



De invloed van bodemverdichting op de plantontwikkeling

Kolom-, laboratorium- en veldexperimenten

Eindrapport onderzoeksproject BoVer (Bodemverdichting Verdiept)

Guido Bakema, Gerben Bakker, Marius Heinen, Fenny van Egmond en Erik van den Elsen



WAGENINGEN
UNIVERSITY & RESEARCH

De invloed van bodemverdichting op de plantontwikkeling

Kolom-, laboratorium- en veldexperimenten

Eindrapport onderzoeksproject BoVer (Bodemverdichting Verdiept)

Guido Bakema, Gerben Bakker, Marius Heinen, Fenny van Egmond en Erik van den Elsen

Dit onderzoek is uitgevoerd door Wageningen University & Research in het kader van het onderzoeksprogramma Bodemverdichting Verdiept (BoVer). BoVer is een driejarig onderzoeksprogramma, gesubsidieerd door de TKI Deltatechnologie.

Wageningen Environmental Research
Wageningen, december 2024

Gereviewd door:
Simone Verzandvoort, onderzoeksredacteur

Akkoord voor publicatie:
Mirjam Hack-ten Broeke, team bodem, water en landgebruik

Rapport 3404
ISSN 1566-7197

Bakema, G., G. Bakker, M. Heinen en E. van den Elsen, 2024. *De invloed van bodemverdichting op de plantontwikkeling; Kolom-, laboratorium- en veldexperimenten; Eindrapport onderzoeksproject BoVer (Bodemverdichting Verdiept)*. Wageningen, Wageningen Environmental Research, Rapport 3404. 174 blz.; 7 fig.; 0 tab.; 8 ref.

Bodemverdichting is een belangrijke bedreiging voor het goed functioneren van de bodem voor de landbouw. In dit onderzoek zijn diverse veld-, kolom- en laboratoriumexperimenten uitgevoerd. Het belangrijkste doel was om fundamentele processen rond de gevolgen van bodemverdichting op de plantontwikkeling en het fysisch gedrag van de bodem beter te doorgronden en hiermee gerichte adviezen te kunnen geven aan marktpartijen over het meten, voorkomen en opheffen van ondergrondverdichting. Het onderzoek geeft aan dat wortels zich kunnen aanpassen aan verdichte gronden en dat ook geringe bodemverdichting gewasontwikkeling significant kan beïnvloeden. Toekomstig onderzoek zou zich meer moeten richten op de relatie tussen plantontwikkeling en verdichting en de mate waarin diepwortelende gewassen bodemverdichting kunnen opheffen.

Soil compaction is a major threat to the soil functions for agriculture. In this research, several experiments were conducted in the field, in soil columns and laboratory. The main objective was to improve knowledge on fundamental processes on effects of subsoil compaction on plant development and the physical behavior of the soil, enabling targeted advice to farmers, consultants and authorities on how to measure, prevent and eliminate subsoil compaction. The research indicates that roots can adapt to compacted soils and that even minor soil compaction can significantly affect crop development. Future research should focus more on the relationship between plant development and compaction and the extent to which deep-rooting crops can eliminate soil compaction.

Trefwoorden: bodemverdichting, wortelontwikkeling, bulkdichtheid, diepwortelende gewassen

Dit rapport is gratis te downloaden van <https://doi.org/10.18174/675719> 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.

© 2024 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 kwaliteitsmanagementsysteem volgens de ISO 9001. In 2006 heeft Wageningen Environmental Research een milieuzorgsysteem geïmplementeerd volgens de norm ISO 14001. Wageningen Environmental Research geeft via ISO 26000 invulling aan haar maatschappelijke verantwoordelijkheid.

Wageningen Environmental Research Rapport 3404 | ISSN 1566-7197

Foto omslag: Groei van maisplanten in kolommen met verdichte grond (foto: Falentijn Assinck, 2023)

Inhoud

Verantwoording	5
Woord vooraf	7
Samenvatting	9
1 Inleiding	13
1.1 Aanleiding	13
1.2 Doelstelling	14
1.3 Leeswijzer	15
2 Onderzoeksopzet	16
2.1 Inleiding	16
2.2 Kolomexperimenten	16
2.3 Laboratoriumexperimenten	17
2.3.1 Laboratoriumexperimenten voor de waterretentie- en waterdoorlatendheidskarakteristiek	18
2.3.2 Laboratoriumexperimenten voor de penetratieweerstand	18
2.4 Veldmetingen	19
2.4.1 Puntmetingen	19
2.4.2 Remote en proximal sensing	20
2.5 Literatuuronderzoek naar diepwortelende gewassen	21
3 Wat zijn de belangrijkste inzichten?	23
3.1 Algemeen	23
3.2 Kolomexperimenten	23
3.3 Laboratoriumexperimenten	24
3.3.1 Waterretentie- en waterdoorlatendheidskarakteristiek	24
3.3.2 Indringingsweerstand gemeten in het laboratorium	24
3.4 Veldexperimenten	25
3.4.1 Puntmetingen	25
3.4.2 Remote en proximal sensing	25
3.5 Diepwortelende gewassen	26
4 Wat levert dit onderzoek op voor de praktijk?	27
5 Wat zijn de belangrijkste aandachtspunten voor toekomstig onderzoek?	29
Literatuur	31
Appendix 1 Monstervoorbereiding voor laboratorium- en kolomexperimenten naar de invloed van bodemverdichting op de water- en luchthuishouding in de bodem en op de plantontwikkeling	32
Appendix 2 Effecten van verschillende mate van verdichting op de bovengrondse en ondergrondse ontwikkeling van mais in een kolomexperiment in de kas	46
Appendix 3 Effecten van verschillende mate van verdichting op de waterretentie- en waterdoorlatendheids-karakteristiek van een zandgrond	70
Appendix 4 Effecten van verschillende mate van verdichting, bodemvochtcondities, conusdiameter en -snelheid op de indringingsweerstand	82
Appendix 5 Effecten van verschillende mate van verdichting op de waterdynamiek in een kolomexperiment in de kas: simulaties met SWAP	107

Appendix 6 Veldexperimenten naar de invloed van bodemverdichting op de water- en luchthuishouding in de bodem en op de plantontwikkeling	120
Appendix 7 Remote en proximal sensing bij onderzoek naar de invloed van bodemverdichting op de water- en luchthuishouding in de bodem en op de plantontwikkeling	156

Verantwoording

Rapport: 3404

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: Onderzoeksredacteur

naam: Simone Verzandvoort

datum: 28-11-2024

Akkoord teamleider voor de inhoud,

naam: Mirjam Hack-ten Broeke

datum: 3-12-2024

Woord vooraf

Bodemverdichting wordt gezien als een van de (inter)nationale bodembedreigingen. 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 over ondergrondverdichting 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 ondergrondverdichting. 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 geeft de resultaten van het onderzoek en geeft aanbevelingen voor vervolgonderzoek.

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

Aan dit project heeft een groot aantal collega's meegewerkt. Speciale dank aan Frank Gerritsen, Valentijn Assinck en Koen Dijksta voor de vele uren in het laboratorium en in het veld.

Samenvatting

Bodemverdichting is een belangrijke bedreiging voor het goed functioneren van de bodem voor de landbouw. 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 hevige buien meer water oppervlakkig afstroomt en dat bij langdurige droogte ondiep wortelende planten worden belemmerd in hun groei.

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. 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. Om maatregelen te treffen om bodemverdichting te voorkomen, is het noodzakelijk om het proces van bodemverdichting en de gevolgen daarvan op de plantontwikkeling en waterhuishouding goed te begrijpen en te voorspellen. Dit meer fundamentele onderzoek heeft de afgelopen jaren weinig aandacht kregen.

Om dit onderzoek een nieuwe impuls te geven, 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. Het onderzoek is opgezet met diverse veld-, kolom- en laboratoriumexperimenten, aangevuld met modelberekeningen. Het belangrijkste doel was om fundamentele processen rond de gevolgen van ondergrondverdichting op de plantontwikkeling en het fysisch gedrag van de bodem beter te doorgronden en hiermee gerichte adviezen te kunnen geven aan marktpartijen over het meten, voorkomen en opheffen van ondergrondverdichting. De experimenten zijn uitgevoerd op een zwak lemige zandgrond waarop mais is verbouwd.

De belangrijkste conclusies uit het onderzoek zijn:

- **Wat is een verdichte bodem?**

De vraag die in dit onderzoek vaak terugkomt, is: wat is eigenlijk een verdichte bodem en is de bodem dicht of verdicht (in dit onderzoek gebruiken we steeds het woord 'verdicht')? Veelal wordt gesteld dat als een bodem een droge bulkdichtheid van boven de 1600 kg/m³ heeft (voor zand), deze als verdicht kan worden bestempeld. Dit onderzoek leert dat mais al bij veel lagere bulkdichtheden wordt gestoord in zijn ontwikkeling als het wordt onderworpen aan droogtestress. Dit kan ook gelden voor andere gewassen, alleen zal de bulkdichtheid waarbij een verminderde opbrengst zal optreden per gewas verschillen. Dus of een bodem als verdicht kan worden beschouwd, is ook afhankelijk van de gewassen die erop geteeld worden.

- **Wortels kunnen zich aanpassen aan verdichte gronden (adaptatie van wortels bij verdichte gronden)**

De kolomproeven laten zien dat de wortels van een maisplant zich gaan verdikken als ze geconfronteerd worden met een verdichte laag. Door de dikkere wortels zijn ze in staat door sterk verdichte lagen heen te groeien. De adaptatie zorgt er wel voor dat er meer energie gestoken wordt in de wortelontwikkeling en dit ten koste gaat van de bovengrondse ontwikkeling.

- **Ook geringe bodemverdichting kan gewasontwikkeling significant beïnvloeden**

In de praktijk is het niet eenvoudig om de gevolgen van bodemverdichting op de gewasontwikkeling te zien. Voor een deel komt dat omdat gewassen beregend worden. Mocht beregening minder makkelijk worden (vanwege beregeningsverboden in droge zomers), dan zullen gewassen daar waar mogelijk diepere watervoorraden moeten zien te benutten. Hierdoor zullen ze dieper moeten wortelen. De kolomexperimenten tonen aan dat het naar grote diepte kunnen doorgroeien sterk kan worden gehinderd door een verdichte laag in de ondergrond en dat voor mais gewasgroei-reducties tot 30% kunnen optreden. Hoewel de extreme condities (geen neerslag gedurende 45 dagen) van de kolomexperimenten in de praktijk (nog) niet veel voorkomen en we hier alleen mais hebben getest, tonen de experimenten aan dat bodemverdichting een significante invloed kan hebben op een duurzame, ofwel niet-beregende gewasontwikkeling en dat het voorkomen van bodemverdichting daarom belangrijk is.

- **Toename van de indringingsweerstand bij hogere mechanische compressie, lagere vochtgehaltes en lagere snelheden**

De indringingsweerstand neemt voor alle vochtgehaltes, indringingssnelheden en pendiameters toe bij een toenemende compressie en dichtheid in de geteste fijne zandgrond. Over het algemeen neemt de indringingsweerstand binnen het geteste drukhoogtebereik (tot $h = -10^6$ cm) toe met een factor 2 à 3 bij een toename van de compressiedruk van 100 tot 400 kPa. De grond varieerde in vochttoestand van bijna waterverzadigd tot luchtdroog. Er is een duidelijke toename van de indringingsweerstand waarneembaar bij een afnemend vochtgehalte. Een lagere pensnelheid geeft over het algemeen een hogere penetratieweerstand.

- **Grenswaarden aan bulkdichtheid zijn een te eenzijdige methode om te beoordelen of een bodem verdicht is**

Nu wordt vaak de droge bulkdichtheid als parameter gebruikt om te bepalen of een bodem verdicht is. Zandgronden worden bij een bulkdichtheid van 1600 kg/m^3 als verdicht beschouwd en daaronder niet. Deze binaire beoordeling (wel/niet) is niet goed bruikbaar, omdat bij veel lagere bulkdichtheden de groei al kan worden verstoord.

- **Detectie van bodemverdichting in een veld vereist meerdere meetmethodes**

Het onderzoek laat zien dat er niet één specifieke meting is die bodemverdichting kan aantonen. Omdat bodemverdichting verstoring kan werken op de plantontwikkeling is het belangrijk die mee te nemen in het oordeel. Dit kan door gedurende het groeiseizoen een aantal keren met een drone over een perceel te vliegen en te kijken waar de groei afwijkt. Deze data zou je kunnen combineren met veldmetingen, waarbij bulkdichtheid en indringingsweerstand ook een aantal keren gedurende het groeiseizoen worden gemeten.

De belangrijkste aanbevelingen uit het onderzoek zijn:

- **Onderzoek naar bodemverdichting meer gericht op plantontwikkeling**

Bodemverdichting wordt nu veelal onderzocht als een grondmechanisch probleem, waarbij vaak gekeken wordt naar parameters zoals droge bulkdichtheid en indringingsweerstand. Het onderzoek laat zien dat plantenwortels weliswaar in staat zijn om zich aan te passen aan verdichte omstandigheden, maar dat dat sterk kan variëren per gewassoort. Een groeiachterstand vindt toch plaats doordat energie in de wortelontwikkeling wordt gestoken in plaats van in bijvoorbeeld de vruchtontwikkeling. De adaptatie van wortels op verdichting is nog maar beperkt onderzocht en zal in toekomstig onderzoek naar de gevolgen van bodemverdichting meer aandacht moeten krijgen. Dit mede in het licht van een veranderend klimaat of aangepaste regels ten aanzien van beregening en bemesting.

- **Meer aandacht voor kolomexperimenten om te begrijpen hoe planten reageren op verdichting**

Kolomexperimenten zijn arbeidsintensief en daardoor kostbaar. Toch leveren ze, meer dan veldexperimenten, veel inzicht in de adaptatie van planten op bodemverdichting. Dit inzicht kan worden vergroot door in eerste instantie ook andere gewassen te testen op dezelfde zandgrond. De focus moet daarbij liggen op de gewassen waarvan bekend is dat ze in staat zijn in meer of mindere mate door verdichte lagen heen te groeien. In een latere fase kan ook getest worden op andere zand- en siltige gronden. Klei- en veengronden zijn voor kolomproeven minder geschikt vanwege hun zwel- en krimpeigenschappen.

- **Veldexperimenten uitvoeren over meerdere jaren om gevolgen van bodemverdichting op de plant bij verschillende weersomstandigheden te bepalen**

Veldexperimenten worden sterk beïnvloed door weersomstandigheden en de initiële situatie van de bodem. Er zou voor kunnen worden gekozen om deze sterk te conditioneren door een gedeelte van het perceel af te dekken en de vochtcondities te reguleren (verder uitdrogen). Ook zou een deel van het perceel bewust kunnen worden verdicht door het te berijden met een zware machine. Dit maakt dat nog steeds maar een beperkt gedeelte van een perceel kan worden onderzocht gedurende een beperkte periode. Een andere strategie is om meerjarige (vijf jaar en meer) veldexperimenten te doen, waarbij de gewasontwikkeling wordt vergeleken van diverse percelen die door bewerking verschillend zijn verdicht.

- **Landelijk beeld van de verdichte bodem**

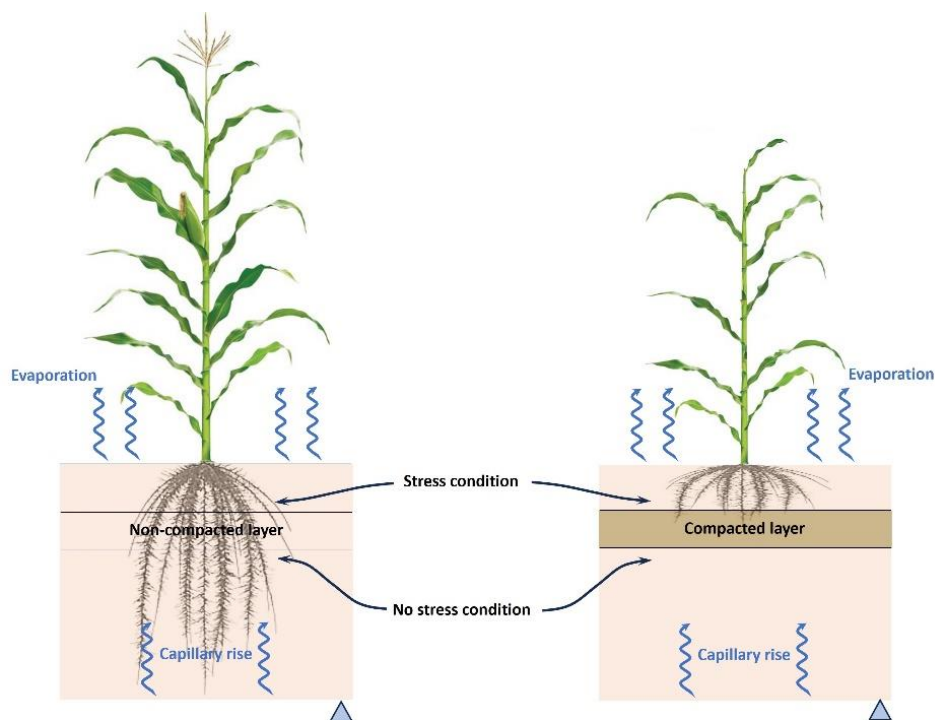
Hoewel er op diverse locaties verdichting is gemeten en soms zelfs in hele provincies, ontbreekt het aan een landelijk beeld. Het is aan te bevelen om op een gestructureerde manier op een groot aantal locaties de droge bulkdichtheid van de ondergrond (30-50 cm -mv) te bepalen, waarbij rekening wordt gehouden met de diverse bodemsoorten, bodembelasting (kan sterk per teelt verschillen) en met geconditioneerde omstandigheden van vocht en meetmethode. Door deze metingen elke tien jaar te herhalen, kan een beeld worden verkregen van de langjarige trend in bodemverdichting.

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Bodemverdichting is een van de belangrijkste bedreigingen voor het goed functioneren van de bodem voor de landbouw. 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).

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. 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 Belemmering van groei door verdichte lagen (Gerben Bakker, 2024).

1.2 Doelstelling

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

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

De literatuurstudie die bij aanvang van het project is uitgevoerd (Bakema et al., 2022), heeft geresulteerd in de volgende, meer concrete doelen:

- **Het ontwikkelen en testen van kolomexperimenten om de gevolgen van bodemverdichting op de waterretentie, zuurstofbeschikbaarheid en bewortelbaarheid te bepalen**

Mechanische weerstand beïnvloedt de bulkdichtheid, het watergehalte en de zuurstofbeschikbaarheid van de bodem, en daarmee ook de wortelgroei. De reacties van individuele worteleigenschappen op verdichting worden beter begrepen dan de bredere compensatiereacties van het gehele wortelsysteem. Over het algemeen vermindert in verdichte bodems de wortellengte en wordt de worteldiameter groter. In dit onderzoek zal met potproeven de invloed van bodemverdichting op de wortelverdeling, -lengte en -diameter inzichtelijk worden gemaakt (zie Appendix 1, 2 en 5).

- **Het onderscheiden van de gevolgen van bodemverdichting voor de plantengroei door veranderingen in de waterretentie- en waterdoorlatendheidskarakteristiek en indringingsweerstand op basis van laboratoriumexperimenten en modelberekeningen**

In de internationale literatuur is aandacht besteed aan de invloed van verandering van droge bulkdichtheid van de bodem op de vorm van de waterretentie- en waterdoorlatendheidskarakteristieken. 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 waterdoorlatendheidskarakteristieken te meten onder zowel niet-verdichte als verdichte omstandigheden. Dat kan het best gebeuren onder geconditioneerde laboratoriumomstandigheden (zie Appendix 3 en 4).

- **Het ontwikkelen van een set veldmetingen om bodemverdichting in het veld vast te stellen**

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 is er invloed van klimaat (temperatuur, neerslag) en veldvariabiliteit (verschillen in textuur, dichtheid, vochtgehalte, bemesting etc.). We kunnen daar waarnemen hoe verdichting in de praktijk uitpakt voor de wortelontwikkeling, gewasontwikkeling en gewasopbrengst. Belangrijk is om niet alleen gewasparameters te monitoren waarin we uiteindelijk geïnteresseerd zijn (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 (zie Appendix 6 en 7).

- **Het uitvoeren van een literatuuronderzoek naar diepwortelende gewassen**

Diepwortelende gewassen zijn in staat door verdichte lagen heen te groeien. Belangrijk is om te weten hoe wortels in staat zijn om door verdichte lagen heen te groeien en hoe dit verschilt per gewas. Ten slotte is het doel om erachter te komen welke bodemparameters (bulkdichtheid, poriënverdeling etc.) worden beïnvloed door de diepwortelende gewassen (zie Appendix 8).

1.3 Leeswijzer

De afzonderlijke deelonderzoeken worden uitgebreid beschreven in de bijlagen van dit rapport. Daarin zijn de details beschreven van de opzet van de experimenten, de resultaten, de discussie en de conclusies per deelonderzoek.

- Appendix 1 Monstervoorbereiding voor laboratorium- en kolomexperimenten naar de invloed van bodemverdichting op de water- en luchthuishouding in de bodem en op de plantontwikkeling
- Appendix 2 Effecten van verschillende mate van verdichting op de bovengrondse en ondergrondse ontwikkeling van mais in een kolomexperiment in de kas
- Appendix 3 Effecten van verschillende mate van verdichting op de waterretentie- en waterdoorlatendheidskarakteristiek van een zandgrond
- Appendix 4 Effecten van verschillende mate van verdichting, bodemvochtcondities, conusdiameter en -snelheid op de indringingsweerstand
- Appendix 5 Effecten van verschillende mate van verdichting op de waterdynamiek in een kolomexperiment in de kas: simulaties met SWAP
- Appendix 6 Veldexperimenten naar de invloed van bodemverdichting op de water- en luchthuishouding in de bodem en op de plantontwikkeling
- Appendix 7 Remote en proximal sensing bij onderzoek naar de invloed van bodemverdichting op de water- en luchthuishouding in de bodem en op de plantontwikkeling
- Appendix 8 Het opheffen van ondergrondverdichting door diepwortelende gewassen: literatuuronderzoek (niet in deze rapportage, zie Bakema et al., 2024)

Samenvattingen van de opzet van de deelonderzoeken worden gegeven in hoofdstuk 2. De belangrijkste conclusies uit de deelonderzoeken zijn beschreven in hoofdstuk 3. De vertaling naar de praktijk van boeren, loonwerkers en onderzoekers is weergegeven in hoofdstuk 4. In hoofdstuk 5 worden de belangrijkste aandachtspunten voor vervolgonderzoek besproken.

2 Onderzoeksopzet

2.1 Inleiding

Het onderzoek heeft bestaan uit de volgende hoofdonderdelen: kolomexperimenten (paragraaf 2.1), laboratoriumexperimenten (2.2) en veldexperimenten (2.3).

Dit onderzoek heeft zich gefocust op zandgronden en siltige gronden. Zandgronden hebben weinig extra belasting nodig om verdicht 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). Verder bezitten zandgronden weinig cohesie. Hierdoor treedt er bij verdichting niet alleen compactie op (in elkaar duwen), maar ook vervorming, waardoor de grote, doorgaande bioporiën en oude wortelgangen (deels) verloren gaan. Het natuurlijk herstel door zwellen en krimpen is bij zandgronden zeer beperkt. Ook door kunstmatig losmaken (woelen) zijn zandondergronden zeer moeilijk te herstellen, omdat ze gemakkelijk herverdichten (Bakema et al., 2023). Dit alles maakt de gevoeligheid voor en het risico op ondergrondverdichting voor zandgronden zo groot.

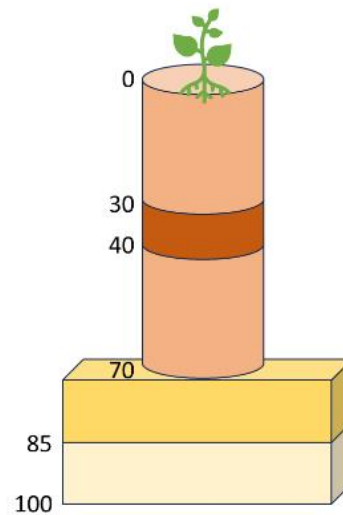
2.2 Kolomexperimenten

In Bakema et al. (2022; hoofdstuk 4, bijlage 1) is een uitgebreide literatuurstudie beschreven over de reactie van het wortelsysteem op bodemverdichting. Hierin wordt onder meer gesteld: *"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 is belangrijk voor fundamenteel plantonderzoek en de plantenveredeling."* Er is in deze studie een kasproef uitgevoerd waarin reacties van het wortelsysteem worden gevolgd op de aanwezigheid van een verdichte laag op 30-40 cm diepte, in een situatie waarin de bovenzijde van de wortelzone (boven de verdichte laag) langzaam uitdroogt en de onderzijde (beneden de verdichte laag) van voldoende vocht wordt voorzien (Figuur 2). Deze proef geeft invulling aan het vraagstuk rondom effecten van verdichting en waterbeschikbaarheid op het wortelsysteem. Tijdens de proef zijn nutriënten- en zuurstofbeschikbaarheid niet limiterend geweest.

a)



c)



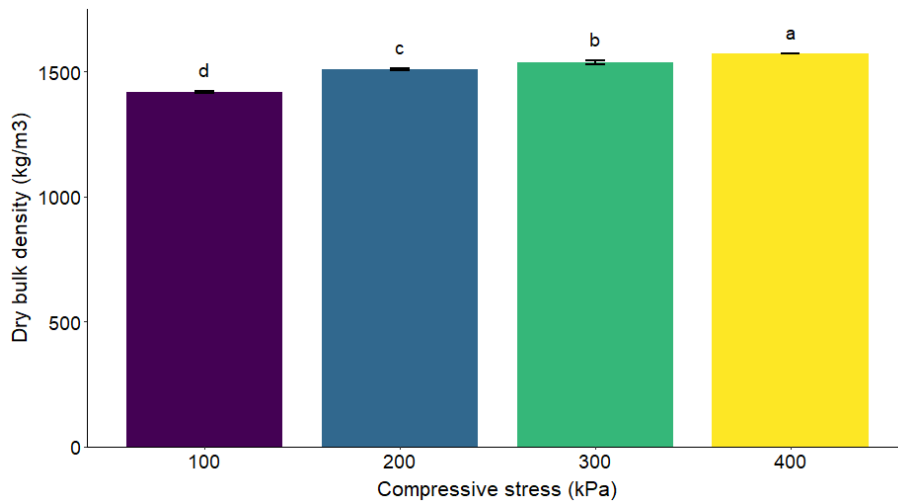
b)



Figuur 2 Foto's van de proefopstelling in de kas (a, b; foto: Falentijn Assinck, 2023) en (c) schematische weergave van de kolommen met verdichte laag op 30-40 cm, geplaatst op grof zand (70-85 cm) op Blokzijlzand (85-100 cm).

2.3 Laboratoriumexperimenten

Zowel bij de kasproef als bij de laboratoriumproeven is ernaar gestreefd om de verdichting van de monsters die in beide proeven zijn gebruikt, zo goed mogelijk op elkaar af te stemmen. Dat is gedaan om de resultaten aan het einde van de proeven met elkaar te kunnen vergelijken, zodat er samenhangende conclusies getrokken kunnen worden zonder last te hebben van verschillende omstandigheden. Ongewenste randverschijnselen zijn bijvoorbeeld de invloed van macroporiën, wormgangen en aggregaten die niet uniform over en tussen de monsters zijn verdeeld en een niet-uniforme verdeling van organisch materiaal en korrelgroottes. Om dit te voorkomen, is een grote hoeveelheid grond uit het veld verzameld en zeer goed gemengd. De grond is een matig humeus, zwak lemig matig fijn zand, met een geologische benaming 'jong dekzand' en een organischestofgehalte van 2.9% ('bepaald met gloeiverlies'). De monsters zijn verdicht met verdichtingsapparatuur waarbij de volgende drukken zijn gehanteerd: 100 kPa (behandeling S1), 200 (S2), 300 (S3) en 400 (S4) kPa. De verdichting heeft geresulteerd in een dichtheid tussen 1410 en 1570 kg m⁻³. ³**Figuur 3.** De minst verdichte grond (bereikt na handmatig aanstampen) had na mengen een dichtheid van 1350 kg m⁻³ (behandeling S0).



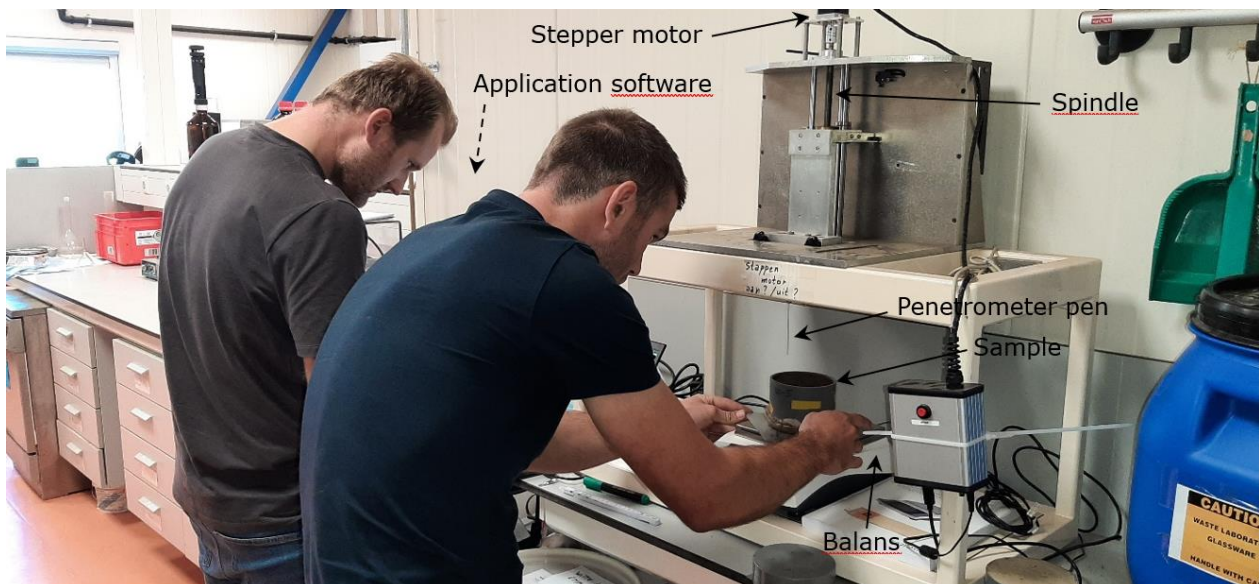
Figuur 3 Droge bulkdichtheid van de grond gebruikt in monsters en in de kasproef als functie van de samendrukking (kg m^{-3} ; $\pm$ standaardafwijking met $n = 4$).

2.3.1 Laboratoriumexperimenten voor de waterretentie- en waterdoorlatendheidskarakteristiek

Verdichting verandert de fysieke eigenschappen van de bodem, met als gevolg een hogere bulkdichtheid. Deze verhoging in bulkdichtheid verandert de poriënstructuur en daarmee de manier waarop water en lucht door de bodem kunnen bewegen. Dit beïnvloedt ook mogelijk de ontwikkeling van de plant. De fysieke veranderingen veranderen ook de waterretentie- en waterdoorlatendheidskarakteristieken van de bodem. De relaties tussen verandering in bulkdichtheid en de verandering van deze karakteristieken zijn gemeten met de verdampingsmethode voor vier verschillende dichtheden en voor één type bodem. Er is gekeken in welke mate de waterretentie- en waterdoorlatendheidskarakteristieken beïnvloed worden door toename van de droge bulkdichtheid. Daarnaast is onderzocht of de Mualem-Van Genuchten-parameters, die de vorm van de waterretentie- en waterdoorlatendheidskarakteristieken beschrijven, een relatie met de droge bulkdichtheid hebben.

2.3.2 Laboratoriumexperimenten voor de penetratieweerstand

Een penetrolgger of penetrometer wordt doorgaans gebruikt voor veldmetingen van de indringingsweerstand van een bodem tot 80 cm diepte. De meting wordt beïnvloed door watergehalte, dichtheid, samendrukbaarheid, bodemsterkte, bodemstructuur en zand- en kleigehalte. Maar de meting wordt ook beïnvloed door apparaat-eigenschappen zoals de hoek, diameter en ruwheid van de conus en de snelheid van penetratie. Een laboratoriummethode is ontwikkeld om de indringingsweerstand onder gecontroleerde omstandigheden te meten. Een metalen sonde werd bevestigd aan een stappenmotor met schroefdraad waarmee nauwkeurig de indringingssnelheid kon worden geregeld (Figuur 4). Deze combinatie werd gebruikt als penetrometer. De indringingsweerstand is gemeten door het monster op een weegschaal te plaatsen en de gewichtstoename te meten tijdens het binnendringen van de naald. Hiermee zijn penetratieweerstanden gemeten bij drie penetratiesnelheden, twee conusdiameters en acht drukhoogten of watergehaltes in monsters die waren aangedrukt met vier compactiedrukken (tussen 100 en 400 kPa).



Figuur 4 Opstelling penetratieproef (foto: Gerben Bakker, 2023).

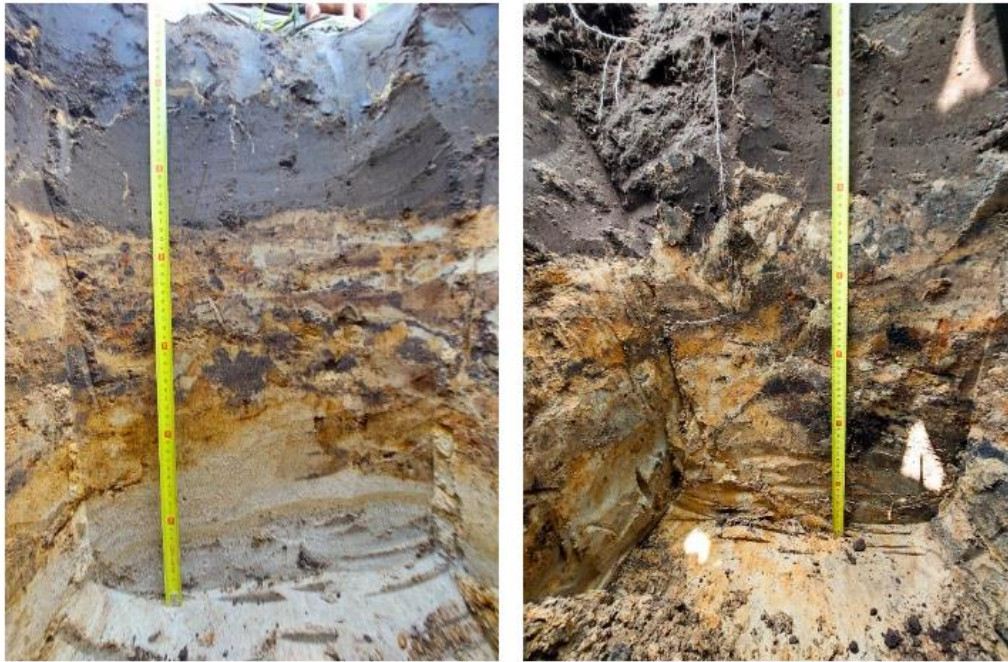
2.4 Veldmetingen

Een achterblijvende groei van planten en een verminderde opbrengst kunnen indicatief zijn voor verdichte gebieden in het veld. Er is nog veel onduidelijk over welke indicatoren het relevantst zijn voor het identificeren van verdichte bodems en voor het bepalen van de impact van verdichte bodems op plantengroei en productiviteit. Er is een veldproef opgezet met als doel het begrip van bodemverdichting op veldschaal te verdiepen en de meest indicatieve parameters voor bodemverdichting en hun invloed op gewasgroei en opbrengst te identificeren. In de veldproef zijn metingen gedaan op puntlocaties en voor een heel veld.

2.4.1 Puntmetingen

Het veldonderzoek binnen het project focuste zich voornamelijk op het testen van (nieuwe) meetapparatuur en het efficiënt verzamelen van benodigde parameters (bulkdichtheid, indringingsweerstand, luchthuishouding) en hulpparameters (textuur, vochtgehalte, nutriënten, visuele beoordeling, zuurstofgehalte) om bodemverdichting te beoordelen. Er is gekeken naar structuur- en textuurvariaties in het veld (onder invloed van verdichting) (Figuur 5) en naar plantengroei en beworteling. Hierbij stond de vraag centraal: welke metingen leveren betrouwbare data op en wanneer?

Meettechnieken in het veld en het effect van verdichting op wortelgroei zijn afhankelijk van het vochtgehalte. Dat betekent dat de meetwaarden gecorrigeerd moeten worden voor vochtgehalte, bijvoorbeeld met de drempelwaarde in vochtgehalte waarbij voor een bepaalde dichtheid planten een effect ervaren. Ook de gewasontwikkeling en -opbrengst werden gemeten om te bepalen of de te monitoren parameters daaraan kunnen worden gecorreleerd. Er is getracht correlaties te vinden tussen de diverse bodemparameters en gewas-ontwikkelingsindicatoren. De veldproef heeft plaatsgevonden op een maisveld in Wageningen gedurende het groeiseizoen van 2023.



Figuur 5 De profielkuilen van subplot 2 en 3. De organischestofrijke bouwvoor reikt vanaf het maaiveld tot ongeveer 27-30 cm diepte, waarna een zeer gemengde/verstoorde laag is te onderscheiden van geel zand (foto: Erik van den Elsen, 2023).

2.4.2 Remote en proximal sensing

Verskillende gegevens zijn verzameld in datasets van gammastraling verkregen met *remote sensing* (met behulp van drones) en *on-the-go proximal sensing*. De gegevensanalyse is uitgevoerd op veldschaal en plotschaal. Er is op dezelfde locatie gemeten als bij de puntmetingen (Figuur 6).



Figuur 6 Proefveld voor de veldexperimenten met mais in het begin van de groei. Op de voorgrond een van de vijf onderzoeksplotjes (foto: Falentijn Assinck, 2023).

2.5 Literatuuronderzoek naar diepwortelende gewassen

Bodemverdichting wordt gezien als een grote uitdaging in de moderne landbouw. Het kan leiden tot een afname van bodemkwaliteiten zoals water- en luchtdoorlatendheid, infiltratiecapaciteit, wateropslag, zuurstoftoevoer en bewortelbaarheid. Vooral de verdichting van de ondergrond (> 30 cm -mv) is problematisch vanwege de meer permanente status. Er zijn verschillende technieken ontwikkeld om een verdichte ondergrond te herstellen, waarvan diepwortelende gewassen (*biosubsoilers*) veelbelovend zijn. De literatuurstudie in dit project gaat in op de leemte in de kennis over de effectiviteit van verschillende gewassen om door een verdichte laag heen te groeien en mogelijk bodemfuncties te herstellen. Er is een literatuurreview gedaan op 57 verschillende experimenten met biosubsoilers, uitgevoerd in 20 studies. Er werden 19 verschillende biosubsoilers onderzocht met de nadruk op radijs, alfalfa (luzerne) (Figuur 7) en cichorei.



Figuur 7 *Diepwortelend gewas, Alfalfa (Luzerne) (foto: Guido Bakema, 2024).*

3 Wat zijn de belangrijkste inzichten?

3.1 Algemeen

Uit de diverse deelonderzoeken volgt een groot aantal conclusies. Deze kunnen worden teruggevonden in de diverse rapportages over de deelonderzoeken (zie Appendices 1-8 en Bakema et al., 2024). Hier zijn de belangrijkste inzichten meer algemeen verwoord. Als eerste een meer generieke vraag ten aanzien van verdichting.

Wat is een verdichte bodem?

De vraag die in dit onderzoek vaak terugkomt, is: wat is eigenlijk een verdichte bodem en is de bodem dicht of verdicht (in dit onderzoek gebruiken we steeds het woord 'verdicht')? Veelal wordt gesteld dat als een bodem een droge bulkdichtheid van boven de 1600 kg/m³ heeft (voor zand), deze als verdicht kan worden bestempeld. Dit onderzoek leert dat mais al bij veel lagere bulkdichtheden wordt gestoord in zijn ontwikkeling als dit wordt onderworpen aan droogtestress. Dit kan ook gelden voor andere gewassen, alleen zal de bulkdichtheid waarbij een verminderde opbrengst zal optreden per gewas verschillen. Dus of een bodem als verdicht kan worden beschouwd, is afhankelijk van de gewassen die erop geteeld worden.

Het tweede aspect over de mate van verdichting gaat over de oorspronkelijke, natuurlijke dichtheid van een bodem, ofwel de dichtheid die er was voordat deze werd bewerkt met zware machines. Zo zijn er bodems die van nature al een hoge dichtheid hebben, terwijl andere juist nog een lage dichtheid hebben (denk aan de jonge gronden in de Flevopolder) (Van Egmond et al., 2024). Dit betekent dat bij een beoordeling van de dichtheid ook de oorspronkelijke dichtheid beschouwd moet worden.

Ten slotte laat dit onderzoek zien dat verdichting niet alleen wordt bepaald door de droge bulkdichtheid, maar ook door de poriënstructuur van de bodem. Dit roept de vraag op of niet ook andere bodemparameters gemeten moeten worden om een goed beeld te krijgen van de mate van verdichting en de invloed die dit heeft op gewassen.

3.2 Kolomexperimenten

Wortelontwikkeling wordt al geremd bij beperkte verdichting

In de huidige onderzoekspraktijk rond bodemverdichting wordt gesteld dat boven een bepaalde droge bulkdichtheid er sprake is van bodemverdichting. Vaak wordt hierbij voor zandgronden een waarde van 1600 kg/m³ aangehouden. De kolomproeven laten zien dat al bij veel lagere waarden (1400 kg/m³) de groei van maisplanten kan worden gehinderd. Hier is een proef gedaan voor een fijne zandgrond en mais met geforceerde droogtestress in de bovengrond. De bevindingen uit voorliggend onderzoek gelden daarom voor mais geteeld op fijn zand, maar de proef geeft voldoende indicaties om zeer kritisch te kijken naar de huidige grenswaarden voor de bulkdichtheid en om rekening te houden met gewasschade bij lagere grenswaarden, ook bij andere gewassoorten en andere bodems.

Wortels kunnen zich aanpassen aan verdichte gronden (adaptatie van wortels bij verdichte gronden)

De kolomproeven laten zien dat de wortels van een maisplant zich gaan verdikken als ze geconfronteerd worden met een verdichte laag. De dikkere wortels zijn in staat om door sterk verdichte lagen heen te groeien. De wortels worden weer dunner zodra ze minder verdichte lagen tegenkomen waarin ze beter water kunnen opnemen. De adaptatie zorgt er wel voor dat meer energie gestoken wordt in de wortelontwikkeling. Dit gaat ten koste van de bovengrondse ontwikkeling van de plant. Uit de literatuur is bekend dat, naast het verdikken van wortels, bepaalde plantensoorten de hoek van de wortels kunnen aanpassen om de penetratie in dichte lagen te verbeteren. De afscheiding van exudaten of slijm is een andere aanpassing die helpt om de

grond op het grensvlak tussen wortel en grond te verzachten, de wrijvingsweerstand te verminderen en de wortelpenetratie door verdichte lagen te vergemakkelijken.

Kolomproeven zijn een goede methode om gevolgen van verdichting voor de plantengroei te onderzoeken

In veldexperimenten wordt veelal gewerkt met een referentieveld en een veld waarin een behandeling wordt getest. Hierbij kan een deel van de variatie in bijvoorbeeld plantontwikkeling worden bepaald. Echter de weercondities, de grondwaterstanden en de specifieke lokale bodemomstandigheden werken vaak verstoring, waardoor de plantontwikkeling sterk kan worden beïnvloed. In dat geval zijn oorzaak en gevolg vaak moeilijk aan elkaar te koppelen. Met kolomexperimenten is het mogelijk de weercondities, de vochtcondities en de bodemopbouw volledig te controleren. In de uitgevoerde kolomproeven kon worden nagegaan of wortels in staat zijn door verdichte bodemlagen heen te dringen en in welke mate de worteleigenschappen (lengte, diameter) hierdoor werden beïnvloed. Hiermee is het mogelijk gebleken een goed beeld te vormen van de adaptatiestrategie van – in dit geval – een maisplant. Een belangrijke aanvulling van onze kolomexperimenten op andere experimenten is dat de vochtcondities in de hele kolom konden worden gereguleerd.

3.3 Laboratoriumexperimenten

3.3.1 Waterretentie- en waterdoorlatendheidskarakteristiek

Laboratoriumexperimenten met geconditioneerd verdichte monsters zijn een goede methode om de gevolgen van verdichting op de waterretentie- en waterdoorlatendheidskarakteristiek te bepalen

Water- en waterdoorlatendheidskarakteristieken worden veelal bepaald aan in het veld gestoken monsters. Door zelf grond te verzamelen, goed te mengen en deze gecontroleerd te verdichten, is het mogelijk gebleken om reproduceerbaar bodemonsters met verschillende dichtheden te maken. Hiermee kon onder sterk geconditioneerde omstandigheden een beeld worden verkregen van de verandering van de karakteristieken bij verschillende mate van verdichting, zonder beïnvloeding van wormgaten, scheuren, oneffenheden in korrelgrootteverdeling en dichtheid in het bodemonster. De spreiding in de verkregen waterretentie- en waterdoorlatendheidskarakteristieken tussen de herhalingen was zeer gering. Dit bevestigt de robuustheid van de methode.

De Mualem-Van Genuchten-parameters veranderen bij veranderingen in de droge bulkdichtheid

De Mualem-Van Genuchten-parameters, die de vorm van de waterretentie- en waterdoorlatendheidskarakteristieken beschrijven, worden duidelijk beïnvloed door de verandering in droge bulkdichtheid. Deze veranderingen passen vrij goed bij eerder in de literatuur gerapporteerde data en modellen. Het watergehalte bij verzadiging (gelijk aan de porositeit), de α -parameter en de doorlatendheid bij verzadiging K_s nemen duidelijk af bij toenemende dichtheid. Voor de gefitte K_s werd in deze studie een groter effect waargenomen dan in de literatuur is beschreven.

3.3.2 Indringingsweerstand gemeten in het laboratorium

Nieuw ontwerp van een lab-petrologger geeft meer inzicht in het indringingsproces

Indringingsmetingen in het laboratorium zijn een goede methode om effecten van veranderende hydrofysische eigenschappen te bepalen in gecontroleerd gemengde en verdichte monsters. Omdat er geen laboratoriumopstelling commercieel verkrijgbaar is, is in dit onderzoek een eenvoudige opstelling ontwikkeld die goedkoop na te bouwen is en die toch nauwkeurige resultaten geeft. In dit onderzoek zijn verschillende variabelen onderzocht met deze opstelling: dichtheid, indringingssnelheid, pendiameter en vochttoestand (drukhoogte).

Indringingsweerstand neemt toe bij hogere mechanische compressie

De indringingsweerstand neemt voor alle vochtgehaltes, indringingssnelheden en pendiameters toe bij een toenemende compressie en dichtheid in de geteste fijne zandgrond. Over het algemeen neemt de

indringingsweerstand in dit drukhoogtebereik (tot $h = -10^6$ cm) toe met een factor 2 à 3 bij een toename van de compressiedruk van 100 tot 400 kPa. De indringingsweerstand bij een luchtdroog monster kan oplopen tot meer dan 21 MPa.

Indringingsweerstand neemt toe bij toenemende droogte

De vochttoestand van de grond varieerde van bijna waterverzadigd tot luchtdroog. Er is een duidelijke toename van de indringingsweerstand waarneembaar bij een toenemende droogte. Dit geldt voor alle geteste indringingssnelheden, pendiameters en dichtheden.

Lagere indringingssnelheid geeft hogere indringingsweerstand

Er is met drie indringingssnelheden gewerkt: de normaal aanbevolen snelheid voor veldmetingen (2 cm/s), een 10x zo lage snelheid en een tussenstap. Een lagere pensnelheid geeft over het algemeen een hogere penetratieweerstand. Dit is in overeenstemming met de literatuur. Verder valt op dat een lagere indringingssnelheid al op geringere penetratiediepte vanaf het bodemoppervlak tot een evenwichtsweerstand komt. Bovendien zijn de resultaten stabiel bij een lage dan bij een hoge indringingssnelheid.

Een kleinere pendiameter geeft een hogere indringingsweerstand

Een kleine pendiameter geeft een grotere penetratieweerstand (na correctie voor het penpuntoppervlak) dan een grotere pendiameter. Voor veldmetingen is de verwachting dat een kleine pendiameter betere resultaten geeft.

3.4 Veldexperimenten

3.4.1 Puntmetingen

Veldexperimenten naar bodemverdichting zijn alleen onder sterk gereguleerde omstandigheden zinvol

Het veldexperiment naar bodemverdichting in het testveld bij Wageningen is sterk verstoord doordat de omstandigheden van bodem, klimaat en vochtuithouding niet konden worden gereguleerd. Zo bleek het veld te bestaan uit een recent gediëpploegde bodem waarin mogelijk verdichte lagen zijn doorbroken en er dus geen uniform verdichte laag meer aanwezig was. Bestuderen van het effect van verdichting op een gewas op veldschaal was daardoor niet goed mogelijk. Verder was het tijdens de proef vrij nat, waardoor het gewas (mais) kon beschikken over ondiep beschikbaar bodemvocht.

