemen bij de beoordeling van de mate waarin de structuur van gronden is verslechterd door niet natuurlijke processen.

7. Bulkdichtheid en organisch stof

De relatie tussen droge bulkdichtheid en organische stof kan bepaald worden uit Vergelijking 2. Hieruit blijkt dat er negatieve correlatie is tussen droge bulkdichtheid en organische stofgehalte (Vergelijking 5). De relatie blijkt uit diverse studies onderzoek in Nederland (Schothorst, 1963) en (Zwart et al., 2013). Wel blijkt dat de relatie tussen organische stof en bulkdichtheid niet lineair te zijn als er gekeken wordt naar de hele bandbreedte aan organische stof (Figuur B2-6 en Figuur B2-7). Met name bij lage organische stofgehaltes (tot 10%) neemt de bulkdichtheid zeer snel af bij toenemende organische stofgehalte; daarna vlakkt de afname af. Die afvlakking wordt veroorzaakt doordat de dichtheid van het organische materiaal toeneemt bij een toename van het organische stofgehalte. Bij hogere organische stofgehalte neemt de hoeveelheid minder gehumificeerd plantmateriaal toe. Rühlman et al. (2006) vonden een toename van het gewicht van organisch materiaal van 1,10 naar 1,50 g/cm³ in de range van 0 tot 100% organische stof (Figuur B2-7). Dit betekent dat lineaire relaties die zijn ontwikkeld op basis van gronden met een specifieke range van organisch stofgehalte niet gebruikt mogen worden voor gronden met een andere range van organische stofgehaltes. Voorbeelden van dergelijke lineaire relaties zijn te vinden in het onderzoek van Sakin et al. (2001) aan gronden met een laag organisch stofgehalte (tot 2%) op de Harran-vlakte (Turkije) en in het onderzoek van Van Eekeren en Bokhorst (2009) voor een gewenste dichtheid van gronden met een organische stofgehalte tot 10% (Vergelijking 6, Vergelijking 7).

Vergelijking 5 Relatie bulkdichtheid – organische stofgehalte

$$\rho_{bd} = \phi_s \rho_m - \phi_{org} (\rho_m - \rho_{org})$$

waarin

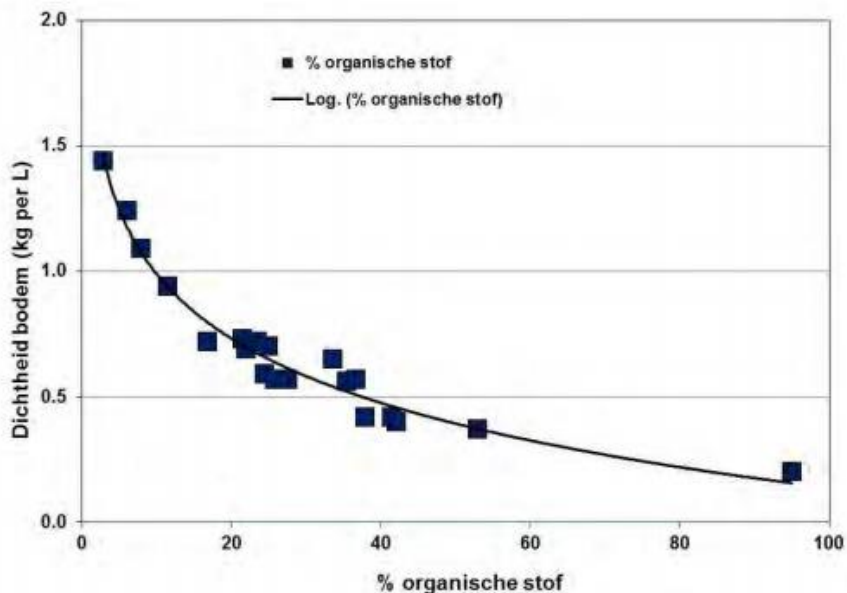
$$\phi_s = \text{volume fractie bodemdelen } (\phi_s = 1 - \phi_w)$$

Vergelijking 6 Relatie bulkdichtheid – organische stofgehalte (Sakin et al., 2001)

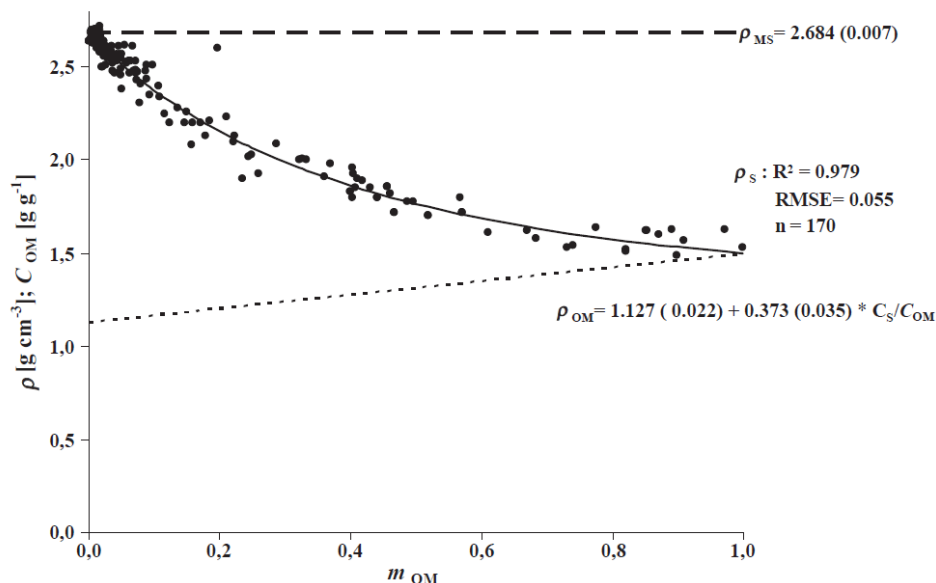
$$\rho_{bd} = 1640 - 876 \times \phi_{org}$$

Vergelijking 7 Relatie bulkdichtheid – organische stofgehalte (Van Eekeren en Bokhorst, 2009)

$$\frac{1}{\rho_{bd}} = 0,02525 * \phi_{org} + 0,06541$$



Figuur B2-6 Relatie bulkdichtheid en organische stof (Zwart et al., 2013). Proeven veenkoloniën tussen 1978- 1982.