Geen correlatie tussen bodemparameters en gewasopbrengst onder optimale vochtcondities

In het proefveld zijn de bulkdichtheid, indringingsweerstand en textuur van de bodem bepaald. Deze parameters zijn gecorreleerd met gemeten gewasopbrengsten. Er werd niet of nauwelijks een correlatie gevonden. De belangrijkste reden hiervoor is dat de vochtcondities optimaal waren (een zomer met relatief veel neerslag), zodat de plantenwortels niet werden gedwongen naar diepere lagen te groeien om op zoek te gaan naar water.

In situ veldmetingen worden sterk beïnvloed door lokale omstandigheden

In-situ veldmetingen werken veel sneller dan metingen waarbij monsters moeten worden genomen en geanalyseerd. In de veldproef zijn een penetrologger, een RhoC-dichtheidssensor en zuurstofdiffusiemeters getest. Deze apparaten werken goed (met uitzondering van de zuurstofdiffusiemeter), maar de resultaten worden sterk beïnvloed door het vochtgehalte en de wijze van bediening. Correctie van meetwaarden hiervoor is essentieel om de meetresultaten goed te kunnen beoordelen.

3.4.2 Remote en proximal sensing

Aantonen van bodemverdichting met multispectrale remotesensingbeelden is complex

Multispectrale remotesensingbeelden die een aantal keren in het groeiseizoen worden opgenomen, kunnen een goed beeld van de ontwikkeling van het gewas over het perceel geven. De gewasontwikkeling is afhankelijk van veel factoren zoals weer, bodemvocht, bodemstructuur etc. Welk deel van de

gewasontwikkeling wordt verstoord door bodemverdichting is zonder goede velddata (nog) niet te bepalen. Omdat voor dit project veldopnamen werden gedaan in het groeiseizoen en de vochtsituatie niet limiterend was, bleken verschillen in gewasontwikkeling in het veld te klein om goed door remote sensing te worden gedetecteerd.

Aantonen van bodemverdichting met gammastralingsmetingen is zeer beperkt mogelijk

Gammastralingsmetingen worden behalve door de bodemstructuur (duidend op verdichting) beïnvloed door de minerale samenstelling en textuur van de grond, het vochtgehalte etc. Dit maakt het lastig om zonder ondersteunende lokale gegevens te bepalen waar de bodem meer of minder is verdicht. Waarschijnlijk is het wel zinvol om data van gammastraling te gebruiken om beter te begrijpen waar verschillen in dichtheid van de bodem verstoring kunnen werken voor plantengroei. Dat kan door het in kaart brengen van verschillen in kleigehalte met behulp van gammastraling. Een complicerende factor is dat bodemverdichting zich vaak dieper dan 30 cm bevindt, waardoor de detectie nog lastiger wordt. Het signaal dat wordt gemeten, is op minerale bodems voor 95% afkomstig van de bovenste 30 cm; slechts 5% is afkomstig van 30 tot 50 cm diepte.

3.5 Diepwortelende gewassen

Verschillende gewassen zijn in staat om door verdichte lagen heen te dringen

Op basis van een literatuurstudie zijn verschillende gewassen gevonden die in staat zijn om de verdichte ondergrond binnen te dringen, zoals luzerne, zwarte haver, koolzaad, cichorei, kernza, lupine, mosterdzaad, parelgierst, radijs, sorghum, rietzwenkgras en witte mosterd. Van sommige van deze gewassen is ook aangetoond dat ze de wortelpenetratie van opvolgende teelt verbeteren. Hoe groter het aantal wortels dat de verdichte laag binnendringt, hoe groter het potentieel voor verbetering. Het feit dat wortels in de ondergrond dringen, betekent echter niet dat de structuur of werking van de ondergrond wordt verbeterd, omdat sommige wortels al bestaande poriën kunnen gebruiken in plaats van nieuwe wortelgangen aan te maken.

De bulkdichtheid en de totale porositeit worden niet significant verbeterd door diepwortelende gewassen

In bijna geen enkele studie uit de literatuur was het diepwortelende gewas in staat om de bulkdichtheid te verlagen of de totale porositeit in de ondergrond te verhogen, zelfs niet na vele jaren van gewasgroei. Er kunnen verschillende redenen zijn waarom deze indicatoren niet significant veranderen. Het wortelstelsel van de gewassen die worden geteeld en de door hen gecreëerde kanalen kunnen te klein zijn om de bulkdichtheid van de grond te veranderen. Of de variabiliteit van deze indicatoren kan zo groot zijn dat de effecten van de kleine wortels verwaarloosbaar lijken.

Het losmakende effect van diepwortelende gewassen is beperkt

Over het geheel genomen werden in de meeste studies verwaarloosbare effecten van diepwortelende gewassen gevonden op het losmaken van de bodem in de vorm van een verbetering van de bulkdichtheid. Wel werden veranderingen gevonden in poriënverdeling van de bodem; deze kunnen relevant zijn, omdat ze de transportprocessen in zeer verdichte ondergrond kunnen verbeteren.

4 Wat levert dit onderzoek op voor de praktijk?

Het onderzoek in het project Bodemverdichting Verdiept is vrij fundamenteel van aard. De onderzoeksvragen van de deelonderzoeken in deze studie zijn weliswaar afgeleid van de maatschappelijke probleemstellingen rondom bodemverdichting, maar dat wil niet zeggen dat de verkregen resultaten vervolgens een sluitend of definitief antwoord geven op de achterliggende maatschappelijke vragen. Hier is aangegeven welke inzichten de resultaten uit dit onderzoek leveren voor de dagelijkse praktijk van het omgaan met bodemverdichting. Denk hierbij aan boeren die geïnteresseerd zijn in de gevolgen van bodemverdichting op de plantontwikkeling, aan loonwerkers die willen weten hoe ze bodemverdichting kunnen voorkomen en opheffen of aan onderzoekers die inzicht willen hebben in de beste manier om bodemverdichting te detecteren in het veld.

Ook geringe bodemverdichting kan gewasontwikkeling significant beïnvloeden

In de praktijk is het niet eenvoudig om de gevolgen van bodemverdichting op de gewasontwikkeling te zien. Voor een deel komt dat omdat gewassen beregend worden. Een duurzame teelt heeft in principe geen beregning nodig, omdat gewassen tijdens droogte in staat zijn om dieper te wortelen om daar water en voeding te onttrekken. De kolomexperimenten tonen aan dat het naar grote diepte kunnen doorgroeien sterk kan worden gehinderd door een verdichte laag in de ondergrond en dat voor mais gewasgroei-reducties tot 30% kunnen optreden in de eerste 6,5 week van de gewasontwikkeling. Hoewel de extreme condities (geen neerslag gedurende 45 dagen) van de kolomexperimenten in de praktijk (nog) niet veel voorkomen en alleen mais is getest, tonen de experimenten aan dat bodemverdichting een significante invloed op de gewasontwikkeling kan hebben en dat het voorkomen van bodemverdichting belangrijk is.

Droge omstandigheden maken de gevolgen van bodemverdichting meer zichtbaar

Klimaatverandering zal ertoe leiden dat de kans op droge voorjaren en zomers zal gaan toenemen. Op dit moment kan een watertekort worden opgevangen door intensief te beregenen. Door toename van de vraag naar zoetwater voor natuur, infrastructuur en drinkwater zal de beschikbaarheid van water voor de landbouw mogelijk meer beperkt gaan worden. Dit betekent dat planten meer waterstress krijgen en in hun groei zullen worden beperkt. Om dit te voorkomen, zouden planten in staat moeten zijn om ook dieper bodemvocht en grondwater te gebruiken. De kolomproeven hebben laten zien dat als de bodem in meer of minder mate verdicht is, de gewassen minder in staat zijn om dit diepere bodemvocht te bereiken. Droogte maakt daarmee de gevolgen van bodemverdichting op de gewasontwikkeling meer zichtbaar. Dit zal in de toekomst gaan toenemen.

Huidige grenswaarden voor bulkdichtheid zijn te eenzijdig om te beoordelen of een bodem verdicht is

Nu wordt vaak de droge bulkdichtheid als parameter gebruikt om te bepalen of een bodem verdicht is. Voor zandgronden wordt een bodem met een bulkdichtheid van 1600 kg/m³ of meer als verdicht beschouwd. Deze binaire beoordeling (wel/niet) is niet goed bruikbaar, omdat ook bij veel lagere bulkdichtheden plantengroei al kan worden verstoord, maar ook omdat bodems van nature al een lage of hoge bulkdichtheid kunnen hebben. Het is beter om te kijken naar de oorspronkelijke dichtheid van de bodem en die te vergelijken met de huidige dichtheid. Verder is het belangrijk in de beoordeling om te kijken naar de gewassen die er in de toekomst op geteeld gaan worden, omdat niet alle gewassen even gevoelig zijn voor verdichting. Ten slotte blijkt uit het onderzoek dat bulkdichtheid wellicht een te eenzijdige parameter is om bodemverdichting te beoordelen en er meer gekeken moet worden naar poriënstructuur.

Detectie van bodemverdichting in een veld vereist meerdere meetmethodes

Het onderzoek laat zien dat er niet één specifieke meting is die bodemverdichting kan aantonen. Omdat bodemverdichting verstorend kan werken op de plantontwikkeling is het belangrijk dit mee te nemen in het oordeel. Dit kan door gedurende het groeiseizoen een aantal keren met een drone over een perceel te vliegen en te kijken waar de groei afwijkt. Deze data kunnen worden gecombineerd met in situ-puntmetingen waarbij bulkdichtheid en indringingsweerstand een aantal keren gedurende het groeiseizoen

worden gemeten. Een visuele beoordeling door het graven van kuilen kan het begrip versterken van waar in het bodemprofiel verdichte lagen worden waargenomen, maar is als enige methode te beperkt en te arbeidsintensief om verdichting objectief en op veldniveau aan te tonen.

Detectie van bodemverdichting is alleen zinvol bij geconditioneerde omstandigheden

Om te kunnen bepalen hoe de mate van bodemverdichting voorkomt in een bepaald gebied wordt veelal de droge bulkdichtheid en soms de indringingsweerstand gemeten. Erg belangrijk daarbij is te realiseren dat deze metingen sterk worden bepaald door de vochtcondities. Dit betekent dat ten eerste de metingen moeten worden gecombineerd met in-situvochtmetingen. Ten tweede zou het wenselijk zijn alle metingen te doen bij hetzelfde vochtgehalte. Een sterk verzadigde klei- of veengrond heeft een lagere droge bulkdichtheid dan een minder verzadigde grond. Doordat vochtcondities sterk wisselen, is de droge bulkdichtheid geen statische parameter, maar is deze dynamisch, ofwel afhankelijk van het moment of vochtgehalte waarin deze wordt gemeten.

Telen van meerdere soorten diepwortelende gewassen kan helpen om verdichte lagen te doorboren en open te houden

Studies uit de literatuur toonden aan dat diepwortelende gewassen met penwortels zoals luzerne, cichorei en lupine tot de effectiefste behoren voor het opheffen van bodemverdichting, omdat van deze soorten is aangetoond dat ze de kenmerken van het poriënsysteem veranderen. De relatief grote penwortels zijn in staat om nieuwe kanalen te creëren binnen bestaande aggregaten. De meer fijnmazige wortelsoorten zijn in staat om de verdichte ondergrond binnen te dringen, maar niet noodzakelijkerwijs om veranderingen in de kenmerken van het poriënsysteem teweeg te brengen. De studies benadrukten echter ook het belang van fijnmazige wortelsoorten voor hun rol bij het verbeteren van de stabiliteit van de bodemstructuur, aggregatie, toevoeging van organisch materiaal, exudaten en bij de nutriëntenkringloop.

Meerjarige diepwortelende gewassen zijn het effectiefst in het verbeteren van de bodemstructuur

Gebleden is dat vooral de gewassen die gedurende een lange periode (> 5 jaar) zijn geteeld of onafgebroken als meerjarige plant zijn geteeld, het invloedrijkst zijn. Kijken we bijvoorbeeld naar luzerne, dan lijken vooral de langere testen (> 5 jaar) de beste resultaten te geven, terwijl kortere testen (< 1 jaar) vooral verwaarloosbare effecten gaven.

Gedrag van wortels wordt beter gesimuleerd bij penetratiemetingen met lage conussnelheid, kleine conus en constante snelheid

Voor het bepalen van de indringingsweerstand in het veld wordt vaak gewerkt met een penetratiesnelheid van 2 cm/s (=1200 mm/min). Deze snelheid is erg moeilijk te handhaven bij een handmatige bediening van de penetrologer, waardoor er aanzienlijke verschillen kunnen ontstaan in de gemeten penetratieweerstanden. Verder wordt in het veld met een veel grotere conusdiameter gewerkt (1 à 2 cm²) dan in het laboratorium mogelijk was (1 à 2 mm²). Uit de proeven in het laboratorium bleek dat de penetratieweerstand afneemt met toenemende penetratiesnelheid. Een plantenwortel beweegt zich erg traag in de bodem. Daarom is het aannemelijk dat uitgegaan moet worden van de hoogste penetratieweerstand (verkregen met de kleinste penetratiesnelheid) bij het beschouwen van de weerstand van een plantenwortel. Om indringingsweerstand voor plantenwortelontwikkeling in het veld te testen, wordt daarom het best een lage conussnelheid gebruikt. Een lage snelheid heeft als aanvullend voordeel dat ook op geringe diepte al een betrouwbare meting gedaan kan worden, terwijl dat bij grotere snelheden niet het geval is.

5 Wat zijn de belangrijkste aandachtspunten voor toekomstig onderzoek?

Binnen het project Bodemverdichting Verdiept is een aantal specifieke aspecten van bodemverdichting onderzocht. Hiermee is meer inzicht ontstaan over de invloed van verdichting op diverse bodemparameters en op de ontwikkeling van planten in verdichte bodems. Hieronder wordt een aantal aspecten benoemd die van belang zijn voor het verdere onderzoek naar bodemverdichting; dit onderzoek kan zowel fundamenteel als meer praktijkgericht zijn.

Onderzoek naar bodemverdichting meer gericht op plantontwikkeling

Bodemverdichting wordt nu veelal onderzocht als een grondmechanisch probleem, waarbij vaak gekeken wordt naar parameters zoals droge bulkdichtheid en indringingsweerstand. Het onderzoek laat zien dat plantenwortels van mais in staat zijn om zich aan te passen aan verdichte omstandigheden. Uiteraard kan dat per gewassoort variëren. Die adaptatie van wortels op verdichting is nog maar beperkt onderzocht en zal in toekomstig onderzoek naar de gevolgen van bodemverdichting meer aandacht moeten krijgen. Dit mede in het licht van een veranderend klimaat of aangepaste regels voor beregening en bemesting en een duurzame teelt.

Meer aandacht voor kolomexperimenten om te begrijpen hoe planten reageren op verdichting

Kolomexperimenten zijn arbeidsintensief en daardoor kostbaar. Toch leveren ze, meer dan veldexperimenten, snel inzicht in de adaptatie van planten op bodemverdichting. Dit inzicht kan worden vergroot door in eerste instantie ook andere gewassen te testen op dezelfde fijne zandgrond als gebruikt in het voorliggende onderzoek. De focus zou daarbij moeten liggen op de gewassen waarvan bekend is dat ze in staat zijn in meer of mindere mate door verdichte lagen heen te groeien. In een latere fase zou ook getest kunnen worden op andere zandgrond en siltige gronden.

Veldexperimenten uitvoeren over meerdere jaren om gevolgen van bodemverdichting op de plant bij verschillende weersomstandigheden te bepalen

Veldexperimenten worden sterk beïnvloed door weersomstandigheden en de initiële situatie van de bodem. Er zou voor kunnen worden gekozen om deze te conditioneren door een gedeelte van het perceel af te dekken en de vochtcondities te reguleren (verder uitdrogen). Ook kan een deel van het perceel bewust worden verdicht door dit te berijden met een zware machine. Dit maakt dat nog steeds maar een beperkt gedeelte van een perceel kan worden onderzocht gedurende een beperkte periode. Een andere strategie zou zijn om meerjarig (5 jaar en meer) veldexperimenten te doen waarbij de gewasontwikkeling van diverse percelen, die door bewerking wel verschillend zijn verdicht, met elkaar wordt vergeleken. Door metingen te doen met drones zijn de kosten relatief beperkt. Wel moeten er dan nog aanvullend puntmetingen in de bodem worden uitgevoerd om de metingen te kunnen kalibreren. Voordeel van laatstgenoemde methode is dat de gewasontwikkeling kan worden onderzocht onder diverse weersomstandigheden en groeistadia.

Aanpassen waterretentie- en waterdoorlatendheidskarakteristieken aan dichtheden in Staringreeks

In dit onderzoek is in het laboratorium de invloed van veranderingen in de droge bulkdichtheid op de waterretentie- en waterdoorlatendheidskarakteristieken onderzocht. In Nederland maken we veelvuldig gebruik van de Staringreeks (Bakker et al., 2020). Dat zijn gemiddelde karakteristieken voor textuurbouwstenen, die zijn gebaseerd op een groot aantal bodemmonsters die elk hun eigen dichtheid hebben, waarvan sommige mogelijk uit verdichte bodemlagen komen. Waar de bouwstenen voorkomen in de bodem van Nederland is weergegeven op de Bodemfysische Eenhedenkaart (BOFEK) (Heinen et al., 2021). De Staringreeks en de BOFEK-kaart gaan beide uit van gemiddelden. Daarom is het niet mogelijk om een indruk te krijgen van de verspreiding van bodemverdichting in Nederland. Er is onderzoek nodig om na te gaan of de in deze studie gehanteerde relaties om de Mualem-van Genuchten-parameters als functie van de droge bulkdichtheid aan te passen, zonder meer kunnen worden toegepast op alle grondsoorten in de Staringreeks. De hier geteste grond is immers alleen een fijne zandgrond.

Nieuwe systematiek om bodemverdichting te beoordelen

Bulkdichtheid is een te beperkte parameter om bodemverdichting te beoordelen: de huidige grenswaarden zijn te beperkt onderbouwd en ze zijn binair (wel/niet). Er is behoefte aan een nieuwe systematiek waarbij een aantal aspecten moet worden meegenomen, zoals de oorspronkelijke dichtheid, een meer glijdende schaal en een plantaafhankelijkheid. De systematiek zal onderbouwd moeten worden met kolom- en veldproeven. Verder is onderzoek nodig om aan te tonen of er naast bulkdichtheid ook andere parameters meegenomen moeten worden in de beoordeling, zoals de poriënstructuur.

Doorontwikkelen van in-situmetingen aan verdichte bodems

Er zijn diverse in-situmetingen in ontwikkeling waarmee bodemverdichting kan worden aangetoond. Deze meetmethoden, zoals de RhoC-dichtheidssensor en de penetrologger moeten verder doorontwikkeld worden, zodat ze op meer grondsoorten toepasbaar zijn en de resultaten kunnen worden genormaliseerd voor vochtomstandigheden en wellicht andere variabelen van de meetmethoden (snelheid van meting, conusdiameter).

Meer onderzoek naar de verdichte bodem in Nederland

De bodem in Nederland heeft een verhoogd risico op bodemverdichting over meer dan 50% van de oppervlakte (Van den Akker et al., 2013). Zeker voor gronden die weinig natuurlijk herstelvermogen hebben, zoals zand en siltige gronden, is de verwachting dat deze voor het grootste gedeelte een sterke mate van verdichting hebben. Hoewel verdichting op diverse locaties is gemeten en soms zelfs in hele provincies (Van Egmond et al., 2024), ontbreekt het aan een landelijk beeld. Het is aan te bevelen om op een gestructureerde manier op een groot aantal locaties de droge bulkdichtheid van de ondergrond (30-50 cm -mv) te bepalen, waarbij rekening wordt gehouden met de diverse bodemsoorten, bodembelasting (kan sterk per teelt verschillen) en geconditioneerde meetomstandigheden. Door deze metingen elke tien jaar te herhalen, kan een beeld worden verkregen van de langjarige trend van bodemdichtheid en de ruimtelijke variatie in Nederlandse landbouwgronden.

Meer aandacht voor het gebruik van diepwortelende gewassen om bodemverdichting op te heffen

Er wordt vaak gekozen voor het mechanisch openbreken van de verdichte grond, bijvoorbeeld door diepploegen, woelen of diepmengen. Dit verbetert de toestand van de grond op korte termijn, maar meestal treedt binnen enkele jaren verdichting op. Het grootste nadeel van de meeste mechanische methoden is dat vaak de volledige bodemstructuur wordt verstoord, wat de mechanische sterkte en het vochtleverend vermogen sterk vermindert. De veelbelovendste techniek om bodemverdichting (gedeeltelijk) op te heffen, is het gebruik van diepwortelende gewassen: biowoelers (Bakema et al., 2023). Deze hebben effect tot in de ondergrond en een beperkte negatieve invloed op de bovengrond. Er is echter meer onderzoek nodig naar de geschiktste diepwortelende gewassen, naar de bodemomstandigheden waaronder deze het effectiefst zijn en naar hoe ze in het teeltsysteem kunnen worden ingepast.

Gevolgen van verdichting op de waterbeschikbaarheid kwantificeren

De waterbeschikbaarheid voor gewassen zal als gevolg van verdichting kunnen verminderen. Het is belangrijk dat het bepalen van de verdichting van de bodem onderdeel wordt van de systematiek, zoals opgenomen in de WaterWijzerLandbouw (zie www.waterwijzerlandbouw.nl) om schade aan landbouwgewassen door droogte of natheid te bepalen. Door het aanpassen van de waterretentie- en waterdoorlatendheidskarakteristieken (zie eerdere aanbevelingen) en de wortelmodule in de modellen kan hierin een eerste stap worden gemaakt. Deze karakteristieken en planteigenschappen zullen dan wel voor veel meer gronden en gewassen bepaald dienen te worden.

Meer expertises samenbrengen

In het BoVer-onderzoek is gewerkt met een groot aantal onderzoekers met verschillende expertise. Met name het combineren van plant(wortel)kennis met bodemfysische kennis is zeer waardevol gebleken. Het is aan te bevelen in het vervolgonderzoek de plant- en bodemkennis te blijven combineren, omdat daarmee beter wordt begrepen welke bodemparameters al dan niet verstorend werken op de plantontwikkeling.

Literatuur

- Akker, J.J.H. van den; Vries, F. de; Hack-ten Broeke, M.J.D., 2013. *Risico op ondergrondverdichting in kaart: resultaten PRISMA-project 'gevoeligheid voor verdichting'*. Bodem 23/1, p. 14 – 15.
<https://edepot.wur.nl/649964>
- Bakema, G, van den Akker J.J.H. en van F. van Egmond, 2021. *Voorkomen en opheffen van bodemverdichting*, Wageningen Environmental Research, Rapport 3069. <https://edepot.wur.nl/542089>
- Bakema, G., G. Bakker, J. Cruijsen, F. van Egmond, E. van den Elsen, M. Heinen, H. Schneider. 2022. *De invloed van bodemverdichting op de water- en luchthuishouding in de bodem en op de plantontwikkeling. Literatuuronderzoek*. Wageningen, Wageningen Environmental Research, Rapport 3225.
<https://edepot.wur.nl/583342>
- Bakema, G, Arthur, E. en Balen van, D., 2023. *Maatregelen voor het herstel van verdichte bodems*, Wageningen Environmental Research, 3296 <https://edepot.wur.nl/640890>
- Bakema, G., Q van Boxtel and L. van Schaik, 2024. *The effects of bio-subsoiling species on recovery of compacted subsoils: a literature review*, Wageningen, Wageningen Environmental Research, Report 3375
<https://edepot.wur.nl/673624>
- Bakker, G., M. Heinen, H.P.A. Gooren, W.J.M. de Groot, P.D. Peters. 2020. *Hydrofysische gegevens van de bodem in de Basisregistratie Ondergrond (BRO) en het Bodemkundig Informatie Systeem (BIS)*; Update 2019. WOt-technical report 186, Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu, Wageningen.
<https://edepot.wur.nl/526509>
- Heinen, M., Brouwer, F., Teuling, C., & Walvoort, D. J. J., 2021. BOFEK2020 - *Bodemfysische schematisatie van Nederland: update bodemfysische eenhedenkaart*. (Rapport / Wageningen Environmental Research; No. 3056). Wageningen Environmental Research. <https://doi.org/10.18174/541544>
- Van Egmond, F.M., K. Teuling, J. Kannekens, W. Harder, M. Knotters, T. Mulder, T van Orsouw, J, Schoorl 2024. *Regionale kartering bodemverdichting in de provincie Flevoland*. Wageningen, Wageningen Environmental Research No. 3382. <https://doi.org/10.18174/672577>

Appendix 1 Monstervoorbereiding voor laboratorium- en kolomexperimenten naar de invloed van bodemverdichting op de water- en luchthuishouding in de bodem en op de plantontwikkeling

Auteur: Gerben Bakker
Reviewer: Marius Heinen

Inhoudsopgave

A1.1	Inleiding	33
A1.2	Materiaal en Methode	33
	A1.2.1 Verzamelen grond	33
	A1.2.2 Mengen en verdelen van de grond	36
	A1.2.3 Verdichten van de grond	37
A1.3	Discussie en conclusies	44
A1.4	Referenties	45

A1.1 Inleiding

Zowel bij de kasproef als de laboratoriumproeven is ernaar gestreefd om de verdichting van de monsters zo goed mogelijk op elkaar af te stemmen. Dat is gedaan om de resultaten aan het einde van de proeven met elkaar te kunnen vergelijken en waardoor er samenhangende conclusies getrokken kunnen worden zonder last te hebben van onverwachte randverschijnselen. Ongewenste randverschijnselen zijn bijvoorbeeld macroporiën, wormgangen en aggregaten die niet uniform over en tussen de monsters zijn verdeeld, een niet uniforme verdeling van organisch materiaal en korrelgroottes. Om dit te voorkomen is een grote hoeveelheid grond in het veld verzameld en zeer goed gemengd. Vervolgens is veel aandacht besteed aan een uniforme wijze van monsterverdichting van de deelmonsters. De gehele monstervoorbereiding, waaronder monsterverdichting is een belangrijke stap in het onderzoek en wordt daarom apart in deze appendix beschreven.

Er zijn monsters gemaakt voor de verdichte laag in de kolomproeven van de kasexperimenten, maar ook voor de hydrofysische bepalingen in het laboratorium. Deze laatste bestaan uit monsters ter bepaling van de waterretentiekaracteristiek, de onverzadigde waterdoorlatendheid, de verzadigde doorlatendheid, de indringingsweerstand en de droge bulkdichtheid.

A1.2 Materiaal en Methode

A1.2.1 Verzamelen grond

Van den Akker et al. (2006) en Bakker et al. (2010) geven aanwijzingen voor de samenstelling van de meest verdichtingsgevoelige gronden (zie grijs gearceerde rijen in Tabel 1 en Tabel 2).

- Lichte zavelgronden (8-17.5% lutum), vooral met een laag kleigehalte (i.v.m. verdichtingsreducerende eigenschappen door krimp- en zwel).
- Zandgronden, vooral met hoog gehalte aan fijn zand (fijn zand = 50-210 μm).

Gronden met een organisch stofgehalte van meer dan 3% zijn minder verdichtingsgevoelig door 'veerkracht'.

Tabel 1 Bodemkundige benaming met bijbehorende lutum- en zandfracties.

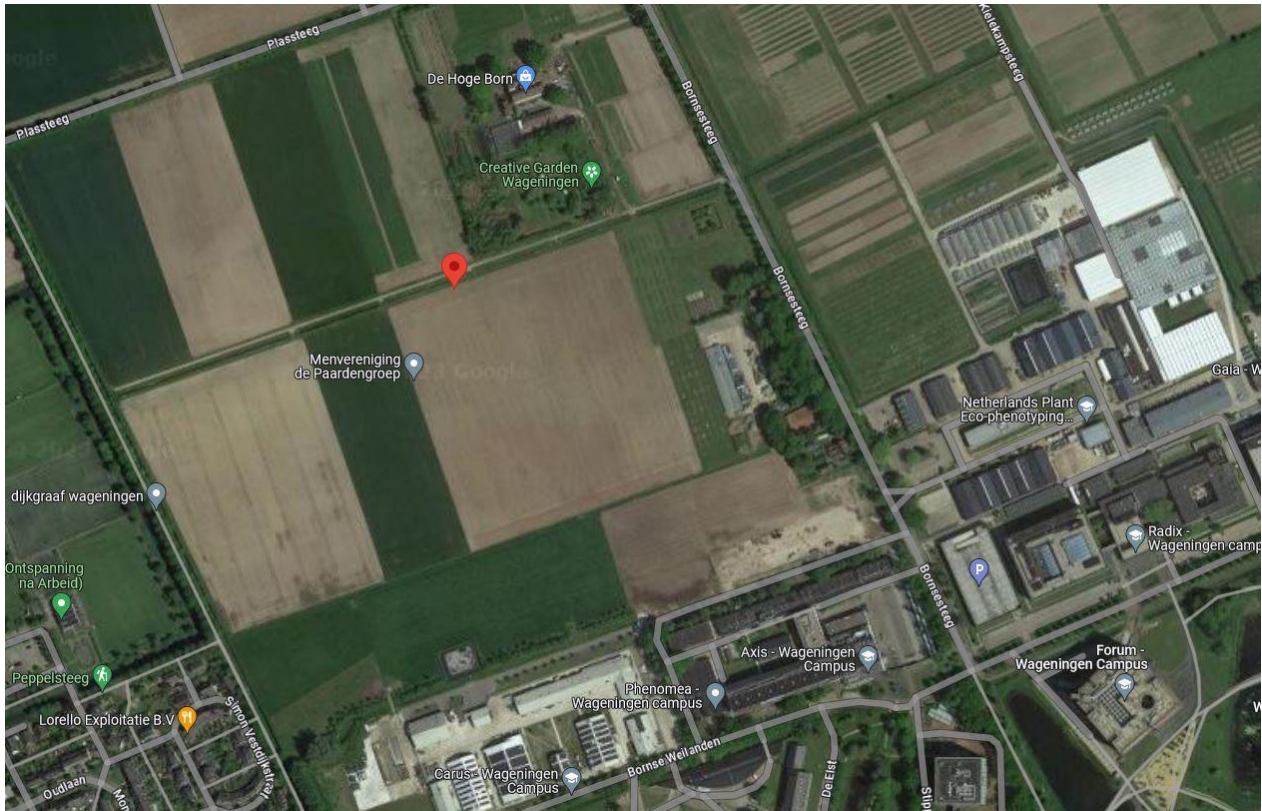
Afzetting	% lutum (<2 mm)		% leem (0-50 mm)		Mediaan vd zandfractie (mm)		Samenvattende naam	Naam
	van	tot	van	tot	van	tot		
Niet-eolisch	0	5	-	-	-	-	zand	kleiarm zand
Niet-eolisch	5	8	-	-	-	-	zand	kleig zand
Niet-eolisch	8	12	-	-	-	-	zavel	zeer lichte zavel
Niet-eolisch	12	17,5	-	-	-	-	zavel	matig lichte zavel
Eolisch	-	-	0	10	-	-	zand	leemarm zand
Eolisch	-	-	10	17,5	-	-	zand	zwak lemig zand
Eolisch	-	-	17,5	32,5	-	-	zand	sterk lemig zand
Eolisch	-	-	32,5	50	-	-	zand	zeer sterk lemig zand

Tabel 2 Bodemkundige benaming met bijbehorende fracties van de totale zandfractie (50-2000 μm).

Eolische en niet-eolische zanden	Fractie (mm)		Samenvattende naam	Naam
	van	tot		
Alle zanden	50	105	fijn zand	uiterst fijn zand
Alle zanden	105	150	fijn zand	zeer fijn zand
Alle zanden	150	210	fijn zand	matig fijn zand

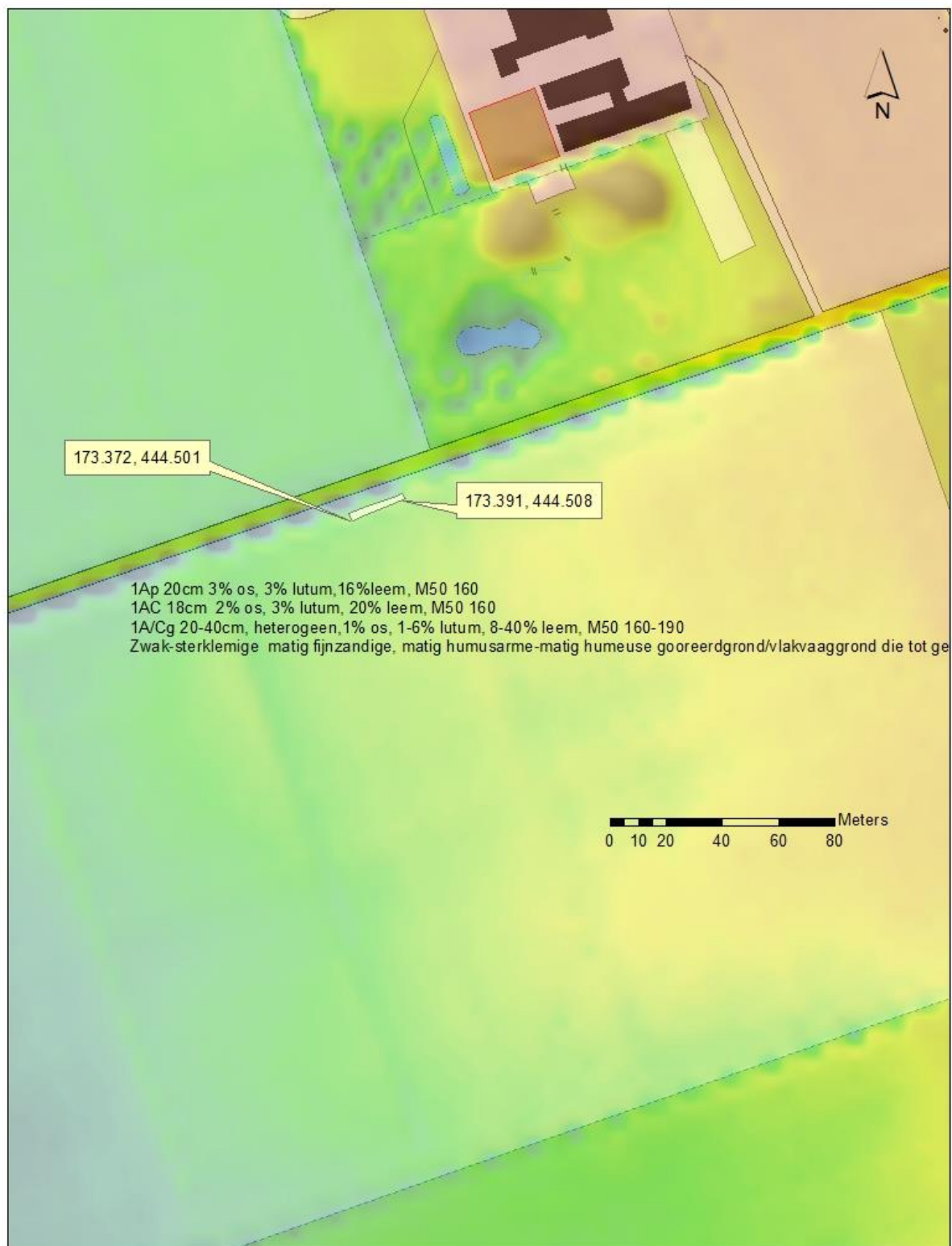
Op basis van gegevens uit het Bodem Informatie Systeem (BIS) en de Basis Registratie Ondergrond (BRO) zijn geschikte gronden geselecteerd. Hieruit is een locatie in de nabijheid van Wageningen gekozen voor het uitvoeren van de veldproef en het verzamelen van uitgangsmateriaal voor de kas- en laboratoriumexperimenten (Figuur 1).

Er is met de perceeleigenaar (Unifarm) overeenstemming bereikt over de voorgenomen meerjarige veldproef en de af te graven grond voor de kas- en laboratoriumproeven. Vervolgens is een vooronderzoek uitgevoerd waarbij er profielbeschrijvingen van de bodem zijn gemaakt en een er schatting is gedaan van de korrelgrootteverdeling en de hoeveelheid organische stof op de verschillende locaties en bodemdiepten. De meest geschikte plek op het perceel voor afgraving van de grond voor de kas- en labproeven is weergegeven in Figuur 2.



Figuur 1 Locatie van een verdichtingsgevoelige grond in de buurt van Wageningen.

Er is een inschatting gemaakt van de in totaal benodigde grond, waarbij rekening is gehouden met een eventuele herhaling van de proef. De herhaling van de proef was niet voorzien in dit onderzoek, maar kan desgewenst in een vervolgonderzoek alsnog plaats vinden omdat de grond zorgvuldig is opgeslagen. De totaal benodigde af te graven grond was geschat op 2,3 m³ (circa 3400 kg bij veldvochtige toestand). Uiteindelijk is 4500 kg veldvochtige grond afgegraven (Figuur 3). Het proces van afgraven werd nauwkeurig begeleid door veldbodemkundigen die erop toezagen dat de af te graven grond steeds aan de eisen van een goed te verdichten grond voldeden.



Figuur 2 Profielbeschrijving en coördinaten van de strook afgegraven grond.

Na afgraven is de grond in een loods uitgespreid waarna het met een enkele keer tussentijds omscheppen 4 weken aan de lucht is gedroogd. Vervolgens is de grond gezeefd over 3 mm.



Figuur 3 Afgraven van de eerste 10 tot 20 cm van de bovengrond.

In Tabel 3 is de gemeten fractieverdeling van de bemonsterde bovengrond van het zandprofiel gegeven.

Tabel 3 Granulaire fractieverdeling van de bemonsterde bovengrond van het zandprofiel aan de Bornsesteeg te Wageningen, gebaseerd op 3 herhalingen, per klasse afgerond. De samenvattende naam van deze grond is "matig humeus, zwak lemig matig fijn zand", gebaseerd op een geologische benaming 'jong dekzand' en een organisch stofgehalte (feitelijk 'gloeiverlies') van 2.9%.

Textuur range (mm) en M50	Naam	Granulaire fractie (%)	Leem	Slib	Silt	Zand
0-2	Lutum	4.8	14.6	8.1		
2-16	Sloef	3.3			9.9	
16-50	Löss	6.6				
50-63	Uiterst fijn zand	3.1				85.5
63-105	Uiterst fijn zand	10.1				
105-150	Zeer fijn zand	20.8				
150-210	Matig fijn zand	24.5				
210-420	Matig grof zand	21.5				
420-2000	Zeer grof zand	5.5				
M50	Mediaan op gewichtsbasis bepaald over het gemeten bereik 50-2000 µm	171				

A1.2.2 Mengen en verdelen van de grond

Na het zeven over 3 mm is de grond naar WEPAL-QUASIMEME getransporteerd, waar het op zeer zorgvuldige wijze is gemengd en verdeeld over meer dan 140 emmers met deksel van 15 liter. WEPAL-QUASIMEME is een ISO17043 geaccrediteerde organisatie voor wereldwijde ringtesten en voor het verspreiden van geüniformeerd monstermateriaal.

De mengprocedure die door WEPAL-QUASIMEME is gehanteerd is hieronder beschreven. Daarbij is onderscheid gemaakt naar de reguliere manier van mengen voor porties van minder dan 360 liter, en voor porties van meer dan 360 liter zoals voor het BoVer project waar ongeveer 3000 liter grond is verzameld. Ongeveer 2160 liter is daarvan is daadwerkelijk gemengd.

A1.2.2.1 Bij een partij <360 liter

Een partij grond (maximaal 360 liter) wordt na mengen verdeeld over 24 emmers van elk 15 liter. Dit gebeurt met de zgn. bulkverdelers van WEPAL-QUASIMEME. Hierbij worden steeds laagjes van ongeveer 1 cm in de 24 emmers gestrooid, zodanig dat uiteindelijk de hele partij verdeeld is over de 24 emmers. De emmers bevatten hierdoor eenzelfde aantal laagjes met dezelfde samenstelling.

A1.2.2.2 Bij een partij >360 liter (bijvoorbeeld 6x360 liter)

Is de partij groter dan 24 emmers, bijvoorbeeld 6x24 emmers, dan wordt de oorspronkelijke partij eerst opgedeeld in 6 eenheden. Elke eenheid wordt vervolgens op de gangbare manier (<360 liter) verdeeld over 24 emmers, waardoor binnen een eenheid elke emmer dezelfde grondsamenstelling heeft. De samenstelling tussen de 6 eenheden is dan nog niet hetzelfde. Om ook tussen de verschillende eenheden geen verschillen in de samenstelling meer te hebben, wordt van elke gemengde eenheid steeds 1/6 deel verwijderd om gezamenlijk een nieuwe eenheid te vormen. Dit vormt 6 nieuwe afgeleide eenheden. Deze 6 nieuwe afgeleide eenheden worden elk vervolgens weer gelijkmatig verdeeld over 6 sets van 24 emmers. Elke emmer binnen de totale partij van 6x24 emmers heeft nu dezelfde samenstelling.

A1.2.3 Verdichten van de grond

Een grond verdicht normaal gesproken bij het ene vochtgehalte meer dan bij het andere. Voor elke grondsoort bestaat er een vochtgehalte waarbij de grond het makkelijkst verdicht, ofwel waarbij de grond de hoogste dichtheid zal bereiken na het aanbrengen van een compressiekracht. Dit vochtgehalte wordt het Proctor-vochtgehalte genoemd. Een hoger of lager vochtgehalte zal leiden tot een lagere dichtheid. Dit vochtgehalte is gemeten met de proctorproef (ASTM D698, 2021; DIN 18127, 2012; NEN-EN 13286-2:2010; MAEER's MIT, no date; RAW, 2010) en is voor de grondsoort zoals gebruikt in dit onderzoek vastgesteld op circa 11% massa-watergehalte (0,11 gram water per gram droge grond).

Bij het verdichten van de grond voor de kas- en laboratoriumexperimenten is de gemengde grond uit de emmers steeds eerst op het proctor-vochtgehalte gebracht.

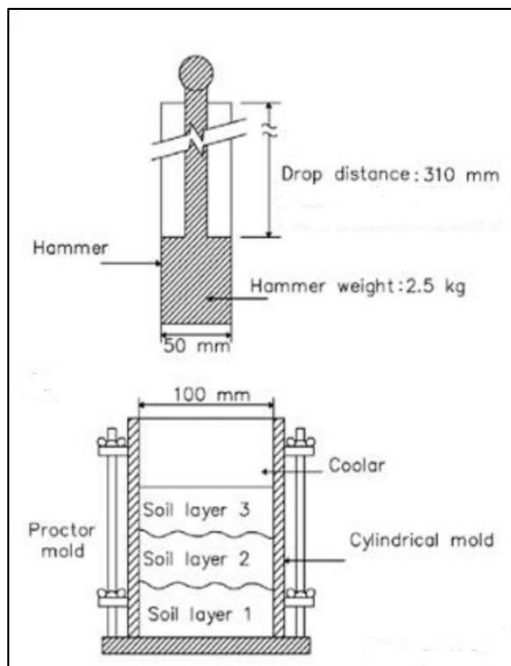
Uit de literatuurstudie van Bakema et al. (2022) bleek dat de krachten die op een diepere ondergrond worden uitgeoefend bij zeer zware belasting door zware landbouwvoertuigen niet boven de 300 kPa uitkomen. In dit onderzoek zijn de volgende belastingen aangehouden: 100, 200, 300 en 400 kPa. Daarbij zijn per monsterring met een computergestuurd verdichtingsapparaat (Royal Eijkelpark, Giesbeek) twee passages van een voertuig gesimuleerd waarbij de druk per 'passage' volgens een vast patroon langzaam opliep naar de gewenste einddruk en vervolgens weer langzaam afliep.

Na het verdichten zijn de monsters verzadigd met water. De grond vertoonde een lichte zwel bij vernatting. Om alle monsters en bepalingsmethoden met elkaar te kunnen vergelijken is gekozen voor een referentievolume die optreedt bij waterverzadiging. Daarom is de grond na verdichten in alle ringen bij waterverzadiging gelijk gemaakt met de ringranden.

De stappen die hierboven kort zijn beschreven worden hieronder in meer detail besproken.

A1.2.3.1 Proctorproef

De proctorproef is beschreven in verschillende normen ASTM D698, EN 13286-2, DIN 18127, Laboratory Manual van de Geotechnical Engineering group in Pune India, en Proef 10 van de RAW 2010. De normen zijn onderling vergelijkbaar, maar verschillen op detailniveau.



Figuur 4 Principe van de proctorproef.

Het valgewicht dat in het Soil-Hydro-Physics (SHP) laboratorium van Wageningen UR is gebruikt heeft een massa van 2,5 kg en een doorsnede van $D = 50$ mm. De valhoogte van het gewicht bedroeg steeds 30,5 cm. De monsterring waarin zich de te verdichten grond voor de proctorbepaling bevindt, heeft de volgende dimensies: $D = 10,2$ cm; $H = 11,64$ cm (monsteroppervlak $A = 81,7$ cm²). Deze eigenschappen vormen de standaard die in de meeste normen zijn omschreven. De RAW gebruikt iets afwijkende monsterringdimensies¹.

Een korte beschrijving van de bepalingprocedure is als volgt: Ongeveer 1 kg grond wordt verdeeld over tenminste 4 verschillende eenheden. Elke eenheid wordt op een ander vochtalte gebracht. Per eenheid wordt het materiaal in 3 lagen in de monsterring aangebracht. Per laag laat men het gewicht van 2,5 kg vanaf een hoogte van 30,5 cm vallen (Figuur 4). In de RAW is voorgeschreven hoe vaak het valgewicht moet vallen. De RAW gebruikt echter een groter monster. Daarom moet het aantal keren vallen volgens de RAW aangepast worden naar het feitelijke monsteroppervlak. In Tabel 4 is het gebruikte aantal slagen voor de proctorproef in het SHP-laboratorium weergegeven.

Tabel 4 Gebruikte aantal slagen van het valgewicht per aangebrachte laag voor de proctorproef in het SHP-laboratorium. Daarbij worden per laag na elkaar een aantal slagen aan de buiten- en binnenzijde plus herhaling aangehouden voor een homogene verdichting.

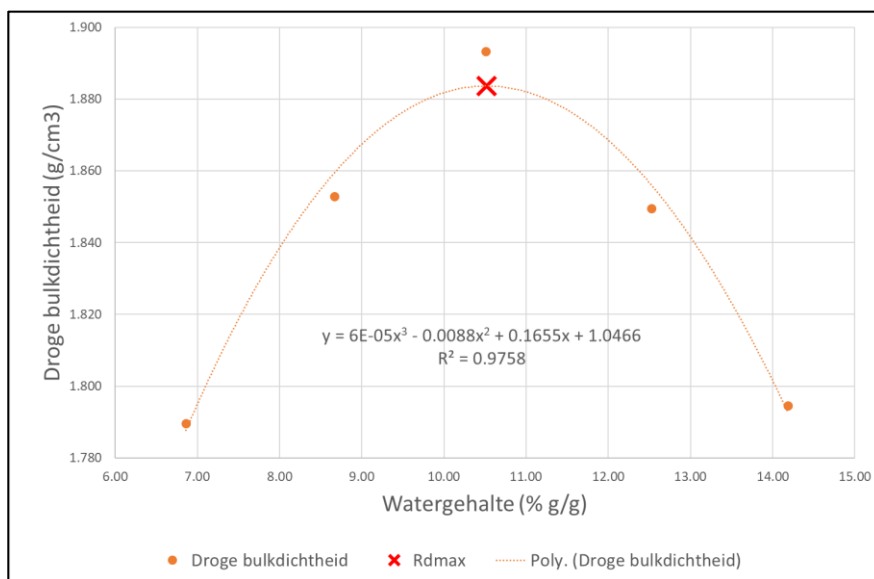
	Aantal slagen				Totaal
	Buitenzijde	Binnenzijde	Buitenzijde	Binnenzijde	
Onderste laag	8	4	8	4	24
Middelste laag	8	4	8	4	24
Bovenste laag	6	3	6	3	18
Op de schijf				9	9

Nadat de grond gelijk is gemaakt met de ring en de natte en vervolgens stoofdrome massa (bij 105 °C) van de grond is bepaald, kan in een grafiek het vochtgehalte tegen de bulkdichtheid worden uitgezet. De

¹ Bij de RAW (2010) gebruikt men een monsterring voor verdichting met $D = 15,24$ cm en $H = 17,78$ cm. Het monsteroppervlak is daarmee $A = 182,4$ cm². Voor het aantal slagen per oppervlakte moet daarvoor worden gecorrigeerd. De oppervlakteverhouding is dan $A_{SHP}/A_{RAW} = 81,7/182,4 = 0,44$. Het aantal slagen gaat daarmee van 56 bij de RAW naar $56 \cdot 0,44 = 24$ voor het SHP-lab. Deze aantallen zijn in overeenstemming met de aantallen die gegeven worden in de manual van de Geotechnical Engineering groep.

maximale dichtheid die uit de te fitten polynoomfunctie (paraboolvormig) volgt, is per definitie de proctordichtheid en het vochtgehalte dat daarbij hoort is het proctorvochtgehalte.

Als voorbeeld zijn in de Figuur 5 de resultaten van monster 3 gegeven. De resultaten van de proeven voor de triplobepalingen zijn weergegeven in Tabel 4.



Figuur 5 Resultaten van de proctorproef van monster 3: droge bulkdichtheid (g cm^{-3}) als functie van het massa watergehalte ($\%, \text{g.g}^{-1}$).

De proctorcurve van Figuur 5 laat zien dat in de buurt van het proctorvochtgehalte een kleine verschuiving in het vochtgehalte nauwelijks tot een andere dichtheid zal leiden. Dit is uiteraard inherent aan de top van een paraboolfunctie. Voorafgaand aan de verdichtingsprocedure hoeven de monsters ten behoeve van de kas- en laboratoriumproeven dus niet exact bij 11% bevochtigd te worden, maar is een kleine afwijking hierin acceptabel geacht.

Tabel 5 Resultaten van de proctorproef van de 3 monsters.

Monster	Proctordichtheid (kg m^{-3})	Proctorvochtgehalte% (g g^{-1})
1	1891	11.5
2	1875	10.9
3	1884	10.5
Gemiddeld	1883	11.0

A1.2.3.2 Verdichten van de grondkolommen voor de kasproeven

De kasproeven zijn uitgevoerd met de gemengde grond in PVC-kolommen (**Figuur**). De binnendiameter van de PVC-kolommen bedroeg 19,2 cm. De kolommen bestaan uit een niet-verdicht bovendeel van 30 cm hoogte, een verdicht middendeel van 10 cm hoogte en een onderdeel van 30 cm hoogte. Het bovenste- en onderste deel is gevuld met het zand dat eerst op ongeveer het proctorvochtgehalte van 10-11% (g/g) is gebracht. Daarna is de grond met een handstamper op een dichtheid van ongeveer 1350 kg m^{-3} gebracht.



Figuur 6 Schematische weergave (links) en de werkelijke opbouw (rechts) van de 70 cm hoge kolommen van de kasproef, waarbij de bovenste 30 cm en de onderste 30 cm van de kolommen niet verdicht zijn ($\rho_d = 1350 \text{ kg m}^{-3}$) en het 10 cm hoge middengedeelte steeds een andere compressie heeft ondergaan: $S1 = 100 \text{ kPa}$, $S2 = 200 \text{ kPa}$, $S3 = 300 \text{ kPa}$ en $S4 = 400 \text{ kPa}$). Het middengedeelte van de referentiekolom heeft steeds een dichtheid die overeenkomt $S0 = 1350 \text{ kg m}^{-3}$, dus conform de dichtheid van de rest van de kolom. De witte bakken op de foto rechts zijn bedoeld om de onderrandvoorwaarde (vochtleverantie) voor de kolommen te regelen.

Voor het verdichten van de 10 cm hoge middendelen van de kaskolommen (S1 t/m S4, Appendix 2: Kolomproef) en de monsters die voor de hydrofysische metingen zijn gebruikt, is een strikte en grotendeels geautomatiseerde verdichtingsprocedure aangehouden (volgende paragraaf). Hierbij zijn de belastingen 100, 200, 300 en 400 kPa aangehouden, en de behandelingen zijn aangeduid met S1 tot en met S4 (S0 is de referentiebehandeling).

A1.2.3.3 Verdichtingsprocedure S1 t/m S4 kasproef en de hydrofysische monsters

Het verdichten van de monsters is in grote lijnen als volgt uitgevoerd:

1. Gewicht van de lege ring noteren
2. Monsterring wordt voorzien van een schaalverdeling met intervallen van 2 cm door een markering met stift aan de binnenkant van de ring.
3. Van submonsters uit de emmers wordt het vochtgehalte bepaald door vochtig wegen – stoofdrogen bij 105°C en vervolgens opnieuw te wegen
4. De grond wordt op 10-11 massa % water gebracht
5. De tot 10-11% massaprocent bevochtigde losse grond wordt in de ring gebracht tot de 1^e markering
6. 1^e laag grond wordt waterpas gemaakt
7. een kleine kracht wordt aangebracht om de grondhoogte te reduceren tot circa 50% van de oorspronkelijke los-gestorte hoogte (verdichting A)
8. de uiteindelijk gewenste kracht aanbrengen die overeenkomt met 2 passages van een (zwaar) voertuig (verdichting B)
9. bovenstaande punten 5-8 worden herhaald totdat de gehele ring (meer dan) gevuld is
10. het monster wordt gelijk gemaakt met de boven- en onderkant van de monsterring
11. het monster wordt ter waterverzadiging weggezet
12. het monster wordt opnieuw gelijk gemaakt met de randen van de monsterring.

Er zijn verschillende monsterringsoorten op deze wijze verdicht:

- $D = 5,0 \text{ cm}$; $H = 5,0 \text{ cm}$ monsterringen voor de bepaling van de retentiekarakteristiek tot $h = -1000 \text{ cm}$
- $D = 10,2 \text{ cm}$; $H = 8,0 \text{ cm}$ monsterringen voor de bepaling van de retentiekarakteristiek en onverzadigde waterdoorlatendheid met de verdampingsmethode.
- $D = 10,2 \text{ cm}$; $H = 8,0 \text{ cm}$ monsterringen voor de bepaling van de indringingsweerstand met de laboratorium-penetrometer.
- $D = 19,2 \text{ cm}$; $H = 10,0 \text{ cm}$ monsterringen voor de bepaling van de verzadigde waterdoorlatendheid.
- $D = 18,9 \text{ cm}$; $H = 10,0 \text{ cm}$ monsterringen voor de simulatie van de verdichte laag in de kasproef.

A1.2.3.4 Gedetailleerde verdichtingsprocedure

Voor het verdichten van de monsters is de 'Compression test apparatus set - 08.67' van Royal Eijkelkamp gebruikt (Figuur 8; <https://www.royaleijkelkamp.com/en-us/products/lab-testing-equipment/soil-physical-research/compression-and-shear-testing/compression-test-apparatus-set/>).

Het apparaat wordt geleverd met standaard monsterringen van 10 cm doorsnede, ofwel met een monsteroppervlak van 78.5 cm². Voor dit oppervlak is het apparaat gekalibreerd. De aangegeven maximaal te leveren kracht is 5000 N. Omgerekend naar een druk levert dit voor het standaard monster $5000/78.5 = 63.7 \text{ N/cm}^2$, ofwel 637 kN/m² (kPa) op, ongeveer overeenkomstig de in de specificaties aangegeven maximale druk van 600 kPa. Dit betekent echter dat wanneer in de software 600 kPa wordt ingegeven, het apparaat er impliciet vanuit gaat dat met het standaard monster wordt gewerkt. De aangelegde druk zal op dat monsteroppervlak dan inderdaad 600 kPa bedragen. Voor elk ander monsteroppervlak gelden echter andere (maximale) aan te leggen drukken die in de software moeten worden ingevoerd.

Tabel 6 geeft een overzicht van de drukken die moeten worden ingevoerd voor de verschillende ringdiameters. Uit de tabel blijkt dat de gewenste referentiedruk voor de K_s ring (19,2 cm doorsnede) soms groter is dan de maximale druk van 600 kPa en dus niet gehaald kan worden (grijze gearceerde waarden). Daarom moet de grond in deze ringen in delen van het oppervlak verdicht gaan worden, zodat steeds een kleiner deel van het totale oppervlak per keer wordt verdicht.



Figuur 7 Verdichtingsapparaat van Eijkelkamp.

Om dit op uniforme wijze en herhaalbaar te kunnen uitvoeren zijn speciale stempels ontworpen en gemaakt die of een 1/2 of 1/3 deel van het totale oppervlak aandrukken.

Tabel 6 Overzicht van de drukken die moeten worden ingevoerd voor de verschillende ringafmetingen.

Ringsoort	Ringdiameter (cm)	Ringoppervlak (cm ²)	In te voeren compressiedruk in het invoerscherm (kPa)					
Normale compressie met referentiedrukken	10.0	78.5	10*)	100	200	300	400	500
100cc	5.0	19.6	3	25	50	75	100	125
Evap	10.2	81.7	10	104	208	312	416	520
hele Ks ringoppervlak	19.0	283.5	36	361	722	1083	1444	1805
1/2 Ks ringoppervlak	13.4	141.8	18	181	361	542	722	903
1/3 Ks ringoppervlak	11.0	94.5	12	120	241	361	481	602

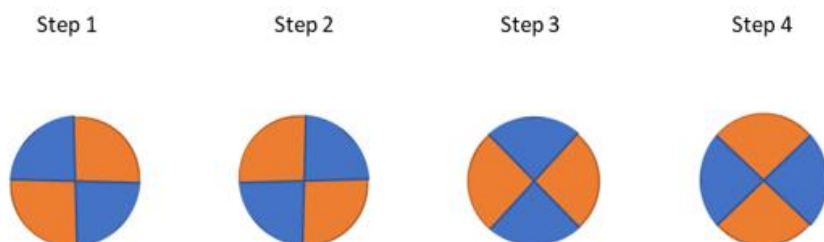
*) deze kleine druk is gebruikt om het monster voor-te-verdichten zodat het los-gestorte volume daalt. Dit heeft tijdens het verdichtingsproces praktische voordelen (zie tekst)

In Tabel 7 is weergegeven hoe de compressiecyclus is opgezet en waarom. Uitgangspunt is steeds de normale bij het apparaat geleverde ring met $D = 10,0$ cm. Als voorbeeld is ook de cyclus weergegeven voor een grotere ring van 19,2 cm doorsnede, maar dan gebruik makend van een taartvormige stempel met het halve monsteroppervlak.

Tabel 7 Beschrijving van de te doorlopen stappen tijdens het verdichten van een monster.

Stap	Beschrijving van de stap
A	Initiële verdichting: Losse grond verdicht gedurende het gehele verdichtingsproces tot ongeveer 50% van zijn oorspronkelijke volume (4 cm hoge losse grond wordt circa 2 cm hoge verdichte grond). Bij het gebruik van de taartvormige stempel met $D = 19,2$ cm ringen zal er door deze grote volumeafname een ongelijkmatige verdichting over het monsteroppervlak optreden. Daarom wordt de gesimuleerde bandpassage van een voertuig voorafgegaan door deze initiële stap A. Ondanks dat de initiële stap voor de kleinere monsteroppervlakken niet nodig is, hebben we dit wel gedaan zodat alle monsters op gelijke wijze worden behandeld. Stap A wordt gedaan bij een menselijke gewichtsdruk (groeve aanname is een persoon van 60 kg op 2 voeten met een totaal oppervlak van 600 cm², resulterend in een druk van 10 kPa). Hierbij wordt gebruik gemaakt van een stempel die het hele oppervlak van het monster beslaat, dus niet met het taartvormige exemplaar. Dit kan bij alle gebruikte monsterringen omdat de druk laag genoeg is en het apparaat altijd in staat is om die druk te leveren. De initiële stap A bestaat dus uit 10 kPa voor een $D = 10$ cm ring of 36 kPa voor een $D = 18,9$ cm ring. De druk wordt gedurende 10 seconden aangelegd. Vervolgens wordt de druk gedurende 5 seconden weggenomen (0 kPa). Daarna is er een herhaling van deze cyclus van 15 seconden.
B	Passerende band: Deze stap stelt een passerende band van een voertuig voor. Het geeft een sequentie van drukken waarbij er een lineaire stijging en daling van de druk is in korte tijd. De druk wordt opgebouwd in 3 stappen vanaf de initiële druk naar de einddruk en vervolgens ook weer terug in dezelfde stappen naar de initiële druk. De stabilisatietijd per deelstap is proefondervindelijk vastgesteld op 6 seconden. Het systeem heeft deze tijd nodig om in evenwicht te komen, ofwel om de ingestelde druk te bereiken. Voor het simuleren van een passerende band, gebruik makend van de standaard monstergrootte ($D = 10$ cm) moeten de stappen 0, 10, 33, 67, 100, 67, 33, 10, 0 kPa worden ingevoerd voor een einddruk van 100 kPa. Voor de hogere drukken en grotere monsters moet de taartvormige stempel met een 1/2 (zie figuur hieronder) of 1/3 stempeloppervlak gebruikt worden, want het apparaat is niet in staat om bij de grote monsteroppervlakken de grootst benodigde drukken te genereren. Bij gebruik van een taartvormige stempel met het halve monsteroppervlak voor de kasproefringen ($D = 18,9$ cm) worden de volgende drukken sequentieel opgelegd: 0, 18, 60, 119, 179, 119, 60, 18, 0 kPa. Ook hier zal de einddruk 100 kPa bedragen. Door de 'halve' stempel 4 keer te draaien en de drukstappen per rotatie te herhalen, worden alle delen van het monsteroppervlak twee keer verdicht (2 keer een 'passerende band'). Om de druk per passerende band beter en gelijkmatiger over het monsteroppervlak te verdelen, wordt de volgende volgorde van het draaien aangehouden: 1. uitgangspositie 2. 90 graden met de klok mee 3. 45 graden tegen de klok in 4. 90 graden met de klok mee (zie afbeelding).

Zo zijn alle oppervlaktedelen onderworpen aan 2 keer een 'passerende band'.



Om een passage van een voertuig te simuleren is uitgegaan van de gestandaardiseerde sequentie zoals weergegeven in Tabel 8. Daarbij is een uiteindelijk te bereiken compressiedruk van 100 kPa als voorbeeld gebruikt.

Tabel geeft een overzicht van de in te voeren drukken in de software van het compressieapparaat bij de verschillende stempeloppervlakken, eveneens voor de voorbeelddruk van 100 kPa.

Tabel 8 Gestandaardiseerd sequentie van aan te leggen drukken voor een te bereiken einddruk van 100 kPa (voor een monsterring met $D = 10$ cm). Tevens zijn de tijden waarover de deeldrukken worden gehandhaafd weergegeven. Deze sequentie is steeds als standaard gebruikt, maar de waarden worden gecorrigeerd voor het gebruikte stempeloppervlak (de druk wordt k keer zo groot als het stempeloppervlak k keer groter is) en de uiteindelijk te bereiken einddruk.

Volgnummer	Type druk	Druk (kPa) *)	Tijd (s)
1	Voordruk	10	10
2	Voordruk	0	5
Herhalen nummers 1 en 2			
3	Startdruk	10	6
4	Voertuig 1/3 vd maximale druk	33	6
5	Voertuig 2/3 vd maximale druk	67	6
6	Voertuig 3/3 vd maximale druk	100	6
7	Voertuig 2/3 vd maximale druk	67	6
8	Voertuig 1/3 vd maximale druk	33	6
9	Voordruk	10	6
10	Nul	0	6

Herhalen nummers 3 t/m 10

*) uitgedrukt als referentiedruk voor een normale compressiering van 10 cm doorsnede.

Tabel 9 Sequentie van aan te leggen drukken voor een te bereiken einddruk van 100 kPa per stempeloppervlak.

Monsterdiameter D (cm)	10,0	5,0	10,2	18,9	18,9	18,9	19,2	19,2	19,2
Gebruikt stempeloppervlak A (cm ²)	78,5	19,6	81,7	280,6	140,3	93,5	289,5	144,8	96,5
Soort ring	Standaard	100 cm ³	Evap	Kasproef kolommen			K_s		
Stempeldeel k	1	1	1	1	1/2	1/3	1	1/2	1/3
Volg nr	Type druk	Te bereiken maximale compactiedruk = 100 kPa. Overeenkomstig in te stellen druk in compressieapparaat (kPa)							
1	Voordruk	10	2	10	36	-	-	37	-
2	Voordruk	0	0	0	0	-	-	0	-
Herhalen nummers 1 en 2									
3	Startdruk	10	2	10	36	18	12	37	19
4	1/3 P_{max}	33	8	35	119	60	40	123	62
5	2/3 P_{max}	67	17	69	238	119	79	246	123
6	3/3 P_{max}	100	25	104	357	179	119	369	185
7	2/3 P_{max}	67	17	69	238	119	79	246	123
8	1/3 P_{max}	33	8	35	119	60	40	123	62
9	Voordruk	10	2	10	36	18	12	37	19
10	Nul	0	0	0	0	0	0	0	0

Herhalen nummers 3 t/m 10

De kracht F (Newton) die het apparaat uitoefent wordt omgezet in een druk in N/m^2 zodra een oppervlak wordt verdicht. Om een druk van 100 kPa te bereiken bij een monsterdiameter van 5 cm moet daarom minder kracht worden uitgevoerd dan bij de standaarddiameter van 10 cm, maar meer bij een monsterdiameter van bijvoorbeeld 19.2 cm. Om een compressiedruk van 400 kPa op een monster met diameter $D = 19.2$ cm te bereiken, moet een druk ingegeven worden van 4×123 kPa (zie grijs in Tabel 9) met gebruik van een stempeldeel $k = 1/3$. Een stempel met het halve monsteroppervlak ($k = 1/2$) zou in dat geval resulteren in een op te brengen druk van $4 \times 185 = 740$ N m^{-2} . Een druk groter dan 600 kPa kan het apparaat echter niet leveren.

A1.2.3.5 Kalibratie verdichtingsapparaat Eijkelkamp

Bij aanvang is het verdichtingsapparaat van Eijkelkamp gekalibreerd. De kalibratie is uitgevoerd door de druk van het verdichtingsapparaat rechtstreeks over te brengen op een gekalibreerde weegschaal. Een ingestelde druk van 1 kPa ($= 0.1 \text{ N cm}^{-2}$) moet over het standaard monsteroppervlak ($D = 10$ cm) van 78.5 cm^2 leiden tot $G = 7.85$ N, ofwel tot $m = G / g = 7.85 / 9.81 = 0.8$ kg. Het gewicht dat de weegschaal moet aangeven bij een ingestelde druk van 10 kPa moet dan 8 kg bedragen. Op deze wijze is het apparaat van Eijkelkamp gekalibreerd voor verschillende drukken. De gevonden afwijkingen hierin zijn gebruikt om de uiteindelijke drukken die ingegeven worden in de software van het verdichtingsapparaat te corrigeren. De kalibratie gaf aan dat een correctiefactor 1.085 nodig was. Een te bereiken druk van bijvoorbeeld 400 kPa is in de programmatuur daarom weergegeven als $400 \times 1.085 = 434$ kPa voor het standaard monster van $D = 10$ cm.

A1.3 Discussie en conclusies

In deze bijlage is een omschrijving gegeven van de werkwijze om te komen tot een homogene grond die voor alle onderzochte onderdelen in dit project hetzelfde zijn. Het grote voordeel van een homogeen en dus goed vergelijkbare grond voor alle onderdelen is dat alle resultaten die in dit onderzoek zijn verkregen direct met elkaar vergeleken en geïntegreerd kunnen worden. Een verschil in resultaten zal dan nooit het gevolg zijn van een verschil in het uitgangsmateriaal.

Om tot een homogene grond te komen zijn grofweg de volgende stappen doorlopen:

1. Verzamelen grond in het veld
2. Mengen en verdelen van de grond
3. Verdichten van de grond

De gehele procedure is omvangrijk, maar waardevol. Er zijn een aantal punten aandachtspunten:

Ad.1 Het verzamelen van de grond in het veld verliep probleemloos.

Ad.2 Het mengen en afvullen van de vele emmers is op zorgvuldige wijze uitgevoerd en gaf ook geen problemen.

Ad.3 Het verdichten van de monsters vroeg een zorgvuldige voorbereiding en analyse van de beschikbare apparatuur. De maximale kracht die het compressieapparaat kon leveren bleek een complicerende factor, maar is ondervangen door tijdens het verdichten van de grond gebruik te maken van stempels die het contactoppervlak verkleinen. Dit vergrootte de uiteindelijk te bereiken compressiedruk, ook voor de grotere monsters. Het aantal handelingen dat uitgevoerd moest worden om tot eenzelfde monsteropbouw te komen nam door het gebruik van stempels echter flink toe voor de grote monsters. Een compressieapparaat dat een grotere kracht kan opbrengen zou daarom wenselijk zijn. Een geschikte compressiekracht bij het gebruik van onze 19.2 cm doorsnede ringen is dan 12000 N in plaats van de huidige 5000 N. Omdat het ook wenselijk is om grotere compressiedrukken te gebruiken, bijvoorbeeld 500 kPa in plaats van 400 kPa, moet de kracht nog verder verhoogd worden naar 15000 N.

Pas na het gebruik van de monsters in het laboratorium werd duidelijk dat de gebruikelijke manier van verdichten (in laagjes opbouwen en steeds aandrukken met eenzelfde kracht) wel tot een goede gemiddelde

dichtheid leidt. De afwijkingen over de hoogte van de monsters bedroeg ongeveer 5% ten opzichte van de gemiddelde waarde over het gehele verdichtingsbereik van 100 – 400 kPa.

A1.4 Referenties

- ASTM D698-12(2021). Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)). West Conshohocken, PA 19428-2959. United States
- Bakker, G. M.J.D. Hack-ten Broeke, F. de Vries en J.J.H. van den Akker. 2010. Basismateriaal voor eventuele prioritaire gebieden. Quick Scan voor Drenthe. Alterra-rapport 1964, Alterra, Wageningen.
<https://edepot.wur.nl/143061>
- Bakema, G., G. Bakker, J. Cruijsen, F. van Egmond, E. van den Elsen, M. Heinen, H. Schneider. 2022. De invloed van bodemverdichting op de water- en luchthuishouding in de bodem en op de plantontwikkeling. Literatuuronderzoek. Rapport 3225, Wageningen Environmental Research.
<https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/583342>
- Basis Registratie Ondergrond: <https://basisregistratieondergrond.nl/>
- DIN 18127: 2012-09. Soil, investigation and testing – Proctor-test.
- Eijkelkamp, 2022. User manual – Compression test apparatus (0867) and Shear strength test apparatus (0868), Giesbeek, The Netherlands
- MAEER's MIT. Laboratory Manual, 7 - Unconfined Compression Test. Geotechnical Engineering, Department of Civil engineering, Pune, India
- NEN-EN 13286-2:2010 en. Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 2: Test methods for laboratory reference density and water content - Proctor compaction. Delft, The Netherlands
- RAW, 2010. Standaard RAW Bepalingen – Proef 10 Proctordichtheid van steenmengsels voor verhardingslagen (éénpuntsproctorproef). Ede, The Netherlands
- Van de Akker, J.J.H., G.D. Vermeulen P.H.M. Dekker en A.P. Phillipsen. 2006. Bodemverdichting. Leidraad Bodembescherming, onderdeel 5720. SDU, Den Haag, 51 pp.

Appendix 2 Effecten van verschillende mate van verdichting op de bovengrondse en ondergrondse ontwikkeling van mais in een kolomexperiment in de kas

Auteur: Marius Heinen
Reviewer: Guido Bakema

Inhoudsopgave

A2.1	Inleiding	47
	A2.1.1 Probleemstelling	47
	A2.1.2 Doelstelling	47
	A2.1.3 Onderzoeksvragen	47
A2.2	Materiaal en Methode	48
	A2.2.1 Zand	48
	A2.2.2 Kolommen	48
	A2.2.3 Behandelingen	49
	A2.2.4 Extra kolommen	51
	A2.2.5 Plant en plantwaarnemingen	51
	A2.2.6 Sensoren	51
	A2.2.7 Kasklimaat	51
	A2.2.8 Statistische analyse	53
A2.3	Resultaten en Discussie	53
	A2.3.1 Bovengrondse groei	53
	A2.3.2 Beworteling	55
	A2.3.3 Verhouding wortel:scheut	62
	A2.3.4 Vochtcondities	63
A2.4	Conclusies	68
A2.5	Referenties	69

A2.1 Inleiding

In Bakema et al. (2022; hoofdstuk 4, bijlage 1) is een uitgebreide literatuurstudie beschreven over de reactie van het wortelsysteem op bodemverdichting. Hierin wordt onder meer gesteld dat: *"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 deze bijlage wordt een kasproef beschreven waarin reacties van het wortelsysteem op de aanwezigheid van een verdichte laag op 30-40 cm diepte in een situatie waarin de bovenzijde van de wortelzone (boven de verdichte laag) langzaam uitdroogt en de onderzijde (beneden de verdichte laag) van voldoende vocht wordt voorzien. Het geeft dus invulling aan het vraagstuk rondom effect van verdichting en waterbeschikbaarheid op het wortelsysteem. Tijdens de proef zijn nutriënten- en zuurstofbeschikbaarheid niet-limiterend.

A2.1.1 Probleemstelling

Het verdichten van de bodem heeft invloed op de gewasgroei. Deze kan worden gehinderd door beperking van de water- en luchthuishouding en bewortelbaarheid (Bakema et al., 2022). 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. Bodemverdichting wordt in het veld meestal bepaald aan de hand van droge bulkdichtheid en indringingsweerstand. Deze grootheden kunnen echter niet altijd de vermindering van de plantengroei verklaren. Als ze goed zijn voorzien van water en nutriënten in de bovengrond kunnen planten zelfs in bodems met een sterk verdichte ondergrond goed groeien.

A2.1.2 Doelstelling

Op basis van een literatuurstudie hebben Bakema et al. (2022) drie hoofddoelen en vijf afgeleide doelen geformuleerd waaraan in het project BOVER is gewerkt. In deze appendix wordt ingegaan op de doelstelling "het ontwikkelen en testen van laboratoriumexperimenten om de gevolgen van bodemverdichting op de bewortelbaarheid te bepalen".

A2.1.3 Onderzoeksvragen

Zoals hierboven aangegeven kunnen planten, mits voorzien van voldoende water, nutriënten en zuurstof, goed groeien in een bovengrond die gelegen is op en (sterk) verdichte ondergrond. Wanneer de omstandigheden in de bovengrond niet hieraan voldoen, dan zal het gewas de neiging hebben om dieper te gaan wortelen om op zoek te gaan naar de benodigde bronnen. In dat geval zal het wortelstelsel zich een weg moeten banen door de verdichte laag heen. Het creëren van dergelijke omstandigheden in het veld is vrij lastig omdat je dan afhankelijk bent van de meteorologische condities en de lokale dichtheid van de ondergrond. Daarom is hier gekozen om een kolomproef in een kas te ontwikkelen waarin de omstandigheden zijn te sturen.

De gedachte was om een kolom te vullen met drie lagen zand, waarbij de middelste laag een hogere dichtheid heeft. Een jong plantje wordt gepoot in de bovenste laag waarin initieel net voldoende water zit om een aantal dagen te kunnen groeien. Wanneer de wortels zich voldoende hebben ontwikkeld is de vochtvoorraad in de bovenste laag te gering voor optimale wateropname en wordt de plant gedwongen dieper te wortelen. In de onderste laag wordt ervoor gezorgd dat er steeds voldoende water aanwezig is. Het sturen van wateraanbod in de onderste laag en de verificatie dat de bovenste laag daarbij niet wordt aangevuld was in een modelstudie vooraf getoetst. Het water bevat voldoende voedingsstoffen zodat nutriëntentekorten niet verwacht worden. Omdat relatief onder droge omstandigheden wordt gewerkt zal ook de zuurstofvoorziening voor de wortels voldoende zijn. Op deze manier wordt dus alleen gekeken naar het gecombineerde effect van verdichting en waterbeschikbaarheid. In Bakema et al. (2022; hoofdstuk 4) was aangegeven dat er weinig gepubliceerde studies zijn waarin reacties van wortels op bulkdichtheid, zuurstofloosheid en watergehalte afzonderlijk bekeken zijn. De kolomproef poogt hierin een bijdrage te leveren.

De volgende onderzoeksvragen zijn daarbij opgesteld:

- Beïnvloedt de verdichte tussenlaag de beworteling als functie van de mate van verdichting ten opzicht van een referentiesituatie waar geen verdichte laag aanwezig is?
- Hoe wordt de morfologie van de wortels (wortelstraal, wortellengte) beïnvloed wanneer deze door de verdichte laag heen groeien?
- Is er een verschil in bovengrondse groei meetbaar als functie van de mate van verdichting?

Deelresultaten van deze proef zijn eerder beschreven door WU studenten Shan (2023) en Meulenberg (2023).

A2.2 Materiaal en Methode

A2.2.1 Zand

Van een perceel aan de Bornsesteeg, Wageningen (51.988⁰, 5.6562⁰; XY: 173477, 444435), is bovengrond verzameld, gedroogd, gezeefd en zeer goed gemengd met behulp van een geautomatiseerd doseersysteem van WEPAL. Met dat systeem is de grond zeer homogeen verdeeld over een groot aantal voorraadenners, waardoor zeker was dat alle behandelingen dezelfde mengverhoudingen hadden (voor details zie Appendix 1). De textuurverdeling staat vermeld in Tabel 1.

Tabel 1 Granulaire fractieverdeling van de bemonsterde bovengrond van het zandprofiel aan de Bornsesteeg te Wageningen.

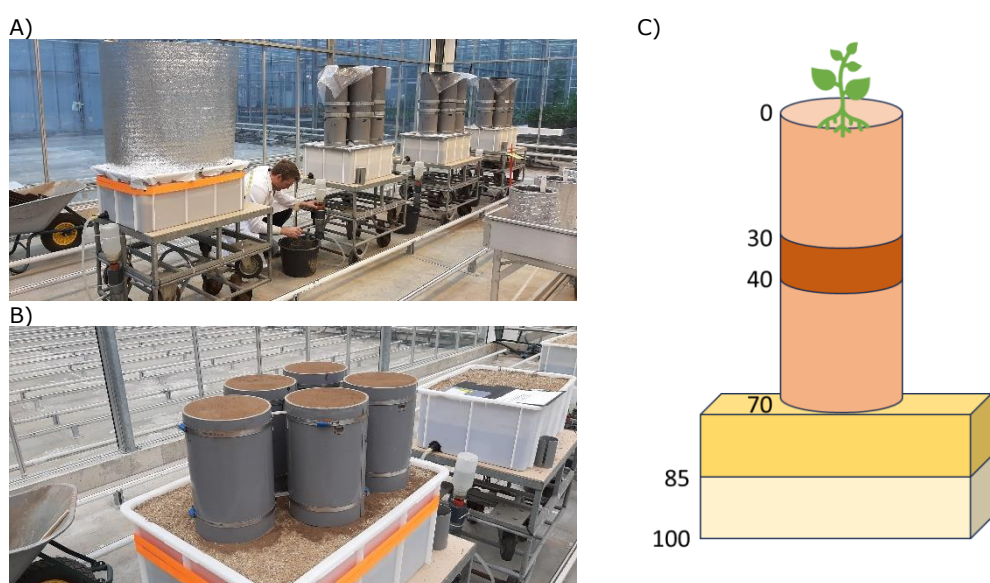
Textuur range (mm)	Naam	Granulaire fractie (%)
0-2	Lutum	4.8
2-16	Sloef	3.3
16-50	Löss	6.6
50-63	Uiterst fijn zand	3.1
63-105	Uiterst fijn zand	10.1
105-150	Zeef fijn zand	20.8
150-210	Matig fijn zand	24.5
210-420	Matig grof zand	21.5
420-2000	Zeef grof zand	5.5
0-50	Leem	14.6
0-16	Slib	8.0
2-50	Silt	9.8

A2.2.2 Kolommen

PVC kolommen met een binnendiameter van 19 cm zijn gevuld met het zand. Er zijn kolommen met hoogte van 30 cm gevuld met een standaard dichtheid (1350 kg m⁻³) en de tussenlagen werden in verschillende dichtheden (zie sectie 'Behandelingen') gemaakt in kolommen met een hoogte van 10 cm. De kolommen werden initieel op een vochtgehalte van 0.16 (laag 0-30) en 0.10 (lagen 30-40, 40-70) cm³ cm⁻³ gebracht. Daarna werden de kolommen samengevoegd tot een kolom van 70 cm hoogte: 0-30 cm niet-verdichte bovengrond, 30-40 cm verdichte tussenlaag en 40-70 cm niet-verdichte ondergrond. De kolommen werden geplaatst op een zandbak bestaande uit een laag van 15 cm grof zand (70-85 cm, brekerzand, Praxis) en een laag van 15 cm fijn zand (85-100; Blokzijlzand) (Figuur 1).

De kolommen werden niet via de bovenzijde bevochtigd, maar via de onderzijde vanuit de zandbak. Daardoor was het mogelijk om de bovenzijde van de kolommen te laten uitdrogen, terwijl de onderzijde van de kolommen voldoende vocht bleef hebben voor wateronttrekking door wortels als die daar zouden kunnen komen. Daarmee werd waterstress aan de bovenzijde van de kolom gecreëerd en werden de plantenwortels

gedwongen water onder de verdichte laag op te nemen. Om wateraanvoer vanaf de onderzijde goed te kunnen laten functioneren werd de bak opgebouwd uit een onderlaag met fijn zand en een bovenlaag met grof zand. In het fijne Blokzijzand was een drainbuis geplaatst. Hiermee is het mogelijk om via een hangende waterkolom de onderdruk in de zandbak te reguleren. Via de drainbuis kan water aan- of afgevoerd worden. Deze onderdruk is de onderrandvoorwaarde die is opgelegd aan de onderzijde van de laag met grof zand. De laag met grof zand was toegevoegd om watertoevoer vanaf de onderkant naar de kolommen toe te beperken en te kunnen reguleren. Het principe berust erin dat de doorlatendheid van grof zand (in het nattere bereik) snel afneemt met afnemende drukhoogte. In de zandbak neemt de drukhoogte in het grofzand naar boven toe inderdaad af, waarmee een beperkte, maar gereguleerde aan- en afvoer van water aan de onderzijde van de kolommen mogelijk wordt gemaakt. De beperking in aanvoersnelheid zorgt er dan voor dat net voldoende water wordt aangevoerd in de laag 40-70 cm maar te weinig om ook de lagen daarboven van voldoende water te voorzien. De proefopzet is mede tot stand gekomen na toetsing met het model SWAP-WOFOST. Onder meer is nagegaan of de wateraanvoer via Blokzijzand + grof zand te reguleren is zodat na verloop van tijd de bovenste 30 cm sterk uitdroogt en de laag 40-70 cm voldoende aanvoer van water krijgt. Deze indicatieve simulaties worden hier niet nader besproken. In Appendix 5 wordt de feitelijke proef nagerekend en daarin wordt duidelijk dat de proefopzet geslaagd is geweest.

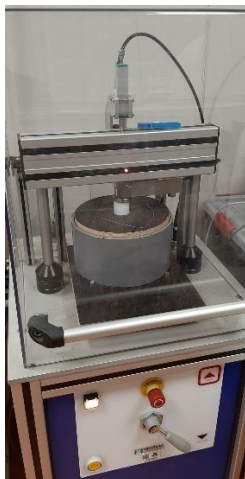


Figuur 1 Foto's van de proefopstelling in de kas (a, b) en (c) schematische weergave van de kolommen met verdichte laag op 30-40 cm geplaatst op grofzand (70-85 cm) op Blokzijzand (85-100 cm).

Aan de bovenzijde werd de grond (kolom en bak) afgedekt met plastic om bodemverdamping tegen te gaan en om grote lokale horizontale potentiaalverschillen in de zandbak te voorkomen. De kolommen werden aan de buitenzijde geïsoleerd met een folie.

A2.2.3 Behandelingen

Voor de tussenlaag (30-40 cm), de verdichte laag, werd de grond gereguleerd met verschillende drukken aangedrukt. Uit de literatuurstudie van Bakema et al. (2022) bleek dat de krachten die op een diepere ondergrond worden uitgeoefend bij zeer zware belasting door zware landbouwvoertuigen niet boven de 300 kPa uitkomen. In dit onderzoek zijn de volgende belastingen aangehouden: 0, 100, 200, 300 en 400 kPa. De onbelaste variant geldt dan als referentie en de dichtheid is daarbij vergelijkbaar aan de lagen erboven en eronder. De drukken werden aangebracht met een samendrukking testapparaat (www.RoyalEijkelpark.com; Figuur 2). Details over de manier van verdichten zijn beschreven in Appendix 1.



Figuur 2 Samendrukkingsapparaat.

Elke behandeling is in viervoud uitgevoerd en de proef is opgezet volgens een gerandomiseerde volledige blok *design* (Figuur 3). Hierbij werden alle behandelingen herhaald op de vier bakken waarmee de onderrandvoorwaarde werd gereguleerd.

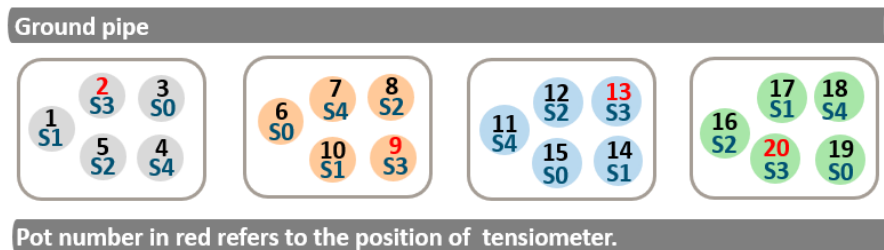
De behandelingen zijn aangeduid met S0-S4 (Tabel 2):

- S0 referentiebehandeling, zonder verdichte tussenlaag
- S1 behandeling met verdichte tussenlaag, aangedrukt met 100 kPa
- S2 behandeling met verdichte tussenlaag, aangedrukt met 200 kPa
- S3 behandeling met verdichte tussenlaag, aangedrukt met 300 kPa
- S4 behandeling met verdichte tussenlaag, aangedrukt met 400 kPa

De dichtheid in de tussenlagen was steeds significant verschillend tussen elke opeenvolgende behandeling: $S1 < S2 < S3 < S4$ (Tabel 2).

➤ **Experimental design:**
Randomized complete block design (RCBD)

One control (S0) and **four** compaction levels (S1,S2,S3,S4)



Figuur 3 Experimentele proefopzet van de gerandomiseerd verdeelde kolommen op vier bakken.

Tabel 2 Dichtheid (kg m^{-3} ; $\pm$ standaardafwijking met $n = 4$) van de verdichte laag per behandeling. Ter vergelijking zijn ook de dichtheden vermeld van de ringen (groot, klein) die zijn gebruikt bij de laboratoriummetingen (zie Appendix 3).

Behandeling	Kasproef	Verdampingsmethode (grote ringen)	Kleine ringen
S0	1350		
S1	1397 (± 15)	1416 (± 8)	1386 (± 39)
S2	1491 (± 9)	1507 (± 8)	1443 (± 29)
S3	1544 (± 9)	1535 (± 15)	1468 (± 29)
S4	1605 (± 13)	1573 (± 1)	1512 (± 7)

A2.2.4 Extra kolommen

Er zijn ook extra kolommen van 70 cm gevuld met dezelfde dichtheid als de niet-verdichte bovenlagen. Deze kolommen werden handmatige van vocht voorzien voor goede groeicondities. De gewasgroei en ontwikkelen van diepte van worteling werden hierin gevolgd via tussentijdse waarnemingen.

A2.2.5 Plant en plantwaarnemingen

Een drie dagen oud voorgekiemd maisplantje² (*Zea mays* LG31218) werd op 23-03-2023 aan het eind van de middag geplaatst in elk van de kolommen. Volledige opkomst werd waargenomen op 27-03-2023 (begin van de ochtend). De bovengrondse groei is gevolgd gedurende de gehele proef. De groeiperiode eindigde na bijna zes weken bij de oogst op 01-05-2023.

Bij de oogst is de bovengrondse biomassa bepaald per pot. De potten zijn verdeeld (gezaagd) in 10 cm dikke lagen. Per laag zijn per pot de volgende wortelgegevens verzameld:

- gemiddelde worteldiameter D_r (cm)
- totale wortellengte L_r (cm)
- totale wortellengte van dunne wortels met een diameter ≤ 0.2 mm
- totale wortellengte van dikke wortels met een diameter > 0.2 mm

De wortellengte L_r is omgerekend naar wortellengtedichtheid L_{rv} : $L_{rv} = L_r / V$, waarin V het bodemvolume van het deelcompartiment is: $V = h\pi r^2$, waarin h de hoogte is van het deelcompartiment ($h = 10$ cm) en r de straal van de ring ($r = 9.5$ cm): $V = 2835.3$ cm³.

A2.2.6 Sensoren

In de kolommen en in de vier bakken zijn op verschillende posities watergehalte- of drukhoogtesensoren geplaatst (Tabel 3). Deze werden via dataloggers regelmatig uitgelezen en digitaal opgeslagen. Hiermee zijn de vochtcondities als functie van de tijd te volgen.

Tabel 3 Positie van geïnstalleerde sensoren ($z = 0$ aan bovenzijde kolom; z positief naar beneden).

	Kolom S0-S4	Kolom S3	Brekerzand [#]	Blokzijlzand [#]
Polymeertensiometer		$z = 25$ cm		
Tensiometer			$z = 77$ cm [@]	$z = 92$ cm [@]
Watergehaltemeter (TDR)	$z = 45$ cm		$z = 77$ cm [§]	$z = 92$ cm [@]

[#]: sensoren in duplo; [@]: alleen in bakken 1 en 4; [§]: in alle vier bakken

A2.2.7 Kasklimaat

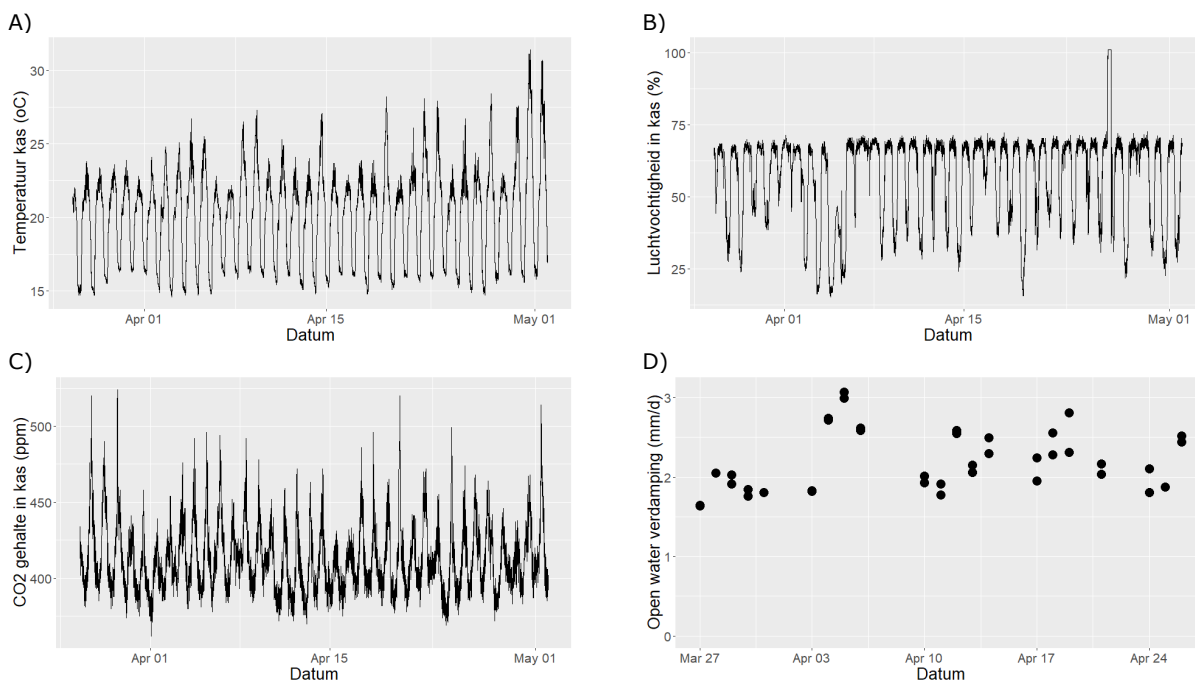
Het kasklimaat werd automatisch geregeld. Er werd assimilatiebelichting toegepast: bij aanvang van 04:00 – 20:00 en aan het eind van 05:00 – 21:00; gradueel verlopend tussendoor. De gemeten kasttemperatuur, luchtvochtigheid en CO₂ concentratie in de kas zijn weergegeven in Figuur 4.

Er waren ook twee bakken met water in de kas aanwezig. Via gewichtsverlies van deze bakken werd een inschatting verkregen van de verdampingsvraag. Drie van de extra kolommen (zie sectie 'Extra kolommen') werden gebruikt om de werkelijke transpiratie te schatten via gewichtsverlies hele kolom gecorrigeerd voor toename van biomassa. Hieruit volgde een gemiddelde transpiratie voor meerdere dagen:

- Periode 24-03-2023 tot 31-03-2023: 0.5 mm d⁻¹
- Periode 31-03-2023 tot 06-04-2023: 0.7 mm d⁻¹
- Periode 06-04-2023 tot 13-04-2023: 1.4 mm d⁻¹

² Volgens Van den Akker et al. (2021) is bodemverdichting een belangrijke oorzaak van opbrengstdervingen bij continue maisteelt. Vandaar dat in BOVER in de veld- en kasproef voor mais is gekozen.

Deze waarden zijn duidelijk lager dan de gemiddelde open-water verdamping van 2.2 mm d^{-1} (Figuur 4d; Tabel 4). Omdat hier sprake is van zeer jonge plantjes met een klein oppervlak mag verwacht worden dat deze niet gelijk hoeven te verdampen als open water.



Figuur 4 Gemeten kasklimaat variabelen tijdens de kasproef: a) luchttemperatuur, b) luchtvochtigheid, c) CO_2 concentratie, d) open water verdamping.

Tabel 4 Gemeten open water verdamping in twee bakken (pan) en hun gemiddelde voor de genoemde periodes.

Datum	Pan 1 (mm d^{-1})	Pan 2 (mm d^{-1})	Gemiddeld (mm d^{-1})
24-03-2023	-	-	-
27-03-2023	1.6	1.6	1.6
28-03-2023	2.1	2.1	2.1
29-03-2023	2.0	1.9	2.0
30-03-2023	1.8	1.8	1.8
31-03-2023	1.8	1.8	1.8
03-04-2023	1.8	1.8	1.8
04-04-2023	2.7	2.7	2.7
05-04-2023	3.1	3.0	3.0
06-04-2023	2.6	2.6	2.6
10-04-2023	2.0	1.9	2.0
11-04-2023	1.8	1.9	1.8
12-04-2023	2.6	2.6	2.6
13-04-2023	2.1	2.1	2.1
14-04-2023	2.3	2.5	2.4
17-04-2023	2.0	2.2	2.1
18-04-2023	2.3	2.6	2.4
19-04-2023	2.3	2.8	2.6
21-04-2023	2.0	2.2	2.1
24-04-2023	1.8	2.1	2.0
25-04-2023	1.9	1.9	1.9
26-04-2023	2.4	2.5	2.5
Totaal (mm)	44.9	46.8	45.8
Gemiddeld (mm d^{-1})	2.1	2.2	2.2

A2.2.8 Statistische analyse

Voor de bovengrondse biomassa, worteldiameter en wortellengte zijn de metingen van alle potten statistisch geanalyseerd via een variantieanalyse (anova) met pakket 'aov' in R (R Core Team, 2023). Hierbij zijn de vier bakken als blokken beschouwd, omdat elke bak afzonderlijk werd geregeld wat betreft regeling onderrandvoorwaarden voor de potten. Het gebruikte model is dan gegeven als: model = Block + Treatment * Layer, waarbij Block staat voor bak (bak 1 – bak 4), Treatment voor de S0-S4 behandelingen, en Layer voor de bemonsterd bodemlagen (1 – 7). Layer is niet gebruikt bij de analyse van de bovengrondse groei.

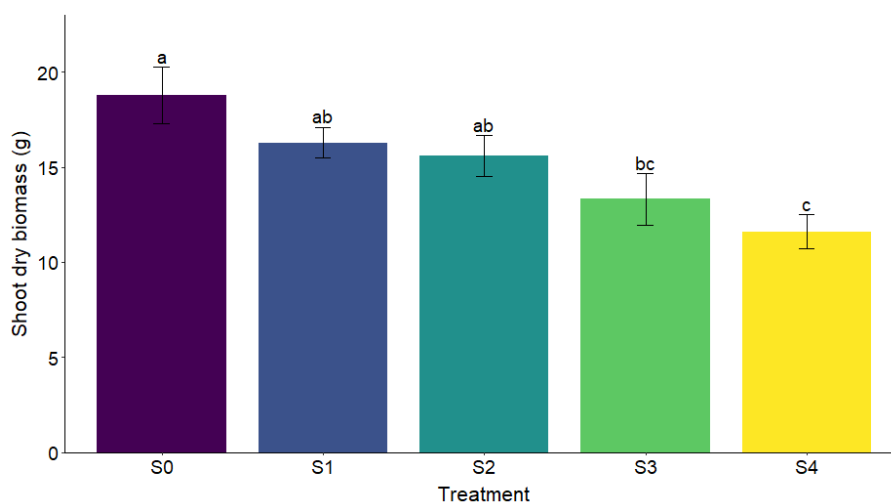
A2.3 Resultaten en Discussie

In deze sectie worden eerst de resultaten voor bovengrondse groei en beworteling besproken. Daarna volgen de resultaten van de gemeten vochtcondities.