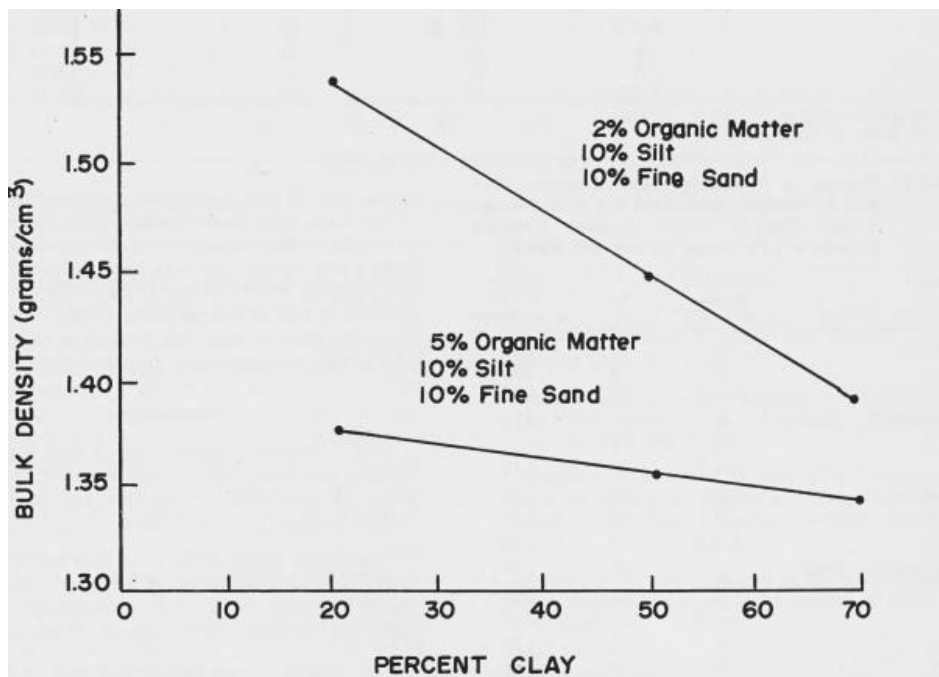


Figuur B2-7 Gemeten en gefitte waarden van de dichtheid van de bodemfractie bij een toename van het gehalte organisch stof en de dichtheid van het organisch materiaal bij een toename van het gehalte organische stof (Rühlman et al. 2006).

8. Bulkdichtheid en kleigehalte

Naast het organische stofgehalte is de bulkdichtheid ook afhankelijk van het kleigehalte. Uit onderzoek uit de jaren zestig aan Canadese gronden is een relatie ontwikkeld tussen de bulkdichtheid, het organische stofgehalte en het kleigehalte (Shaykewich et al. uit Bauer (1974)) (Figuur B2-8 en Vergelijking 8). Bij lage organische stofgehaltes heeft een toename van het kleigehalte een grotere afname van de bulkdichtheid tot gevolg dan bij hogere organische stofgehaltes. Dit blijkt nog sterker uit de pedotransferfunctie voor bulkdichtheid die door Wösten et al. (2001) is ontwikkeld op basis van de bodemkarakteristieken van 832 Nederlandse bodemhorizonten (Vergelijking 9 en Figuur B2-9).

De vergelijkingen van o.a. Wösten et al. (2001) geven door hun gedetailleerdheid de indruk een hoge mate van nauwkeurigheid en voorspellend vermogen te hebben. Echter hun correlatie aan de meetdata is beperkt en daarnaast lijken ze ook lagere bulkdichtheden te genereren dan degene die in het veld worden gevonden.



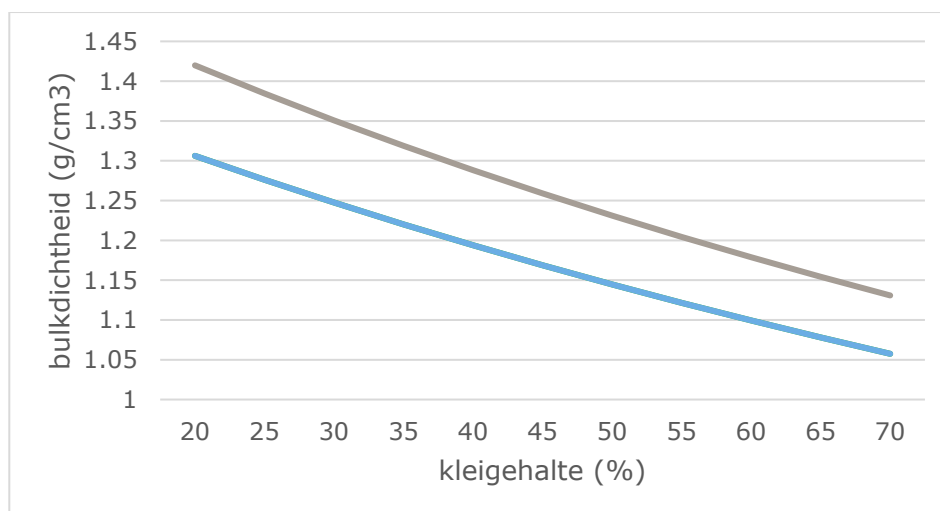
Figuur B2-8 Relatie bulkdichtheid en kleigehalte bij verschillende organische stofgehaltes (Shaykewich et al. uit Bauer, 1974).