A2.3.1 Bovengrondse groei

In het MSc rapport van Shan (2023) zijn de volgende conclusies gegeven voor de bovengrondse groei als functie van de behandelingen. *"Toenemende verdichtingsniveaus van de ondergrond (toegepast op de ondergrondlaag op 30-40 cm diepte) verminderden geleidelijk de bladverschijningsnelheid (LAR, °Cd) in vergelijking met de controleplanten.... Het effect op LAR was significant wanneer de krachten groter waren dan 200 kPa. Over het algemeen vertoonden het fotosynthetisch bladoppervlak en de hoogte van de planten dezelfde dalende trend met toenemende verdichtingsniveaus nadat de wortels werden blootgesteld aan verdichtingslagen. Het significante effect van verdichting werd eerder aangetoond in termen van fotosynthetisch bladoppervlak (na 200 °Cd) dan planthoogte (na 300 °Cd). Hoewel er een algemene dalende trend werd waargenomen, waren de drukkrachten groter dan 300 kPa schadelijk, aangezien de droge stof van de scheuten significant lager was dan bij de controleplanten. Deze resultaten gaven aan dat de ondergrondverdichtingsbelastingen hoger dan 300 kPa op een diepte van 30-40 cm de scheutgroei tijdens de vegetatieve fase beperkten, waardoor de maïsofbrengst mogelijk daalde. Samengevat heeft ondergrondverdichting door herhaalde zware mechanische krachten een negatieve invloed op de bovengrondse architectuur van maïs tijdens de vegetatieve groei."*

In Figuur 5 is het effect van de behandelingen op de drogestofopbrengsten van de bovengrondse scheuten getoond, en Tabel 5 toont de uitkomsten van de anova analyse. Er was geen significant blok-effect, maar wel een significant ($p < 0.05$) effect als gevolg van de behandelingen, waarbij S3 en S4 significant een lagere opbrengst hebben dan de referentiebehandeling S0.



Figuur 5 Significant effect van verdichting op de droge stof (g) van de scheuten bij de oogst ($p < 0.01$). Foutbalken verwijzen naar de standaardfout van het gemiddelde. Letters geven LSD resultaten weer, behandelingen aangeduid met dezelfde letters zijn niet significant verschillend bij een betrouwbaarheidsinterval van 95% (bron: Shan, 2023).

Tabel 5 Anova uitkomsten voor bovengrondse biomassa als functie van de blokken en van de behandelingen S0-S4 (treatments) volgens 'aov' in R (R Core Team, 2023).

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)			
block	3	2.50	0.834	0.130	0.9403			
treatments	4	121.44	30.361	4.739	0.0159 *			
Residuals	12	76.88	6.407					

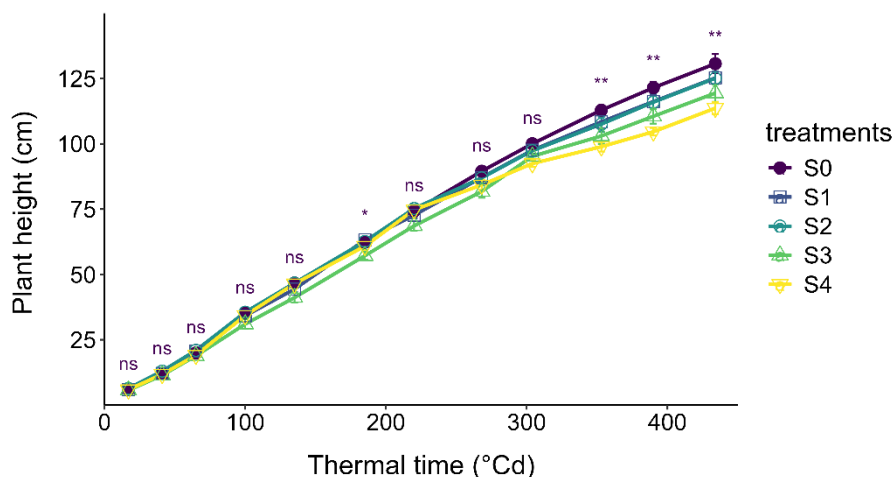
Signif. codes:	0	****	0.001	***	0.01 **	0.05 .	0.1 '	1

Op basis van waarnemingen in potten die buiten de proefopzet waren geplaatst is via tussentijdse waarnemingen een indruk verkregen in de groeisnelheid van bovengrondse biomassa en van bewortelingsdiepte (Tabel 6).

Tabel 6 Verloop van bovengrondse biomassa en bewortelingsdiepte als functie van de tijd zoals waargenomen in de extra kolommen.

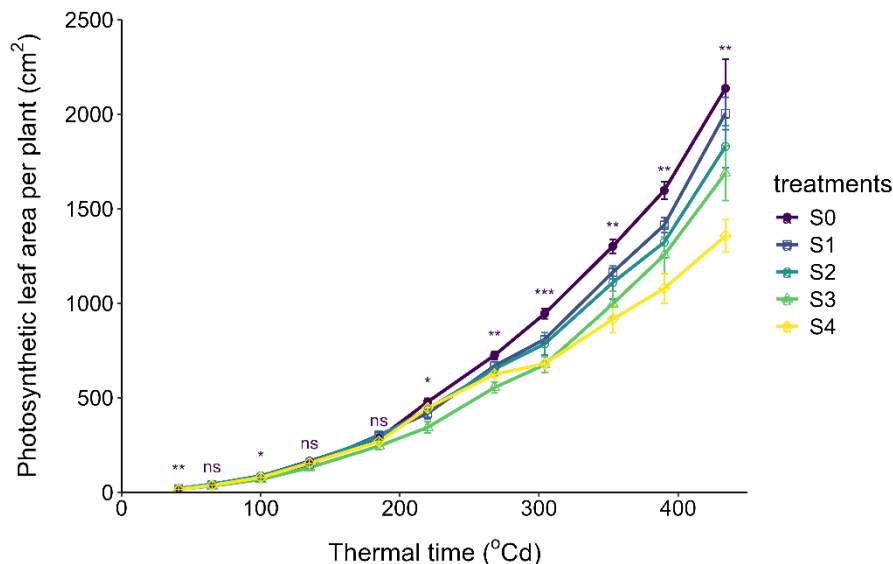
Datum	Dagen na opkomst (d)	Bovengrondse biomassa (g)	Diepte onderste wortel (cm)
27-03-2023	0	1.2	3.0
03-04-2023	7	2.4	14.5
10-04-2023	14	8.9	22.0
17-04-2023	21	13.1	34.5
24-04-2023	28	14.1	48.0
01-05-2023	35	17.2	> 50.0

Shan (2023) geeft ook de gewasontwikkeling, in termen van gewashoogte en fotosynthetisch bladoppervlak, als functie van de thermische tijd³ (Figuur 6, Figuur 7). In het tweede deel van de groeiperiode zijn duidelijk significante verschillen waarneembaar.



Figuur 6 Planthoogte als functie van de thermische tijd voor de vijf behandelingen. Per tijdstip is aangegeven of de verschillen significant zijn (ns: niet significant; *: $p < 0.05$; **: $p < 0.01$) (bron: Shan, 2023).

³ De thermische tijd is het gesommeerde product van kasttemperatuur boven een vaste drempelwaarde van 8 °C en de tijd (in dagen): °Cd



Figuur 7 Fotosynthetisch bladoppervlak als functie van de thermische tijd voor de vijf behandelingen. Per tijdstip is aangegeven of de verschillen significant zijn (ns: niet significant; *: $p < 0.05$; **: $p < 0.01$). De data van het laatste meetmoment zijn verkregen via directe scanning van het blad, de overige data zijn schattingen (bron: Shan, 2023).

A2.3.2 Beworteling

A2.3.2.1 Worteldiameter

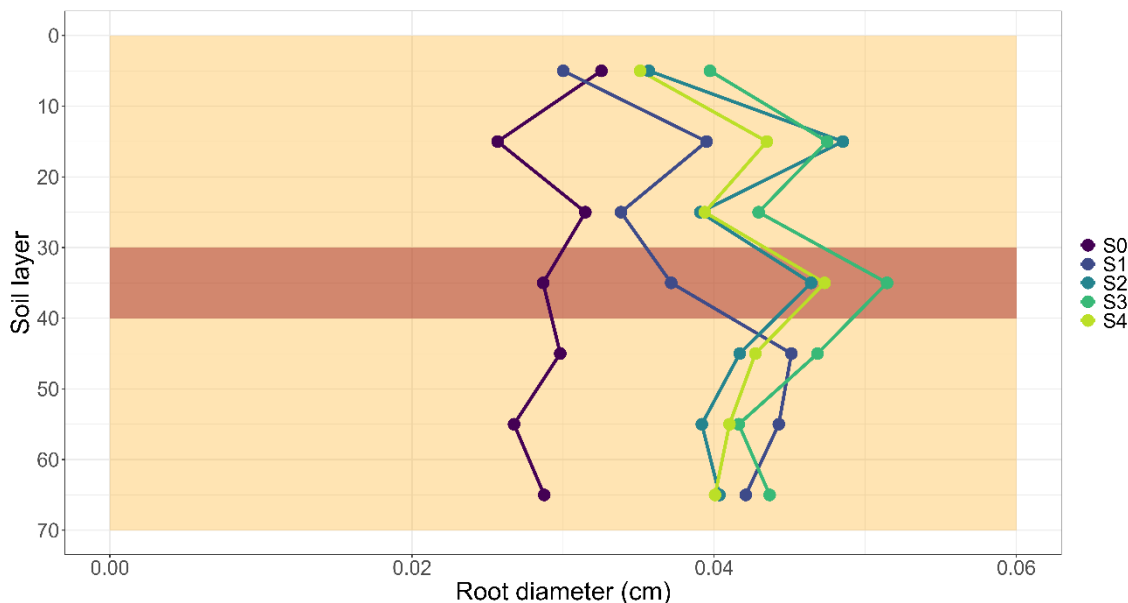
Er was geen significant blok-effect, maar wel een significant effect van de behandelingen en diepte en hun interactie op de worteldiameter ($p < 0.01$; Tabel 7). In behandeling S0 was de diameter (gemiddeld over de herhalingen) duidelijk veel geringer dan in de overige behandelingen op vrijwel alle dieptes (Figuur 8). Er was geen duidelijke (visuele) trend aanwezig waarbij de gemiddelde diameter toeneemt bij toenemende dichtheid.

Vaak wordt in gepubliceerde studies in de verdichte laag een hogere diameter waargenomen (zie Bakema et al., 2022, hoofdstuk 4; inleiding in Meulenberg, 2023). Ook hier worden daar relatief dikke wortels aangetroffen, maar ook boven en onder de verdichte laag zijn de diameters groter dan in de referentiebehandeling. Dikkere wortels zijn gunstig om door een verdichte laag heen te kunnen dringen. Onder de verdichte laag neemt de diameter weer af als functie van de diepte. Dat betekent dat de wortels in staat zijn om in de daaronder gelegen niet-verdichte laag weer terug te keren naar de dunnere wortels. Dit wordt vaak aangeduid als de plasticiteit van de wortels. Echter, de waarden in de behandelingen S1-S4 blijven overal hoger dan die voor S0.

Tabel 7 Anova uitkomsten voor worteldiameter D_r als functie van de blokken, van de behandelingen S0-S4 (Treatment) en bodemlagen (0-70 in 7 lagen van 10 cm; Layer) volgens 'aov' in R (R Core Team, 2023).

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)						
Block	3	0.000075	0.0000250	1.074	0.3634						
Treatment	4	0.004024	0.0010059	43.236	< 2e-16 ***						
Layer	6	0.000821	0.0001369	5.884	2.66e-05 ***						
Treatment:Layer	24	0.001275	0.0000531	2.283	0.0023 **						
Residuals	102	0.002373	0.0000233								

Signif. codes:	0	****	0.001	***	0.01	**	0.05	.	0.1	'	1



Figuur 8 Gemiddelde worteldiameter als functie van de diepte per behandeling. De donkere horizontale band geeft de positie van de verdichte laag weer in behandelingen S1-S4.

Het is onbekend waarom in de bovenlaag de wortels in de behandelingen S1-S4 dikker zijn dan die in de referentiesituatie. Voor zover bekend zijn maiswortels niet in staat om reeds aanwezige wortels dikker te laten worden (Hannah Schneider, persoonlijke mededeling). Het is dus onduidelijk waarom de initieel gevormde wortels al een grotere diameter hebben.

Duruhoa et al. (2007) hebben een enigszins vergelijkbare proefopzet gebruikt zoals in deze studie: potten met een diameter van 10 cm en 40 cm hoog waarin mais werd geteeld in een kas. Hierin was de laag 20-30 cm verdicht (drie dichtheden: 1200, 1400, 1600 kg m⁻³) ten opzichte van de lagen erboven en eronder. Het watergeefregime was anders dan in deze studie: het watergehalte in de potten werd op 70% of 90% van veldcapaciteit gehouden, zodat de omstandigheden natter waren dan in onderhavige studie. Zij vonden geen overduidelijke effecten van de verdichte tussenlaag op de gemeten wortel diameters.

Konôpka et al. (2009) bestudeerden de wortelmorfologie in potten gevuld met fijn zand en grote aggregaten met verschillende dichtheden (ranges 1450-1610 en 1630-1790 kg m⁻³). Wortels die in de aggregaten waren doorgedrongen hadden grotere diameters, maar wanneer de wortels weer uit de aggregaten het fijne zand ingroeiden dan nam de diameter weer af (plasticiteit). Dat is vergelijkbaar met de waarnemingen in deze studie enigszins zichtbaar (Figuur 8).

Popova et al. (2016) rapporteerden dat de worteldiameter van mais met ongeveer 5% toenam bij een verandering van de droge bulkdichtheid van 1500 naar 1700 kg m⁻³.

Rosolem et al. (2002) gebruikten kolommen met verdichte tussenlagen (3.5 dikke verdichte laag) met dichtheden van 1310, 1430, 1580 en 1700 kg m⁻³; de boven- en onderlagen met dichtheid 1250 kg m⁻³. Zij vonden geen verschillen in worteldiameter en drogestofproductie van wortels en scheut voor gewassen *Crotalaria juncea* (Indian hemp), *Crotalaria spectabilis* (showy crotalaria), *Helianthus annuus* (sunflower), *Pennisetum americanum* (pearl millet) en *Sorghum bicolor* (guinea sorghum). Zij stelden dat geen effecten werden waargenomen omdat de mechanische weerstand in alle potten en alle bodemlagen relatief gering was (< 1.34 MPa), en dat de vocht- en nutriëntenbeschikbaarheid overal voldoende was.

A2.3.2.2 Totale wortellengtedichtheid

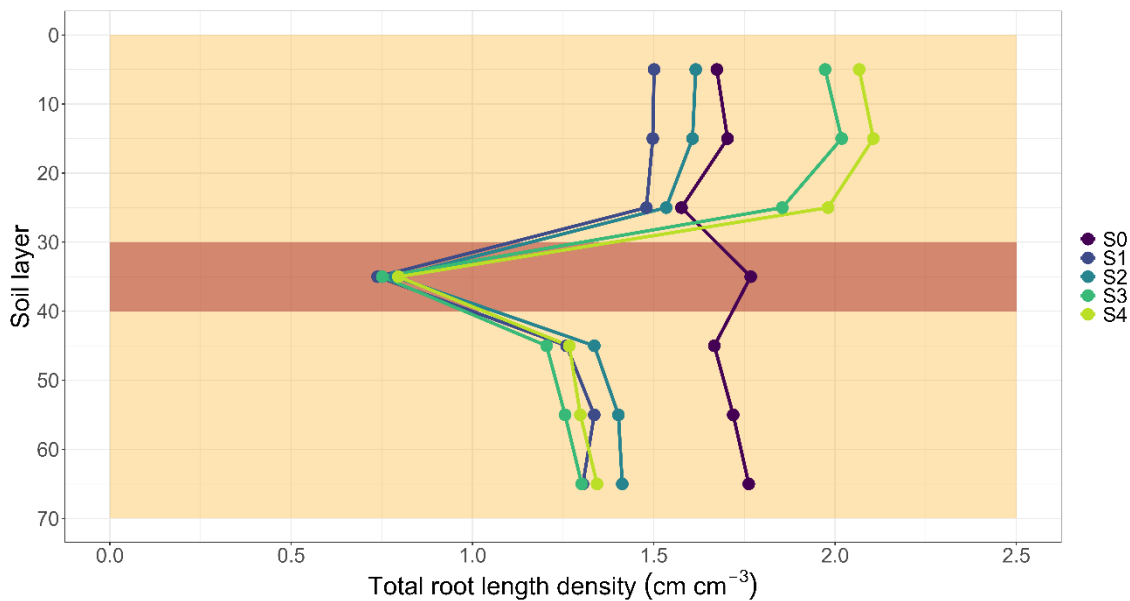
Voor wortellengte werd een significant block-effect waargenomen, waarbij de totale lengte in de vijf potten op bak 1 significant hoger was dan die in de potten op de andere drie bakken.

Er was een significant ($p < 0.01$) effect van behandeling op de totale wortellengte L_r en wortellengtedichtheid L_{rv} en een hoog-significant ($p < 0.001$) effect van de diepte op L_r en L_{rv} (Tabel 8); er was geen significante interactie Treatment:Layer. De L_{rv} voor de referentiebehandeling S0 is vrij constant met de diepte (Figuur 9). De behandelingen S1-S4 hebben een overduidelijk lagere vrijwel identieke waarde voor L_r en L_{rv} in de verdichte laag (30-40 cm) (Figuur 9; Figuur 10). Onder de verdichte laag is L_{rv} voor de vier behandelingen S1-S4 vrijwel hetzelfde en groter dan de waarde in de verdichte laag, maar geringer dan voor S0 (Figuur 9). Boven de verdichte laag hebben behandelingen S1 en S2 een iets lagere L_{rv} waarde dan bij S0, en hebben S3 en S4 een iets hogere waarde dan bij S0.

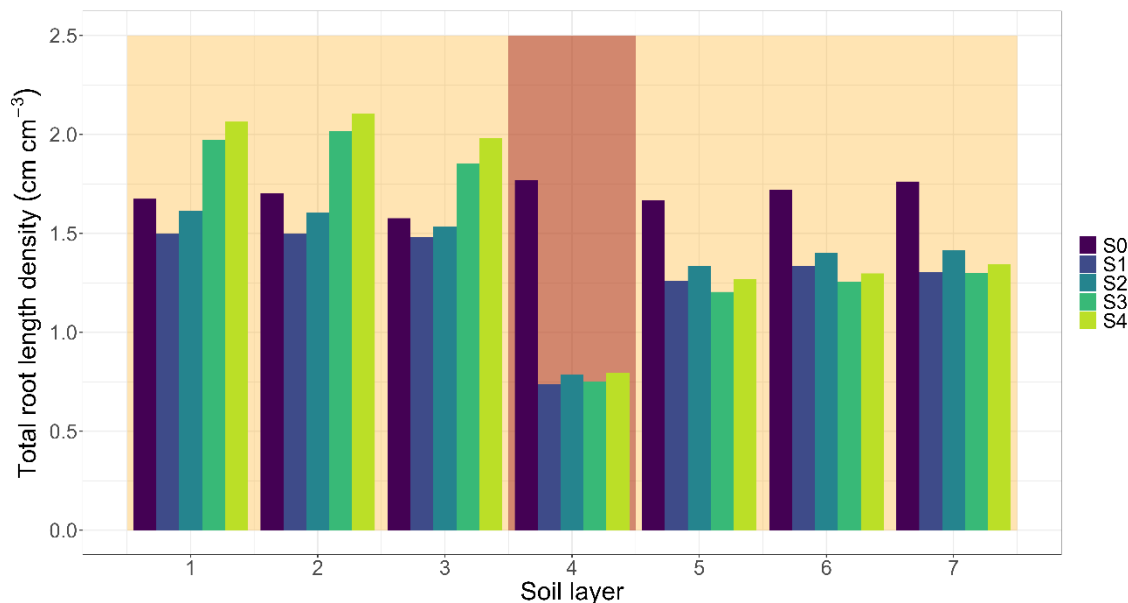
Tabel 8 Anova uitkomsten voor totale wortellengte L_r als functie van de blokken, van de behandelingen S0-S4 (Treatment) en bodemlagen (0-70 in 7 lagen van 10 cm; Layer) volgens 'aov' in R (R Core Team, 2023).

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
Block	3	20672403	6890801	4.770	0.00375	**
Treatment	4	20727883	5181971	3.587	0.00886	**
Layer	6	81474066	13579011	9.400	3.34e-08	***
Treatment:Layer	24	41366798	1723617	1.193	0.26627	
Residuals	102	147341222	1444522			

Signif. codes:	0	****	0.001	***	0.01	**
				0.05	.	0.1
					'	1



Figuur 9 Gemiddelde wortellengtedichtheid als functie van de diepte per behandeling. De donkere horizontale band geeft de positie van de verdichte laag weer in behandelingen S1-S4.



Figuur 10 Gemiddelde wortellengtedichtheid per bodemlaag van 10 cm per behandeling (laag 4 is de verdichte laag).

Duruhoa et al. (2007) hebben een enigszins vergelijkbare proefopzet gebruikt zoals in deze studie: potten met een diameter van 10 cm en 40 cm hoog waarin mais werd geteeld in een kas. Hierin was de laag 20-30 cm verdicht (drie dichtheden: 1200, 1400, 1600 kg m⁻³) ten opzichte van de lagen erboven en eronder. Het watergeefregime was anders dan in deze studie. Zij vonden ook lagere L_{rv} waarden in de verdichte laag (in de range 0.71 – 0.81 cm cm⁻³) dan in de lagen erboven (1.37 – 3.16 cm cm⁻³) en eronder (3.13 – 4.24 cm cm⁻³). Boven de verdichte laag werd waargenomen dat L_{rv} significant lager was bij hogere dichtheden van de tussenlaag. Onder de verdichte laag was L_{rv} het hoogst en onafhankelijk van de mate van verdichting van de tussenlaag.

Wanneer wortels door de verdichte laag zijn heengedrongen dan bleek zowel in deze studie als in die van Duruhoa et al. (2007) dat in de laag daaronder de L_{rv} weer toenam. Dat is in lijn met Kirkegaard et al. (1992) die stelden dat de reductie in L_{rv} in de verdichte laag kan worden gecompenseerd door wortelgroei in de niet-verdichte lagen. Anders dan wat Kirkegaard et al. (1992) stelden is in deze studie wel waargenomen dat de aanwezigheid van de verdichte laag leidt tot een verandering in totale wortellengte en bovengrondse groei.

Zhang et al. (2012) hebben L_{rv} gemeten onder veldomstandigheden. In de laag 20-40 cm, waar de droge bulkdichtheid het hoogste was (in 0-200 cm), werd regelmatig (drie jaar: 2008-2010, twee gewassen: wintergraan, mais) lokaal een lagere L_{rv} aangetroffen op één van de twee proeflocaties. In een potexperiment met een homogeen profiel werd voor wintergraan een vrij uniforme L_{rv} als functie van de diepte gemeten.

De Moraes et al. (2019) vergeleken $L_{rv}(z)$ gemeten in vier grondbewerking plots. De plot met minimale oppervlakkig grondbewerking had een duidelijk meer verdichte laag op diepte 21-30 cm ten opzichte van daarboven en daaronder. Echter, hier werd geen verlaagde L_{rv} waargenomen. De droge bulkdichtheid van die laag van 1270 kg m⁻³ (lager dan de behandelingen in deze studie) was blijkbaar niet beperkend.

Veel van de in de literatuur gerapporteerde L_{rv} metingen betreffen metingen onder veldomstandigheden en vaak met als doel verschillen tussen grondbewerking in beeld te krijgen. Hierbij kan het voorkomen dat de omstandigheden in de laag boven een eventueel verdichte laag niet altijd ongunstig hoeven zijn geweest; denk aan waterbeschikbaarheid via regenval. Daarnaast zijn niet altijd hele duidelijke verschillen in droge bulkdichtheid in de veldproeven waargenomen. Dat alles maakt het moeilijk om onze resultaten rechtstreeks te koppelen aan en te vergelijken met literatuurdatta.

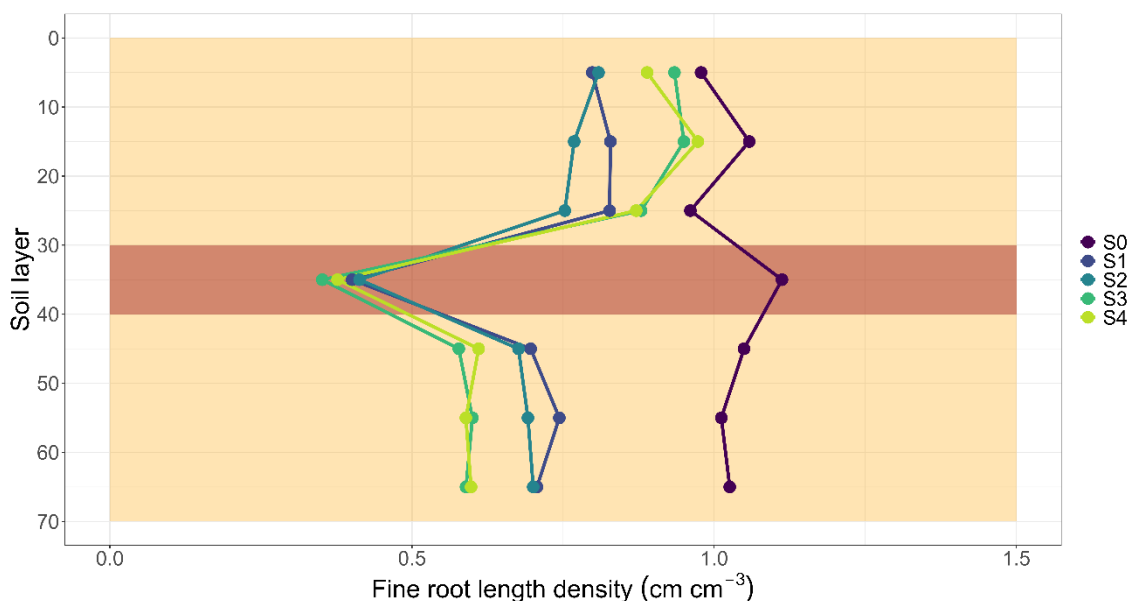
A2.3.2.3 Totale wortellengtedichtheid dunne wortels

Voor de dunne wortels (diameter ≤ 0.2 mm) is een significant blokeffect, behandelingseffect en diepte-effect verkregen (Tabel 9; Figuur 11). De L_{rv} voor dunne wortels is voor de behandelingen S1-S4 steeds kleiner dan voor de referentiebehandeling S0. Bovenin is L_{rv} voor behandelingen S1 en S2 kleiner dan die voor S3 en S4, en onderin is dat omgekeerd. In de verdichte laag is voor behandelingen S-S4 de waarde voor L_{rv} vrijwel gelijk.

Tabel 9 Anova uitkomsten voor totale wortellengte L_r voor dunne wortels als functie van de blokken, de behandelingen S0-S4 (Treatment) en bodemlagen (0-70 in 7 lagen van 10 cm; Layer) volgens 'aov' in R (R Core Team, 2023).

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Block	3	3989435	1329812	3.271	0.0243 *
Treatment	4	19453819	4863455	11.962	5.22e-08 ***
Layer	6	16837904	2806317	6.902	3.58e-06 ***
Treatment:Layer	24	9920946	413373	1.017	0.4531
Residuals	102	41470340	406572		

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1



Figuur 11 Gemiddelde wortellengtedichtheid voor klasse dunne wortels als functie van de diepte per behandeling. De donkere horizontale band geeft de positie van de verdichte laag weer in behandelingen S1-S4.

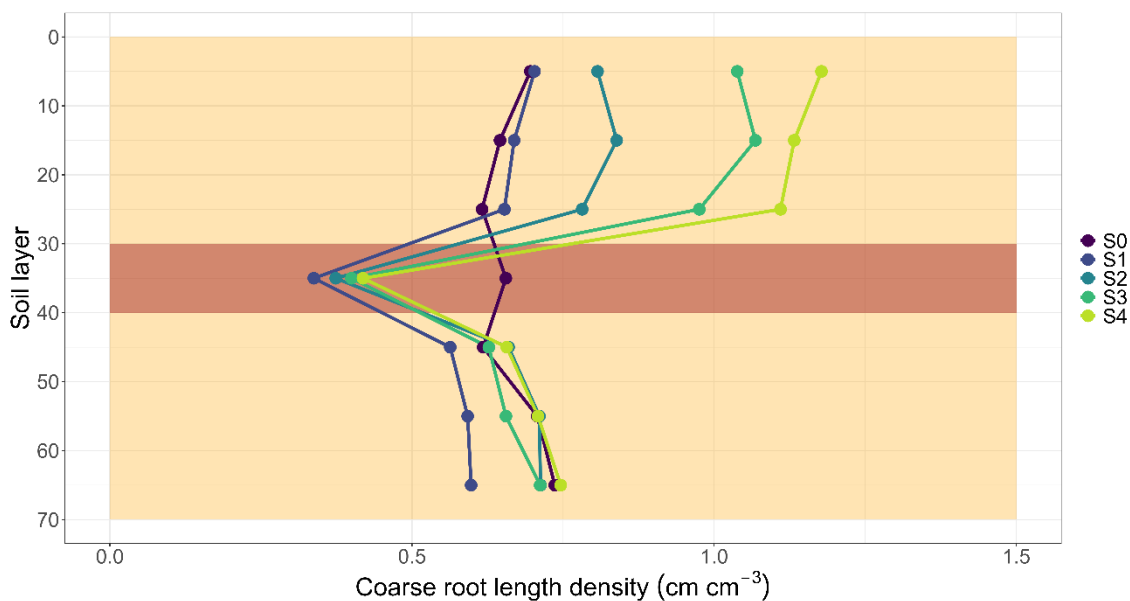
A2.3.2.4 Totale wortellengtedichtheid dikke wortels

Voor de dikke wortels (diameter > 0.2 mm) is een significant blokeffect, behandelingseffect en diepte-effect verkregen (Tabel 10; Figuur 12). In de verdichte laag is voor behandelingen S1-S4 de waarde voor L_{rv} vrijwel gelijk en duidelijk kleiner dan die voor de referentiebehandeling S0. Bovenin is een trend zichtbaar dat L_{rv} toeneemt met de behandeling van S0 naar S4. Onder de verdichte laag worden vrijwel gelijke waarden voor L_{rv} voor dikke wortels waargenomen.

Tabel 10 Anova uitkomsten voor totale wortellengte L_r voor dikke wortels als functie van de blokken, van de behandelingen S0-S4 (Treatment) en bodemlagen (0-70 in 7 lagen van 10 cm; Layer) volgens 'aov' in R (R Core Team, 2023).

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
Block	3	6557942	2185981	5.444	0.00164	**
Treatment	4	9322831	2330708	5.805	0.00030	***
Layer	6	24541454	4090242	10.187	8.22e-09	***
Treatment:Layer	24	11808948	492039	1.225	0.23882	
Residuals	102	40953610	401506			

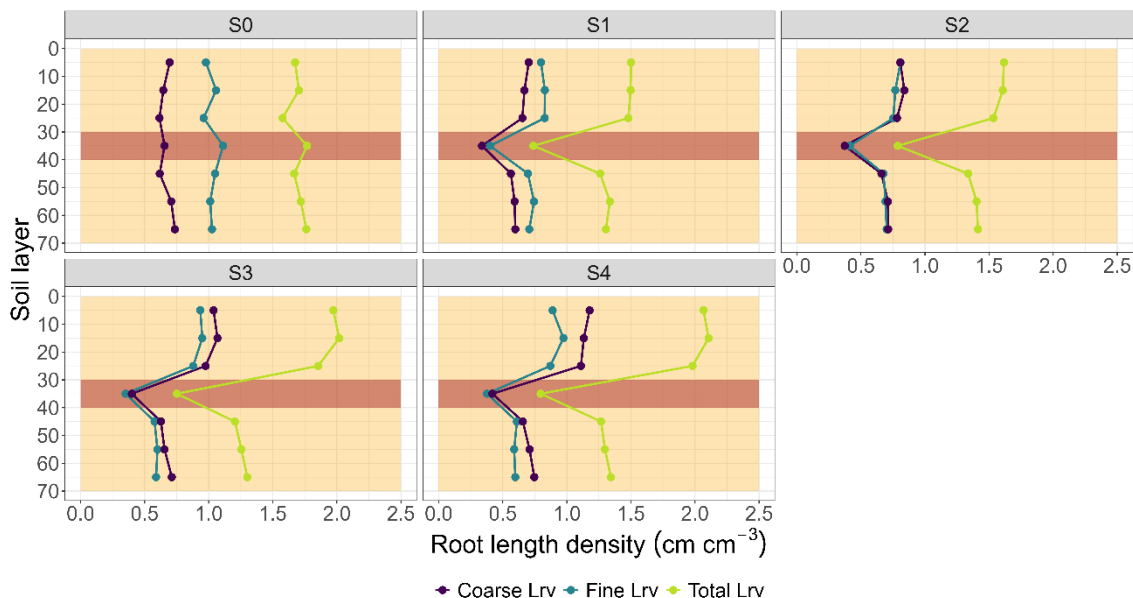
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1						



Figuur 12 Gemiddelde wortellengtedichtheid voor klasse dikke wortels als functie van de diepte per behandeling. De donkere horizontale band geeft de positie van de verdichte laag weer in behandelingen S1-S4.

A2.3.2.5 Totale wortellengtedichtheid: dunne en dikke wortels en totaal

Figuur 13 toont de diepte-profielen van L_{rv} voor de totale wortellengte en de wortellengte uitgesplitst naar dunne en dikke wortels voor de vijf afzonderlijke behandelingen S0-S4. Hierin valt te zien dat bij S0 er relatief meer dunne wortels zijn dan dikke wortels, en dat deze verhouding verandert in de reeks S1-S4, waarbij in S4 er relatief meer dikke wortels worden aangetroffen.



Figuur 13 Gemiddelde wortellengtedichtheid als functie van de diepte: totaal en uitgesplitst over de klassen dunne en dikke wortels. De donkere horizontale band geeft de positie van de verdichte laag weer in behandelingen S1-S4.

A2.3.2.6 Horizontale uniformiteit beworteling

Tijdens de bemonstering van de beworteling is ook visueel beoordeeld of de wortels homogeen zichtbaar waren aan de onderzijde van elke 10-cm laag (uitgezonderd de ondersta laag 60-70 cm). De visuele beoordeling bestond uit een cijfercode: 1 = uniform verdeeld over het gehele oppervlak en 5 = alle wortels aanwezig aan de buitenzijde van de ring. Van de in totaal 120 waarnemingen werd in 96 gevallen (80%) de score 1 toegekend en in 11 gevallen (9.2%) de score 2 (Tabel 11). Dus in bijna 90% van de gevallen werden de score 1 of 2 toegekend hetgeen duidt op een vrij uniforme verdeling van de beworteling. De hoogste scores (4, 5) werden voornamelijk waargenomen in behandeling S4 en op dieptes 20-30 (net boven de verdichte laag) en 30-40 (in de verdichte laag). Dat duidt er op dat de verdichting van behandeling S4 zodanig groot was dat de wortels eerst op zoek zijn gegaan naar de zijkant in plaats van proberen door de verdichte laag heen te groeien. Deze wortels zijn mogelijk ook tussen de wand van de ring en de verdichte laag naar onderen gegroeid. De wortels in de lagen onder de verdichte laag bij behandeling S4 waren weer redelijk uniform verdeeld (6 van de 8 scores waren gelijk aan 1).

Tabel 11 Score van uniformiteit van de wortelverdeling per laag: 1 = uniform verdeeld, 5 = wortels voornamelijk aan buitenkant kolom: aantal keer dat score voorkwam in de 120 waarnemingen en het percentage.

Score	Aantal (idem per behandeling S0 – S4)	Percentage
1	96 (24, 24, 21, 15, 21)	80
2	11 (0, 0, 3, 4, 4)	9.17
3	6 (0, 0, 0, 3, 3)	5
4	4 (0, 0, 0, 2, 2)	3.33
5	3 (0, 0, 0, 0, 3)	2.5

A2.3.2.7 Algemene discussie

Naast bovengenoemde effecten op worteldiameter en -lengte kan het effect van een verdichte laag op beworteling ook nog op andere manieren bestudeerd worden. Bijvoorbeeld, op basis van CT-scans lieten Burr-Hersey et al. (2017) zien dat de morfologie van de penwortel, zijwaartse wortelgroei en de hoek waaronder wortels groeien beïnvloed wordt wanneer de wortels een verdichte laag tegenkomen. Zij hanteerden een dichtheid van 1200 kg m⁻³ in de bovenste helft van bodemkolommen en 1400 kg m⁻³ in de

onderste helft. Zij onderzochten de gewassen radijs (*Raphanus sativus*), wikke (*Vicia Sativa*; vetch) en zwart haver (*Avena strigosa*).

In deze studie is getracht de plant te dwingen dieper te gaan wortelen omdat de bovenlaag sterk uitdroogt. In diverse andere studies in de literatuur waarin vergelijkbare proeven zijn gedaan werd de plant regelmatig voorzien van water. In dergelijke situaties is er mogelijk minder noodzaak voor de plant om dieper te gaan wortelen. Bovendien zal dan ook de verdichte laag relatief nat zijn, waardoor de indringingsweerstand van die laag niet erg hoog zal zijn. Zie Appendix 4 waarin wordt aangetoond dat de indringingsweerstand sterk afhankelijk is van het watergehalte.

A2.3.3 Verhouding wortel:scheut

Op basis van de gemeten wortellengte en worteldiameter kan het totale wortelvolumen worden berekend en hieruit kan de totale wortelmassa worden geschat. Voor dat laatste wordt aangenomen dat de dichtheid van verse wortels ongeveer gelijk is aan 1.0 g cm^{-3} en het drogestofgehalte gelijk is aan 0.1 g g^{-1} . Vervolgens kan dan de verhouding in drooggewicht wortel:scheut worden berekend (Tabel 12; Figuur 14). De verschillen zijn significant met $p < 0.001$ (geen blokeffect; Tabel 13).

De wortel:scheut verhoudingen zijn van dezelfde orde als de waarden gerapporteerd in bijv. Ordóñez et al. (2020). Volgens hun literatuurstudie is die range 0.02-0.40; waarvan twee studies in kasproeven met een range 0.06-0.25. Volgens Ordóñez et al. (2020) is de wortel:scheut verhouding in de beginfase van de plantontwikkeling hoger dan aan het eind van de groeiperiode.

Het is duidelijk dat de wortel:scheut verhouding toeneemt met toenemende dichtheid van de verdichte tussenlaag. Dat kan het gevolg zijn van het feit dat in de meest verdichte behandelingen er meer watertekorten zijn ondervonden. De plant gaat hier op reageren door meer assimilaten toe te kennen aan vorming wortels en minder aan bovengrondse organen.

De totale biomassa, wortelmassa + scheutmassa, vertoont een dalende trend voor de behandelingen S0 – S4, maar deze is niet significant ($p > 0.1$).

De overall gemiddelde verhouding wortellengte:wortelbiomassa, volgens de hierboven vermeldde omrekening, was 95.6 m g^{-1} . De Willigen en Van Noordwijk (1987) verzamelden gegevens hierover uit de literatuur en voor mais gaven zij een gemiddelde waarde van 101 m g^{-1} (range: 8-280 voor 13 studies). De hierboven gehanteerde omrekeningswijze levert dus een goede schatting voor het wortelgewicht.

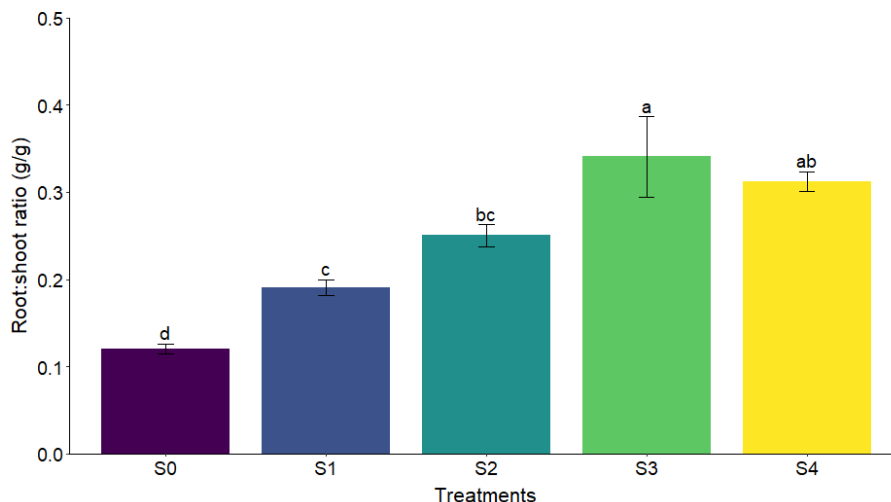
Tabel 12 Gemiddelden van berekende wortelbiomassa en gemeten scheutmassa per plant voor de vijf behandelingen en de wortel:scheut verhouding.

Behandeling	Wortelmassa droog (g)	Scheutmassa (g)	Wortel:scheut (g g^{-1})
S0	2.259	18.758	0.120
S1	3.088	16.278	0.191
S2	3.890	15.580	0.250
S3	4.403	13.310	0.341
S4	3.630	11.613	0.313

Tabel 13 Anova uitkomsten voor wortel:scheut verhouding als functie van de blokken en van de behandelingen S0-S4 (Treatment) volgens 'aov' in R (R Core Team, 2023).

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)						
block	3	0.00814	0.00271	1.484	0.269						
treatments	4	0.12895	0.03224	17.626	5.8e-05 ***						
Residuals	12	0.02195	0.00183								

Signif. codes:	0	****	0.001	***	0.01	**	0.05	.	0.1		1



Figuur 14 Wortel:scheut verhouding voor de vijf behandelingen: gemiddelden over alle herhalingen met standaardafwijking. Waarden aangeduid met verschillende letters zijn significant ($p = 0.05$) verschillend.

Steinwider (2022) rapporteerde effecten van verdichting in een potproef (potten zonder en met verdichte onderlaag: bovenlaag 0-25 cm, dichtheid 1350 kg m^{-3} ; onderlaag 25-47.5 cm, dichtheid 1350 of 1650 kg m^{-3}). Geen significante verschillen konden worden aangetoond in boven- en ondergrondse biomassa tussen de behandelingen (wel/niet verdicht). Wel werd een significant hogere wortelbiomassa bij sorghum waargenomen ten opzichte van de andere gewassen (mais, alfalfa (luzerne), radijs, witte mosterd, winterrogge, rode klaver). Over het algemeen was het effect op bovengrondse biomassa zeer gering, en werden grotere effecten op wortelbiomassa gezien. Winterrogge en rode klaver lieten een relatieve daling van wortelbiomassa zien, en voor de overige gewassen werd een relatieve stijging waargenomen. De potten werden regelmatig voorzien van water (100-600 mL per week) al naar gelang de behoefte van de plant. Anders dan in onderhavige studie zal er weinig of geen sprake van sterke uitdroging zijn geweest.

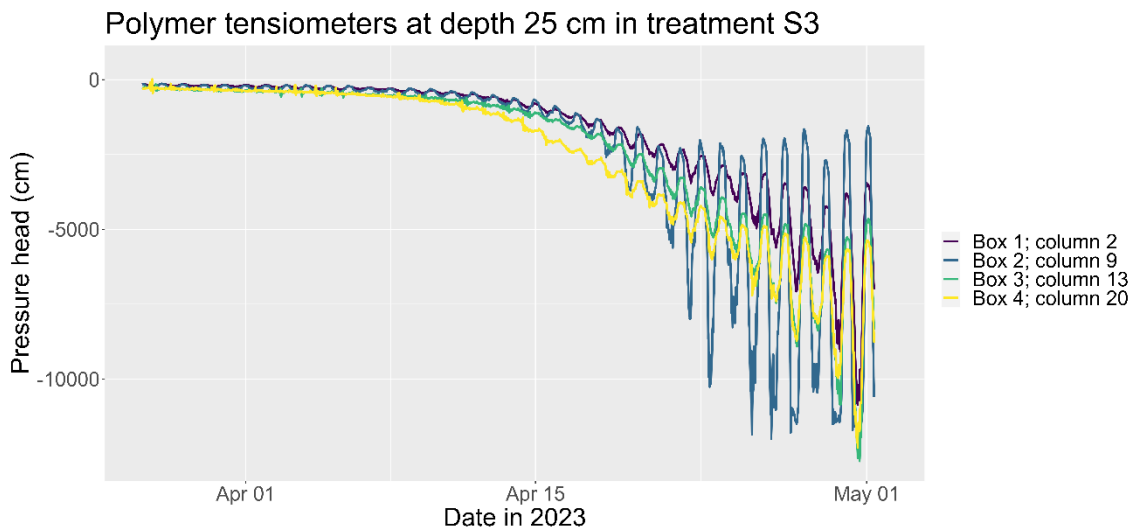
A2.3.4 Vochtcondities

De kolommen zijn gevuld met vooraf bevochtigd zand. Hierbij zijn de volgende initiële volumetrische watergehalte nagestreefd: $0.16 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ in laag 0-30 cm, en $0.10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ in lagen en 40-70 cm. Dat komt overeen met een initiële vochtvoorraad van 48, 10 en 30 mm voor de drie achtereenvolgende compartimenten in de kolom. Niet al dat water is beschikbaar voor opname door wortels. Op basis van de bijbehorende drukhoogtes leidt deze initiële verdeling automatisch tot herverdeling van water: bij hydrostatisch evenwicht zonder af- en aanvoer van water zal na herverdeling de waterhoeveelheden in de drie compartimenten gelijk zijn aan 38, 11 en 39 mm.

A2.3.4.1 Polymeertensiometers in S3

Vlak boven de verdichte laag in elk van de potten van behandeling S3 is de drukhoogte als functie van de tijd gemeten. Deze zijn getoond in Figuur 15. Er zijn slechts geringe verschillen waarneembaar tussen de vier

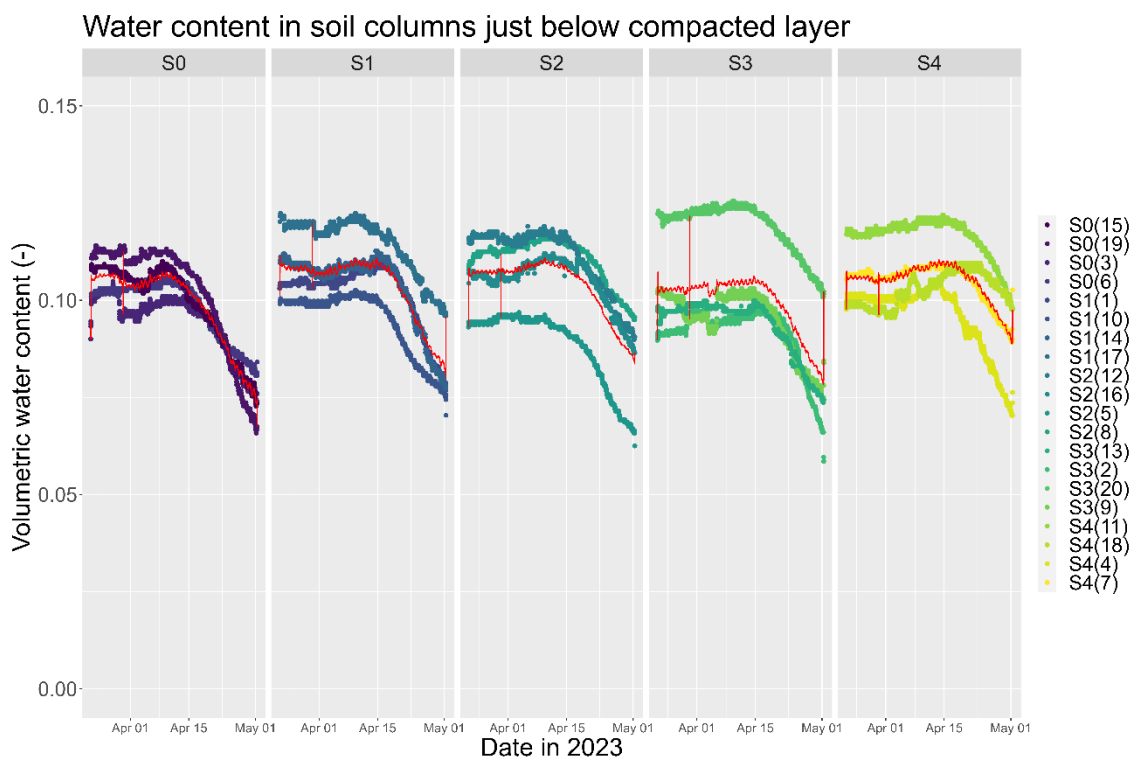
herhalingen; de dag-nacht ritmiek is een bekend fenomeen dat wordt toegeschreven aan de wateropname door het gewas tijdens de dag en herverdeling van water gedurende de nacht. Gedurende de eerste 2 à 3 weken (tot aan medio April) neemt de drukhoogte geleidelijk af tot ongeveer -1000 à -2000 cm. Na medio April zakt de drukhoogte vrij snel. Uit de waarnemingen van de 'extra kolommen' volgt dat de beworteling rond medio April de verdichte laag heeft bereikt en deels binnengedrongen (zie Tabel 6). Vanaf dat moment zien we de hele lage drukhoogtes ontstaan in de bovenste 30 cm. Het makkelijk beschikbare water in de laag 0-30 cm is dan verbruikt. En de plant kan alleen nog maar doorgroeien wanneer het in staat is dieper te wortelen. De vier herhalingen vertonen vergelijkbare patronen.



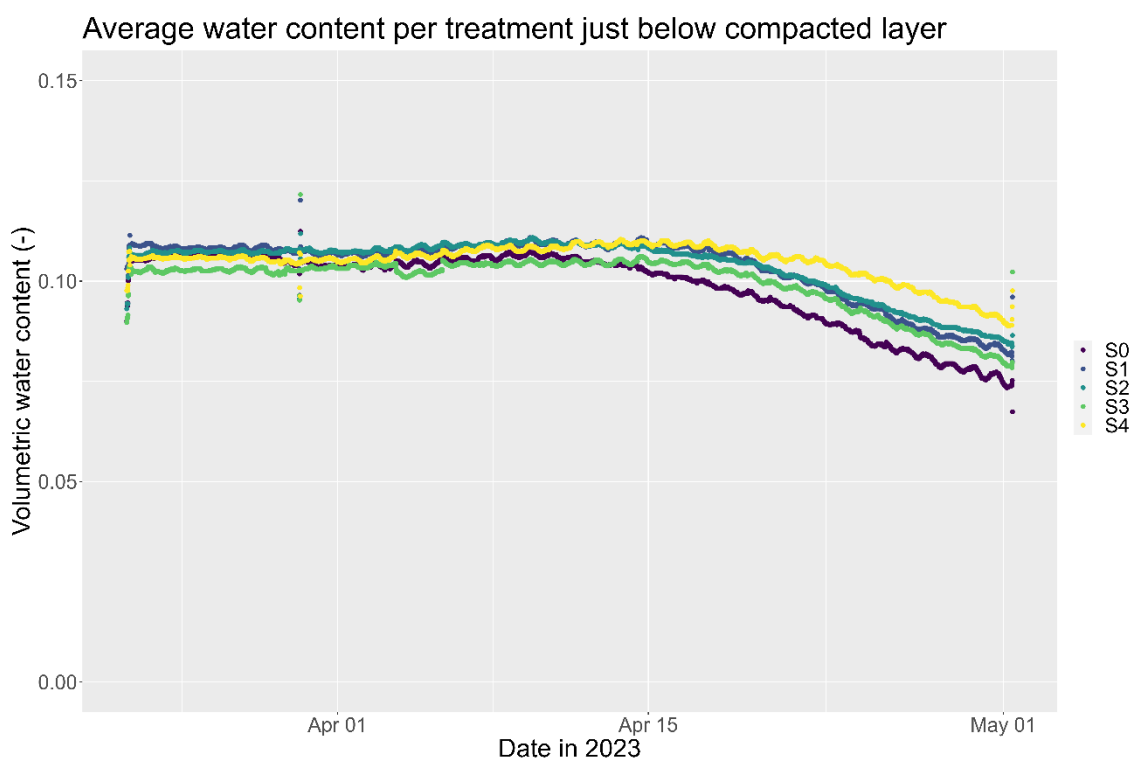
Figuur 15 Drukhoogte als functie van de tijd gemeten net boven de verdichte laag in behandeling S3 (4 kolommen).

A2.3.4.2 Tensiometers in alle potten

De watergevulde tensiometers net onder de verdichte laag in alle kolommen vertoonden een synchroon beeld (Figuur 16). Tot medio April bleef het watergehalte vrij constant. Na medio April, wanneer de eerste wortels door de verdichte laag heen komen, begint de wateronttrekking in de laag 40-70 cm. Dat leidt tot uitdroging, ondanks de wateraanvoer via de bakken (grofzand op Blokzijlzand). In Figuur 17 zijn de gemiddelde verlopen voor de vijf behandelingen uitgezet. De uitdroging aan het einde van de groeiperiode lijkt het grootste te zijn bij de referentiebehandeling (S0) en is over het algemeen minder naarmate de dichtheid van de verdichte laag groter is; behandeling S3 lijkt hierop een uitzondering, echter deze had ook al lagere watergehaltes gedurende de eerste helft van de groeiperiode.



Figuur 16 Watergehaltes als functie van de tijd gemeten net onder de verdichte laag ($z = -45$ cm) in alle kolommen van de vijf behandelingen; de rode lijn geeft het gemiddelde per behandeling.



Figuur 17 Gemiddelde watergehaltes als functie van de tijd gemeten net onder de verdichte laag ($z = -45$ cm) in de vijf behandelingen.

A2.3.4.3 Vochtdynamiek in de bakken

De zandbakken werden gebruikt om een randvoorwaarde op te leggen aan de onderzijde van de bodemkolommen. Ze bestonden uit een zeer fijne zandbodemplaat (Blokzijlzand) en een grove zandlaag aan de bovenkant. In beide zandlagen werden de drukhoogte (bakken 1 en 4; Figuur 18) en het volumetrisch

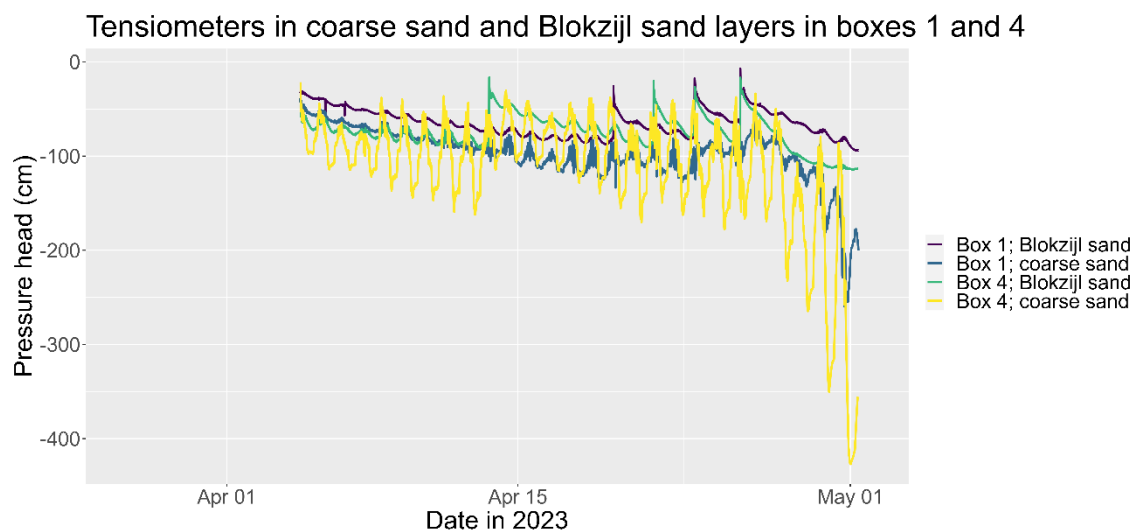
watergehalte (alle vier de bakken; Figuur 19) gemeten in duplo. Het idee was om constante randvoorwaarden te hebben voor alle bodemkolommen, d.w.z. constante condities in de zandlagen. Volgens de gegevens in Figuur 18 en Figuur 19 is dit niet helemaal gelukt. De stijghoogte in het Blokzijlzand werd geregeld via een hangend waterkolom. Omdat de drains niet altijd goed werkten (er kwam lucht in het systeem) nam de gemeten drukhoogte in het Blokzijlzand in de loop van de tijd iets af. Daarom is op sommige momenten manueel water via de drainbuis toegevoegd om de drukhoogte zo goed mogelijk constant te houden (Figuur 18). Deze momenten zijn te zien als pieken in de drukhoogte in met name het Blokzijlzand. Gemiddeld was de drukhoogte in het Blokzijlzand -65 cm (Box 1) en -74 cm (Box 4). Tabel 14 geeft enkele statistieken van de gemeten drukhoogtegegevens.

Gedurende een groot deel van de experimentele periode bleven de drukhoogtes in het grove zand op hetzelfde niveau. Aan het einde van het experiment zien we dat deze een dalende trend vertonen. Dit kan worden toegeschreven aan de wateropname door wortels omdat een deel van het wortelstelsel was doorgedrongen tot in de grove zandlaag.

Het fluctuerende patroon in de gemeten drukhoogtes is ofwel het gevolg van het effect van temperatuur of van hoge niveaus van opwaartse waterafgifte overdag en het herverdelingsproces 's nachts.

De gemeten watergehalten in het Blokzijlzand (bak 1 en 4) bleven redelijk constant (Figuur 19; Tabel 15). Aan het einde van het experiment vertoonde één van de TDR sensoren in bak 4 een zeer onregelmatig patroon. Deels zou dit te wijten kunnen zijn aan het fluctuerende patroon in de drukhoogte in dit vak.

De watergehalten in de grove zandlagen vertoonden nogal wat verschil tussen de herhalingen en tussen de vakken (Figuur 19; Tabel 16).



Figuur 18 Drukhoogte als functie van de tijd in Blokzijlzand en grofzand in de genoemde bakken (duplo metingen).

Tabel 14 Statistieken van de gemeten drukhoogtes in het Blokzijlzand en grof zand voor bakken 1 en 4.

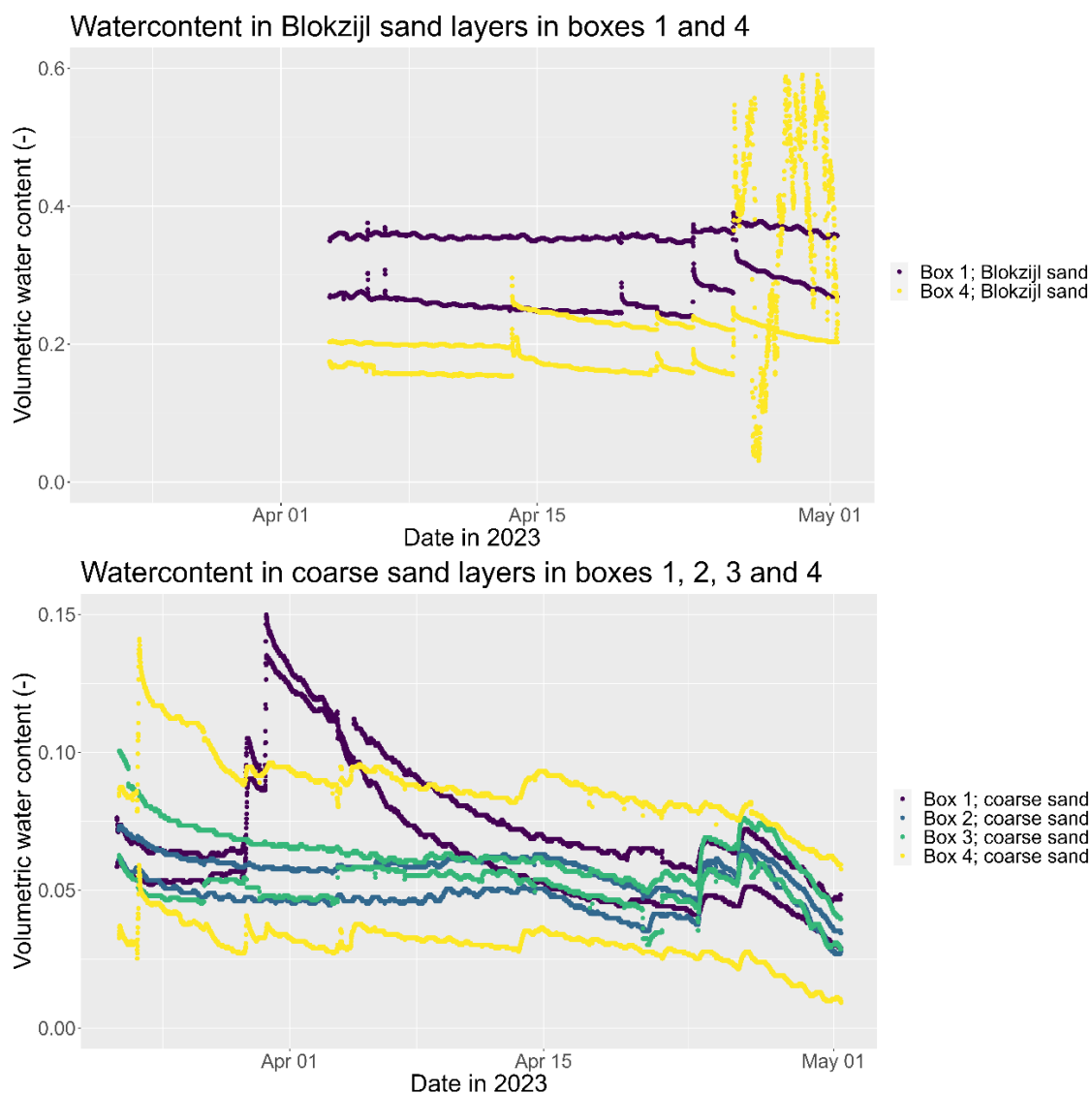
	Box 1 Blokzijlzand	Box 4 Blokzijlzand	Box 1 Grof zand	Box 4 Grof zand
Minimum (cm)	-94.1	-114.2	-259.8	-427.1
Maximum (cm)	-7.0	-16.3	-38.7	-21.4
Average (cm)	-64.7	-74.3	-97.3	-113.5
Standard deviation (cm)	14.4	17.8	29.1	64.6
Coefficient of variation (%)	22.2	23.9	29.9	56.9

Tabel 15 Statistieken van de gemeten watergehaltes in het Blokzijlzand voor bakken 1 en 4.

Blokzijlzand				
	Box 1		Box 4	
Min	0.348	0.240	0.031	0.195
Max	0.380	0.390	0.613	0.296
Avg	0.358	0.266	0.208	0.219
Sd	0.007	0.021	0.111	0.018
CV	2.0	8.0	53.4	8.1

Tabel 16 Statistieken van de gemeten watergehaltes in het grof zand voor bakken 1 – 4.

Grof zand								
	Box 1		Box 2		Box 3		Box 4	
Min	0.029	0.046	0.027	0.034	0.029	0.040	0.058	0.009
Max	0.135	0.150	0.073	0.067	0.063	0.100	0.141	0.059
Avg	0.063	0.077	0.057	0.048	0.050	0.064	0.087	0.030
Sd	0.024	0.022	0.007	0.006	0.007	0.009	0.012	0.007
CV	38.9	27.9	13.0	13.0	13.1	14.1	13.9	23.5



Figuur 19 Watergehaltes als functie van de tijd in Blokzijlzand (boven) en grof zand (onder) in de genoemde bakken (duplo metingen).

Het is moeilijk gebleken om de condities in de vier bakken met Blokzijlzand en grof zand enerzijds te conditioneren en anderzijds goed in onderlinge overeenstemming te verkrijgen⁴. Mogelijk is dat een van de redenen waarom uit de statistische analyses is gebleken dat er voor de wortellengtes een blok-effect is waargenomen.

A2.4 Conclusies

Hieronder volgen puntsgewijs de hoofdconclusies uit deze kasproef met maisplanten.

- De bovengrondse groei werd significant beïnvloed door de aanwezigheid van de verdichte tussenlaag in de huidige proefopzet. Dit was met name te zien aan het bladverschijningsnelheid en drogestofopbrengst, en in mindere mate aan de hoogte van de plant. Met name de groei bij de twee behandelingen met de hoogste dichtheid (S3: aangedrukt met 300 kPa; S4: aangedrukt met 400 kPa) zijn significant lager dan de referentiebehandeling waar geen verdichte tussenlaag aanwezig was.
- De aanwezigheid van een verdichte tussenlaag resulteerde in dikkere wortels dan in de referentiebehandeling, zowel in als boven en onder de verdichte laag. Hierbij was sprake van een licht toenemende trend in diameter met toenemende dichtheid van de tussenlaag.
- De wortellengte(dichtheid) was significant lager in de verdichte tussenlaag voor de vier behandelingen ten opzichte van de referentie, en ook lager dan in de lagen erboven en de lagen eronder.
- Met toenemende dichtheid van de tussenlaag veranderde ook de verhouding in wortellengte(dichtheid) van dunne versus dikke wortels: het aandeel dikkere wortels nam toe met toenemende dichtheid.
- Op basis van berekende wortelgewichten en gemeten bovengronds opbrengsten per plant bleek dat de wortel:scheut verhouding significant toenam met toenemende verdichting van de tussenlaag.
- In de referentiekolommen waarin er geen verdichte laag aanwezig was en de groeicondities over het hele profiel optimaal waren bereikten de wortels ongeveer halverwege de experimentele periode de diepte overeenkomend met de bovenkant van de verdichte laag, en na een paar dagen erna de diepte overeenkomend met de onderkant van de verdichte laag. De resultaten doen vermoeden dat dit ook in de behandelingen het geval zal zijn geweest.
- Gedurende de eerste helft van de experimentele periode nam het watergehalte in de bovenlaag af. De initiële vochtvoorraad was waarschijnlijk net voldoende. Daarna nam de drukhoogte in de bovenlaag zeer sterk af, en was er nog maar weinig water voor opname beschikbaar.
- In de onderste niet-verdichte laag bleef het watergehalte vrij constant gedurende de eerste helft van de experimentele periode. Er waren toen nog geen wortels in die laag aanwezig zodat er geen wateronttrekking plaatsvond. Gedurende de tweede helft van de groeiperiode werd water in het onderste compartiment onttrokken waarbij aanvulling van onderaf plaatsvond. Desondanks nam het watergehalte geleidelijk af, maar niet zodanig dat dit leidde tot extreem lage watergehaltes of waterstress-initiërende condities in die laag.
- Aanvoer van water naar de plantenwortels vanaf de bovenzijde was uitgesloten. Wateraanvoer vond alleen plaats vanaf de onderzijde vanuit de grove zandlaag van de zandbak. De regeling van wateraanvoer via grof zand naar de onderste niet-verdichte laag heeft vrij goed gefunctioneerd. De aanvoersnelheid was iets geringer dan de opnamesnelheid door de wortels, waardoor de onderste laag langzaam droger werd. De niet-verdichte laag aan de bovenzijde werd daarmee niet verder bevochtigd via de aanvoer van onderaf.

Slotopmerking

Het hier beschreven experiment is tot stand gekomen op basis van de bevindingen uit een literatuuranalyse over de reactie van het wortelsysteem op bodemverdichting (Bakema et al., 2022; Hoofdstuk 4, Bijlage 1). Hierin werd onder meer het volgende gesteld: *"Er zijn nog maar weinig studies waarin reacties van wortels op bulkdichtheid, zuurstofloosheid en watergehalte afzonderlijk bekeken zijn."* Dit experiment was bedoeld om meer inzicht te krijgen over de interactie beworteling, dichtheid en watergehalte. Het betreft daarmee een academische studie. De opgelegde condities zijn niet representatief voor wat er in het veld gebeurt, maar de resultaten geven wel aan wat er met het wortelsysteem gebeurt wanneer het door een verdichte

⁴ Dit kwam met name door het disfunctioneren van de drains en hangende waterkolommen, wat veroorzaakt werd door het Brekerzand dat onvoorzien krimpverschijnselen vertoonde. Hierdoor kon er via de zijwand van de zandbak makkelijker lucht bij de drains komen. Dit effect werd versterkt doordat de zandbakken van kunststof waren gemaakt en er een lichte opbolling van de wanden ontstond door de mechanische druk van de grond en grondkolommen. In een eventueel volgend experiment moeten daarom stijve bakken worden gebruikt en moet vooraf beter getest worden op de krimpeigenschappen van de grond.

laag heen moet dringen. In principe is de proefopzet hiervoor geschikt, en zou herhaald kunnen worden voor andere gewassen (zowel gevoelige als minder dichtheids-gevoelige gewassen). Uiteraard zullen enkele kinderziekten van de meetopstelling nog verbeterd moeten worden, zoals stijvere bakken voor betere aansturing onderrandvoorwaarde, beter verhinderen dat wortels langs wand pot en grond om de verdichte laag heen groeien, en verhinderen beworteling in grof zand. Het verdient de aanbeveling om tussentijdse waarnemingen van wortelontwikkeling te meten. Hiervoor moet worden nagegaan of in-situ metingen via CT-scans mogelijk is (zie bijv., Burr-Hersey et al., 2017; Steinwider, 2022).

A2.5 Referenties

- Bakema, G., G. Bakker, J. Cruijssen, F. van Egmond, E. van den Elsen, M. Heinen, H. Schneider. 2022. De invloed van bodemverdichting op de water- en luchthuishouding in de bodem en op de plantontwikkeling. Literatuuronderzoek. Rapport 3225, Wageningen Environmental Research. <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/583342>
- Burr-Hersey, J.E., S.J. Mooney, A.G. Bengough, S. Mairhofer, K. Ritz. 2017. Developmental morphology of cover crop species exhibit contrasting behaviour to changes in soil bulk density, revealed by X-ray computed tomography. PLoS ONE 12(7): e0181872. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0181872>
- de Moraes, M.T., H. Debiasi, J.C. Franchini, J. de Andrade Bonetti, R. Levien, A. Schnepf, D. Leitner. 2019. Mechanical and Hydric Stress Effects on Maize Root System Development at Different Soil Compaction Levels. Front. Plant Sci. 10, 1358. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01358>
- de Willigen, P. and M. van Noordwijk. 1987. Roots, plant production and nutrient use efficiency. Ph.D. Thesis. Wageningen Agricultural Univ., Wageningen, the Netherlands. Available at: <https://edepot.wur.nl/202228>
- Duruoha, C., C.R. Piffer, P.A. Silva. 2007. Corn root length density and root diameter as affected by soil compaction and soil water content. Irriga, Botucatu 12(1), 14-26. <https://irriga.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/3283>
- Kirkegaard, J.A., So, H.B., Troedson, R.J. 1992. The effect of soil strength on the growth of pigeonpea radicles and seedlings. Plant and Soil 140, 65-74. <https://doi.org/10.1007/BF00012808>
- Konôpka, B., L. Pagès, C. Doussan. 2009. Soil compaction modifies morphological characteristics of seminal maize roots. Plant Soil Environ. 55(1): 1-10. <https://doi.org/10.17221/380-PSE>
- Meulenbergh, I. 2023. Maize root architecture response to different levels of soil compaction. BSc Thesis report. Wageningen University, Chair group Crop System Analysis (CSA).
- Ordóñez, R.A., S.V. Archontoulis, R. Martinez-Feria, J.L. Hatfield, E.E. Wright, M.J. Castellano. 2020. Root to shoot and carbon to nitrogen ratios of maize and soybean crops in the US Midwest. European Journal of Agronomy, 120, 126130. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126130>
- Popova, L., D. van Dusschoten, K.A. Nagel, F. Fiorani, B. Mazzolai. 2016. Plant root tortuosity: an indicator of root path formation in soil with different composition and density. Annals of Botany 188, 685-698. <https://doi.org/10.1093/aob/mcw057>
- R Core Team. 2023. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.
- Rosolem, C.A., J.S.S. Foloni, C.S. Tiritan. 2002. Root growth and nutrient accumulation in cover crops as affected by soil compaction. Soil & Tillage Research 65, 109-115. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(01\)00286-0](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(01)00286-0)
- Shan, K. 2023. Effects of subsoil compaction on above-ground architecture of maize. MSc Thesis report. Wageningen University, Chair group Crop System Analysis (CSA), Wageningen, The Netherlands.
- Steinwider, L. 2022. Remediation of agricultural subsoil compaction. Burrowing crops vs mechanical deep ripping. MSc Thesis, Ghent University, Faculty of Bioscience Engineering, Ghent, Belgium. https://libstore.ugent.be/fulltxt/RUG01/003/013/848/RUG01-003013848_2021_0001_AC.pdf
- Van den Akker, J.J.H., J.G.C. Deru, J.W.M. Sleiderink, M. van Agtmaal, I.G.A.M. Noij, M. Heinen. 2021. Effecten van sorghum en mais op bodem en gewas op een verdichte zandgrond. WENR rapport 3081, Wageningen Environmental Research. <https://edepot.wur.nl/545414>
- Zhang, X., L. Shao, H. Sun, S. Chen, Y. Wang. 2012. Incorporation of Soil Bulk Density in Simulating Root Distribution of Winter Wheat and Maize in Two Contrasting Soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 76: 638-647. <https://doi.org/10.2136/sssaj2011.0187>

Appendix 3 Effecten van verschillende mate van verdichting op de waterretentie- en waterdoorlatendheidskarakteristiek van een zandgrond

Auteur: Marius Heinen
Reviewer: Gerben Bakker

Inhoudsopgave

A3.1	Inleiding	71
	A3.1.1 Probleemstelling	71
	A3.1.2 Doelstelling	71
	A3.1.3 Onderzoeksvragen	71
A3.2	Materiaal en Methode	71
	A3.2.1 Zand	71
	A3.2.2 Behandelingen	72
	A3.2.3 Bepaling waterretentie- en waterdoorlatendheidskarakteristieken	73
	A3.2.4 Data analyse waterretentie- en waterdoorlatendheidskarakteristieken	73
A3.3	Resultaten en Discussie	74
	A3.3.1 Droge bulkdichtheid als functie van samendrukking	74
	A3.3.2 Effect op de Mualem – Van Genuchten (MVG) parameters	75
A3.4	Conclusies	80
A3.5	Referenties	81

A3.1 Inleiding

In Bakema et al. (2022) is een literatuurstudie beschreven over de invloed van verdichting op de water- en luchthuishouding en op de indringingsweerstand. Bij de invloed op de waterhuishouding wordt dan specifiek bedoeld op de invloed van de droge bulkdichtheid op de waterretentie- en waterdoorlatendheidseigenschappen van de bodemlaag.

A3.1.1 Probleemstelling

Het verdichten van de bodem beïnvloedt de daaronder liggende bodemlagen en beïnvloedt daarmee de waterretentie en waterdoorlatendheid van die bodemlagen en tevens de indringingsweerstand. Hiervoor zijn in de literatuur modelconcepten gepubliceerd, maar deze zijn nog niet eerder getoetst (gevalideerd) voor Nederlandse bodems.

A3.1.2 Doelstelling

Op basis van een literatuurstudie hebben Bakema et al. (2022) drie hoofddoelen en vijf afgeleide doelen geformuleerd waaraan in het project BOVER is gewerkt. In deze appendix wordt ingegaan op de volgende afgeleide doelen:

- 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.

A3.1.3 Onderzoeksvragen

De volgende onderzoeksvragen staan centraal in deze studie:

- In welke mate worden de waterretentie- en waterdoorlatendheidskarakteristieken beïnvloed door een verandering in de droge bulkdichtheid?
- Vertonen de Mualem – Van Genuchten parameters, die de vorm van de waterretentie- en waterdoorlatendheidskarakteristieken beschrijven, een relatie met de droge bulkdichtheid? Zo ja, passen deze verbanden bij de bevindingen uit de literatuur?

A3.2 Materiaal en Methode

A3.2.1 Zand

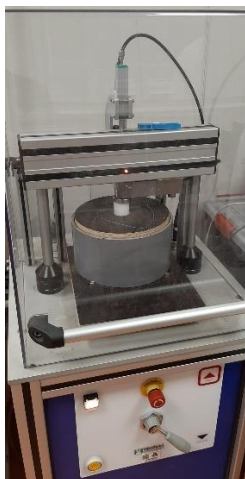
Van een perceel aan de Bornsesteeg, Wageningen (51.988⁰, 5.6562⁰; XY: 173477, 444435), is bovengrond verzameld, gedroogd, gezeefd en zeer goed gemengd met behulp van een geautomatiseerd doseersysteem van WEPAL. Met dat systeem is de grond zeer homogeen verdeeld over een groot aantal voorraadenners, waardoor zeker was dat alle behandelingen dezelfde mengverhoudingen hadden (voor details zie Appendix 1). De textuurverdeling staat vermeld in Tabel 1.

Tabel 1 Granulaire fractieverdeling van de gezeefde en goed gemengde bemonsterde bovengrond van het zandprofiel aan de Bornsesteeg te Wageningen.

Textuur range (µm)	Naam	Granulaire fractie (%)
0-2	Lutum	4.8
2-16	Sloef	3.3
16-50	Löss	6.6
50-63	Uiterst fijn zand	3.1
63-105	Uiterst fijn zand	10.1
105-150	Zeef fijn zand	20.8
150-210	Matig fijn zand	24.5
210-420	Matig grof zand	21.5
420-2000	Zeef grof zand	5.5
0-50	Leem	14.6
0-16	Slib	8.1
2-50	Silt	9.9

A3.2.2 Behandelingen

PVC kolommen zijn gevuld met het gemengde zand waarbij een standaard dichtheid van 1350 kg m^{-3} werd nagestreefd voor de lagen boven en onder de verdichte laag ten behoeve van de kasproeven. Vervolgens werd de grond voor de verdichte middenlaag gereguleerd met verschillende drukken aangedrukt. Uit de literatuurstudie van Bakema et al. (2022) bleek dat de krachten die op een diepere ondergrond worden uitgeoefend bij zeer zware belasting door zware landbouwvoertuigen niet boven de 300 kPa uitkomen. In dit onderzoek zijn de volgende belastingen aangehouden: 100, 200, 300 en 400 kPa. De drukken werden aangebracht met een samendrukkingsapparaat (www.RoyalEijkelkamp.com; Figuur 1). Details over de manier van verdichten zijn beschreven in Appendix 1.



Figuur 1 Samendrukkings apparaat.

Elke behandeling is in drievoud uitgevoerd De behandelingen zijn aangeduid met S1-S4:

- S1 aangedrukt met 100 kPa
- S2 aangedrukt met 200 kPa
- S3 aangedrukt met 300 kPa
- S4 aangedrukt met 400 kPa

Daarnaast zijn er ringen gemaakt voor het meten van de waterretentie- en waterdoorlatendheid volgens de verdampingsmethode, en voor de doorlatendheid bij verzadiging. Verder zijn er 100 cm^3 zandbakmonsters

gemaakt voor waterretentiebepalingen in het natte bereik (beschrijving bepalingen in paragraaf 0). Naast de vier behandelingen S1 t/m S4 zijn in een verkennend vooronderzoek ook metingen verricht aan een referentiemonster (S0). Deze is mogelijk op een andere wijze voorbehandeld, maar betrof wel een beoogde dichtheid van 1350 kg m^{-3} .

A3.2.3 Bepaling waterretentie- en waterdoorlatendheidskarakteristieken

Volgens de standaard methode zijn van deze monsters de waterretentie- en waterdoorlatendheidskarakteristieken in het laboratorium gemeten, zijn de data uitgewerkt en zijn hiervoor de Mualem – Van Genuchten parameters berekend. De methodiek staat vermeld in Bakker et al. (2020). Bij deze standaard methode worden ook gegevens gebruikt van metingen op de zandbakmethode. Daarvoor zijn de 100 cm^3 ringen gebruikt die ook zijn aangedrukt met een belasting van 100, 200, 300 en 400 kPa. Achteraf bleek dat de droge bulkdichtheid in de kleine ringen afweek van die in de grote ringen die bij de verdampingsmethode werden gebruikt⁵. Omdat resultaten daardoor mogelijk niet consistent zijn (bulkdichtheden passen dan niet meer bij de gemeten karakteristieken) worden de resultaten op twee manieren gepresenteerd:

- casus 0: resultaten zoals verkregen volgens de standaard methode, waarbij de karakteristieken zijn afgeleid op basis van de gegevens van verdampingsmethode aangevuld met gegevens van de zandbakmethode;
- casus 1: resultaten waarbij de karakteristieken zijn afgeleid op basis van de gegevens van de verdampingsmethode alleen.

Voor beide cases geldt dat ook gegevens van de drukpanmethode, de luchtdroogmethode en de gemeten doorlatendheid bij verzadiging zijn meegenomen.

De resultaten die in deze bijlage zijn genoemd hebben betrekking op de gemiddelden van de drie herhalingen. Behandeling S0 is uitgevoerd in enkelvoud.

A3.2.4 Data analyse waterretentie- en waterdoorlatendheidskarakteristieken

De resultaten hebben betrekking op:

- a. de relatie tussen samendrukkingskracht en de droge bulkdichtheid; deze laatste is achteraf vastgesteld in de ringen van de verdampingsmethode;
- b. de relatie tussen de gefitte Mualem (1976) – Van Genuchten (1980) (MVG) parameters (θ_r , θ_s , α , n , K_{sr} , λ); deze worden gepresenteerd als functie van de samendrukkingskracht of de droge bulkdichtheid; tevens worden de relatieve veranderingen in deze parameters gepresenteerd als functie van de relatieve droge bulkdichtheid.

In Bakema et al. (2022) is een overzicht gegeven van modelbeschrijvingen waarbij de MVG parameters veranderen bij verandering van de droge bulkdichtheid. De hier gevonden resultaten worden vergeleken met deze concepten uit de literatuur (Tabel 2; voor details en voorbeelden van vormveranderingen van de curves: zie Bakema et al., 2022). Er zijn meerdere relaties in de literatuur gegeven, maar in deze studie beperken we ons tot de relaties zoals hier vermeld. Voor de λ -parameter zijn in de literatuur geen afhankelijkheden van de droge bulkdichtheid gevonden.

⁵ Voor alle 4 de behandelingen was de gemiddelde dichtheid in de kleine ringen 2.1% – 4.4% lager dan in de grote ringen.

Tabel 2 Voorbeeld van enkele relaties in de literatuur die de verandering van de Mualem (1976) – Van Genuchten (1980) parameters (θ_r , θ_s , α , n , K_s , λ) beschrijven bij verandering (bijvoorbeeld als gevolg van verdichting) van de droge bulkdichtheid ρ (kg m^{-3}). Het subscript c in de tabel 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), en K_s is de doorlatendheid bij verzadiging (cm d^{-1}). Voor λ is geen model in de literatuur beschikbaar.

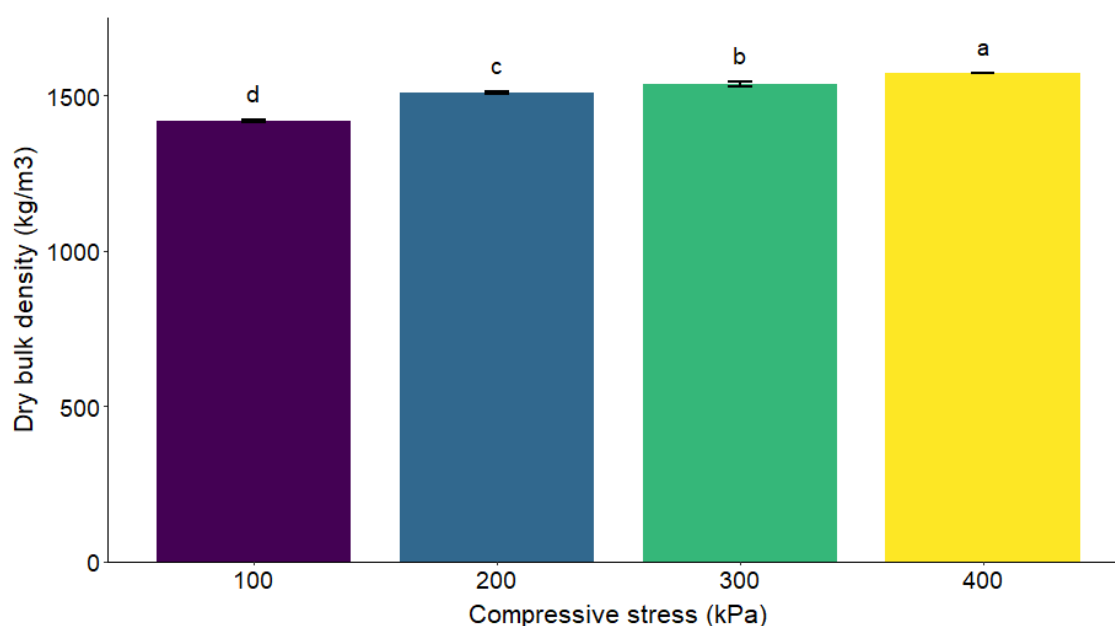
Parameter	Relatie	Opmerking
θ_r	$\theta_{r,c} = \theta_r \frac{\rho_c}{\rho}$	Assouline (2006a); Tian et al., 2018; Kool et al., 2019
θ_s	$\theta_{s,c} = \theta_s \frac{(\rho_s - \rho_c)}{(\rho_s - \rho)}$	Assouline (2006a); Tian et al., 2018; Kool et al., 2019 ρ_s : dichtheid van de vaste fase (kg m^{-3})
α	$\alpha_c = \alpha \left(\frac{\rho_c}{\rho} \right)^{-\omega}$	$\omega = 3.97$ (Tian et al., 2018; Kool et al., 2019)
n	$(n_c - 1) = (n - 1) \left(\frac{\rho_c}{\rho} \right)^{\epsilon}$	$\epsilon = -0.97 + 1.28 f_{\text{silt}} / f_{\text{clay}}$ (Tian et al., 2018; Kool et al., 2019) [#]
K_s	$K_{s,c} = K_s \left(\frac{\theta_{s,c}}{\theta_s} \right)^3 \left(\frac{\rho_c}{\rho} \right)^{\delta-7}$	$\delta = 4$ (Assouline, 2006b)

[#]: Voor de grondsoort gebruikt in deze studie volgt dan: $\epsilon = -0.97 + 1.28((3.3+6.6)/4.8) = 1.67$

A3.3 Resultaten en Discussie

A3.3.1 Droge bulkdichtheid als functie van samendrukking

Er was een significant effect ($p < 0.001$) van de samendrukking op de droge bulkdichtheid (Figuur 2; Tabel 3). Bij elke verhoging van de druk neemt de dichtheid significant toe. Het valt op dat de verandering in dichtheid tussen 100 kPa en 200 kPa groter is dan de overige veranderingen. Mogelijk dat hier, naast een verkleining van het aandeel poriën, een relatieve grote verandering van de ligging van de zandkorrels ten opzichte van elkaar is opgetreden, en dat bij overige drukken het vooral gaat om verkleining van de poriën.



Figuur 2 Droge bulkdichtheid als functie van de samendrukking. Verschillende letters duiden op significante verschillen tussen de behandelingen ($p < 0.001$; anova analyse (R Core Team, 2023)).

Tabel 3 Droge bulkdichtheid (kg m^{-3}) per behandeling: gemiddelde en $\pm$ standaardafwijking van de drie herhalingen.

Behandeling	Droge bulkdichtheid (kg m^{-3})
S1	1416 (± 8)
S2	1507 (± 8)
S3	1535 (± 15)
S4	1573 (± 1)

A3.3.2 Effect op de Mualem – Van Genuchten (MVG) parameters

A3.3.2.1 Parameters en curves: algemeen

De spreiding tussen de individuele curves zoals verkregen voor de drie herhalingen per behandeling was zeer gering, waardoor we kunnen volstaan met een verdere analyse op basis van de gemiddelde resultaten per behandeling. De gemiddelden (inclusief standaardafwijkingen) voor de MVG parameters zijn gegeven in Tabel 4 (casus 0) en Tabel 5 (casus 1).

De gemiddelde curves voor casus 0 en casus 1 zijn weergegeven in Figuur 3. Hierin is duidelijk te zien dat de toename in droge bulkdichtheid van S1 naar S4 leidt tot een verlaging van het vochtgehalte nabij verzadiging. In de droge delen van de waterretentie- en waterdoorlatendheidscurve is de invloed nauwelijks zichtbaar. Dit beeld past bij de bevindingen uit de literatuuranalyse zoals gepresenteerd in Bakema et al. (2022).

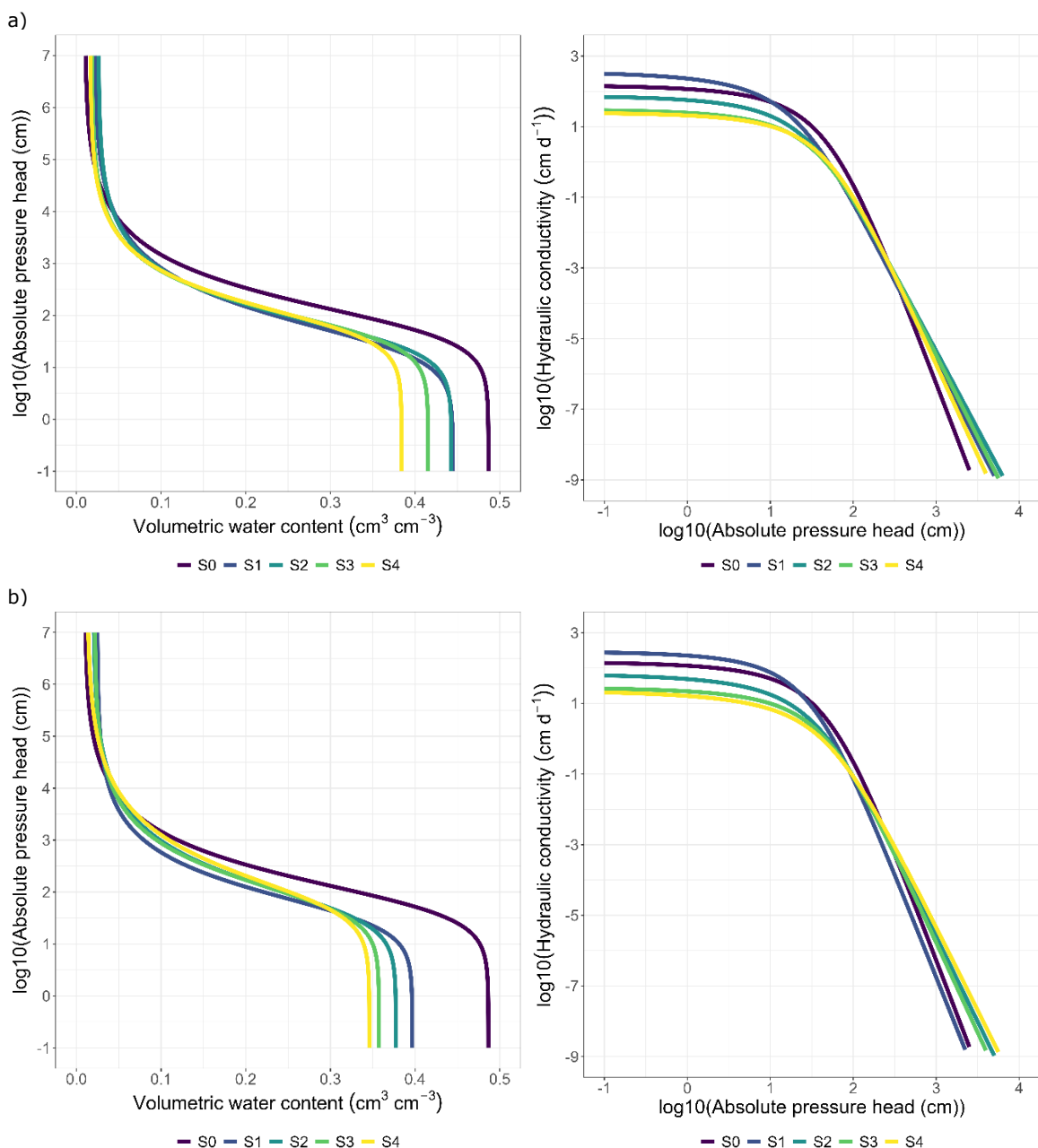
De relaties voor S0 wijken wat af, onder meer doordat deze een grotere porositeit heeft en voor een groter bereik aan drukhoogtes natter is dan de behandelingen S1-S4, en met een relatief lage waarde voor de doorlatendheid bij verzadiging. Zoals eerder al is gemeld, is de voorbehandeling van de S0 behandeling anders geweest dan die voor de monsters van S1-S4, wat een deel van dit verschil kan verklaren. In de vervolganalyse waarbij de MVG-parameters als functie van de behandeling worden beschouwd zal behandeling S0 daarom niet worden meegenomen.

Tabel 4 Gemiddelden en standaardafwijkingen van de MVG parameters (S0: $n = 1$; S1-S4: $n = 3$) voor uitwerking van casus 0. n.d.: geen data.

Behandeling	θ_r ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)	θ_s ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)	a (cm^{-1})	n (-)	λ (-)	$K_{s,fit}$ (cm d^{-1})
Gemiddeld						
S0	0.00997	0.48661	0.01648	1.52254	5.97123	150.062
S1	0.020954	0.444696	0.037124	1.491509	3.326122	360.9493
S2	0.025916	0.44284	0.027019	1.567971	2.273573	74.96801
S3	0.018188	0.415402	0.020156	1.590952	2.505652	30.46626
S4	0.016298	0.38405	0.016421	1.592376	3.326196	25.05535
Standaard afwijking						
S0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
S1	0.002173	0.004803	0.003073	0.031143	0.326569	37.83282
S2	0.000104	0.000398	0.000342	0.002192	0.275759	3.863296
S3	0.002146	0.001601	0.001038	0.042803	0.331303	3.043033
S4	0.000606	0.001782	0.000393	0.019203	0.529283	2.139361

Tabel 5 Gemiddelden en standaardafwijkingen van de MVG parameters (S0: $n = 1$; S1-S4: $n = 3$) voor uitwerking van casus 1. n.d.: geen data.

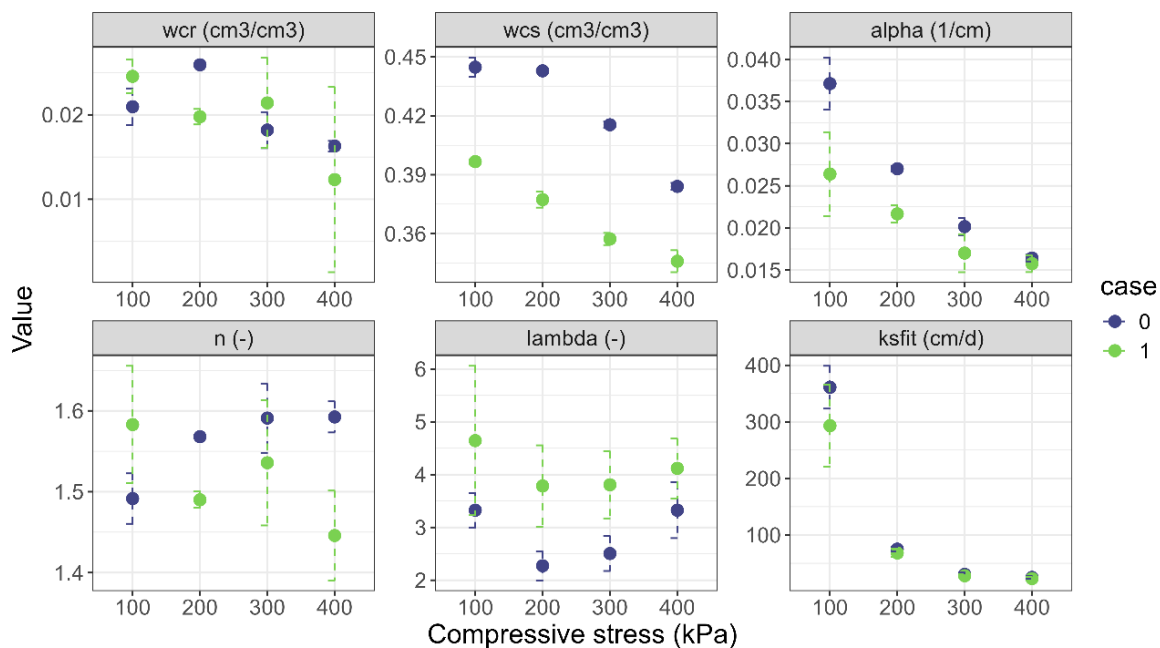
Behandeling	θ_r ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)	θ_s ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)	a (cm^{-1})	n (-)	λ (-)	$K_{s,\text{fit}}$ (cm d^{-1})
Gemiddeld						
S0	0.00997	0.48661	0.01648	1.52254	5.97123	150.062
S1	0.024547	0.396667	0.026398	1.582949	4.644329	293.1506
S2	0.019768	0.377333	0.021667	1.490038	3.78544	68.21504
S3	0.021403	0.357333	0.01701	1.535784	3.807897	27.95798
S4	0.01233	0.346	0.015762	1.445845	4.119167	22.95615
Standaard afwijking						
S0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
S1	0.001983	0.001155	0.004978	0.072522	1.415315	72.53232
S2	0.000916	0.004041	0.001026	0.010122	0.769571	7.032128
S3	0.00535	0.003055	0.002264	0.077428	0.63572	1.432515
S4	0.010962	0.005568	0.001009	0.055356	0.570691	3.081944



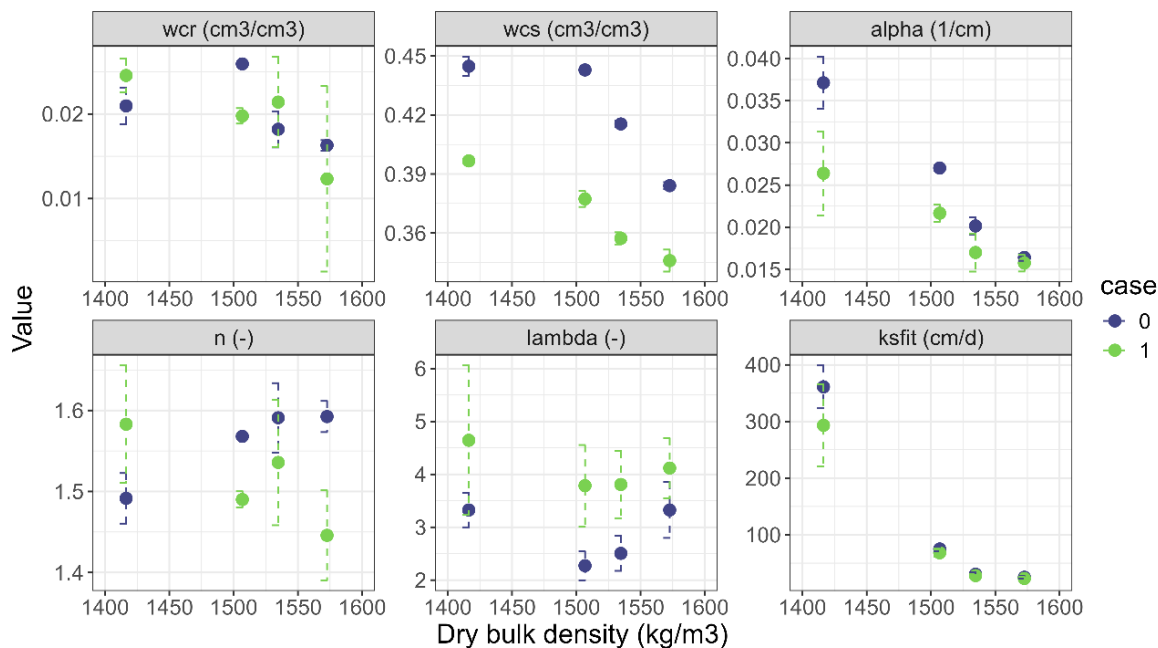
Figuur 3 Gemiddelde Mualem – Van Genuchten curves per behandeling voor a) casus 0 en b) casus 1.