Vergelijking 8 Relatie bulkdichtheid en organische stofgehaltes en kleigehalte (Shaykewich et al. uit Bauer, 1974).

$$\rho_{bd} = 1,77 - 0,0016 * Sand - 0,0017 * Silt - 0,0047 * C - 0,07 * org + 0,0008 * org * C$$

Vergelijking 9 Relatie bulkdichtheid en organische stofgehaltes en kleigehalte voor zavel- en kleigronden (Wösten et al., 2001)

$$\frac{1}{\rho_{bd}} = 0,6117 + 0,003601 * C + 0,002171 * org^2 + 0,01715 * LN(org)$$



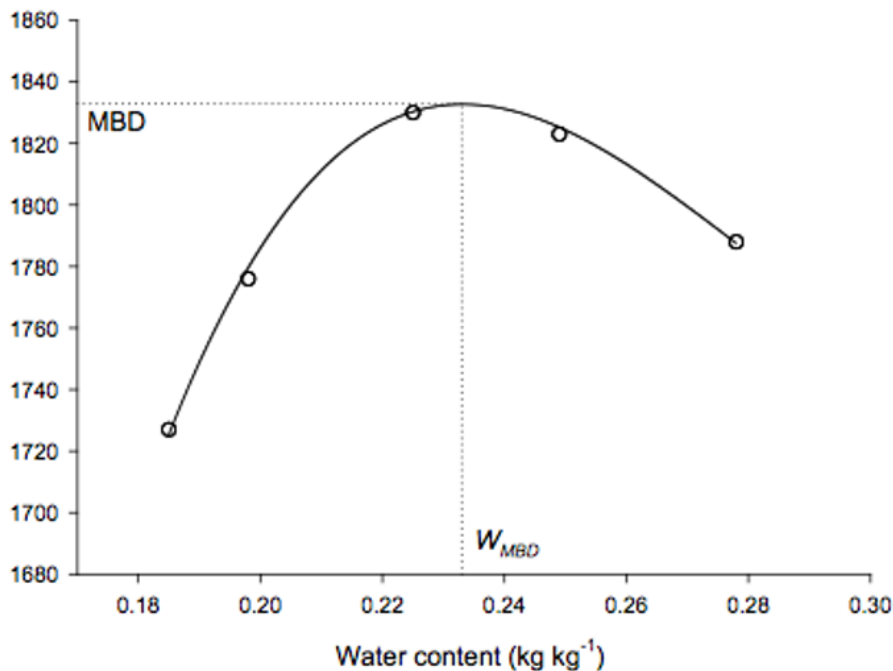
Figuur B2-9 Relatie tussen droge bulkdichtheid en kleigehalte voor 5% organische stof (blauwe lijn) en 2% organische stof (grijze lijn) (Wösten et al., 2001).

9. Actuele bulkdichtheid en relatieve bulkdichtheid

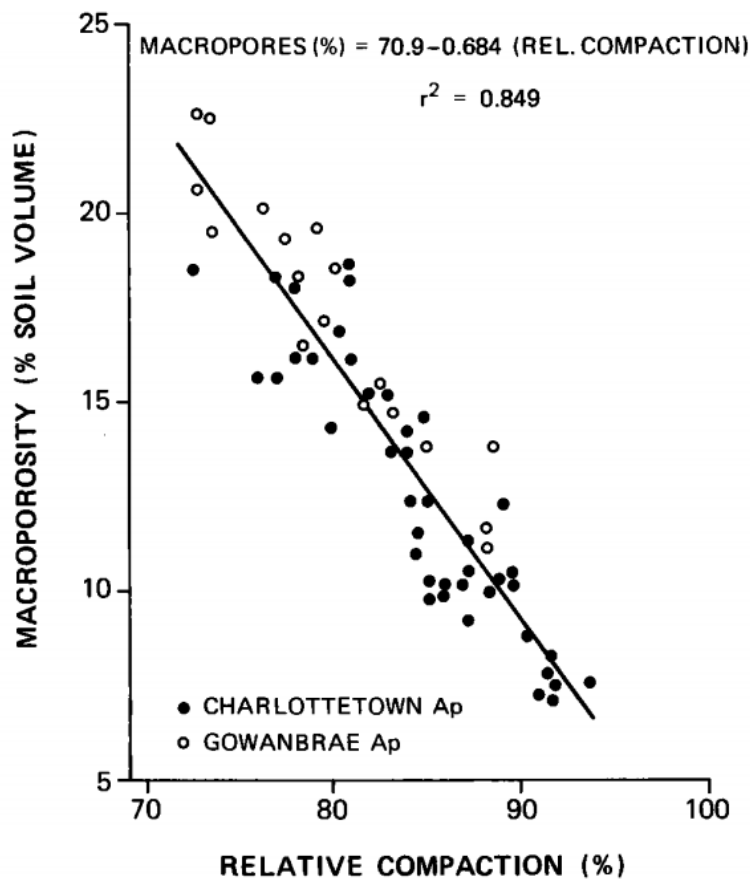
Bulkdichtheid is geen intrinsieke eigenschap van de bodem en kan onder invloed van het vochtgehalte, afbraak en opbouw organische stof, zwellen en krimpen van gronden, grondbewerking en de mate waarin gronden door belasting zijn verdicht, sterk variëren. Hierdoor is het moeilijk om de diverse gemeten bulkdichtheden met elkaar te vergelijken.

Een methode om de actueel gemeten waarden te standaardiseren is door deze te vergelijken met de maximale droge bulkdichtheid. Hiermee ontstaat een zogenaamde relatieve droge bulkdichtheid. De maximale droge bulkdichtheid kan met een zogenaamde Proctor-proef worden bepaald. Bij deze proef wordt een grondmonster belast door er met een specifiek gewicht een aantal keren op te slaan. Van dit verdichte monster wordt de droge bulkdichtheid bepaald. Vervolgens wordt aan het grondmonster water toegevoegd en wordt de proef nogmaals uitgevoerd. Het verder vernatten van het monster en het opnieuw verdichten worden net zolang uitgevoerd totdat de droge bulkdichtheid begint te dalen. Een voorbeeld van een eindresultaat van de proef is te zien in Figuur B2-10.

De methode van relatieve bulkdichtheid is gebruikt door Carter (1990) om te bepalen hoe de relatieve dichtheid over een drietal seizoenen varieert onder invloed van grondbewerking en gewasgroei voor een tweetal podzolgronden in Canada. Hieruit blijkt dat er sterke relatie is tussen de relatieve dichtheid en de aanwezigheid van macroporiën. Uitgaande van een voor een optimale luchthuishouding gewenst macroporiën-volume tussen de 12 en 14%, zou de grond een relatieve verdichtingsgraad moeten hebben tussen de 83-86% (Figuur B2-11). Macroporiën zijn gevoelig voor belasting en bezwijken gedurende de eerste fase van verdichting. Een vermindering van het volume van macroporiën veroorzaakt gelijktijdig ook een verandering van andere eigenschappen zoals de waterdoorlatendheid (Carter, 1990).

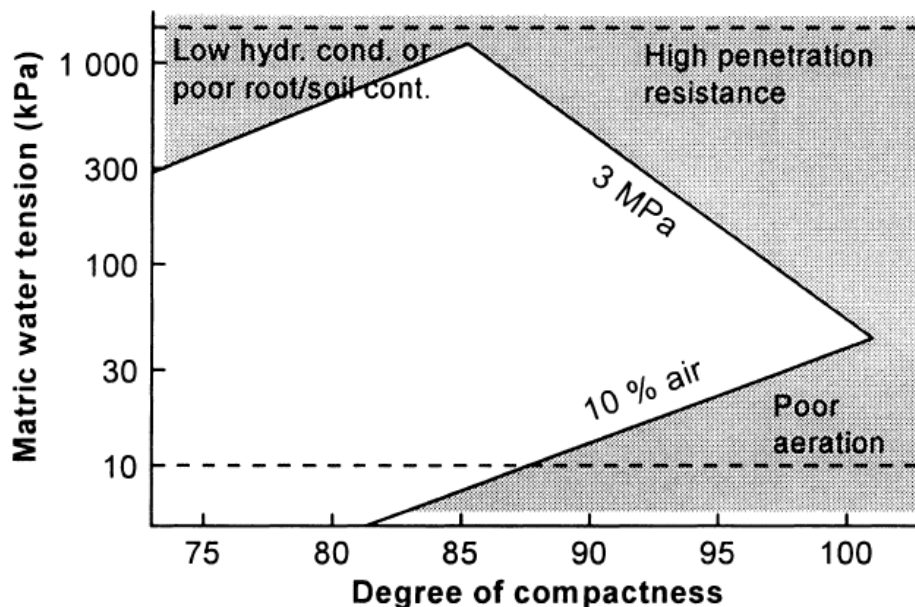


Figuur B2-10 Droge bulkdichtheid bepaald door de Proctor-proef bij verschillende vochtgehaltes <https://labmodules.soilweb.ca/soil-compaction-bulk-density/> MBD= Maximum Bulk Density.



Figuur B2-11 Relatie tussen de macroporiën en de relatieve dichtheid voor een tweetal podzolgronden in Canada (Carter, 1990).

De bruikbaarheid van de relatieve dichtheid wordt verder aangetoond door Håkansson and Lipiec (2000). Er werd geconstateerd dat de bulkdichtheid en porositeit voor optimale plantgroei sterk verschilt per bodemsoort maar deze vrijwel gelijk is wanneer voor die gronden gekeken wordt naar de relatieve bulkdichtheid (door hen degree of compaction genoemd). De kritische waarden die gesteld worden aan indringingsweerstand en luchtgevulde poriën zijn, op een voor de meeste gronden op dezelfde wijze, sterk gerelateerd aan de relatieve bulkdichtheid en waterspanning (Figuur B2-12).



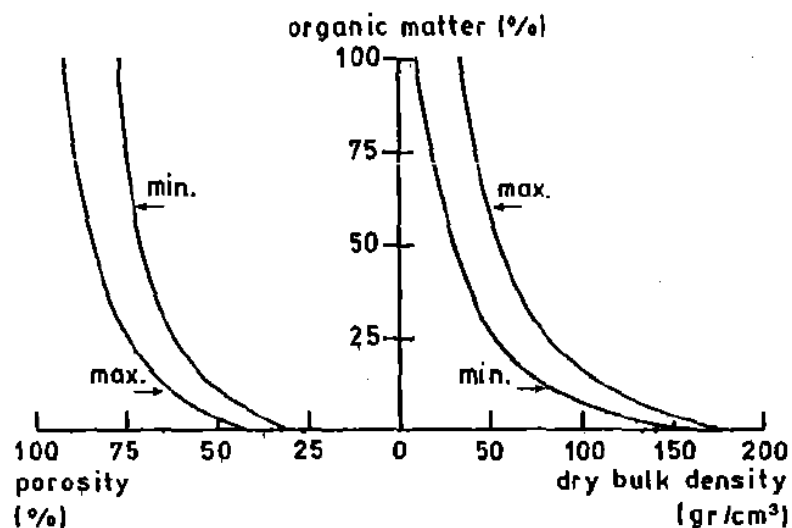
Figuur B2-12 Relatie tussen relatieve dichtheid en waterspanning gerelateerd aan grenswaarden voor bodemverdichting. Het grijze gebied is de zone waarin er schade aan de plantengroei optreedt (Håkansson and Lipiec, 2000).

Een andere definitie van relatieve dichtheid is ontwikkeld door Schothorst (1963). Hierbij wordt een vergelijking gemaakt met de maximale en minimale bulkdichtheid bij een bepaald gehalte organische stof. De minimale en maximale dichtheid worden hierbij gedefinieerd als respectievelijk het hoogste en laagste poriënvolume dat bij een bepaald organisch stofgehalte onder natuurlijke omstandigheden kan voorkomen. De maximale en minimale dichtheden zijn geen constante waarden maar variëren afhankelijk van porositeit en organisch stofgehalte. Op basis van metingen aan zand- en veengronden zijn een set grenswaarden geformuleerd (Figuur B2-13). Bij de maximale en minimale dichtheid bestaat er een constante verhouding tussen de afname van de gewichtshoeveelheid mineralen en de toename van de gewichtshoeveelheid organische stof van respectievelijk 5,5:1 en 8,7:1 (Figuur B2-14)(Vergelijking 10). De laatste is gelimiteerd tot 50% organische stofgehalte.

Vergelijking 10 Maximale droge bulkdichtheid in relatie tot de massa van het organische stof (gebaseerd op Figuur B2-14, (Schothorst, 1963))

$$\rho_{bd} = 1750 - 44,6 * (\phi_{org} * \rho_{org})$$

De grenswaarden laten zien dat een grond met bv 5% organisch stof met een volumegewicht van 1,45 (kg m⁻³) en een poriënvolume van 42% als verdicht wordt gezien, terwijl een grond met 15% organische stof en een volumegewicht van 1,04 (kg m⁻³) met een veel hoger poriënvolume van 56%, ook als verdicht wordt beschouwd (Figuur B2-14, Figuur B2-13).



Figuur B2-13 Minimale en maximale porositeit en bulkdichtheid van natuurlijke zandgronden met verschillende percentages organische stof (Boels en Havinga, 1980).