A3.3.2.2 Parameters als functie van druk of droge bulkdichtheid

Voor beide casussen zijn de parameters geplot als functie van de aangebrachte druk (Figuur 4) en bijbehorende droge bulkdichtheid (Figuur 5). Over het algemeen wordt waargenomen dat met toenemende compressiedruk (of dichtheid) θ_r en θ_s lineair afnemen, K_s exponentieel afneemt, α iets kromlijinig afneemt, n voor casus 0 toeneemt en voor casus 1 afneemt, en λ eerst afneemt en daarna weer toeneemt. De afname van θ_r als functie van de dichtheid is niet conform de theoretische verwachting (zie Tabel 2). De parameter θ_r wordt gefit op basis van watergehaltes waarvan de meeste in het relatief natte traject liggen en slechts enkele in het droge traject. Dat kan betekenen dat de onzekerheid in de schatting relatief groot kan zijn. Verder moet bij θ_r in ogenschouw genomen worden dat het gaat om kleine waarden en dat we in dit onderzoek relatief kleine veranderingen in de droge bulkdichtheid hebben beschouwd (in tegenstelling tot de onderzoeken in de literatuur). Voor casus 1 wordt een daling van n als functie van de dichtheid waargenomen, en dat past niet bij de verwachting dat deze moet toenemen (zie Tabel 2). Hiervoor is geen verklaring te geven.



Figuur 4 Relaties tussen de MVG-parameters ($wcr = \theta_r$; $wcs = \theta_s$, $alpha = \alpha$, $n = n$, $lambda = \lambda$, $ksfit = K_s$) en de aangebracht compressiedruk voor behandelingen S1-S4 voor casus 0 en casus 1. De symbolen zijn de gemiddelden voor de drie herhalingen en de verticale error-bars zijn gelijk aan bijbehorende $\pm$ standaardafwijking.

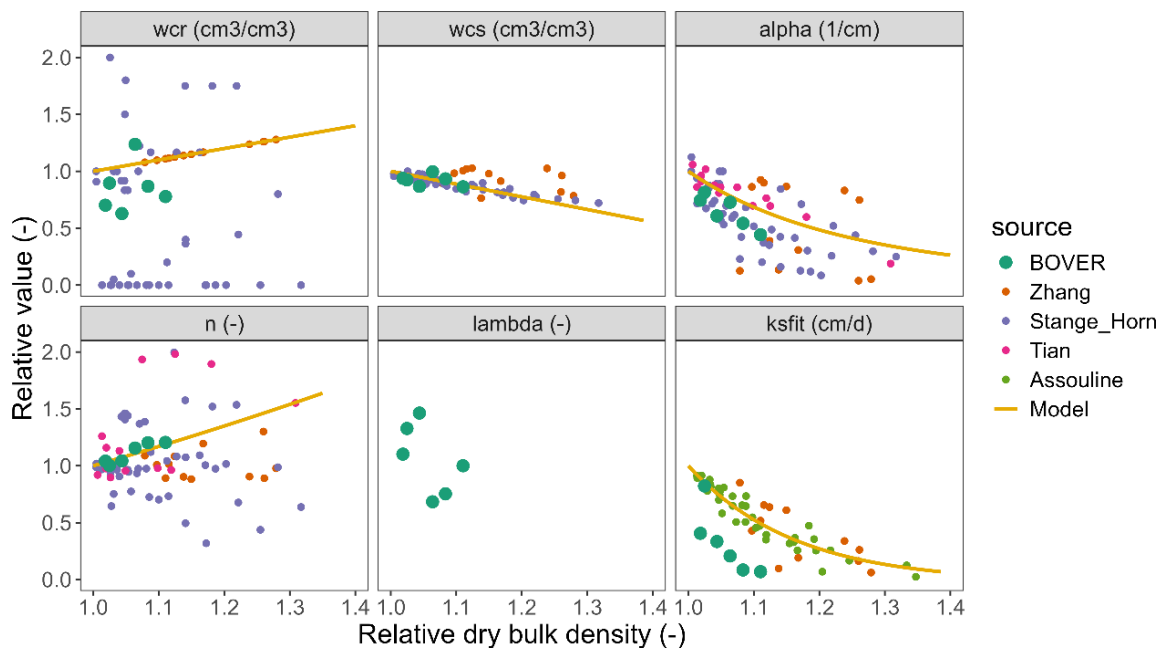


Figuur 5 Relaties tussen de MVG-parameters ($wcr = \theta_r$; $wcs = \theta_s$, $\alpha = \alpha$, $n = n$, $\lambda = \lambda$, $ksfit = K_s$) en de droge bulkdichtheid voor behandelingen S1-S4 voor casus 0 en casus 1. De symbolen zijn de gemiddelden voor de drie herhalingen en de verticale error-bars zijn gelijk aan bijbehorende $\pm$ standaardafwijking.

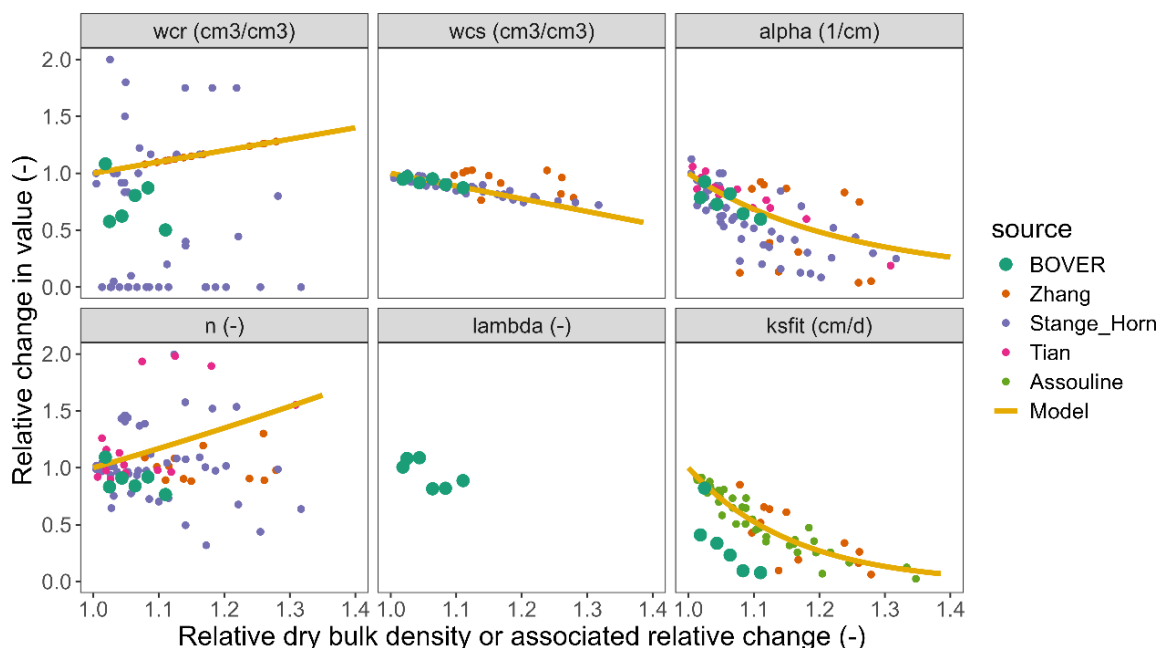
Volgens de relaties gegeven in Tabel 2 bestaan er verbanden tussen de relatieve verandering van de parameters als functie van de relatieve droge bulkdichtheid. Voor de 6 paarsgewijze veranderingen in dichtheid (S2:S1, S3:S1, S4:S1, S3:S2, S4:S2, S4:S3) zijn de veranderingen in de MVG parameters gegeven in Figuur 6 (casus 0) en Figuur 7 (casus 1). Voor beide casussen geldt dat de relatieve verandering van de parameters θ_r , θ_s , α en n (alleen casus 0) vrij goed overeenkomen met de relaties uit Tabel 2. Opvallend is wel dat de K_s data uit deze studie een groter effect lijken te hebben dan de hier gepresenteerde literatuurstudie van Assouline (2006b) en Zhang et al. (2006) en het model uit Tabel 2. In de literatuur zijn, voor zover bij ons bekend, geen modellen beschikbaar voor de parameter λ . Onze gegevens geven voorlopig nog geen aanleiding om hiervoor een model-concept vast te stellen.

Ter vergelijking zijn voor een beperkt aantal studies uit de literatuur de data opgenomen in Figuur 6 en Figuur 7. Hierbij valt op dat de data uit de literatuur soms meer spreiding vertonen dan de data uit deze studie. Soms hebben de data uit de literatuur betrekking op een grotere range aan verhoudingen in droge bulkdichtheid. Dat komt omdat die data betrekking hebben op grote dichtheidsveranderingen die optreden na ploegen. Dat betreft dus vaak data waarbij de bodem eerst een hele lage dichtheid heeft na ploegen en daarna weer verdicht door consolidatie. Over het algemeen geldt dat de in deze studie (BOVER) verkregen data passen bij data uit de literatuur en de daaruit afgeleide modellen (zie Tabel 2).

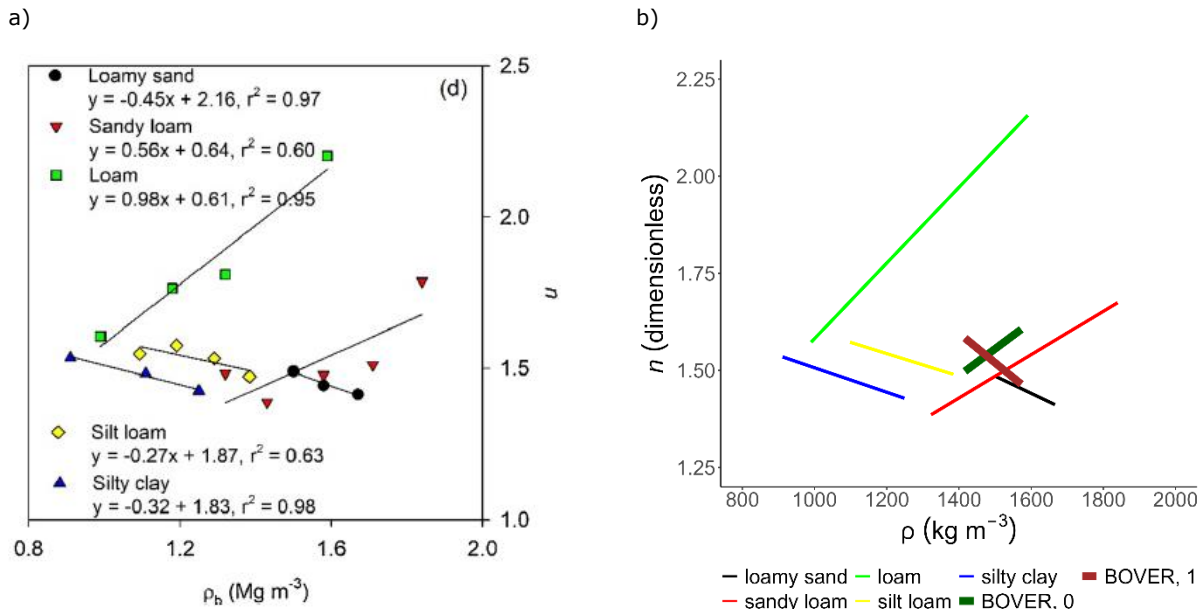
Voor de n parameter zijn voor casus 0 en casus 1 twee verschillende relaties met de relatieve verandering in dichtheid waargenomen in deze studie (Figuur 5). In een overzichtsstudie van Tian et al. (2021) lieten zij ook zien dat deze afhankelijkheid sterk grondsoort afhankelijk is, met soms een toename en soms een afname van n als functie van de droge bulkdichtheid (Figuur 8). Blijkbaar is het dus lastig om een goed onafhankelijk model af te leiden de n parameter. Ter vergelijking, voor casus 0 en casus 1 werd in deze studie het lineaire verband gegeven door, respectievelijk, $n = 0.6914\rho + 0.5183$ ($R^2 = 0.94$) en $n = -0.7613\rho + 2.6615$ ($R^2 = 0.74$).



Figuur 6 Relaties tussen de relatieve verandering van de MVG-parameters ($wcr = \theta_r$; $wcs = \theta_s$, $\alpha = \alpha$, $n = n$, $\lambda = \lambda$, $ksfit = K_s$) en de relatieve verandering van de droge bulkdichtheid voor casus 0. BOVER: data uit deze studie; Model: relaties uit Tabel 2; literatuurdata: Zhang et al. (2006; θ_r , θ_s , α , n , K_s), Stange en Horn (2005; θ_r , θ_s , α , n), Tian et al. (2018; α , n), Assouline (2006b, K_s). De model-relaties (Tabel 2) voor θ_s en K_s zijn berekend voor een basis droge bulkdichtheid van 1400 kg m^{-3} (het gemiddelde van de data van Assouline, 2006b) en voor een dichtheid van de vaste fase van 2650 kg m^{-3} .



Figuur 7 Relaties tussen de relatieve verandering van de MVG-parameters ($wcr = \theta_r$; $wcs = \theta_s$, $\alpha = \alpha$, $n = n$, $\lambda = \lambda$, $ksfit = K_s$) en de relatieve verandering van de droge bulkdichtheid voor casus 1. BOVER: data uit deze studie; Model: relaties uit Tabel 2; literatuurdata: Zhang et al. (2006; θ_r , θ_s , α , n , K_s), Stange en Horn (2005; θ_r , θ_s , α , n), Tian et al. (2018; α , n), Assouline (2006b, K_s). De model-relaties (Tabel 2) voor θ_s en K_s zijn berekend voor een basis droge bulkdichtheid van 1400 kg m^{-3} (het gemiddelde van de data van Assouline, 2006b) en voor een dichtheid van de vaste fase van 2650 kg m^{-3} .



Figuur 8 (a) Relaties voor n als functie van de droge bulkdichtheid voor vijf verschillende grondsoorten zoals gegeven door Tian et al. (2021), en (b) dezelfde relaties vergeleken met de twee relaties verkregen in project BOVER.

De analyse voor K_s is uitgevoerd met de gefitte K_s waarden. Een vergelijkbaar beeld als in Figuur 6 (casus 0) en Figuur 7 (casus 1) zijn verkregen voor de afzonderlijk gemeten K_{sat} waarden (geen figuren getoond). De afzonderlijk gemeten K_{sat} waarden zijn gebruikt bij het fitten van K_s , zodat het ook verklaarbaar is dat voor K_s en K_{sat} vergelijkbare resultaten zijn verkregen.

Hoewel de model-concepten zoals gepubliceerd in de literatuur al in diverse andere studies worden toegepast, moet men toch in het achterhoofd houden dat niet alle gemeten data perfect door het model verklaard worden. Dat valt bijvoorbeeld te zien aan de grote scatter aan meetpunten voor θ_r , α en n in Figuur 6 en Figuur 7. Omdat θ_r vaak hele kleine waarden betreft (soms gelijk aan nul) is die scatter enigszins verklaarbaar.

De verschillen tussen beide casussen zijn gering. Met andere woorden de invloed van de afwijkende dichtheid van de kleine ringmonsters in het bepalen van de MVG parameters (in casus 0) is gering geweest. Er is geen duidelijke reden om aan te geven dat de uitwerking conform de standaard (zoals toegepast bij casus 0) niet correct is. In Appendix 4 zal bij de modelstudie dan ook de MVG parameters van casus 0 gebruikt worden.

A3.4 Conclusies

Hieronder volgen puntsgewijs de hoofdconclusies uit deze laboratoriumproeven.

- Het is mogelijk gebleken om reproduceerbaar bodemmonsters met verschillende dichtheden te produceren; de spreiding in verkregen waterretentie- en waterdoorlatendheidskarakteristieken tussen de herhalingen was daarbij zeer gering.
- Bij toename van de dichtheid neemt de porositeit af wat leidt tot een duidelijke verschuiving van de waterretentiekarakteristiek in het natte traject. De doorlatendheid bij verzadiging neemt exponentieel af met toenemende dichtheid.
- De MVG parameters worden duidelijk beïnvloed door de verandering in droge bulkdichtheid, en deze veranderingen passen vrij goed bij eerder in de literatuur gerapporteerde data en modellen. Alleen voor K_s werd in deze studie een groter effect waargenomen dan de literatuur data en bijbehorend model.

Aanbevelingen

Deze validatie van de literatuur modelconcepten betreft slechts 1 bodemsoort in Nederland. Het wordt geadviseerd dit voor meerdere grondsoorten te herhalen.

De verschillen tussen de vier droge bulkdichtheden in de behandelingen S1 – S4 ware relatief klein: de verhoudingen varieerden tussen 1.02 en 1.11. Voor een bredere toepasbaarheid van de gevonden relaties is het verstandig dit bereik in de toekomst groter te kiezen.

Dit onderzoek betreft fundamenteel onderzoek naar de invloed van veranderingen in de droge bulkdichtheid op de waterretentie- en waterdoorlatendheidskarakteristieken. In Nederland maken we veelvuldig gebruik van de Staringreeks. Dat zijn gemiddelde karakteristieken voor textuurbouwstenen, en die gemiddelden zijn gebaseerd op een groot aantal bodemonsters die elk hun eigen dichtheid hebben, waarvan sommige mogelijk uit verdichte bodemlagen komen. Er is onderzoek nodig om na te gaan of de hier gehanteerde relaties om de MVG-parameters als functie van de droge bulkdichtheid aan te passen zonder meer kunnen worden toegepast op de Staringreeks curves, of dat voorafgaand aan de afleiding van de gemiddelde curves al rekening moet worden gehouden met de droge bulkdichtheid.

A3.5 Referenties

- Assouline, S. 2006a. Modeling the Relationship between Soil Bulk Density and the Water Retention Curve. *Vadose Zone Journal* 5(2), 554-563. <http://dx.doi.org/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. <http://dx.doi.org/10.2136/vzj2005.0084>
- Bakema, G., G. Bakker, J. Crujisen, F. van Egmond, E. van den Elsen, M. Heinen, H. Schneider. 2022. De invloed van bodemverdichting op de water- en luchthuishouding in de bodem en op de plantontwikkeling. Literatuuronderzoek. Rapport 3225, Wageningen Environmental Research. <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/583342>
- Bakker, G., M. Heinen, H.P.A. Gooren, W.J.M. de Groot, P.D. Peters. 2020. Hydrofysische gegevens van de bodem in de Basisregistratie Ondergrond (BRO) en het Bodemkundig Informatie Systeem (BIS); Update 2019. WOt-technical report 186, Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu, Wageningen. <https://edepot.wur.nl/526509>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.05.020>
- Mualem, Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12: 513-522. <https://doi.org/10.1029/WR012i003p00513>
- R Core Team. 2023. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.
- Stange, C.F., R. Horn. 2005. Modeling the soil water retention curve for conditions of variable porosity. *Vadose Zone Journal* 4, 602-613. <https://doi.org/10.2136/vzj2004.0150>
- Tian, Z., J. Chen, C. Cai, W. Gao, T. Ren, J.L. Heitman, R. Horton. 2021. New pedotransfer functions for soil water retention curves that better account for bulk density effects. *Soil & Tillage Research* 205, 104812. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104812>
- Tian, Z., W. Gao, D. Kool, T. Ren, R. Horton, J.L. Heitman. 2018. Approaches for Estimating Soil Water Retention Curves at Various Bulk Densities With the Extended Van Genuchten Model. *Water Resources Research*, 54, 5584-5601. <https://doi.org/10.1029/2018WR022871>
- 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. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.08.012>

Appendix 4 Effecten van verschillende mate van verdichting, bodemvochtcondities, conusdiameter en -snelheid op de indringingsweerstand

Auteur: Gerben Bakker
Reviewer: Marius Heinen

Inhoudsopgave

A4.1	Inleiding	83
A4.1.1	Penetrometer	83
A4.1.2	Penetrometermetingen in het laboratorium	83
A4.1.3	Onderzoeksvragen penetrometer	83
A4.2	Materiaal en Methode	83
A4.2.1	Laboratoriumopstelling	83
A4.2.2	Gebruikte grond	88
A4.2.3	Uitgevoerde penetrometermetingen in het SHP-lab	89
A4.2.4	Standaard verloop balans-tijdwaarden bij indringing	92
A4.3	Resultaten	94
A4.3.1	Ruwe data: massa als functie van de tijd	94
A4.3.2	Indringingsweerstand als functie van de diepte	94
A4.3.3	Invloed pendiameter en pensnelheid	101
A4.4	Discussie en conclusie	104
A4.5	Referenties	106

A4.1 Inleiding

A4.1.1 Penetrometer

Een penetrologer of penetrometer wordt doorgaans gebruikt voor veldmetingen en meet de indringingsweerstand van een bodem tot 80 cm diepte. De meting wordt beïnvloed door watergehalte, dichtheid, samendrukbaarheid, bodemsterkte, bodemstructuur, zand- en kleigehalte. Maar de meting wordt ook beïnvloed 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 (staafdiameter = 2,5 mm) met een conisch uiteinde (kegelhoek 60° en conusdiameter = 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 is in een aangepaste vorm voor het onderzoek in project BoVer nagebouwd en gebruikt om de penetratieweerstanden te meten aan homogene bodemmonsters die gecontroleerd verdicht en bevochtigd zijn. De laboratoriummetingen zijn uitgevoerd met gecontroleerd verdichte bodemmonsters in het laboratorium, zoals beschreven in Bijlage 1, maar ook aan bodemmonsters die onverstoord in het veld zijn genomen.

A4.1.2 Penetrometermetingen in het laboratorium

In Bakema et al. (2022) is het belang van laboratoriumonderzoek aangegeven. Om inzicht te krijgen in de interacties tussen penetrometer en bodem onder verschillende condities is het van belang metingen uit te voeren onder gecontroleerde laboratoriumomstandigheden.

Een spin-off van dit project is dat er een laboratoriumopstelling is ontworpen en gebouwd. Dit kan interpretaties van in het veld uitgevoerde metingen vergemakkelijken en inzichten geven voor het verbeteren ervan.

A4.1.3 Onderzoeksvragen penetrometer

De volgende onderzoeksvragen proberen we in het BoVer-project te beantwoorden voor de onderzochte bodem onder geconditioneerde condities:

- Wat is het effect van mechanische compressie op de indringingsweerstand?
- What is het effect van drukhoogte en watergehalte op indringingsweerstand?
- What is het effect van indringingssnelheid op de indringingsweerstand?
- What is the effect van de diameter van de conus op de indringingsweerstand?
- Welke relatie is er te vinden tussen de laboratoriummetingen en de veldmetingen?
- Kunnen we regels opstellen die de in het veld gemeten indringingsweerstand vertalen naar een standaard conditie?

A4.2 Materiaal en Methode

A4.2.1 Laboratoriumopstelling

Er is uitvoerig bij leveranciers en gebruikers nagegaan welke mogelijkheden er zijn om in het laboratorium de indringingsweerstand van een grondkolom te meten. De conclusie was dat er geen geschikte apparatuur beschikbaar is om indringingsweerstand te meten in het laboratorium.

Panayiotopoulos et al. (2003) beschrijven een *custom made* 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 $1,52 \text{ mm min}^{-1}$. 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).

Omdat het nabouwen van deze opstelling te kostbaar is, hebben we zelf een nieuw ontwerp gemaakt op basis van een Programma van Eisen (PvE).

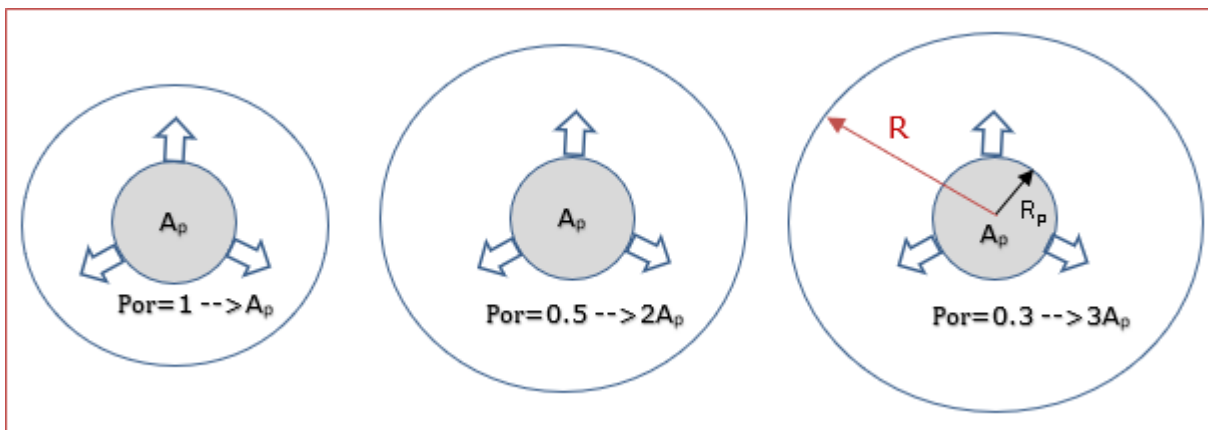
A4.2.1.1 Invloedsfeer pen

Een aandachtspunt bij het uitvoeren van penetrometermetingen in het laboratorium is dat de grond opgesloten zit in een starre ring. Voor een goede meting moet de grond zich bij penetratie 'vrij' in de ring kunnen bewegen, ofwel het moet geen ander gedrag vertonen dan in het vrije veld. Het is daarom van belang om te weten op welke afstand van de pen van de penetrometer de bodemdeeltjes nog bewegen. Hiermee kunnen de ringafmetingen en pendimensies worden bepaald.

De minimale invloedsfeer tot het centrum van de pen is hieronder berekend op basis van de pendiameter en de porositeit van de bodem. Dit is vervolgens vergeleken met praktische handvatten uit de literatuur.

Minimale theoretische invloedsfeer

- De grond die wordt ingenomen door het penoppervlakte A_p (met penstraal R_p) wordt in de situatie met minimale invloedsfeer bij penetratie verplaatst naar de naastliggende omringende lege porieruimte (Figuur 1). Dit gebeurt alleen als alle grond zijwaarts wordt verplaatst. In de praktijk is het niet waarschijnlijk dat alle lege porieruimte naast de pen wordt opgevuld. De invloedsfeer is dan groter. In werkelijkheid zal een deel van de grond ook naar beneden worden verplaatst in plaats van zijwaarts.
- Bij een porositeit van 100% ($\phi = 1$) wordt de grond in de minimale situatie weggedrukt naar het naastliggende oppervlak A_p ; Bij een porositeit van 50% ($\phi = 0,5$) is de benodigde oppervlakte 2 keer zo groot, ofwel $2A_p$, etc.



Figuur 1 De penoppervlakte A_p wordt minimaal ingenomen door de aangrenzende lege oppervlakte aan poriën. Links: Bij een porositeit $\phi = 1$ (100% poriën) is de minimaal benodigde oppervlakte rondom de pen eveneens A_p . De totale oppervlakte inclusief pen is dan $2A_p$; Midden: Bij een porositeit $\phi = 0,5$ (50% poriën) is de minimaal benodigde oppervlakte naast de pen $2A_p$. De totale oppervlakte inclusief pen is dan $3A_p$; Rechts: Bij een porositeit $\phi = 0,33$ (33% poriën) is de minimaal benodigde oppervlakte naast de pen $3A_p$. De totale oppervlakte inclusief pen is dan $4A_p$.

Uit Figuur 1 blijkt dat de straal R vanaf het middelpunt van de pen tot de rand van de cirkel waarin de bodemdeeltjes zich in het theoretische geval minimaal bewegen, berekend kan worden met

$$R = \sqrt{\frac{A_{tot}}{\pi}} = \sqrt{\frac{(A_p + A_p/\phi)}{\pi}} = R_p \cdot \sqrt{\frac{1 + \phi}{\phi}}$$

Voor de zandgrond die wij gebruiken varieert de porositeit bij een drukkracht van 100 kPa tot 400 kPa tussen de 0,445 en 0,384. R varieert voor de *worst case* situatie met een porositeit van 0,384 tussen 0,9 mm voor een pen met 1 mm doorsnede ($r = 0,5$ mm) en 1,9 mm voor een pen met 2 mm doorsnede ($r = 1$ mm).

Literatuurgegevens met betrekking tot de invloedssfeer van de conus

De Wit (1988) geeft een invloedssfeer van maximaal 18 keer de diameter van de pen als straal vanaf het centrum van de pen. Farrel en Greacen (1966) geven een invloedssfeer van maximaal 5 keer de diameter van de pen als straal vanaf het centrum van de pen. Tabel 1 geeft een overzicht van de verschillende afstanden.

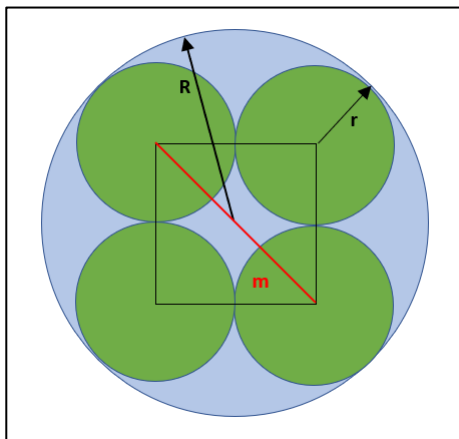
Tabel 1 Minimale theoretische invloedssfeer en praktische handvatten uit de literatuur.

Sstraal r van de pen (mm)	Invloedssfeer als straal R vanaf midden van de pen bij een worst-case porositeit van $\phi = 0,384$		
	Theoretisch minimum $R = R_p \times \text{SQRT}[(1+\phi)/\phi]$ (mm)	Farrel & Greacen (1966) $R = 5 \times D$ (mm)	De Wit (1988) $R = 18 \times D$ (mm)
0,5	0,9	5	18
1,0	1,9	10	36
5,0	9,5	50	180

Het is nu mogelijk om te bepalen of het mogelijk is om 4 keer te prikken in een standaard ring die gebruikt wordt voor de verdampingsmethode. Deze ring heeft een handzaam formaat en vraagt geen compressiestempels waarbij het monster gedraaid moet worden (zie bijlage 1 Monstervoorbereiding).

Omdat er veel varianten gemeten moeten worden (drukhoogte, dichtheid, pendiameter, pensnelheid), willen we het aantal prikken per monsterring maximaliseren, zodat we het aantal monsterpreparaten kunnen verkleinen.

Om de invloedssfeer van de pen van de penetrometer te kunnen koppelen aan de afmetingen van de ring en de pendiameter, berekenen we de stralen zoals weergegeven in Figuur 2.



Figuur 2 Berekening beste plek om 4 keer te kunnen prikken per monster.

De beste plek om 4 keer te prikken in een monsterring is het centrum van de kleine cirkels van Figuur 2. Het is te berekenen dat de straal van de cirkels dan gelijk is aan:

$$r = \frac{R}{1 + \sqrt{2}}$$

De straal r van de beste plek om te prikken bij 4 prikpunten in een ringmonster, is voor een standaard verdampingsring met een binnendiameter van 102 mm gelijk aan $r \approx 21$ mm. Uit Tabel 1 blijkt dat de invloedssfeer met een $D = 2$ mm pen ligt tussen 1,9 (theoretisch minimum) en 36 mm (maximum volgens de

Wit) vanaf het midden van de pen. De berekende 21 mm wordt in de proeven met de lab-penetrometer als acceptabel beschouwd voor een pendiameter van maximaal 2 mm.

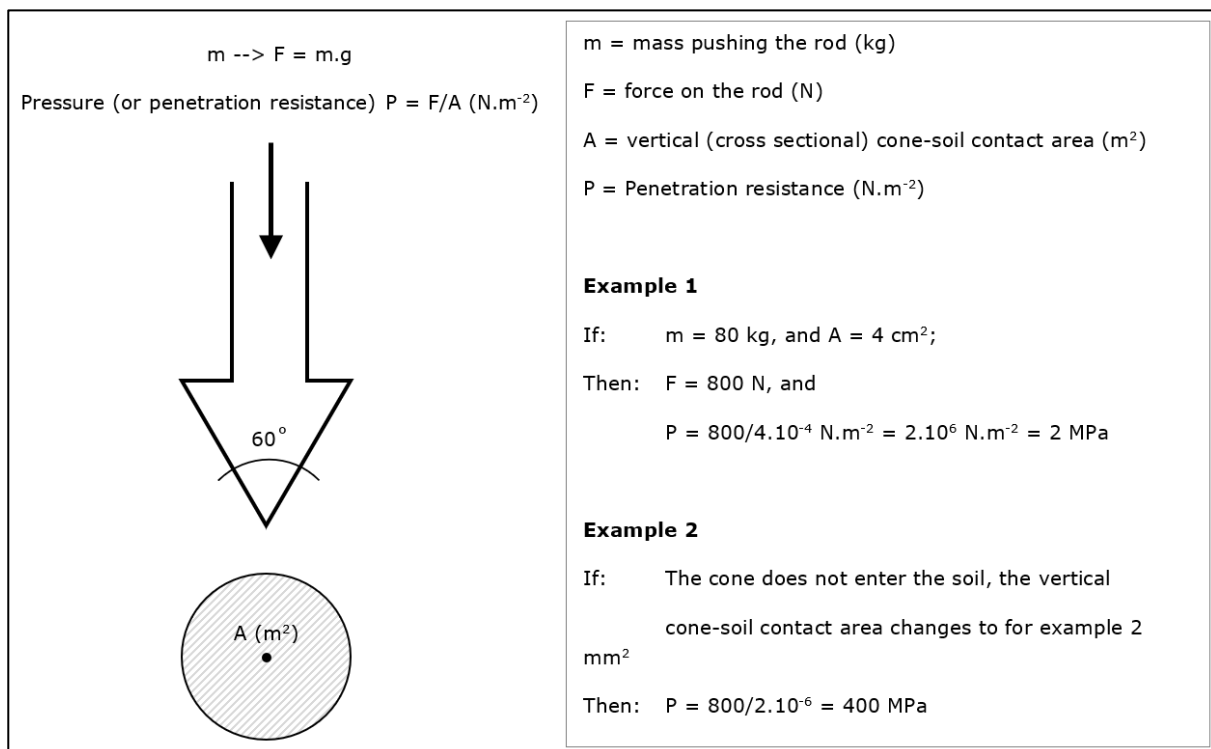
Voor de praktische uitvoering van de penetrometermetingen is een mal gemaakt waarop de 21 mm prikafstand is aangegeven.

A4.2.1.2 Eigenschappen reguliere veld-penetrometer

Een reguliere veld-penetrometer heeft de volgende eigenschappen (Vereniging voor Landinrichting, 1992):

- Een penoppervlakte van 1 cm^2 ($D \approx 1.15 \text{ cm}$);
- Tophoek van 60 graden;
- Aflezing tot 10 000 kPa (= 10 MPa)

Figuur 3 geeft de eigenschappen en basisberekening van de indringingsweerstand weer. De schaalweergave van een veld-penetrometer is meestal gebaseerd op een 1 cm^2 conus. De penetratieweerstand P bij 80 kg belasting is 8 MPa.



Figuur 3 Standaard penetrometer en berekening indringingsweerstand.

A4.2.1.3 Ontwerp van een lab-penetrometer

De indringingsweerstand in grondmonsters onder laboratoriumomstandigheden kan bepaald worden door de kracht te meten die nodig is om een naald te penetreren met een constante indringingssnelheid. De aanbevolen snelheid voor een veld-penetrometer is 2 cm/s. Het is aan te bevelen om daar in het laboratorium aansluiting bij te zoeken, zodat resultaten vergelijkbaar zijn. De indringingsdiepte kan variëren maar is voor onze doelstelling ongeveer 8 cm. Dit is de hoogte van de beoogde veel gebruikte monsterring in het Bodemhydrofysisch lab van Wageningen UR). De kracht moet automatisch worden geregistreerd over het gebruikte hoogte-interval.

In Figuur 4 is het basisontwerp gegeven. De verticale verplaatsing van de penetrometerpen met constante snelheid wordt gerealiseerd met een stappenmotor die bevestigd is aan een draadstang en die bestuurd wordt vanuit een pc. Het monster wordt op een weegschaal geplaatst, waarbij het toegenomen gewicht tijdens de penetratie als functie van de diepte wordt geregistreerd. In rust wordt de balans getarreed en zal een uitslag vertonen zodra de pen het bodemoppervlak indringt. Dit eerste meetpunt wordt gebruikt als startpunt.

Zoals hierboven is weergegeven mag de conusdiameter maximaal 1 of 2 mm ($A = 0,8$ of $3,1 \text{ mm}^2$) zijn om op 4 plekken in een monster met een diameter van 10.2 cm doorsnede te kunnen meten. Uitgaande van een conus van 1 mm^2 en een indringingsweerstand van maximaal 20 MPa (5 MPa wordt in de literatuur vaak aangeduid als ondoordringbaar voor plantenwortels), wordt een kracht uitgeoefend van $F = P \cdot A =$

$$20 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6} = 20 \text{ N}.$$

Het benodigde meetbereik is dan 0-20 N. Dit komt overeen met een gewicht van 2 kg op een weegschaal. Met een bereik van 0-20 N moet de balans de som kunnen meten van het monstergewicht + het omgerekende "indringingsgewicht" van 2 kg. De balans moet verder een digitale uitgang hebben om het gewicht in de tijd en dus over diepte te kunnen meten.

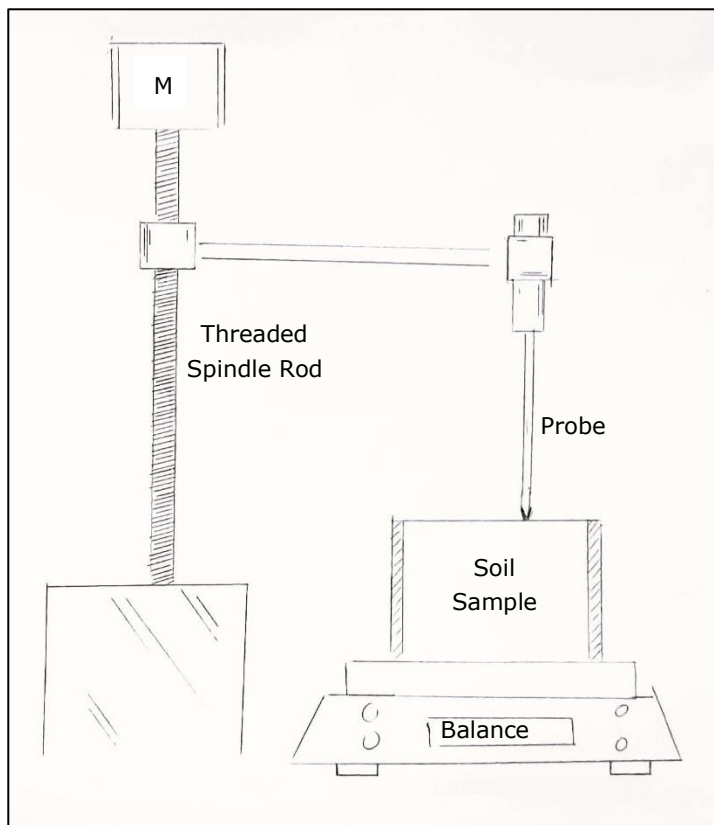
Het gewicht van het monster bedraagt ongeveer 6,3 kg bij een ringdiameter $D = 10,2 \text{ cm}$; Ringhoogte $H = 8 \text{ cm}$; droge bulkdichtheid $\rho_d = 1,6 \text{ g/cm}^3$; Porositeit = 40%, ($m = V \times \rho_{\text{dry soil}} + V \times \rho_{\text{water}} \times \phi = 654 \times 1,6 + 654 \times 0,4 = 1046 + 261 \approx 1,3 \text{ kg}$).

Tezamen met het maximale penetratiegewicht van 2 kg, moet het bereik van de weegschaal 3,3 kg zijn, afgerond 5 kg met eventuele toebehoren als ringgewicht en dergelijke.

Voor een grotere ringafmeting, bijvoorbeeld een ring van $D = 20$ en $H = 10$, moet het bereik $5,0 + 1,3 +$ toebehoren = 6,3 kg, afgerond 10 kg met eventuele toebehoren bedragen.

Eisen balans:

- Bereik 0 – 5 kg (monsterring $D \times H = 10 \times 8 \text{ cm}$, $P = 20 \text{ MPa}$)
- Bereik 0 - 10 kg (monsterring $D \times H = 20 \times 10 \text{ cm}$, $P = 20 \text{ MPa}$)
- Resolutie 1 gram
- Digitale uitgang



Figuur 4 Basisontwerp WUR lab-penetrometer.

Bij de start van de experimenten was er geen pen met conus beschikbaar. Daarom zijn de proeven in eerste instantie gestart met $D = 1$ mm en $D = 2$ mm rechte pennen met een tophoek van 60 graden. Later in het project is een pen beschikbaar gekomen met een conusdiameter van 2 mm en 1.6 mm schacht. Deze is als laatste en extra variant gebruikt om het midden van het monster te beproeven. Figuur 5 geeft een impressie van de varianten.

A4.2.2 Gebruikte grond

In Appendix 1 (Monstervoorbereiding) is verslag gedaan van de grond die is gebruikt voor de penetrometerproeven in het SHP-laboratorium. Ook is hierin aangegeven hoe de grond voor deze proeven is verdicht.

Figuur 5 geeft een indruk van de opstelling en de onderdelen.



Figuur 5 Boven en rechts: Conus van één van de penetrometernaalden. De schacht heeft een doorsnede van 1.6 mm en de conus een doorsnede van 2 mm. De punt heeft een hoek van 60 graden; Links: Twee soorten rechte (wolfram) naalden zonder conus maar wel met afgeschuinde punt van 60 graden. Er zijn twee rechte naalden met een diameter van 2 mm en twee rechte naalden met een diameter van 1 mm. Alle varianten zijn gebruikt om de verschillen in indringingsweerstand te onderzoeken.

A4.2.3 Uitgevoerde penetrometermetingen in het SHP-lab

Om relaties te vinden tussen de indringingsweerstand, de indringingssnelheid, conusdiameter, verdichtingsgraad en de drukhoogte, zijn de metingen onderverdeeld naar:

- 3 penetratiesnelheden:
 - 2.0 cm/s (= 1200 mm/min), vergelijkbaar met de gewenste penetratiesnelheid in het veld
 - 1.1 cm/s (= 660 mm/min)
 - 0.2 cm/s (= 120 mm/min)
- 3 conusdiameters:
 - 1.0 mm: deze bestaat uit een rechte pen met 1 mm doorsnede (geen aparte conus), maar wel met een afgeschuinde punt met conushoek van 60° , een hoek die tevens vaak in het veld wordt gebruikt
 - 2.0 mm: deze bestaat uit een rechte pen met 2 mm doorsnede (geen aparte conus), maar wel met een afgeschuinde punt met conushoek van 60°
 - Conusbonus 2.0 mm: deze bestaat uit een rechte pen (schacht) van 1,6 mm doorsnede en een conus van 2.0 mm doorsnede. De naam conusbonus is gebruikt omdat deze metingen pas later zijn toegevoegd in verband met het later gereed komen van de conus. De metingen met deze pen zijn steeds uitgevoerd in het midden van de monsters nadat alle andere indringingsmetingen zijn uitgevoerd. Bij enkele van deze monsters is tevens een meting uitgevoerd waarbij het monster is omgedraaid, om te onderzoeken welk effect de verdichtingsprocedure heeft gehad op het profiel van de meting.
- 4 compactiedrukken: 100, 200, 300, 400 kPa (zie toelichting in Appendix 1: Monstervoorbereiding)
- 8 drukhoogten h : $h = -5, -10, -30, -60, -100, -300, -1000, -10^6 \text{ cm}^6$

Voor het uitvoeren van deze metingen zijn een groot aantal monsters gemaakt die met exact dezelfde grond op uniforme wijze zijn verdicht (Appendix 1: Monstervoorbereiding).

De metingen zijn in 2 series uitgevoerd:

- Serie A: Deze serie bevat de metingen bij drukhoogten h van -5, -10, -30 en -60 cm;
- Serie B: Deze serie bevat de metingen bij drukhoogten h van -100, -300, -1000 en -10^6 cm

De uitgevoerde metingen zijn weergegeven in Tabel 2 en Tabel 3 voor respectievelijk de series A en B. De tabellen laten zien dat elk monster gebruikt is voor 4 (of 5) metingen.

Bijvoorbeeld monster 200-6 van serie A. Deze ring (nummer 200-6) is verdicht met een compressiedruk van 200 kPa, vervolgens waterverzadigd, gelijkgemaakt met de boven- en onderkant van de ring en op een zuigspanning van $h = -5 \text{ cm}$ gebracht op de zandbak. Na het bereiken van hydrostatisch evenwicht is op plek 1 in het monster de indringingsweerstand gemeten over de diepte van het monster met een rechte naald met een diameter van 1 mm en een indringingssnelheid van 1200 mm/min (2 cm/s). Vervolgens is de naald verwisseld naar een rechte naald met een diameter van 2 mm, is de indringingssnelheid aangepast naar 120 mm/min (0.2 cm/s) en is op plek 2 in het monster de indringingsweerstand gemeten. Het monster is vervolgens teruggezet op de zandbak en is de zuigspanning verlaagd naar $h = -10 \text{ cm}$. Na het bereiken van hydrostatisch evenwicht is op plek 3 in het monster de indringingsweerstand bepaald met wederom een rechte naald met een diameter van 1 mm en een indringingssnelheid van 1200 mm/min (2 cm/s) en daarna op plek 4 met een rechte naald met een diameter van 2 mm en een indringingssnelheid van 120 mm/min (0.2 cm/s). Er is in dit geval nog extra informatie ingewonnen door bij dezelfde zuigspanning ($h = -10 \text{ cm}$) in het midden van het monster de indringingsweerstand te meten met een penetrometernaald die voorzien is van een conus (diameter schacht = 1.6 mm, conusdiameter = 2 mm, tophoek conus = 60°).