Dit betekent dat grenzen aan bulkdichtheid alleen goed kan worden bepaald als er ook bekend is wat het organische stofgehalte is.

Vergelijking 11 Relatieve dichtheid als functie van actuele, minimale en maximale dichtheid (Schothorst, 1963 uit Boels en Havinga, 1980)

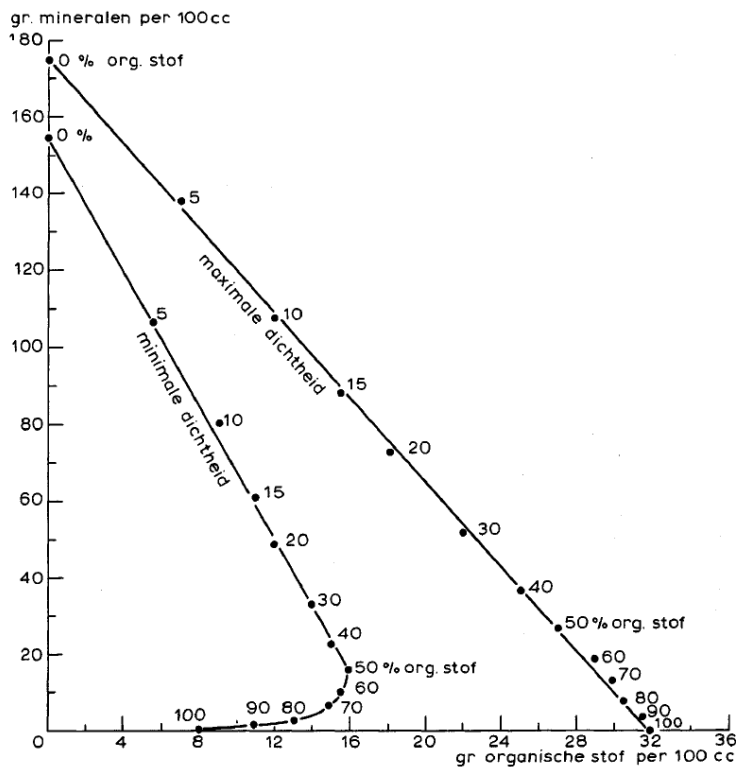
$$\rho_{bdr} = \frac{\rho_{bd} - \rho_{bdmin}}{\rho_{bdr max} - \rho_{bdmin}}$$

waarin

ρ_{bdr} = relatieve dichtheid (-)

ρ_{bdmin} = minimale dichtheid = hoogste poriënvolume onder natuurlijke omstandigheden (kg m^{-3})

$\rho_{bdr max}$ = maximale dichtheid = laagste poriënvolume onder natuurlijke omstandigheden (kg m^{-3})



Figuur B2-14 Maximale en minimale dichtheid als functie van gewichtshoeveelheid organische stof en gewichtshoeveelheid minerale delen (Schothorst, 1963).

10. Grenswaarden aan droge bulkdichtheid.

De grenswaarden die aan droge bulkdichtheid worden gesteld zijn veelal gerelateerd aan de mate waarin een grond gevoelig is voor (verdere) verdichting. Zo wordt door Renger (1970) de term "Lagerungsdichte" of "Paking density" geïntroduceerd. De Lagerungsdichte wordt in het veld vastgesteld en is ingedeeld in een vijftal klassen (Renger et al., 2014). Daarnaast kan deze in het lab worden bepaald op basis van een droge bulkdichtheid die gecorrigeerd is voor het klei en siltgehalte.

Renger (1970) heeft van diverse gronden de droge bulkdichtheid en het kleigehalte bepaald en heeft op basis daarvan een relatie ontwikkeld (Vergelijking 12 en Figuur B2-15). Vervolgens is van alle monsters op basis van visuele waarneming bepaald wat de structuur is (al dan niet verdicht). Op basis daarvan is een verdeling van de paking density gemaakt: < 1400 kg m⁻³ niet verdicht, 1400 – 1750 kg m⁻³ licht verdicht, > 1750 kg m⁻³ sterk verdicht. Door Van den Akker en de Groot (2008) zijn de grenswaarden van Renger omgezet naar grenswaarden voor kleigronden (lutum > 17,5%) (Vergelijking 13). Voor zandgronden, met een laag organisch stofgehalte, wordt door Van den Akker en de Groot (2008) op basis van een minimaal poriëngehalte van 40% (Vergelijking 4), de grenswaarde op 1600 kg m⁻³ gesteld (Vergelijking 14). Uit verdichtingsproeven op bloembollenvelden blijkt dat een minimale poriëngehalte van 40% nodig is voor het goed functioneren van het wortelstel (Van de Valk en de Haan, 1974).

Bij een lutumgehalte van 17,5% is de grenswaarde voor klei identiek aan die van zand. Er is geen wetenschappelijke basis voor die 17,5%, het is slechts dat bij die waarde dat er een bulkdichtheid 1600 kg m⁻³ rolt uit Vergelijking 13.

In het onderzoek om de Europese gronden te beoordelen op hun gevoeligheid voor verdichting worden de grenswaarden van Renger gebruikt (Jones et al., 2003). Hierbij wordt ook een link gelegd met de textuur (Figuur B2-16).

Vergelijking 12 Bepaling Packing density op basis van bulkdichtheid en kleigehalte (Renger, 1970)

$$Pd = \rho_{bd} - 9 * C$$

waarin:

P_d = pakingsdichtheid (kg m^{-3})

C = kleigehalte (%)

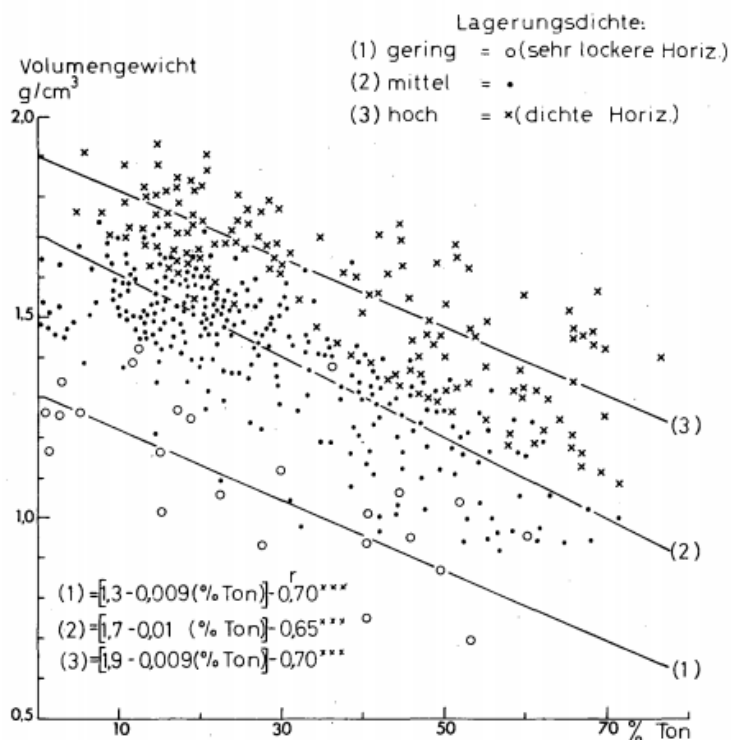
Vergelijking 13 Grenswaarde bulkdichtheid voor kleigronden ($> 17,5\%$ lutum) (van den Akker en de Groot, 2008)

$$\rho_{bd} = 1750 - 9 * C$$

Vergelijking 14 grenswaarde droge bulkdichtheid zand en zavel ($< 17,5\%$ lutum) (van den Akker en de Groot, 2008)

$$\rho_{bd} = 1600$$

Volumengewicht (Dichte des Bodens) und Tongehalt von Böden mit unterschiedlicher Lagerungsdichte (Gehalt an organischer Substanz $< 3\%$)



Figuur B2-15 Droge bulkdichtheid bij diverse kleigehalte en verschillende verdichtingsgraden bij gronden met een organische stofgehalte van 3% (Renger, 1970).

		Packing density t m ⁻³		
		Low	Medium	High
Texture Code	Texture Class	< 1.40	1.40 – 1.75	> 1.75
1	Coarse	VH	H	M ¹
2	Medium	H	M	M
3	Medium fine	M(H)	M	L ³
4	Fine	M ²	L ⁴	L ³
5	Very fine	M ²	L ⁴	L ³
9	Organic	VH	H	

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

¹ except for naturally compacted or cemented coarse (sandy) materials that have very low (L) susceptibility.

² these packing densities are usually found only in recent alluvial soils with bulk densities of 0.8 to 1.0 t m⁻³ or in topsoils with >5% organic carbon.

³ these soils are already compact.

⁴ Fluvisols in these categories have moderate susceptibility

Figuur B2-16 Indeling van diverse grondsoorten en hun packing density op hun gevoeligheid voor verdichting (Jones et al., 2003).

Waar Renger (1970) zijn grenzen aan bulkdichtheid relateert aan een specifieke structuur zijn anderen met name op zoek naar een grens waarbij de plantengroei wordt gelimiteerd. Hierbij wordt gezocht naar een kritieke bulkdichtheid waarbij de wortelgroei wordt gelimiteerd of waarbij de oogst wordt verminderd (Reichert et al. 2008). Er wordt daarbij gezocht naar een relatie met grenswaarden op het gebied van luchtgevulde poriën (> 0,1 m³/m³) en indringingsweerstand (< 2 MPa). Zo heeft Jonas (1983, uit Reichert, 2008) vergelijkingen ontwikkeld voor een maximale bulkdichtheid (kritische grens) waarbij de wortelgroei met 20% werd verminderd ten opzichte van maximale groei bij veldcapaciteit. De vergelijkingen, die zijn gebaseerd op proeven met een sterk uiteenlopend klei en siltgehalte, vertonen eenzelfde trend als de vergelijkingen van Renger (Vergelijking 15 en Vergelijking 16).

Vergelijking 15 Kritische bulkdichtheid in relatie tot kleigehalte (Jonas, 1983, uit Reichert, 2008)

$$\rho_{bd} = 1,77 - 0,00063 * C$$

waarin:

C = kleigehalte (g/kg)

Vergelijking 16 Kritische bulkdichtheid in relatie tot klei- en siltgehalte (Jonas, 1983, uit Reichert, 2008)

$$\rho_{bd} = 1,83 - 0,00043 * (C + S)$$

waarin:

S = siltgehalte (g/kg)

Renger heeft zijn relaties uit 1970 in 2014 weer geüpdatet (Figuur B2-17). Hierbij is de Vergelijking 13 opnieuw geverifieerd aan diverse gronden met een laag organisch stofgehalte en aangepast (Vergelijking 17) (Renger et al. 2014). Verder vonden zij dat de grenswaarde voor packing density (voor alle gronden) vrijwel constant ligt op 1710 kg/ m³ (was oorspronkelijk 1750 kg m⁻³).

Vergelijking 17 Relatie Packing density op basis van bulkdichtheid en kleigehalte (organisch stof < 1%) (Renger et al. 2014)

$$Pd = \rho_{bd} - 5 * C + S$$

Tabelle 3: Obere Grenzwerte der optimalen Trockenrohdichte (*TRD*) und der optimalen effektiven Lagerungsdichte *Ld* im Unterboden in Abhängigkeit von den Bodenarten

		Ld Nr.1: berechnet mit Gleichung (3) Ld Nr.2: berechnet mit Gleichung (1a)				
Nr.	Bodenart	mittlerer Tongehalt in %	mittlerer Schluffgehalt in %	<i>TDR</i> in g/cm ³	<i>Ld</i> Nr.1 in g/cm ³	<i>Ld</i> Nr.2 in g/cm ³
1	Ss	2,5	5	1,64	1,67	1,68
2	St2	11	5	1,62	1,68	1,72
3	Su2	2,5	17,5	1,64	1,68	1,66
4	Su3	4	32,5	1,64	1,69	1,68
5	Su4	4	45	1,63	1,70	1,67
6	Sl2	6,5	17,5	1,64	1,69	1,70
7	Sl3	10	25	1,62	1,70	1,71
8	Sl4	14,5	25	1,61	1,71	1,74
9	Slu	12,5	45	1,61	1,72	1,72
10	Uu	4	90	1,59	1,70	1,63
11	Us	4	65	1,62	1,70	1,66
12	Ut2	10	80	1,58	1,71	1,67
13	Ut3	14,5	76	1,56	1,71	1,69
14	Ut4	21	72	1,54	1,72	1,74
15	Uls	12,5	57,5	1,59	1,71	1,70
16	Lu	23,5	57,5	1,54	1,71	1,75
17	Ls2	21	45	1,56	1,71	1,75
18	Ls3	21	35	1,57	1,71	1,76
19	Ls4	21	22,5	1,59	1,72	1,78
20	St3	21	7,5	1,61	1,72	1,80
21	Lts	35	22,5	1,52	1,72	1,84
22	Lt2	30	40	1,52	1,71	1,79
23	Lt3	40	40	1,46	1,70	1,82
24	Tu4	30	70	1,49	1,71	1,86
25	Tu3	37,5	57,5	1,47	1,71	1,81
26	Tu2	55	40	1,41	1,72	1,91
27	Tl	55	22,5	1,43	1,72	1,93

Figuur B2-17 Bepaling van de packing density (*LD*) op basis van droge bulkdichtheid, klei- en siltgehalte (Renger et al. 2014).