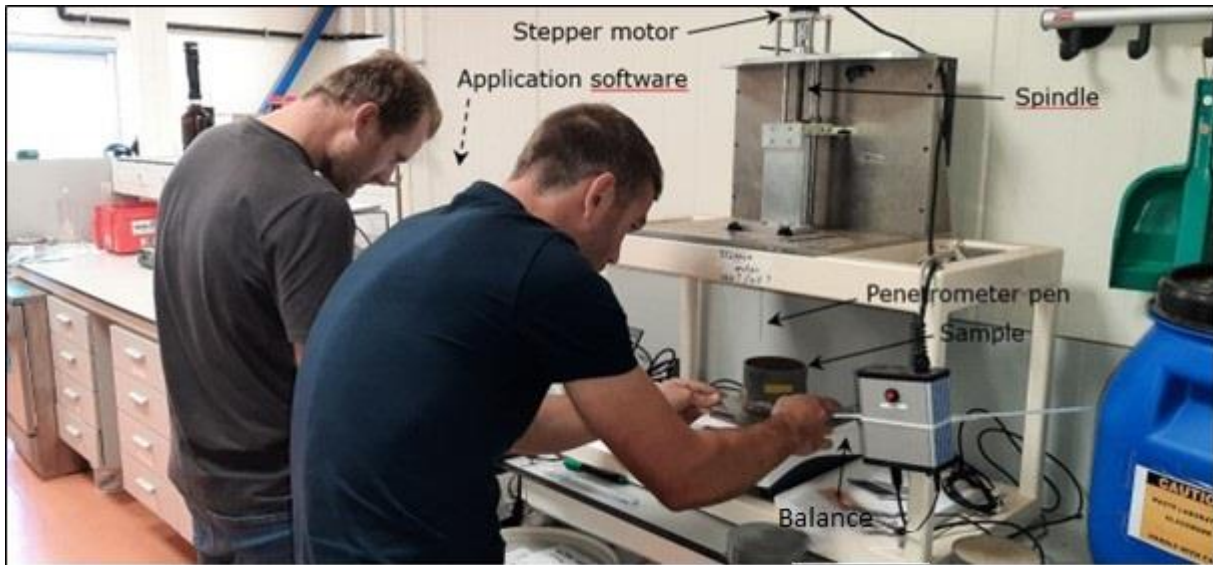
⁶ Een drukhoogte h van -10^6 cm is verkregen door het monster aan de lucht te drogen.

Tabel 2 Uitgevoerde penetrometermetingen van serie A (drukhoogte $5 \leq |h| \leq 60$ cm) bij verdichtingsdrukken in kPa, pendiameters d ($d1 = 1$ mm, $d2 = 2$ mm), snelheden v ($v1 = 1200$ mm/min (= 2 cm/s) triplometingen bij veldsnelheid, $v2 = 660$ mm/min (=1.1 cm/s), $v3 = 120$ mm/min (=0.2 cm/s), conusbonus (=pen met conus van 2mm en schacht 1.6 mm).

	kPa-ringno	h (cm)	$d1$ $v1$	$d2$ $v1$	$d2$ $v2$	$d2$ $v3$	Conusbonus $d2$ $v1$
Serie A	100-4	-5	1	1			
	100-4	-10	1	1			midden 1x
	100-1	-30	1	1			
	100-1	-60	1	1			midden 1x
	100-5	-5	1		1		
	100-5	-10	1		1		midden 1x
	100-2	-30	1		1		
	100-2	-60	1		1		midden 1x
	100-6	-5	1			1	
	100-6	-10	1			1	Ondersteboven midden 1x
	100-3	-30	1			1	
	100-3	-60	1			1	Ondersteboven midden 1x
	200-4	-5	1	1			
	200-4	-10	1	1			midden 1x
	200-1	-30	1	1			
	200-1	-60	1	1			midden 1x
	200-5	-5	1		1		
	200-5	-10	1		1		midden 1x
	200-2	-30	1		1		
	200-2	-60	1		1		midden 1x
	200-6	-5	1			1	
	200-6	-10	1			1	Ondersteboven midden 1x
	200-3	-30	1			1	
	200-3	-60	1			1	Ondersteboven midden 1x
	300-4	-5	1	1			
	300-4	-10	1	1			midden 1x
	300-1	-30	1	1			
	300-1	-60	1	1			midden 1x
	300-5	-5	1		1		
	300-5	-10	1		1		midden 1x
	300-2	-30	1		1		
	300-2	-60	1		1		midden 1x
	300-6	-5	1			1	
	300-6	-10	1			1	Ondersteboven midden 1x
	300-3	-30	1			1	
	300-3	-60	1			1	Ondersteboven midden 1x
	400-4	-5	1	1			
	400-4	-10	1	1			midden 1x
	400-1	-30	1	1			
	400-1	-60	1	1			midden 1x
	400-5	-5	1		1		
	400-5	-10	1		1		midden 1x
	400-2	-30	1		1		
	400-2	-60	1		1		midden 1x
	400-6	-5	1			1	
	400-6	-10	1			1	Ondersteboven midden 1x
	400-3	-30	1			1	
	400-3	-60	1			1	Ondersteboven midden 1x

Tabel 3 Uitgevoerde penetrometermetingen van serie B (drukhoogte $100 < |h| < 106$ cm) bij verdichtingsdrukken in kPa, pendiameters d ($d_1 = 1$ mm, $d_2 = 2$ mm), snelheden v ($v_1 = 1200$ mm/min (= 2 cm/s) triplometingen bij veldsnelheid, $v_2 = 660$ mm/min (=1.1 cm/s), $v_3 = 120$ mm/min (=0.2 cm/s), conusbonus (=pen met conus van 2mm en schacht 1.6 mm).

	kPa-ringno	h (cm)	d_1 v_1	d_2 v_1	d_2 v_2	d_2 v_3	Conusbonus d_2 v_1
Serie B	100-13	-100	1	1			
	100-25	-300	1	1			midden 1x
	100-25	-1000	1	1			
	100-1	-10 ⁶	1	1			midden 1x
	100-14	-100	1		1		
	100-26	-300	1		1		midden 1x
	100-26	-1000	1		1		
	100-2	-10 ⁶	1		1		midden 1x
	100-15	-100	1			1	
	100-27	-300	1			1	Ondersteboven midden 1x
	100-27	-1000	1			1	
	100-3	-10 ⁶	1			1	Ondersteboven midden 1x
	200-16	-100	1	1			
	200-28	-300	1	1			midden 1x
	200-28	-1000	1	1			
	200-4	-10 ⁶	1	1			midden 1x
	200-17	-100	1		1		
	200-29	-300	1		1		midden 1x
	200-29	-1000	1		1		
	200-5	-10 ⁶	1		1		midden 1x
	200-18	-100	1			1	
	200-30	-300	1			1	Ondersteboven midden 1x
	200-30	-1000	1			1	
	200-6	-10 ⁶	1			1	Ondersteboven midden 1x
	300-19	-100	1	1			
	300-31	-300	1	1			midden 1x
	300-31	-1000	1	1			
	300-7	-10 ⁶	1	1			midden 1x
	300-20	-100	1		1		
	300-32	-300	1		1		midden 1x
	300-32	-1000	1		1		
	300-8	-10 ⁶	1		1		midden 1x
	300-21	-100	1			1	
	300-33	-300	1			1	Ondersteboven midden 1x
	300-33	-1000	1			1	
	300-9	-10 ⁶	1			1	Ondersteboven midden 1x
	400-22	-100	1	1			
	400-34	-300	1	1			midden 1x
	400-34	-1000	1	1			
	400-10	-10 ⁶	1	1			midden 1x
	400-23	-100	1		1		
	400-35	-300	1		1		midden 1x
	400-35	-1000	1		1		
	400-11	-10 ⁶	1		1		midden 1x
	400-24	-100	1			1	
	400-36	-300	1			1	Ondersteboven midden 1x
	400-36	-1000	1			1	
	400-12	-10 ⁶	1			1	Ondersteboven midden 1x



Figuur 6 Foto van de opstelling met de verschillende onderdelen.

A4.2.4 Standaard verloop balans-tijdwaarden bij indringing

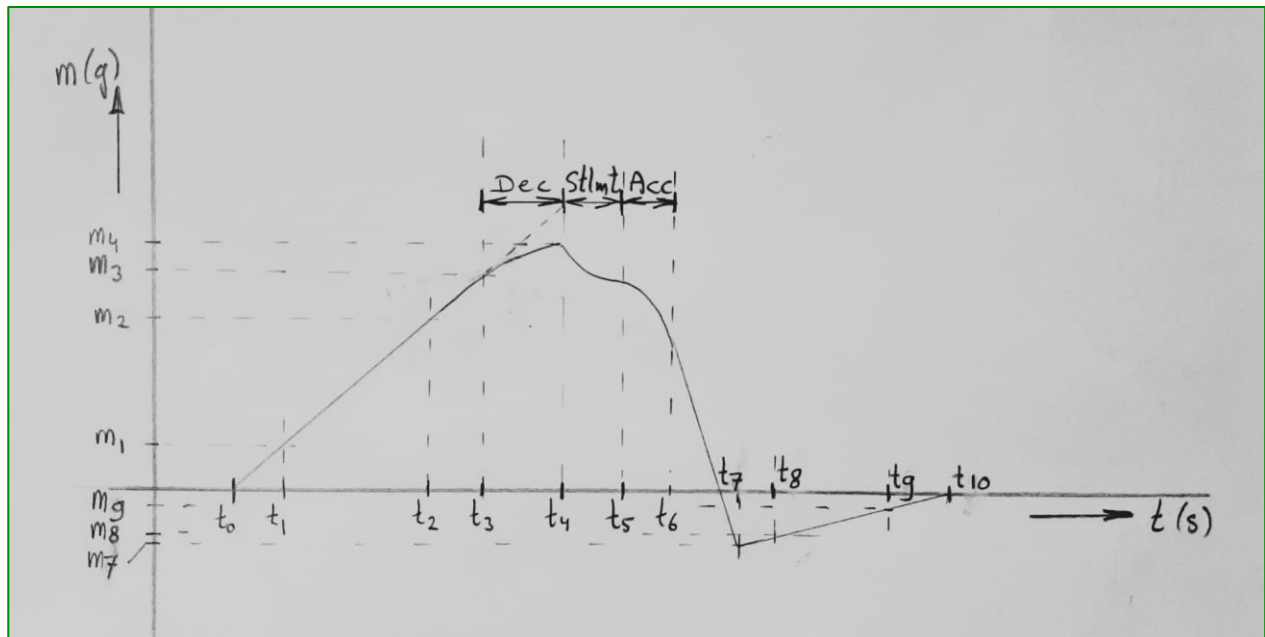
Figuur 6 geeft een schematische weergave van een standaard verloop van de geregistreerde balanswaarden bij indringing en terugtrekking van de penetrometernaald. Er zijn verschillende stadia te zien:

- $< t_0$: De naald heeft het bodemoppervlak nog niet bereikt. Op t_0 , als de pen het bodemoppervlak bereikt, moet de naald de beoogde snelheid hebben bereikt. Er moet rekening gehouden worden met de traagheid van de stappenmotor: deze heeft een korte tijd nodig om te versnellen. In de uitgevoerde proeven is de naald daarom altijd tenminste 4 cm boven het bodemoppervlak afgesteld, zodat de motor de juiste snelheid heeft als deze bij het bodemoppervlak aankomt⁷.
- t_0 - t_3 : de geregistreerde massa neemt toe. De Wit (1988) geeft aan dat de diepte waarover de indringingsweerstand kan blijven oplopen bij cohesieloos zand van 20D, met D = diameter conus (de invloedssfeer beneden de conus is 3D a 4D. De horizontale straal van de invloedssfeer is maximaal 9D). Bij een 2 mm pen is dat dan 4 cm. Chesness et al. (1972) geven een machtsfunctie voor het verband tussen de penetratieweerstand met de diepte: $CI = D^{0.79}$ met CI = conusindex (psi); D = penetratiediepte (inch). De machtsfunctie is bijna lineair vanwege de exponent 0,79. Het gebied tussen t_1 en t_2 is een veilige diepte zonder randeffecten om te beschouwen.
- t_3 - t_4 : De motor vertraagt (Eng: *deceleration*)
- t_4 - t_5 : De motor staat stil en de bodemdeeltjes settelen zich (Eng: *settlement*)
- t_5 - t_6 : De motor slaat aan en versnelt, maar dan in omgekeerde richting om de pen uit het monster te halen. Hier nog als positieve waarde getekend, maar kunnen ook al negatief zijn
- t_6 - t_7 : daling tot de meest negatieve waarde die tot stand komt door een combinatie van maximale kleef door de bijna volledige lengte van de pen in de grond en de maximale snelheid.
- t_7 - t_8 : de kleef wordt minder, en daarmee ook de geregistreerde massa, als de penlengte in de grond afneemt.
- $> t_8$: de pen is uit het monster.

De dataverwerking heeft betrekking op de periode t_1 tot t_2 voor de neergaande beweging en op de periode t_8 tot t_9 voor de opgaande beweging. De meettijdstippen (in sec) worden omgerekend naar monsterdiepte (cm)

⁷ De maximum versnelling van de stappenmotor is 30 mm s^{-2} , ofwel $30 \cdot 60 \cdot 60 = 108000 \text{ mm min}^{-2} = 108 \text{ m min}^{-2}$. Een versnelling van $a = 10 \text{ mm s}^{-2}$ is gekozen als een veilige opstartwaarde, omdat de motor stappen kan overslaan als de versnelling te groot is. Versnelling, tijd en snelheid kan berekend worden met: $a = (v - v_0)/(t - t_0) [\text{L T}^{-2}]$, met v = eindsnelheid $[\text{L T}^{-1}]$; t = tijd op eindsnelheid $[\text{T}]$; v_0 = startsnellheid $[\text{L T}^{-1}]$; a = versnelling $[\text{L T}^{-2}]$. Als $t_0 = v_0 = 0$ vereenvoudigt de vergelijking tot $a = v/t$ of $t = v/a$. De tijd die nodig is om tot volledige snelheid of vanaf daar naar snelheid 0 te komen kan worden berekend met: $t = \frac{v \left[\frac{\text{mm}}{\text{min}} \right]}{a \left[\frac{\text{mm}}{\text{min}^2} \right]}$ [min], en de positie na deze tijd t is dan $s(t) = at^2 + v_0t + s_0$. In het geval dat een snelheid van 2 cm s^{-1} gebruikt wordt en $a = 10 \text{ mm s}^{-2} = 10 \cdot 60 \cdot 60 = 36000 \text{ mm min}^{-2}$, dan is $v = 2 \text{ cm s}^{-1} = 2 \cdot 10 \cdot 60 = 1200 \text{ mm min}^{-1}$; $t = 1200/36000 = 1/30 \text{ min} = 2 \text{ s}$; $s = at^2 = 36000 \cdot (1/30)^2 = 36000/900 = 40 \text{ mm} = 4 \text{ cm}$ ($v_0 = 0$ en $s_0 = 0$). De naald moet dus **tenminste 4 cm boven het bodemoppervlak** beginnen met versnellen om de gewenste snelheid te hebben voordat het de bodem binnendringt.

De netto indringingsweerstand wordt verkregen door de weerstand van de opgaande beweging af te trekken van die van de neergaande beweging omdat de rechte naald zonder conus een relatief groot 'kleef'oppervlak heeft voor zowel de neergaande als opgaande beweging waar rekening mee gehouden moet worden. Een veldwaarneming wordt in de regel gedaan met een stang met een verdikte punt (conus), waarin kleef een veel kleinere rol speelt. Op deze manier is een vergelijking tussen de twee methoden beter te maken. Een plantenwortel ondervindt overigens niet de neergaande 'kleef' omdat de wortel naar beneden groeit en niet de hele wortel naar beneden duwt.



Figuur 7 geeft een meting van de balans tijdens penetratie met 1200 mm/min voor een meting bij $t < t_0$, voor een meting bij die ligt tussen t_0 en t_3 en voor een meting die ligt tussen t_7 en t_{10} .



Figuur 8 Close up van de balans met monster tijdens penetratie met 1200 mm/min. Links: getarreeerde balanswaarde '0.0 gram' voorafgaand indringing; Midden: positieve balanswaarde bij neergaande beweging; Rechts: negatieve balanswaarde bij opgaande beweging.

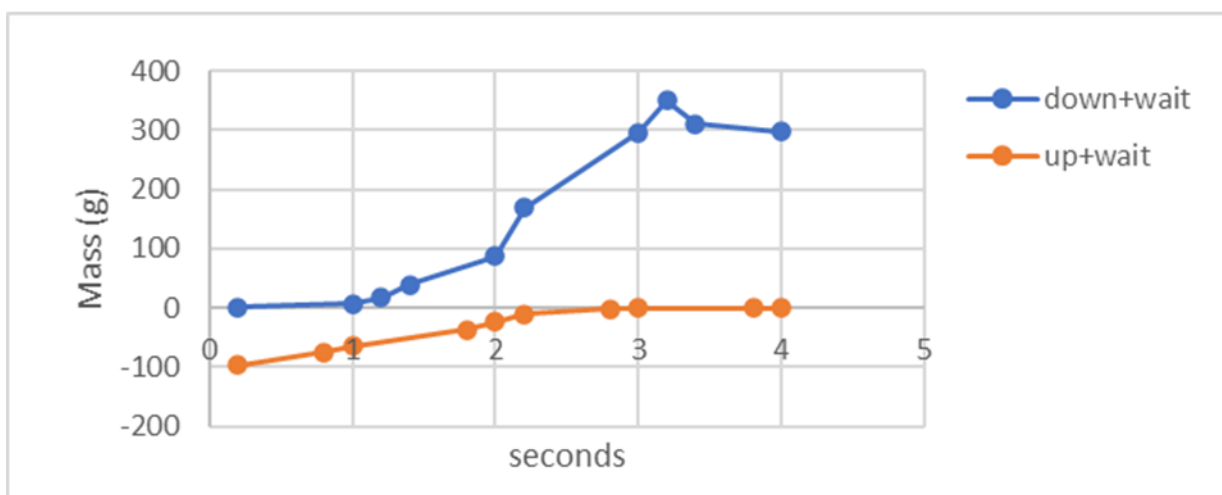
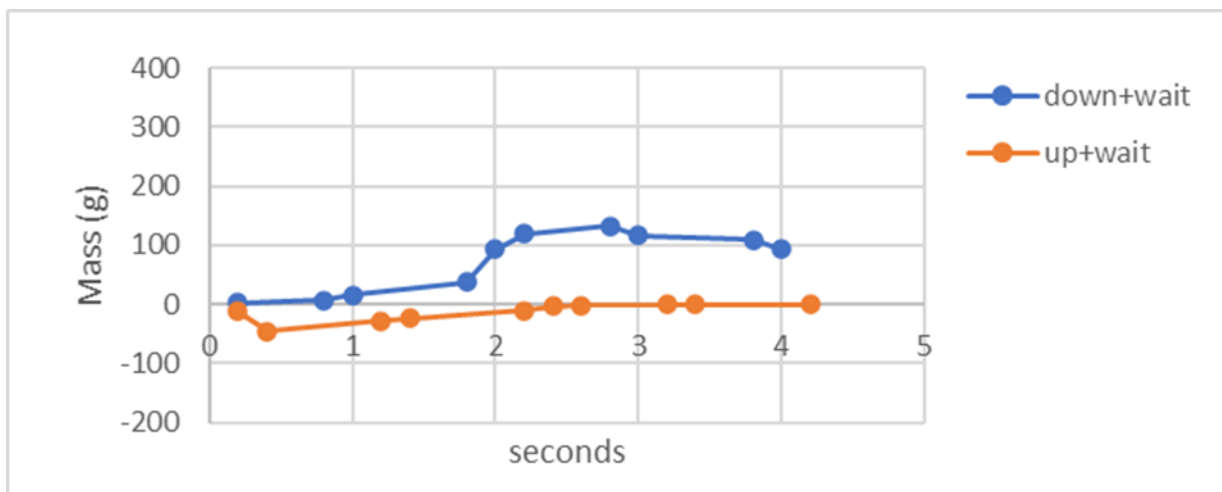
A4.3 Resultaten

A4.3.1 Ruwe data: massa als functie van de tijd

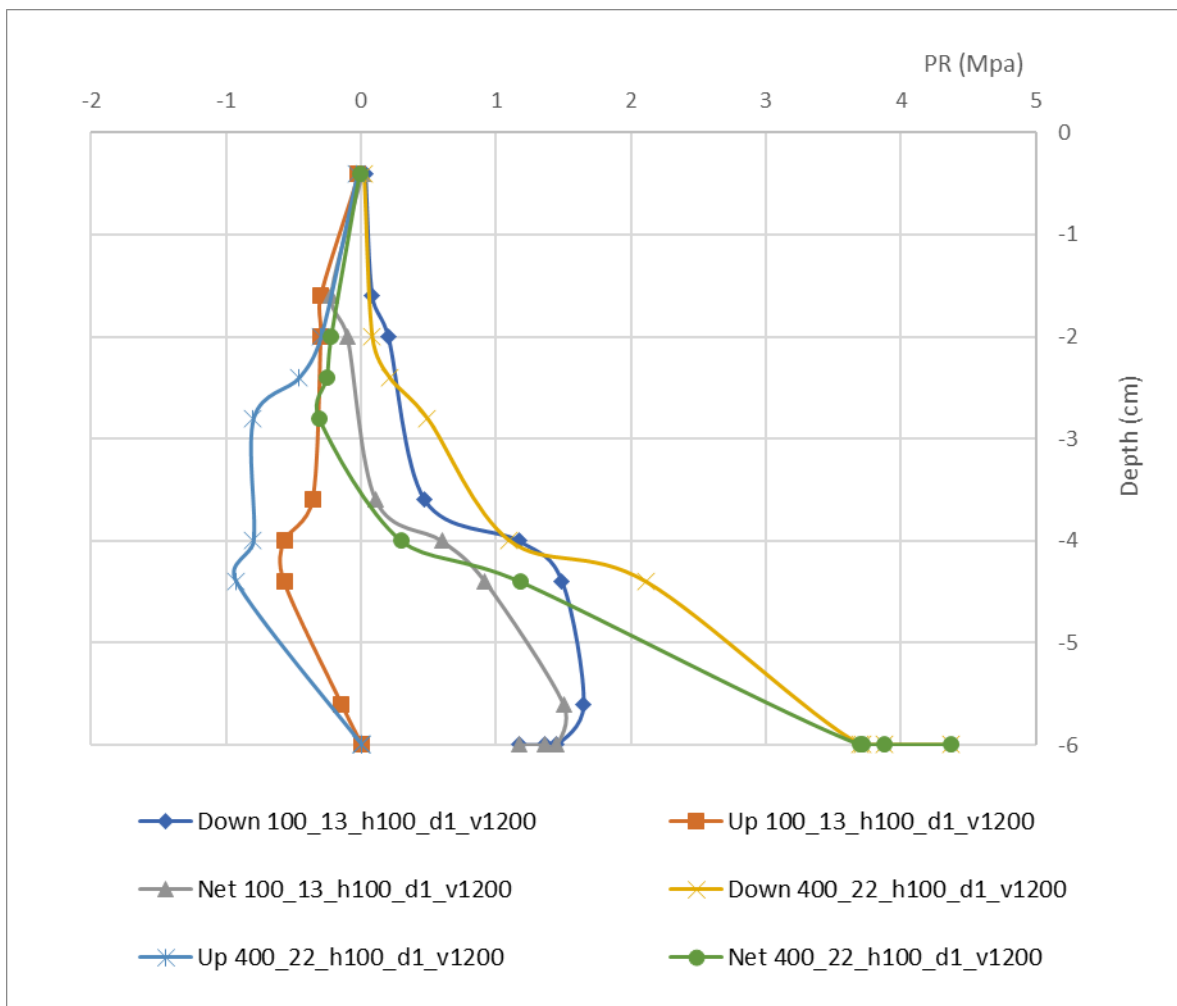
Figuur 9 geeft een voorbeeld van de gemeten massa in de tijd, waarbij de eerst weergegeven meting die van de blauwe lijn is (neergaande beweging van de naald) zodra de balans een waarde aangeeft die groter is dan de getarreeerde waarde 'nul'. De naald wordt in de onderste positie even in rust gehouden (toevoeging 'wait' in de figuur): de kromming van de blauwe lijn aan het eind van een meting naar een kleinere massa stelt daarmee de relaxatie van de bodemdeeltjes in rust voor. Daarna gaat de naald in dezelfde snelheid weer omhoog. Start daarvan markeert het begin van de oranje lijn (opgaande beweging van de naald). Dit resulteert in een negatieve massa.

A4.3.2 Indringingsweerstand als functie van de diepte

Figuur 10 toont de berekende indringingsweerstand als functie van de diepte voor beide monsters uit Figuur 9.



Figuur 9 Gemeten massa voor monster 100_13_h100_d1_v1200 (bovenste figuur: verdichting met 100 kPa, monster 13) en monster 400_22_h100_d1_v1200 (onderste figuur: verdichting 400 kPa, monster 22) beide bij een drukhoogte $h = -100$ cm, pendiameter van 1 mm en snelheid 1200 mm/min. Duidelijk is de toename van de indringingsweerstand te zien voor het monster dat verdicht is met 400 kPa ten opzichte van het monster dat verdicht is met 100 kPa.



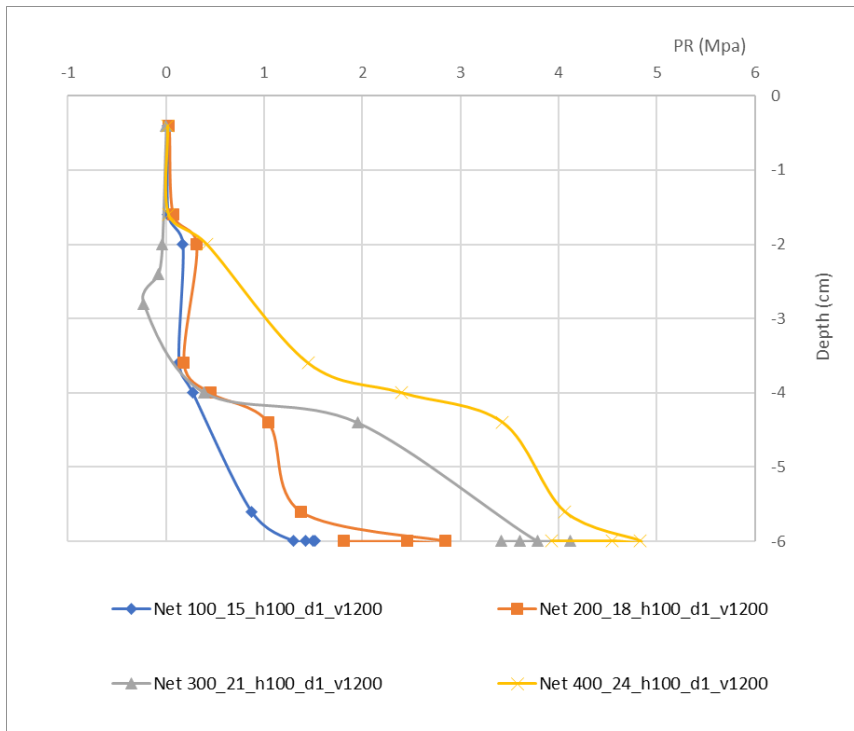
Figuur 10 De indringingsweerstand P_R (MPa) als functie van de diepte voor beide monsters uit Figuur 9. De penetratie is steeds gestopt op 6 cm diepte in verband met veiligheid en randeffecten. De indicatie 'Down' betekent dat de pen zich naar beneden beweegt, de indicatie 'Up' betekent dat de pen zich naar boven beweegt. De indicatie 'Net' betekent de indringingsweerstand van de neergaande beweging verminderd met de opgaande beweging.

N.B.: Door onnauwkeurigheden in de tijdstapwaarden (met name zichtbaar bij de hogere penetratiesnelheden) die de balans met enige vertraging meegeeft naar het uitleesprogramma op de computer, kan het zijn dat de software ervan uitgaat al op $z = -6$ cm te zijn aangekomen, maar dat dit feitelijk nog niet het geval is. Het gevolg is dat de penetratieweerstand op deze diepte soms nog lijkt toe te nemen (in dit geval bij de gele en groene lijn). Dit is fysisch onmogelijk en dus onjuist: de waarden horen dan bij een kleinere diepte. De hoogste penetratieweerstand hoort wel bij $z = -6$ cm. Voor dit fenomeen wordt in de huidige software nog niet gecorrigeerd.

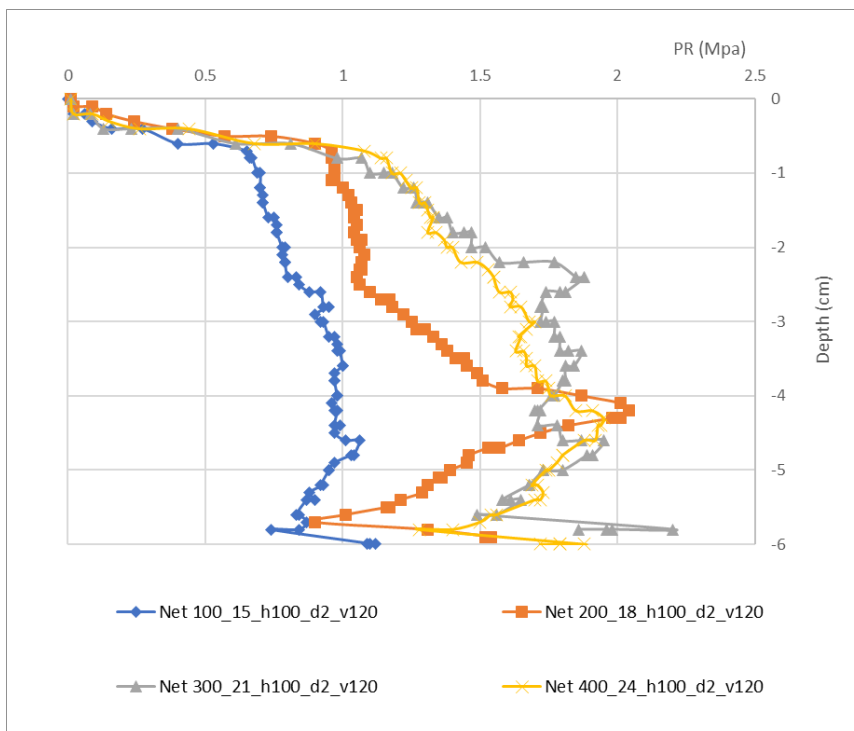
Er zijn vele vergelijkingen tussen de uitgevoerde metingen mogelijk: tussen de triplo's, conusdiameter, drukhoogte, verdichtingsgraad en indringingssnelheid. Omdat het niet doenlijk is om alle resultaten en vergelijkingen te laten zien, worden hieronder een aantal varianten uitgelicht ter illustratie. De gevonden waarden geven een indruk, maar gelden niet voor de andere metingen:

- Figuur 11: Indringingsweerstand P_R bij toenemende verdichtingsdrukken bij $d = 1$ mm en een hoge indringingssnelheid ($v = 1200$ mm/min)
- Figuur 12: Indringingsweerstand P_R bij toenemende verdichtingsdrukken bij $d = 1$ mm en een lage indringingssnelheid ($v = 120$ mm/min)
- Figuur 13: Gefitte hellingen bij toenemende verdichtingsdrukken (100 – 400 kPa), een zuigspanning van $h = -100$ cm, een pendiameter van 2 mm en een lage indringingssnelheid ($v = 120$ mm/min). De fits zijn uitgevoerd over het dieptebereik -1 tot -4,5 cm volgens Figuur 7.

- **Figuur 14:** Gecombineerde metingen, waarbij alleen de waarden op 2 cm diepte zijn weergegeven. Het valt op dat in dit geval bij een hoge indringingssnelheid ($v = 1200 \text{ mm/min}$) en een kleine pendiameter (1 mm) de waarden sterk afwijken van die van de andere snelheden en diameters.



Figuur 11 Indringingsweerstand P_R van enkele monsters bij toenemende verdichtingsdrukken bij $d = 1 \text{ mm}$ en een hoge indringingssnelheid ($v = 1200 \text{ mm min}^{-1}$).



Figuur 12 Indringingsweerstand P_R bij toenemende verdichtingsdrukken bij $d = 1 \text{ mm}$ en een lage indringingssnelheid ($v = 120 \text{ mm min}^{-1}$).

In Tabel 4 t/m Tabel 15 zijn de gemiddelde neergaande indringingsweerstand per meting over de monsterhoogten weergegeven. Tevens is de 3D-grafiek weergegeven met op de x-as de verdichtingsdruk, de y-as de drukhoogte weergegeven als $\log(h)$; en op de z-as de resulterende indringingsweerstand in MPa. De linker grafiek is die waarbij de waarde bij $h = -10^{-6}$ buiten beschouwing is gelaten. De rechter grafiek is over het gehele drukhoogte-bereik.

Tabel 4 *d1v1200 down - gemiddelden over de diepte. Gemeten waarden.*

LOG(h)	Compressiedruk (MPa)				Zonder LOG(h)=6	Met LOG(h)=6
	100	200	300	400		
0.5	0.249	0.438	0.566	0.798		
1	0.333	0.829	0.758	0.860		
1.5	0.320	0.536	0.782	0.865		
1.8	0.971	0.973	1.081	0.881		
2	0.922	1.181	1.886	2.551		
2.5	0.749	1.357	2.125	2.580		
3	1.434	2.069	3.351	2.901		
6	8.090	13.596	19.241	21.236		

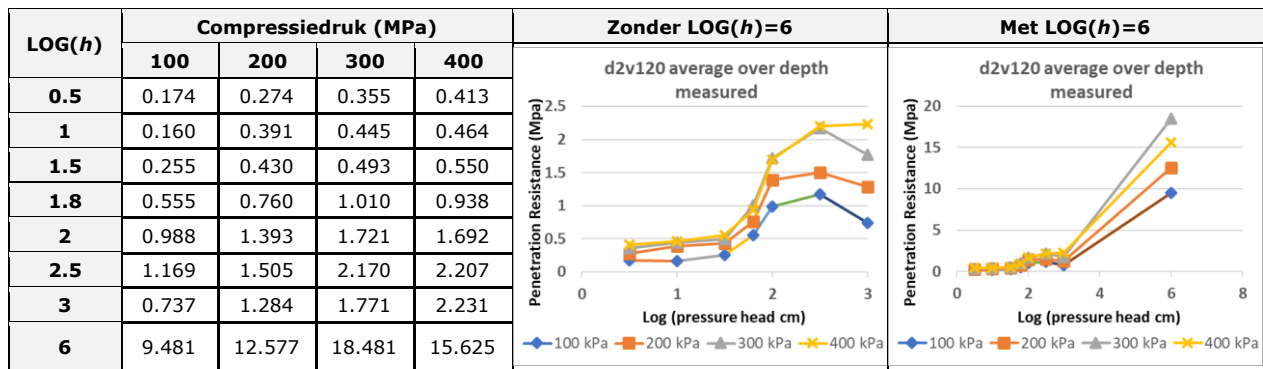
Tabel «Tabel»: *d2v1200 gemiddelden over de diepte. Gemeten waarden.*

LOG(h)	Compressiedruk (MPa)				Zonder LOG(h)=6	Met LOG(h)=6
	100	200	300	400		
0.5	0.216	0.412	0.395	0.462		
1	0.196	0.328	0.630	0.467		
1.5	0.329	0.405	0.398	0.708		
1.8	0.571	0.782	0.724	0.535		
2	0.515	0.785	0.980	1.102		
2.5	0.601	1.407	0.962	1.333		
3	0.602	0.779	1.114	1.226		
6	2.950	7.973	9.573	10.167		

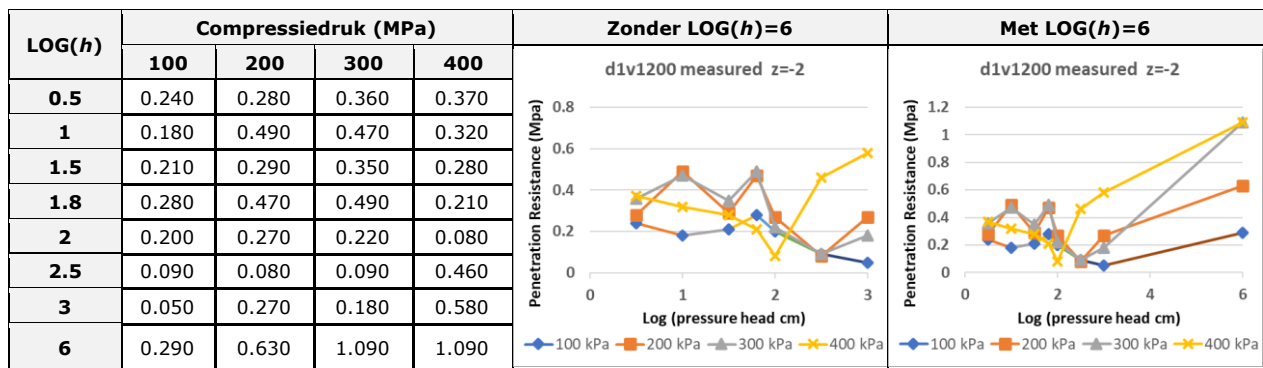
Tabel 5 *d2v660 down gemiddelden over de diepte. Gemeten waarden.*

LOG(h)	Compressiedruk (MPa)				Zonder LOG(h)=6	Met LOG(h)=6
	100	200	300	400		
0.5	0.124	0.296	0.361	0.460		
1	0.190	0.368	0.464	0.410		
1.5	0.291	0.459	0.538	0.556		
1.8	0.422	0.822	#N/A	0.822		
2	0.852	1.026	1.337	1.532		
2.5	0.978	1.066	1.613	2.006		
3	1.011	1.629	1.849	1.811		
6	3.622	11.996	12.832	13.714		

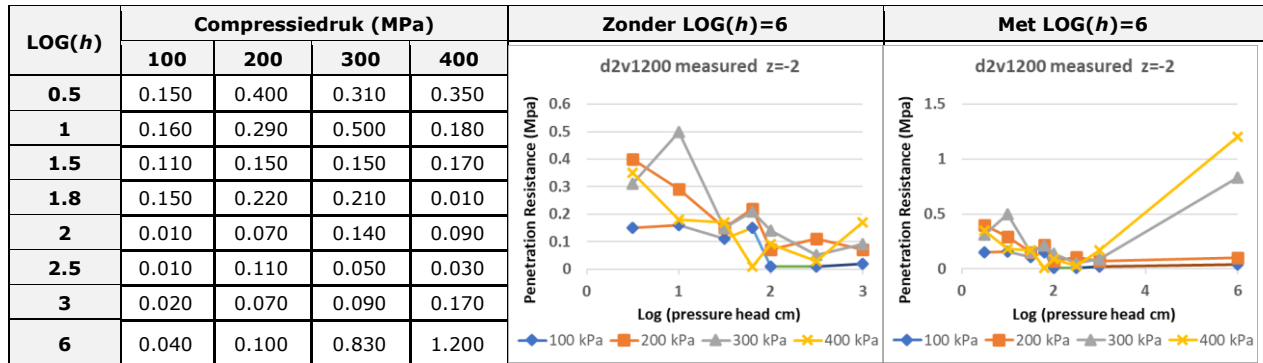
Tabel 6 d2v120 down gemiddelden over de diepte. Gemeten waarden.



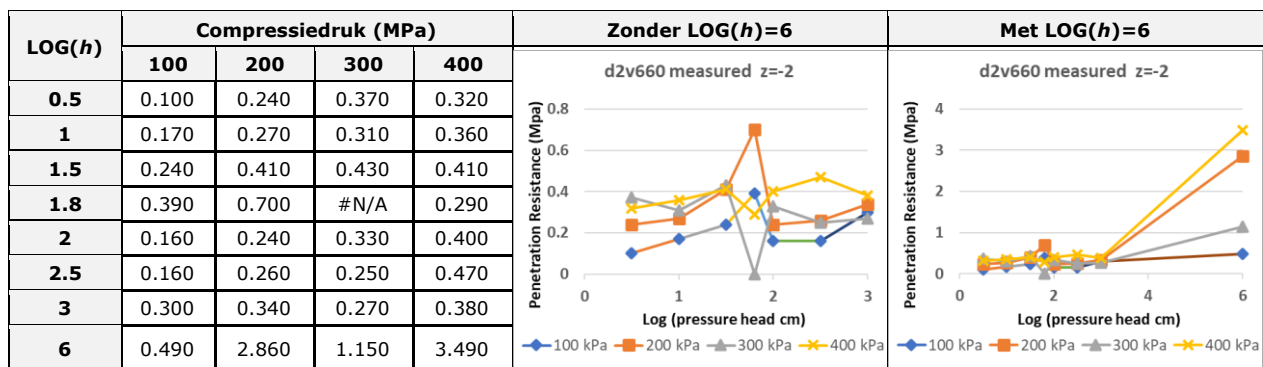
Tabel 7 d1v1200 down op diepte z=-2 cm. Gemeten waarden.



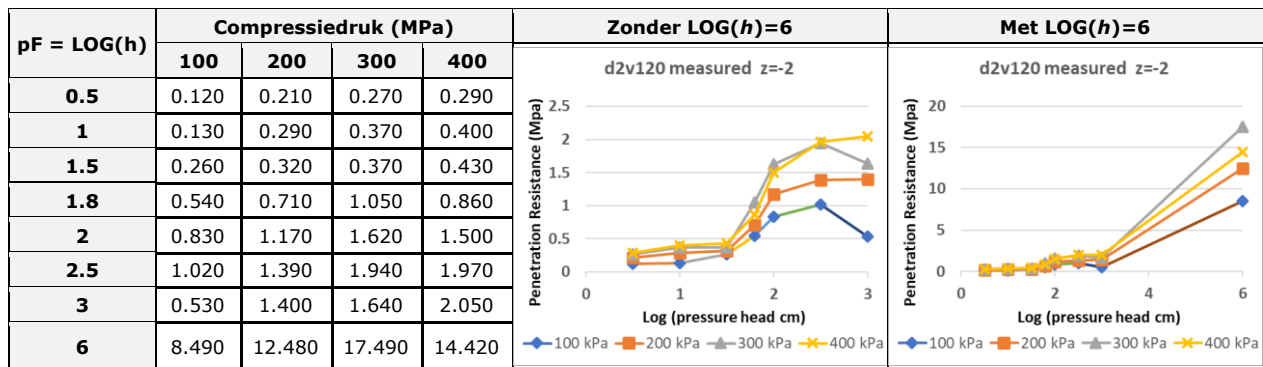
Tabel 8 d2v1200 down op diepte z=-2 cm. Gemeten waarden.



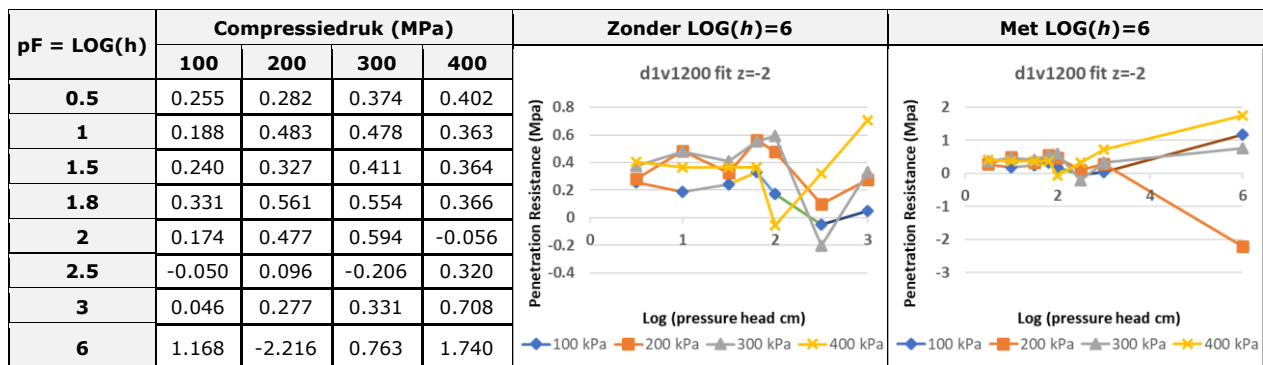
Tabel 9 d2v660 down op diepte z=-2 cm. Gemeten waarden.



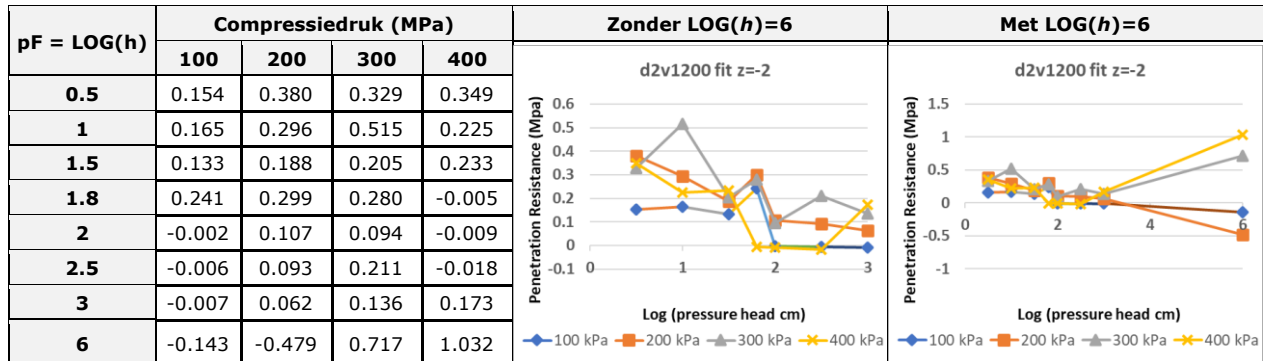
Tabel 10 d2v120 down op diepte z=-2 cm. Gemeten waarden.



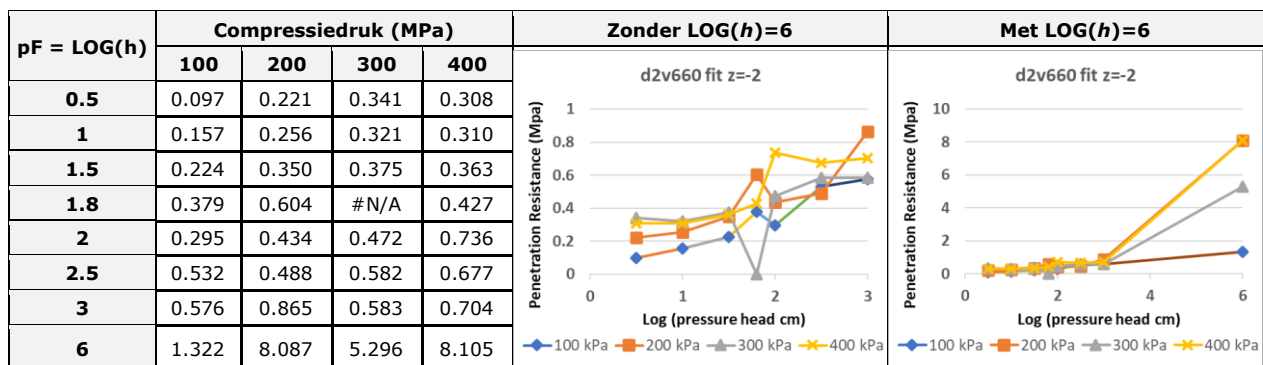
Tabel 11 d1v1200 down op diepte z=-2 cm. Gefitte waarden.



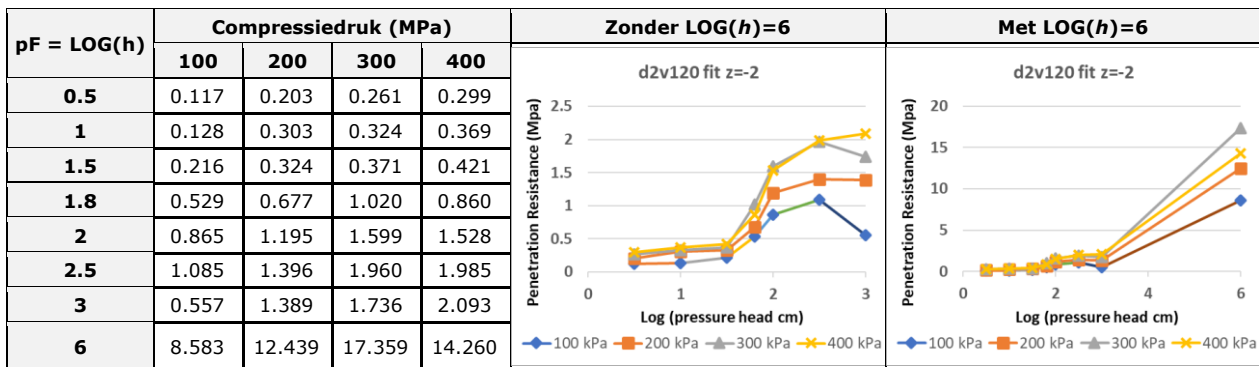
Tabel 12 d2v1200 down op diepte z=-2 cm. Gefitte waarden.