11. Conclusies

- (Droge) bulkdichtheid (massa per eenheid volume) heeft twee belangrijke functies: a) bij conversie van meetgegevens (van gravimetrisch naar volumetrisch) en b) als algemene karakterisering van de toestand van de bodemmatrix.
- Bulkdichtheid is een parameter die bepaald wordt door diverse andere bodemparameters zoals porositeit (primair en secundair), organische stofgehalte en dichtheden van de minerale delen. Dit maakt bulkdichtheid een complex te doorgronden parameter, die niet goed te beoordelen is in relatie tot het gebruik/probleem, zonder iets te weten van de onderliggende parameters.
- Er is een sterke relatie tussen de porositeit en de droge bulkdichtheid. Om te weten welke invloed een verlaagde porositeit op hydraulische eigenschappen heeft, moet duidelijk zijn welke poriën worden beïnvloed door de samendrukking (verhoogde bulkdichtheid). Met name de afname van macroporiën (> 50 µm) is daarin belangrijk. Het bepalen van de hoeveelheid macroporiën (sproeitest bij H₂O – 50 cm) als aanvulling op het meten van bulkdichtheid kan meer zicht geven op de invloed van een veranderende bulkdichtheid.
- De bulkdichtheid wordt sterk beïnvloed door het organische stofgehalte van de bodem. Vooral bij lage gehalten (0-10%) is er een sterk lineaire afname. Boven de 10% organische stof neemt de bulkdichtheid minder sterk af doordat het gewicht van het organische stofgehalte bij hogere percentages organische stof toeneemt.
- De bulkdichtheid wordt beïnvloed door het kleigehalte. Met name voor gronden met een laag organisch stofgehalte (0-10%) is de invloed van het kleigehalte hoog.

- Bulkdichtheid is, zeker voor de bovenste 30 cm, over de tijd geen constante parameter en kan onder invloed van klimaat, plantengroei en grondbewerking sterk gaan verschillen. Om de actuele bulkdichtheid te objectiveren is een vergelijking met de maximale bulkdichtheid nodig (= relatieve bulkdichtheid). Deze maximale bulkdichtheid geeft aan tot welke waarde een grond maximaal kan worden samengedrukt. De relatieve bulkdichtheid kan gekoppeld worden aan hydraulische eigenschappen en kan daarmee grenswaarden opleveren voor de bulkdichtheid.
- De grenswaarden die in Nederland veelal worden gesteld aan droge bulkdichtheid zijn gebaseerd op relaties uit onderzoek aan een beperkt aantal Duitse gronden uit de jaren zeventig. Omdat er in Nederland geen onderzoeken zijn gedaan om deze grenswaarden te verifiëren, moeten de grenswaarden voor Nederlandse gronden met de nodige terughoudendheid worden gebruikt. Zeker voor zandgronden is de wetenschappelijke basis erg beperkt. Verder wordt voor de Nederlandse grenswaarden geen rekening gehouden met organische stofgehalte.
- Na 2012 zijn in Nederland de labmetingen aan droge bulkdichtheid van klei en veengronden gewijzigd (Bakker, 2021, mondelinge mededeling). Nu worden de monsters eerst volledig verzadigd (waardoor ze zwellen) en daarna afgesneden. Dit maakt dat de data van droge bulkdichtheid van voor en naar 2012 moeilijk te vergelijken zijn.
- De ontwikkelde pedotransferfuncties die een relatie leggen tussen organische stof en kleigehalte zijn beperkt gevalideerd en geven significant andere waarden in vergelijking met recente data. Daarnaast zijn ze gebaseerd op data met een beperkte bandbreedte ten aanzien van organische stof en kleigehalte.
- Droge bulkdichtheid zijn gewicht in goud waard? De droge bulkdichtheid is een parameter die zonder een relatie met andere metingen moeilijk te duiden is. In zoverre is droge bulkdichtheid een niet zo waardevolle parameter.

12. Aanbevelingen

- Om de droge bulkdichtheid te kunnen beoordelen op zaken als bv bodemverdichting is het aan te raden ook het organische stofgehalte, klei- en siltgehalte te meten.
- Het type organische materiaal en de mate waarin dit gehumificeerd is bepaalt de dichtheid van het organische materiaal. Hierbij moet rekening worden gehouden bij het maken en gebruiken van pedotransferfunctie waarbij op basis van de bulkdichtheid het organische stofgehalte wordt bepaald.
- Verifieer bestaande pedotransferfuncties waarin de droge bulkdichtheid zit meer aan recentere data. Hierbij dient ook rekening te worden gehouden dat de meetmethoden van droge bulkdichtheid in de loop der jaren is gewijzigd. Daarnaast is het belangrijk te bepalen (of te weten) voor welke klei- en organisch stofgehalte de functies toepasbaar zijn en voor welke duidelijk niet. Weet wat de achtergrond is van de onderzoeken waaraan de pedotransferfunctie refereert. Veelal zijn die onderzoeken uitgevoerd voor specifieke gronden onder specifiek omstandigheden. Dit maakt dat het extrapoleren van die resultaten tot buiten het onderzoekskader tot verkeerde conclusies kan leiden.
- Specifiek geldt dit voor de pedotransferfunctie van Wösten et al. (2001) die in modellen als SWAP worden gebruikt. Uit een vergelijking met meer recent metingen blijkt dat de Wösten functie significant lagere waarden voorspeld.
- Ontwikkel nieuwe grenswaarden voor het bepalen van de ernst van verdichting op basis van droge bulkdichtheid. Onderzoek daarbij of relatieve bulkdichtheid in combinatie met andere verdichtingsindicatoren een meer nauwkeuriger indicator oplevert.
- In de toekomst zal het mogelijk zijn om meer velddata te generen met behulp van in-situ metingen of met behulp van remote sensing. Hierdoor wordt het mogelijk nog meer gebiedsdekkend droge bulkdichtheid of daaraan gerelateerde bodemparameters te bepalen. Het is belangrijk om naast het vergroten van de hoeveelheid data en de nauwkeurigheid daarvan te blijven werken aan het verbeteren van de proceskennis. Dit kan door het uitvoeren van veldexperimenten waarbij in-situ metingen worden verricht onder diverse veld- of gewasomstandigheden. Dergelijke experimenten zijn kostbaar maar zijn noodzakelijk om goede verbanden te leggen en de onderliggende proces te doorgronden. Het doen van veldexperimenten zou naast het doorontwikkelen van tools en nieuw meettechnieken voldoende aandacht moeten houden. Zeker omdat daarmee ook het onverwachte kan worden aanschouwd.

13. Literatuur (alleen Bijlage 2)

- Bakema G., J.J.H. van den Akker en F. van Egmond, 2021. Opheffen en voorkomen van bodemverdichting. Wageningen Environmental Research, Rapport 3069, Wageningen Environmental Research, Wageningen.
- Bauer, A., 1974. Influence of soil organic matter on bulk density and available water capacity of soils. Farm research May-June 1974.
- Boels, D. en L. Havinga, 1980. Physical soil degradation in the Netherlands, ISW nota 1235 Wageningen.
- Carter, M.R. 1990. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sandy loams. Can. J. Soil Sci. 70:425-433.
- Dec, D., Dörner, J., O. Horn. Effect of bulk density on hydraulic properties of homogenized and structured soils. J. Soil, Sci. Plant Nutr 8.
- Dörner, J., P. Sandoval and D. Dec, 2010. THE ROLE OF SOIL STRUCTURE ON THE PORE FUNCTIONALITY OF AN ULTISOL. Journal Soil Sci. Plant Nutr. 10 (4): 495 - 508 (2010).
- Fuentes, J.P, M. Flurry, M. Bedzdicek, 2004. Hydraulic properties in a silt loam soil under natural prairie, conventional and no-till. Soil Sci Soc Am J. 68.
- Håkansson, I., and J. Lipiec, 2000. A review of the usefulness of relative bulk density in studies of soil structure and compaction. Soil & Tillage 53 (2000) 71-85.
- Jones, R. J. A., Spoor, G. and Thomasson, A. J. 2003. Vulnerability of subsoils in Europe to compaction: A preliminary analysis. Soil and Tillage Research, 73, 131-143.
- Koorevaar, P., G. Menelik en C. Dirksen, 1983. Elements of soil physics. Developments in soil science 13. Elsevier. Amsterdam.
- Reichert, J.M., L. Suzuki, D.J. Reinert, R. Horn en I. Håkansson, 2008. Reference bulk density and critical degree of compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. Soil & Tillage, 102 (2009), 242-254.
- Renger M, K. Bohne and G. Wessolek, 2014. Bestimmung und Aussagemöglichkeiten der effektiven Lagerungsdichte. In: Wessolek G, Kaupenjohann M, Renger M (eds) Bodenphysikalische Kennwerte und Berechnungsverfahren für die Praxis, Teil II. TU Berlin, Berlin.
- Renger, M., 1970. Über den Einfluss der Dränung auf das Gefüge und die Wasserdurchlässigkeit bindiger Böden. Mitteilungen Deutschen Bodenkundlich 12 Gesellschaft 11, 23-28.
- Rühlman, J., M. Körschens and J. Graefe, 2006. A new approach to calculate the particle density of soils considering properties of the soil organic matter and the mineral matrix. Geoderma 130 (2006) 272-283.
- Sakin, E., A. Deliboran and E. Tutar, 2001. Bulk density of Harran plain soils in relation to other properties. African Journal of Agriculture Research. April 2011.
- Schothorst, C.J., 1963. Het porienvolume van losse en dichte zand- en veengronden. no. 170 ICW Wageningen.
- Sonneveld, M. P. W. and van den Akker, J. J. H. 2010. Quantification of C and N stocks in grassland topsoils in a Dutch region dominated by dairy farming. Journal of Agricultural Science, 1-9.
- Van den Akker, J. J. H. en De Groot, W. J. M. 2008. Een inventariserend onderzoek naar de ondergrondverdichting van zandgronden en lichte zavel, Wageningen, Alterra.
- Van der Valk, G.G.M. en de Haan F.A.M. 1974. Invloed van bodemverdichting op de productie van bloembollen op duinzandgronden. Rapport 21, Laboratorium voor Bloembollenonderzoek, Lisse.
- van Eekeren, N., J. Bokhorst, 2009. Beoordeling bodemkwaliteit zandgronden. Zorg voor zand, rapport nr.7, Louis Bolk instituut. Driebergen.
- van Essen, E., en W. Harder, 2017. Verkennend onderzoek naar bodemverdichting provincie Groningen, Drenthe en Friesland. Aequator, Harderwijk.
- Wösten, J.H.M., G.J. Veerman, W.J.M. de Groot en J. Stolte. 2001. Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks. Vernieuwde uitgave 2001. Wageningen, Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte. Alterra-rapport 153. 86 blz. 3 fig.; 10 tab.; 20 ref.
- Zwart, K., A. Kikkert, A. Wolfs, A. Termorshuizen, G.J. van der Burgt. 2013. Tien vragen en antwoorden over organische stof. Masterplan Mineralenmanagement project 12059. HLB, Wijster.
<https://edepot.wur.nl/272641>

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

Wageningen Environmental Research
Rapport 3225
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, 7.200 medewerkers (6.400 fte) en 13.200 studenten en ruim 150.000 Leven Lang Leren-deelnemers 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 0317 48 07 00
wur.nl/environmental-research

Rapport 3225
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, 7.200 medewerkers (6.400 fte) en 13.200 studenten en ruim 150.000 Leven Lang Leren-deelnemers 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.