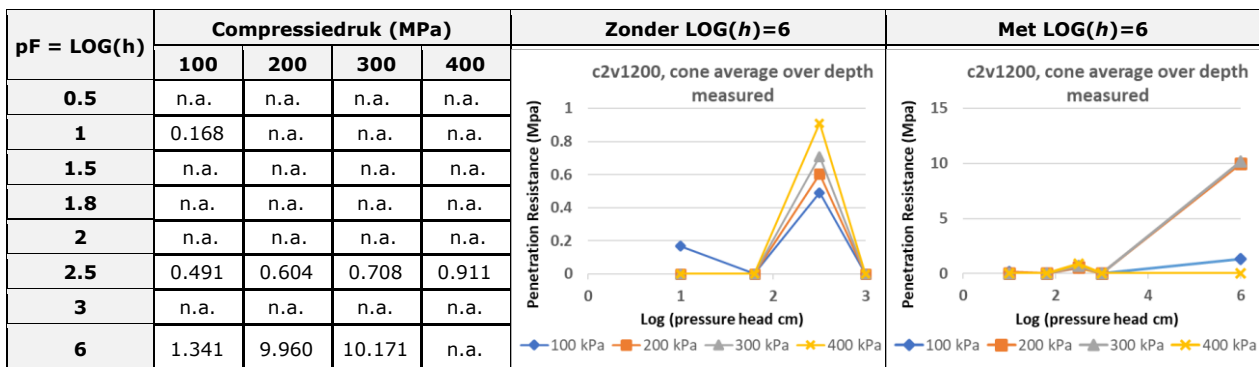
Tabel 13 d2v660 down op diepte z=-2 cm. Gefitte waarden.



Tabel 14 d2v120 down op diepte z=-2 cm. Gefitte waarden.

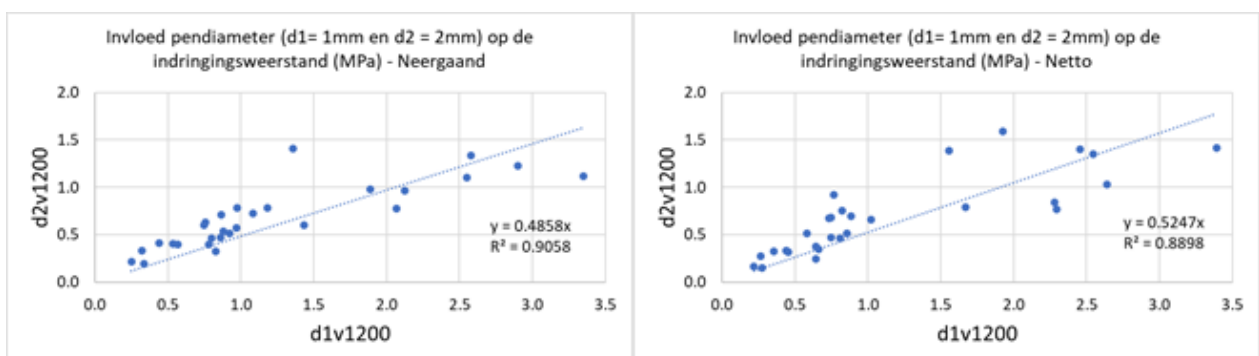


Tabel 15 c2v1200 pen met conus down gemiddelden over de diepte. Gemeten waarden. "n.a."= niet aanwezig.

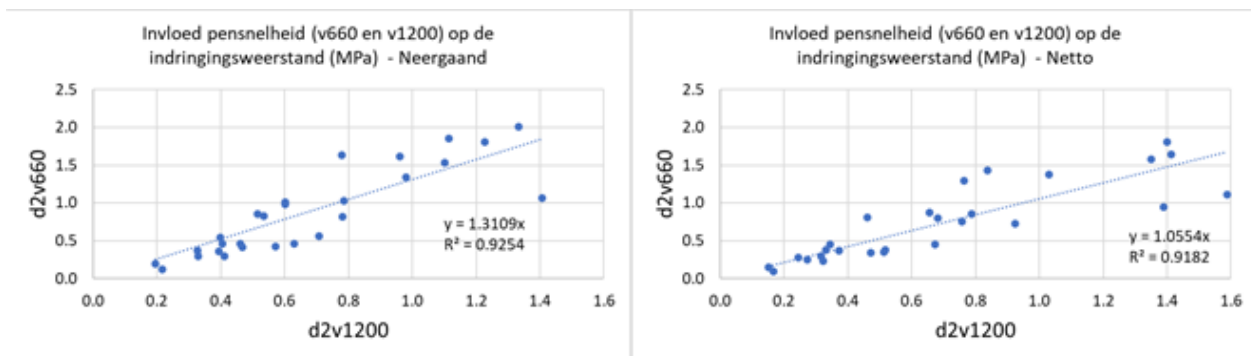


A4.3.3 Invloed pendiameter en pensnelheid

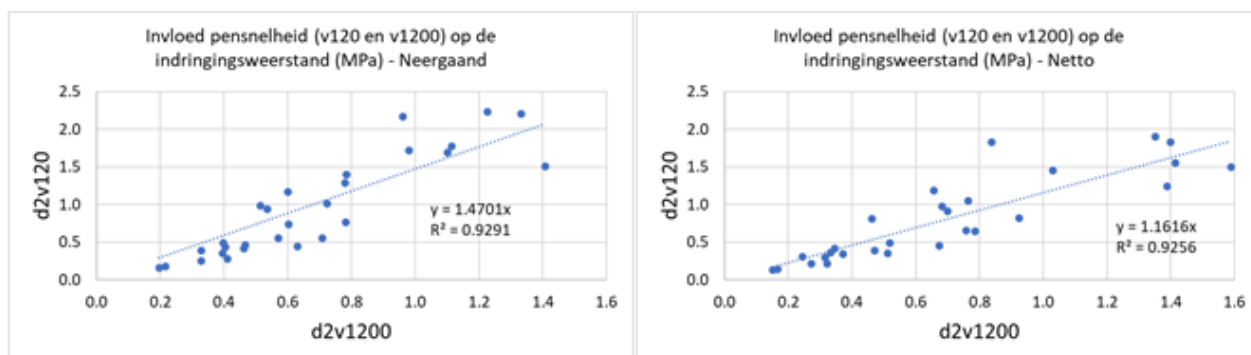
Figuur 13 geeft de invloed van de pendiameter op de neergaande indringingsweerstand en Figuur 14 en Figuur 15 geven de invloed van de pensnelheid op de neergaande indringingsweerstand. Figuur 16 geeft een vergelijking van de invloed van een pen met conus ten opzichte van een pen zonder conus. De waarden voor $h = -10^{-6}$ cm zijn buiten beschouwing gelaten omdat de pen bij deze droge condities soms vastliep en daarom niet goed beoordeeld kan worden.



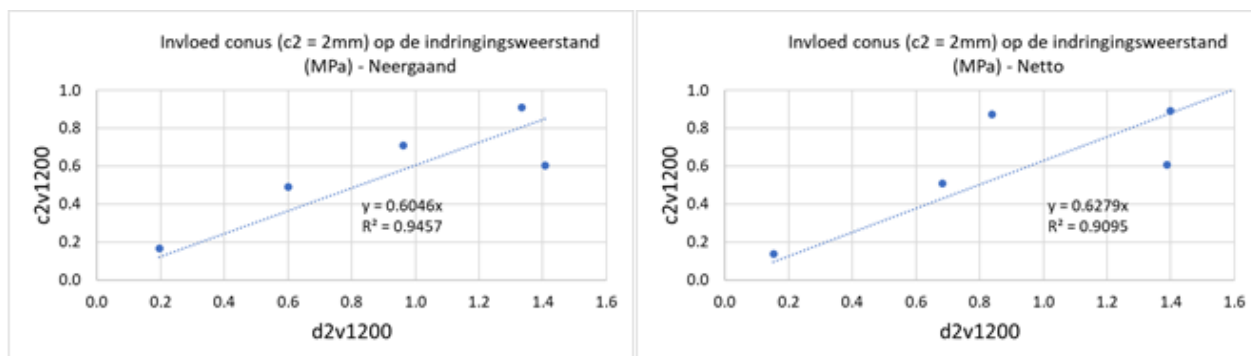
Figuur 13 De dieptegemiddelde neergaande (links) en netto (rechts) indringingsweerstand (diepte 0-6 cm), waarbij de indringingsweerstand van de pen met 2 mm doorsnede is uitgezet tegen die van $d = 1$ mm voor alle gegevens van $pF = 0.5$ tot $pF = 3$ en compactiegraden 100 kPa-400 kPa. Het punt (0,0) is niet gemeten, maar geldt wel als valide punt. De regressielijnen zijn door dit punt geforceerd.



Figuur 14 De dieptegemiddelde neergaande (links) en netto (rechts) indringingsweerstand (0-6 cm), waarbij de indringingssnelheid van 660 mm/min is uitgezet tegen die van een snelheid van 1200 mm/min voor alle gegevens van $pF = 0.5$ tot $pF = 3$ en compactiegraden 100 kPa-400 kPa. Het punt (0,0) is niet gemeten, maar geldt wel als valide punt. De regressielijnen zijn door dit punt geforceerd.



Figuur 15 De dieptegemiddelde neergaande (links) en netto (rechts) indringingsweerstand (0-6 cm), waarbij de indringingssnelheid van 120 mm/min is uitgezet tegen die van een snelheid van 1200 mm/min voor alle gegevens van $pF = 0.5$ tot $pF = 3$ en compactiegraden 100 kPa-400 kPa. Het punt (0,0) is niet gemeten, maar geldt wel als valide punt. De regressielijnen zijn door dit punt geforceerd.



Figuur 16 De dieptegemiddelde neergaande (links) en netto (rechts) indringingsweerstand (0-6 cm), waarbij de indringingssnelheid van de conus met diameter 2 mm ($c2$) is uitgezet tegen die van een de rechte pen met diameter 2 mm ($d2$) bij een snelheid van 1200 mm/min voor de beperkt beschikbare gegevens in het bereik van $pF = 0.5$ tot $pF = 3$ en compactiegraden 100 kPa-400 kPa

Deze resultaten zijn ook in tabelvorm gegeven in Tabel 16: verhoudingen tussen de gemeten penetratieweerstanden P_r (MPa) bij pendiameters D (mm) en indringingssnelheden v (mm.min⁻¹). Ze zijn gebaseerd op de gemiddelde waarden over de monsterdiepte 0-6 cm bij compactiedrukken 100 – 400 kPa en een aangelegde drukhoogte van $-1000 < h < -5$ cm.

Tabel 16 Verhoudingen tussen de gemeten penetratiweerstanden P_r (MPa) bij pendiameters D (mm) en indringingssnelheden v (mm.min⁻¹) volgens Figuur 13 – Figuur 16.

Behandeling		$P_r(Y)/P_r(X)$	
X	Y	Neergaand	Netto
D1V1200	D2V1200	0.486	0.525
D2V1200	D2V660	1.311	1.055
D2V1200	D2V120	1.470	1.162
D2V1200	C2V1200	0.605	0.628

In Tabel 17 zijn de gemeten gemiddelde netto indringingsweerstanden P_r (MPa) over een diepte van 0-6 cm weergegeven.

Tabel 17 Gemeten gemiddelde netto (neergaand minus opgaand) indringingsweerstanden P_r (MPa) over een diepte van 0-6 cm bij verschillende verdichtingsgraden (kPa), drukhoogten pF (log(-h)), pendiameters D (mm) en indringingssnelheden v (mm.min⁻¹) bij de gebruikte zandgrond.

Aangelegde drukhoogte (log(h))=pF	Behandeling					
	Verdichtingsdruk (kPa)	d1v1200	d2v1200	d2v660	d2v120	d2v1200conus
0.5	100	0.218	0.167	0.092	0.140	
1	100	0.273	0.153	0.144	0.127	0.137
1.5	100	0.266	0.272	0.247	0.211	
1.8	100	0.856	0.517	0.375	0.487	
2	100	0.807	0.462	0.813	0.810	
2.5	100	0.747	0.683	0.800	0.979	0.510
3	100	1.672	0.787	0.855	0.647	
0.5	200	0.354	0.323	0.231	0.216	
1	200	0.645	0.245	0.275	0.308	
1.5	200	0.440	0.333	0.375	0.363	
1.8	200	0.823	0.757	0.752	0.655	
2	200	1.021	0.657	0.868	1.182	
2.5	200	1.557	1.389	0.950	1.243	0.607
3	200	2.296	0.765	1.289	1.049	
0.5	300	0.453	0.316	0.297	0.300	
1	300	0.580	0.513	0.347	0.352	
1.5	300	0.664	0.345	0.448	0.418	
1.8	300	0.882	0.699		0.915	
2	300	1.924	1.588	1.112	1.501	
2.5	300	2.282	0.838	1.434	1.825	0.873
3	300	3.390	1.413	1.644	1.553	
0.5	400	0.643	0.373	0.372	0.346	
1	400	0.747	0.472	0.341	0.384	
1.5	400	0.731	0.673	0.454	0.453	
1.8	400	0.765	0.924	0.726	0.819	
2	400	2.639	1.030	1.379	1.451	
2.5	400	2.455	1.400	1.811	1.829	0.891
3	400	2.544	1.351	1.578	1.900	
Average		1.167	0.694	0.741	0.802	

A4.4 Discussie en conclusie

Homogeniteit van de monsters

Er is veel zorg besteed aan het homogeen verdichten van de monsters (zie Bijlage 1: Monstervoorbereiding). Desondanks zijn lichte afwijkingen geconstateerd in de homogeniteit van de droge bulkdichtheden over de hoogte van het monsters. In een aparte proef zijn maximale afwijkingen over de diepte geconstateerd van 6% van de gemiddelde dichtheid per compactiegraad (bij 8 herhalingen per compactiegraad). De gemiddelde droge bulkdichtheden over de diepte van het monster zijn goed vergelijkbaar. De homogeniteit van de dichtheid over de diepte van de monsters beschouwen we als voldoende voor het uitvoeren en interpreteren van de indringingsweerstand.

Wat is het effect van mechanische compressie op de indringingsweerstand

De aangebrachte compressiekrachten varieerden van 100 kPa tot 400 kPa. Er is een duidelijke toename van de indringingsweerstand waarneembaar bij een toenemende compressiekracht over het gehele vochtigheidsbereik van volledig droog tot bijna verzadigd en bij alle pendiameters en pensnelheden. In Tabel 4 t/m Tabel 15 zijn deze weergegeven. De indringingsweerstand varieert van 0,1 – 2,2 MPa bij de verschillende indringingssnelheden en pendiameters over het drukhoogtebereik $-1000 < h < -5$ cm. Over het algemeen neemt de indringingsweerstand in dit drukhoogtebereik toe met een factor 2 à 3 bij een toename van de compressiedruk van 100 – 400 kPa. De indringingsweerstand bij $h = -10^6$ cm (luchtdroog) kan oplopen tot meer dan 21 MPa.

Wat is het effect van drukhoogte en watergehalte op indringingsweerstand?

De aangebrachte drukhoogten varieerden van $h = -5$ cm (bijna waterverzadigd) tot $h = -10^6$ cm (bijna droog). Er is een duidelijke toename van de indringingsweerstand waarneembaar bij een toenemende droogte. In Tabel 4 t/m Tabel 15 zijn deze weergegeven. Over het algemeen neemt de indringingsweerstand over het drukhoogtebereik $h = -5$ tot $h = -1000$ cm toe met een factor 2 tot 10 bij de verschillende indringingssnelheden, pendiameters en compressiekrachten.

Wat is het effect van indringingssnelheid op de indringingsweerstand?

Er is met 3 indringingssnelheden gewerkt: $v = 1200$ mm/min (normaal aanbevolen snelheid voor veldmetingen = 2 cm/s), $v = 660$ mm/min en $v = 120$ mm/min. De indringingssnelheid van 2 cm/s is vastgesteld in de International Reference Test Procedure (IRTP) en de ASTM standard (ASTM D5778), en geldt ongeacht het grondtype, maar is vastgesteld op basis van metingen met een gedraineerde zandgrond (Kim et al. 2010).

Tabel 4 en Tabel 5 zijn deze weergegeven. Een lagere pensnelheid geeft over het algemeen een hogere netto en bruto penetratieweerstand (circa 10% respectievelijk 40%). Verder valt op (in deze bijlage niet weergegeven) dat een lagere indringingssnelheid al op veel geringere diepte tot een evenwichtsweerstand komt. De resultaten zijn een stuk stabielere dan die bij de hoge penetratiesnelheden van 660 mm/min en 1200 mm/min.

Ten tijde van het gereedkomen van deze rapportage zijn nieuwe meetgegevens beschikbaar gekomen over het effect van de indringingssnelheid op de diepte waarop de meting 'stabiel' is. Er zijn duidelijke omslagpunten waargenomen. Hoe sneller de indringing hoe dieper dit stabiele punt ligt. Het begin van de stabiele diepte ligt bij een snelheid van $v = 120$ mm/min op ongeveer $z = -1,5$ cm. Voor $v = 660$ mm/min is dat ongeveer $z = -4,5$ cm en voor 1200 mm/min ongeveer $z = -6,0$ cm. Ge et al. (2024) geven aan dat als een conus op een hogere snelheid door de bodem gaat het een grotere kinetische potentiële energie levert aan het aanwezige poriewater, waardoor dit water snel wil verplaatsen. Het is te beargumenteren dat een lagere penetratieweerstand ontstaat doordat de gelimiteerde waterdoorlatendheid ervoor zorgt dat slechts een deel van het water zich in de korte tijd kan verplaatsen wat resulteert in een plaatselijk hogere waterdruk, waardoor bodemdeeltjes in dat gebied makkelijker bewegen. Het onderzoek van Ge et al. gaat overigens uit van een waterverzadigde bodem. Het is aannemelijk dat dit ook voor een onverzadigde bodem geldt, wat wordt bevestigd door het onderzoek van Suzuki & Lehane (2022). De verhouding k/v (waterdoorlatendheid/penetratiesnelheid) geven zij als maat voor de penetratieweerstand: hoe groter deze verhouding, hoe groter de penetratieweerstand. Een aanvullende interpretatie vanuit voorliggend onderzoek is dat de mechanische waterdruk dieper in het monster groter is omdat daar het water moeilijker weg kan

dan aan het oppervlak, waardoor de indringingsweerstand afneemt met toenemend vochtgehalte en toenemende diepte in het bovenste deel van het monster. Als de conus langzamer beweegt neemt dit effect af en is de indringingsweerstand groter. Afnemende penetratieweerstanden met toenemende indringingssnelheden worden ook gevonden door onder andere Zhang & Wang (2022), Suzuki & Lehane (2015) en Kim et al. (2010). Suzuki & Lehane vinden dit bij zowel verzadigde als onverzadigde gronden. Suzuki & Lehane geven technische relaties: hoe hoger de stijfheid van de bodem (hoe minder makkelijk deze vervormt door een externe kracht), of hoe hoger de frictiehoek van de bodemdeeltjes (hoe minder makkelijk de deeltjes over elkaar heen schuiven), hoe hoger de penetratieweerstand.

Omdat een plantenwortel wortel erg traag in de bodem beweegt, is het aannemelijk dat de kinetische energie van het bodemwater verwaarloosbaar is en dat daarom van de hoogste indringingsweerstand uitgegaan moet worden, en dus bij een lage snelheid van de conus van de penetrometer. Een lage conussnelheid heeft als aanvullend voordeel dat ook op geringe diepte al een betrouwbare meting gedaan kan worden, terwijl dat bij grotere snelheden niet het geval is. Uit Suzuki & Lehane valt op te maken dat er een laagste penetratiesnelheid gevonden moet kunnen worden waarbij de penetratieweerstand niet verder toeneemt. Welke snelheid dat precies is hangt af van de waterdoorlatendheid van de bodem en is dus afhankelijk van het vochtgehalte in de bodem. De snelheid is op dit moment nog onbekend.

Wat is the effect van de diameter van de conus op de indringingsweerstand?

Uit Tabel 16 valt op dat een pendiameter met 1 mm doorsnede een ongeveer 2 keer zo grote penetratieweerstand laat zien (na correctie voor het penpuntoppervlak) dan de 2 mm pendiameter. Voor de 'kleef' aan de zijkant van de pen is dan al gecorrigeerd door de negatieve penetratieweerstanden bij de opgaande beweging op te tellen bij die van de neergaande beweging.

Een kleinere pendiameter veroorzaakt minder waterverplaatsing waardoor ook hier de theorie van Ge et al. (2024) van toepassing lijkt te zijn. De indringingsweerstand neemt toe met afnemende pendiameter. Voor praktijkmetingen is de verwachting dat een kleine pendiameter betere resultaten geeft.

Welke relatie is er te vinden tussen de laboratoriummetingen en de veldmetingen?

In het veld wordt vaak gewerkt met een indringingssnelheid van 2 cm/s (=1200mm/min). Deze snelheid is erg moeilijk te handhaven bij een handmatige bediening, waardoor er aanzienlijke verschillen kunnen ontstaan in de gemeten penetratieweerstanden die veroorzaakt worden door snelheidsverschillen. Verder wordt in het veld met een veel grotere conusdiameter gewerkt dan in deze proeven in het lab mogelijk waren. In Tabel 16 is een kwantitatieve vergelijking gegeven tussen de penetratieweerstanden bij verschillende snelheden en pendiameters voor deze specifieke grond. Ze zijn dus niet zondermeer toepasbaar op andere gronden. Het vochtgehalte of drukhoogte van het poriewater bepaalt voor een belangrijk deel de gevonden penetratieweerstand. Omdat het vochtgehalte in het veld normaal gesproken grote variaties vertoont, bijvoorbeeld nat nabij het grondwater en droog aan de oppervlakte bij droog weer, zullen ook de gevonden penetratieweerstanden hier duidelijk en niet-verwaarloosbaar aan relateren.

In het veld komen normaal gesproken grote verschillende indringingssnelheden bij het meten in 1 profiel en tussen profielen, zijn de indringingssnelheden groot, is de conusdiameter groot en zijn er grote vochtverschillen in het profiel aanwezig. Een reguliere meting met de hand-penetrometer vertoont dan ook vaak grote onverklaarbare verschillen over de diepte van het profiel en over de tijd. In dit onderzoek is duidelijk gemaakt dat de verschillen groot kunnen zijn en voor veel verwarring bij de interpretatie kunnen zorgen.

De resultaten van dit onderzoek tonen aan dat veldmetingen verbeterd kunnen worden door gebruik te maken van:

- Een lage indringingssnelheid⁸
- Een automatische goed gereguleerde indringingssnelheid (geen handbediening)
- Een kleine conusdiameter

⁸ In dit onderzoek is de laagst geteste indringingssnelheid 120 mm/min (=0.2 cm/s). De verwachting is dat bij lagere snelheden de penetratieweerstand nog verder zal toenemen, maar dat er een laagste snelheid is waarbij de weerstand niet verder toeneemt. Bij welke snelheid dat is, is op dit moment nog onduidelijk

- Een nauwkeurige vocht- of drukhoogtemeting over de gemeten diepte. Om voor het vochtgehalte of drukhoogte te kunnen corrigeren is een lab-kalibratie nodig voor de specifieke grond.

A4.5 Referenties

- Bakema, G., G. Bakker, J. Cruijsen, F. van Egmond, E. van den Elsen, M. Heinen, H. Schneider. 2022. De invloed van bodemverdichting op de water- en luchthuishouding in de bodem en op de plantontwikkeling. Literatuuronderzoek. Rapport 3225, Wageningen Environmental Research.
<https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/583342>
- Chesness, J.L, E.E. Ruiz & C. Cobb, Jr., 1972. Quantitative Description of Soil Compaction in Peach Orchards Utilizing a Portable Penetrometer. Athens, University of Georgia, Agricultural Engineering Center.
D5778–20, Standard Test Method for Electronic Friction Cone and Piezocone Penetration Testing of Soils. Current edition approved June 1, 2020. Published July 2020
- de Wit, N.M.M. 1988. De invloed van verschillende bodemparameters op de indringingsweerstand van zandgrond. ICW Nota 1844, Wageningen, Instituut voor cultuurtechniek en waterhuishouding.
- Farrel, D.A. & E.L. Greacen, 1966. Resistance to penetration of fine probes in compressible soil. Austr. J. Soil Res. 4, 1, pp.1-17.
- Ge, Ying, et al., 2024. "Numerical simulation of cone penetration test by using CFD–DEM coupled analysis." Acta Geotechnica (2024): 1-19.
- International Reference Test Procedure for the Cone Penetration Test (CPT) and the Cone Penetration Test with pore pressure (CPTU) (English). Netherlands Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Geotechnical engineering for transportation infrastructure: theory and practice, planning and design, construction and maintenance; Soil mechanics and geotechnical engineering, 1999.
- Kim, K., M. Prezzi, R. Salgado and W. Lee, 2010. Penetration rate effects on cone resistance measured in a calibration chamber. Houston, Professional Service Industries.
- Panayiotopoulos, K., E. Salonikiou, K. Siaga, V. Germanopoulou, S. Skaperda, 2003. Effect of uniaxial compression on water retention, hydraulic conductivity and the penetration resistance of six Greek soils. International Agrophysics 17 (2003): 191-197.
- Salgado, R. & M. Prezzi, 2014. Penetration Rate Effects on Cone Resistance: Insights From Calibration Chamber and Field Testing. West Lafayette, Lyles School of Civil Engineering. Soils and Rocks, São Paulo, 37(3): 233-242.
- Sanglerat, G., 1972. The penetrometer and soil exploration. Elsevier. Amsterdam, 464 pp.
- Suzuki, Y. & B.M. Lehané, 2015. Analysis of CPT end resistance at variable penetration rates using the spherical cavity expansion method in normally consolidated soils. Crawley, The University of Western Australia.
- Vereniging voor Landinrichting, 1992. Cultuurtechnisch Vademecum. Brouwer Offset, Utrecht.
- Zhang, Jian-Hong & Hao Wang, 2022. Experimental and Numerical Study of Rate Effect in Cone Penetration Tests. Beijing, Tsinghua University.

Appendix 5 Effecten van verschillende mate van verdichting op de waterdynamiek in een kolomexperiment in de kas: simulaties met SWAP

Auteurs: Marius Heinen, Martin Mulder

Reviewer: Guido Bakema (WENR), Jos van Dam (WU)

Inhoudsopgave

A5.1	Inleiding	108
A5.2	Materiaal en Methode	108
A5.2.1	SWAP-WOFOST	108
A5.2.2	Domein, randvoorwaarden en initiële conditie	108
A5.2.3	Hydraulische eigenschappen	109
A5.2.4	Watervraag en wateropname	110
A5.2.5	Beworteling	110
A5.3	Resultaten en Discussie	110
A5.3.1	Actuele transpiratie	110
A5.3.2	Drukhoogte net boven de verdichte laag	111
A5.3.3	Watergehalte net onder de verdichte laag	112
A5.3.4	Wateraanvoer vanuit grof zand	113
A5.3.5	Capillaire opstijging door verdichte laag heen	114
A5.3.6	Wortelverdeling en gesimuleerde wateropnameverdeling	114
A5.3.7	Algemene discussie	117
A5.4	Conclusies	118
A5.5	Referenties	119

A5.1 Inleiding

In Appendix 2 van dit rapport zijn de resultaten van een kasproef beschreven. In die proef groeide een maisplantje in een pot bestaande uit drie compartimenten, waarvan de middelste een verhoogde dichtheid had ten opzichte van de andere twee compartimenten. Er werd geen water aan de bovenzijde toegediend, zodat het bovenste compartiment na verloop van tijd uitdroogde (zie gemeten drukhoogteverloop in Appendix 2). Zodra de wortels door de verdichte laag heen waren gedrongen konden ze water opnemen uit het onderste compartiment. De bewortelingsgegevens en gemeten watergehaltes en drukhoogtes zijn in Appendix 2 gerapporteerd. De hydraulische eigenschappen zijn (achteraf) gemeten in het laboratorium in ringmonsters die op vergelijkbare wijze waren verdicht zoals de middelste compartimenten in de kolomproef (zie Appendix 3). In deze appendix worden simulaties met het model SWAP-WOFOST beschreven waarbij de kasproef is nagerekend.

Voorafgaand aan de kasproef is met hetzelfde model de proefopzet met een pot bestaande uit drie compartimenten boven op een laag grof zand doorgerekend op basis van gefingeerde hydraulische eigenschappen, gefingeerde bewortelingsprofielen en gefingeerde verdamping. Hieruit bleek dat het bovenste compartiment na verloop van tijd sterk uitgedroogd zou raken, dat de aanvoer vanuit het grof zand naar de onderkant van de pot net voldoende zou kunnen zijn, en dat daarbij weinig of geen water via capillaire opwaartse beweging door de verdichte laag naar het bovenste compartiment zou plaatsvinden. Op basis van deze bevindingen is de uiteindelijk proefopzet zoals beschreven in Appendix 2 uitgevoerd. Omdat in deze voor-simulaties was uitgegaan van een groot aantal gefingeerde eigenschappen is besloten deze resultaten hier niet te beschrijven, maar de focus te leggen op het narekenen van de situatie in de kasproef.

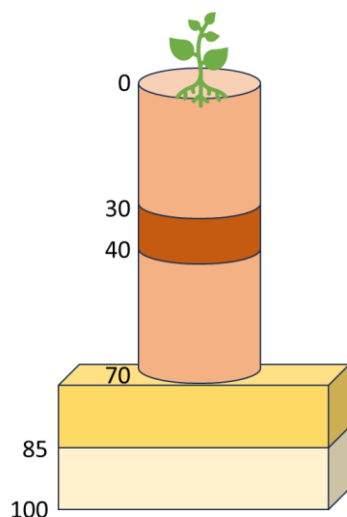
A5.2 Materiaal en Methode

A5.2.1 SWAP-WOFOST

Er is gebruik gemaakt van het model SWAP-WOFOST (Kroes et al., 2017). Omdat de focus ligt op de ondergrondse dynamiek van water is besloten om gewasgroei niet dynamisch na te bootsen, maar gebruik te maken van de optie om ondergrondse gewasontwikkeling op te leggen. Het betreft hier de ontwikkeling van de beworteling. Vanwege de abrupte verandering van de bewortelingsprofielen bij overgang tussen de drie compartimenten (zie Appendix 2) moest het model dag-voor-dag gedraaid worden (via de zogenaamde doorstart functionaliteit van SWAP-WOFOST), waarbij de eindtoestand van de vorige dag als begintoestand van de nieuwe dag werd gebruikt, en alleen het bewortelingsprofiel per dag in de invoer werd aangepast.

A5.2.2 Domein, randvoorwaarden en initiële conditie

In Figuur 1 is de kolomproef schematische weergegeven. De SWAP-WOFOST simulaties hebben betrekking op de drie compartimenten in de pot en de laag grof zand daaronder. De laag Blokzijlzand was in de proefopzet aanwezig om een opgelegde onderdruk aan de onderzijde van de laag grof zand aan te brengen. Hoewel de ingestelde onderdruk in het Blokzijlzand was gekozen om een onderdruk van $h = -75$ cm aan de onderzijde van het grof zand te realiseren, bleek uit gemeten drukhoogtes in het midden van het grofzand dat daar de drukhoogte gemiddeld -105 cm was, terwijl ongeveer -90 cm werd verwacht. Daarom is in de simulaties een iets lagere opgelegde drukhoogte aan de onderzijde van het grof zand aangehouden: $h = -85$ cm.



Figuur 1 Schematische weergave van de kolommen met verdichte laag op 30-40 cm geplaatst op grofzand (70-85 cm) op Blokzijlzand (85-100 cm).

Aan de bovenzijde van de pot werd in SWAP een dichte rand verondersteld omdat deze met plastic was afgedekt (geen wateraanvoer of -afvoer).

Er werden vijf behandelingen in de kasproef gebruikt, aangeduid met S0 (referentie, zonder verdichte tussenlaag; droge bulkdichtheid 1350 kg m^{-3}), en S1-S4 met toenemende dichtheid van de verdichte laag (zie Appendix 2 en Appendix 3):

- S1 aangedrukt met 100 kPa, resulterend in een droge bulkdichtheid van 1416 kg m^{-3}
- S2 aangedrukt met 200 kPa, resulterend in een droge bulkdichtheid van 1507 kg m^{-3}
- S3 aangedrukt met 300 kPa, resulterend in een droge bulkdichtheid van 1535 kg m^{-3}
- S4 aangedrukt met 400 kPa, resulterend in een droge bulkdichtheid van 1573 kg m^{-3}

Initieel werd een hydrostatisch evenwicht in de laag grof zand verondersteld. De drie compartimenten in de pot waren samengesteld met uniform voor-bevochtigd zand. Hierbij was zoveel water toegediend dat de gemiddelde volumetrische watergehaltes van de bovenste, middelste en onderste compartimenten gelijk was aan, respectievelijk, 0.16 , 0.10 en $0.10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Op basis van de waterretentiekaracteristieken (zie Appendix 3) werd hieruit de uniforme initiële drukhoogte per compartiment berekend en opgelegd als initiële toestand in het model (Tabel 1).

Tabel 1 Initiële drukhoogte (h ; cm) per laag voor de vijf behandelingen.

Laag, compartiment (cm)	S0	S1	S2	S3	S4
0-30	-541.7	-541.7	-541.7	-541.7	-541.7
30-40	-1465.5	-816.9	-771.0	-712.7	-732.2
40-70	-1465.5	-1465.5	-1465.5	-1465.5	-1465.5

A5.2.3 Hydraulische eigenschappen

De hydraulische eigenschappen van de niet verdichte compartimenten (bovenst en onderste compartiment) en van de verdichte tussen lagen zijn gerapporteerd in Appendix 3 (zie Tabel 4 in Appendix 3).

A5.2.4 Watervraag en wateropname

In aparte potten is tijdens de kasproef geprobeerd vast te stellen wat het waterverbruik is geweest van de plant. Hieruit volgde een gemiddelde transpiratie voor meerdere dagen (zie Appendix 2):

- Periode 24-03-2023 tot 31-03-2023: 0.5 mm d⁻¹
- Periode 31-03-2023 tot 06-04-2023: 0.7 mm d⁻¹
- Periode 06-04-2023 tot 13-04-2023: 1.4 mm d⁻¹

Deze waarden zijn als ET_{ref} opgelegd aan SWAP-WOFOST; omdat bodemverdamping was uitgezet, geldt dat ET_{ref} wordt vertaald naar T_{pot} : de watervraag van het gewas.

Voor de periode na 13-04-2023 was geen informatie beschikbaar. Gedurende de gehele kasproef was de open-water verdamping gemiddeld 2.2 mm d⁻¹. Er is gekozen om $ET_{ref} = 2$ mm d⁻¹ op te leggen voor de periode na 13-04-2023 tot aan einde van de proef.

SWAP-WOFOST kent meerdere concepten om actuele wateropname (T_{act}) te simuleren:

- Fe_0: wateropname volgens het empirische concept van Feddes et al. (1978); hierbij wordt geen rekening gehouden met mogelijke compensatie door het wortelsysteem;
- Fe_1: als Fe_0, maar nu wordt wel achteraf een (lineaire) compensatie doorgevoerd volgens Jarvis (2011);
- dW: wateropname wordt beschreven volgens een proces-gebaseerd wateropnamemodel (gebaseerd op De Willigen en Van Noordwijk, 1987; 1991), waarbij impliciet compensatie wordt meegenomen.

Details over deze wateropname modellen zijn o.a. beschreven in Heinen en Mulder (2023). Simulatieresultaten zullen worden gepresenteerd voor deze drie wateropnameconcepten.

A5.2.5 Beworteling

De gemeten bewortelingsprofielen aan het eind van de kasproef zijn gerapporteerd in Appendix 2. Omdat er geen tussenwaarnemingen van de wortelverdeling beschikbaar zijn, wordt hier verondersteld dat de tussenliggende verdelingen analoog zijn aan de eindverdeling, en waarbij de bewortelingsdiepte toeneemt van 2 cm aan het begin tot 70 cm aan het eind van de proef. Een lineaire toename van de bewortelingsdiepte was in extra potten waargenomen (zie Tabel 6 in Appendix 2). Hier is een dagelijkse toename van 2 cm aangehouden. De gemeten bewortelingsprofielen lieten zien dat de beworteling vrij uniform (nauwelijks gradiënten met de diepte) was per compartiment; dat is aangehouden in de modelberekeningen.

Voor de wateropnamemodellen Fe_0 en Fe_1 doet alleen de relatieve wortelverdeling ter zake, en is geen aanvullende informatie nodig over worteldiameter, wortelgewicht en feitelijke wortellengte.

Voor wateropnamemodel dW zijn de wortellengtedichtheid en de worteldiameter noodzakelijk. Omdat SWAP-WOFOST alleen relatieve wortelverdeling en wortelbiomassa als invoer accepteert, is de wortelbiomassa berekend behorende bij de wortellengtedichtheid, en is hierbij een specifiek wortellengte:wortelmassa verhouding (input voor SWAP-WOFOST) aangehouden (verschillend per behandeling en per tijdstip).

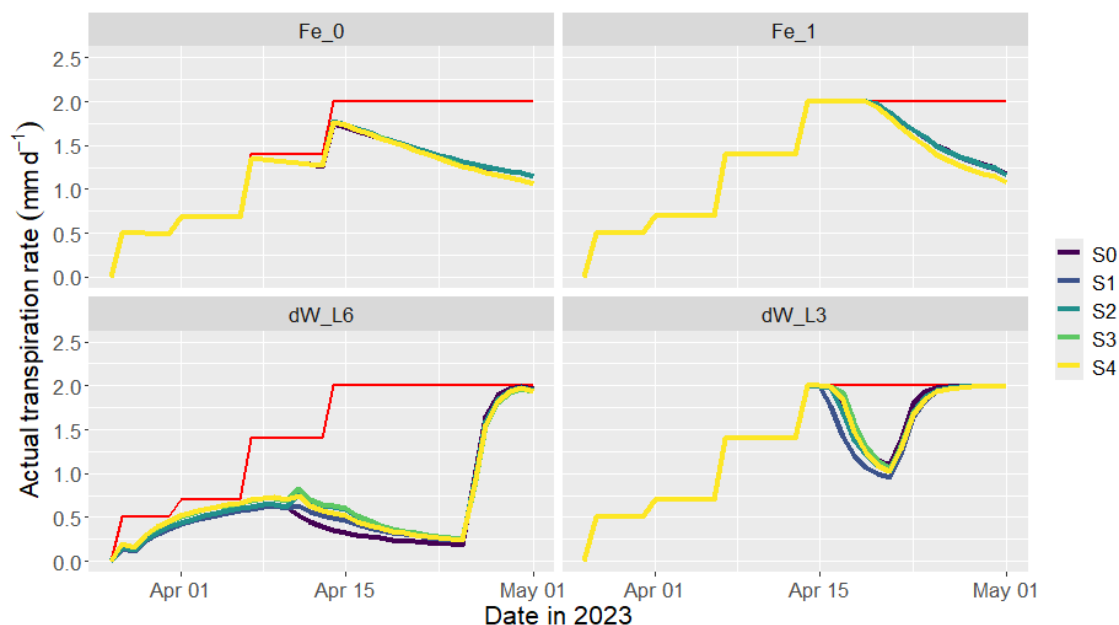
A5.3 Resultaten en Discussie

A5.3.1 Actuele transpiratie

Zoals hierboven toegelicht zijn de SWAP-WOFOST simulaties niet gebruikt om de actuele groei na te bootsen. Hier beperken we ons tot een vergelijking van de actuele wateropname ten opzichte van de watervraag (Figuur 2). Het is algemeen bekend dat er een zeer sterke relatie bestaat tussen reductie in wateropname en reductie in gewasontwikkeling.

Volgens Fe_0 en Fe_1 kon het gewas gedurende de eerste helft van de groeiperiode voldoen aan de watervraag. Volgens Fe_0 treedt eerder reductie in wateropname plaats dan volgens Fe_1, met andere

woorden de compensatie in Fe_1 leidt tot meer wateropname. Aan het eind van de periode is er gedurende meerdere dagen een reductie in wateropname gesimuleerd. Dat zou betekenen dat er ook een reductie in gewasgroei moet hebben plaatsgevonden. Dat was bij behandelingen S1-S4 ook gemeten (zie Appendix 2). Echter, ook voor S0 wordt hier reductie in wateropname gesimuleerd, en dat zou betekenen dat ook voor S0 de gewasgroei gelimiteerd is. Verder valt op dat de reductie voor alle behandelingen vrijwel even groot is geweest, en dat zou betekenen dat er weinig of geen verschil in gewasontwikkeling tussen de behandelingen zou moeten bestaan. Er was wel een verschil bovengrondse gewasgroei gemeten (Appendix 2): afname met toenemende dichtheid van de tussenlaag. Maar gelijktijdig was er een toename in wortelbiomassa: het gewas had geïnvesteerd in het aanmaken van meer wortels ten koste van bovengrondse groei. Inderdaad was er geen significant effect (slechts een dalende trend) van de behandelingen op de totale biomassa (bovengronds + ondergronds) (zie Appendix 2).



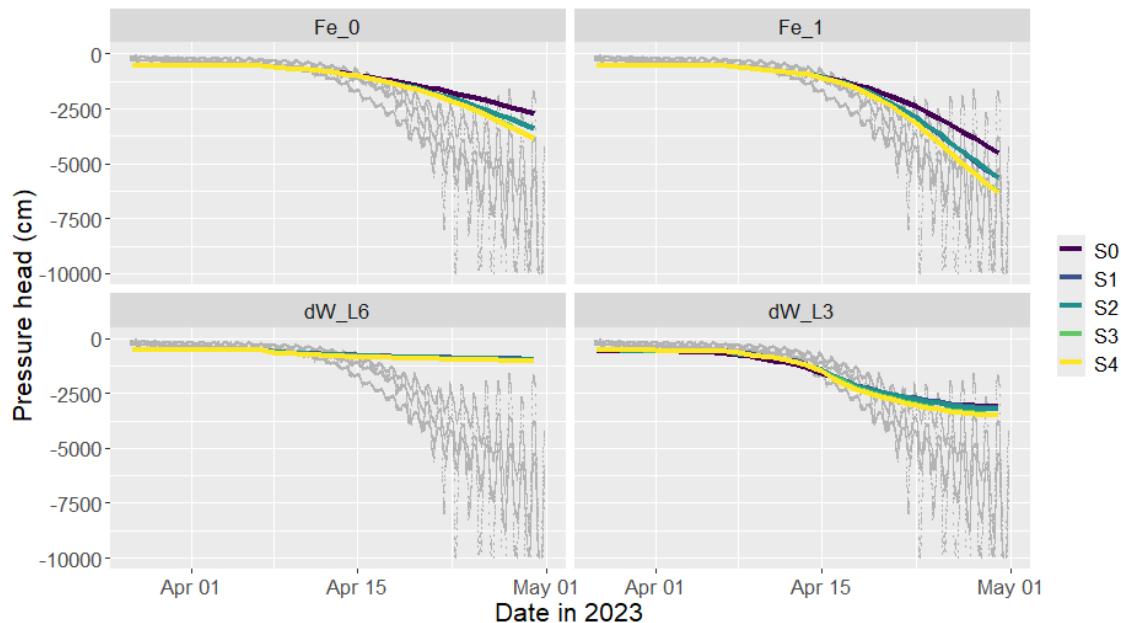
Figuur 2 Gesimuleerde actuele transpiratie (T_{act} , mm d^{-1}) volgens de wateropname concepten Fe_0, Fe_1, en dW voor de vijf behandelingen S0-S4, met in rood de opgelegde watervraag (T_{pot} , mm d^{-1}). Voor concept dW zijn twee situaties gegeven: voor $\lambda = 6$ en $\lambda = 3$, zoals nader toegelicht in de tekst.

De simulatie volgens wateropnameconcept dW resulteerde in enorme reductie in wateropname vanaf begin van de proef. Pas helemaal aan het eind van de groeiperiode, wanneer de wortels de onderkant van de pot bereikten, zien we dat het gewas voldoende water kon opnemen. Diverse analyses zijn uitgevoerd om na te gaan wat het effect is van aanpassing wortellengtedichtheid, worteldiameter, en doorlatendheid van de wortelwand. Deze aanpassingen hadden echter een gering effect. Nadere inspectie van de doorlatendheid van de bodemlagen liet zien dat de doorlatendheid van de bovenste en onderste compartimenten bij de heersende drukhoogtes extreem laag was. Vervolgens is gevarieerd met de λ parameter in de Mualem – Van Genuchten parameters. Voor de niet verdichte situatie (S0) was deze oorspronkelijk gefit op een waarde gelijk aan $\lambda = 6$. In Figuur 2 is ter illustratie het resultaat getoond wanneer $\lambda = 3$ wordt aangehouden. In dat geval wordt er pas na half april reductie in wateropname gesimuleerd. Deze verdwijnt weer aan het eind van de proef wanneer de wortels de onderste laag bereiken. De onderste lagen worden voorzien van water uit het grof zand, en dit wordt dan direct door de wortels opgenomen. Ook hier zien we nauwelijks verschillen tussen de behandelingen.

A5.3.2 Drukhoogte net boven de verdichte laag

In Figuur 3 zijn de gesimuleerde drukhoogtes op diepte 25 cm, net boven de verdichte tussenlaag, getoond voor de drie wateropname concepten, waarbij voor concept dW onderscheid is gemaakt in $\lambda = 6$ en $\lambda = 3$ (zie hierboven). Simulaties betreffen alle behandelingen, de getoonde meetwaarden betreffen alleen metingen (viervoud) in behandeling S3 (in de overige behandelingen zijn geen metingen uitgevoerd, zie Appendix 2).

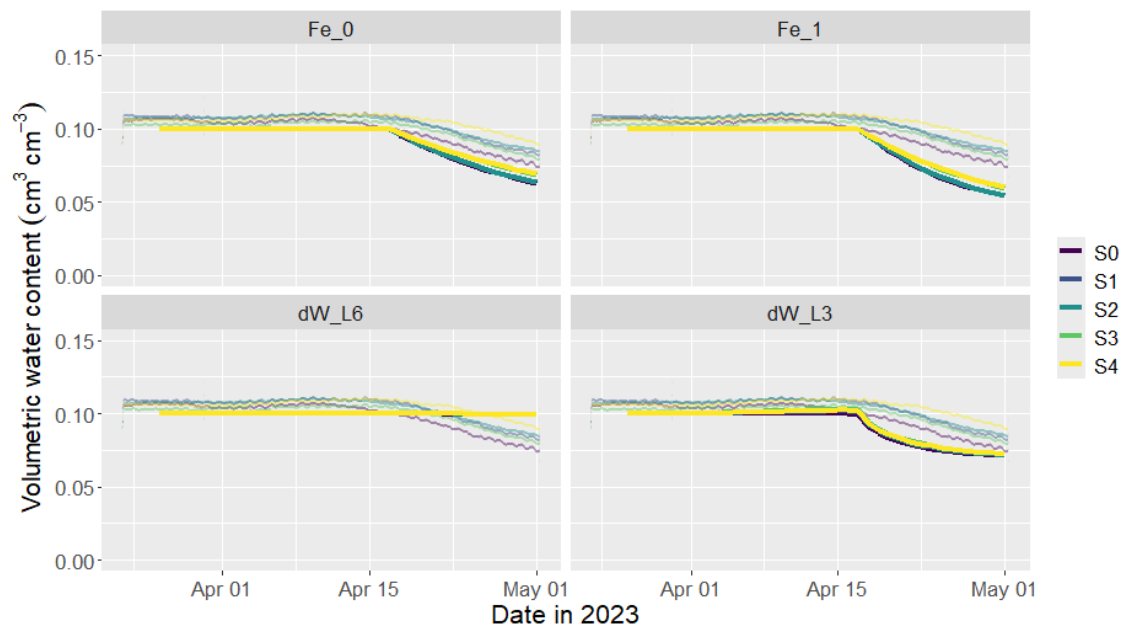
De verschillen in gesimuleerde patronen is gering, en alleen bij Fe_0 en Fe_1 is de afname voor S0 iets geringer aan het eind van de groeiperiode. Omdat bij dW met $\lambda = 6$ zeer veel reductie in wateropname werd gesimuleerd, blijft er vrij veel water achter in het bovenste compartiment, zodat de gesimuleerde drukhoogte in dat geval niet erg afneemt. Vanaf ongeveer half april zijn de wortels door de verdichte laag heengedrongen en is het meeste water uit het bovenste compartiment verbruikt. Vanaf dat moment zien we een relatief sterke daling van de gemeten en gesimuleerde drukhoogtes op 25 cm diepte. Er is dus een redelijk goede overeenstemming in gemeten en gesimuleerde drukhoogte op deze diepte.



Figuur 3 Gesimuleerde verloop van de drukhoogte op diepte 25 cm (net boven de verdichte laag) voor de vijf behandelingen en de drie wateropname concepten. De grijze meetpunten zijn de in viervoud gemeten drukhoogtes in behandeling S3. Voor concept dW zijn twee situaties gegeven: voor $\lambda = 6$ en $\lambda = 3$, zoals nader toegelicht in de tekst.

A5.3.3 Watergehalte net onder de verdichte laag

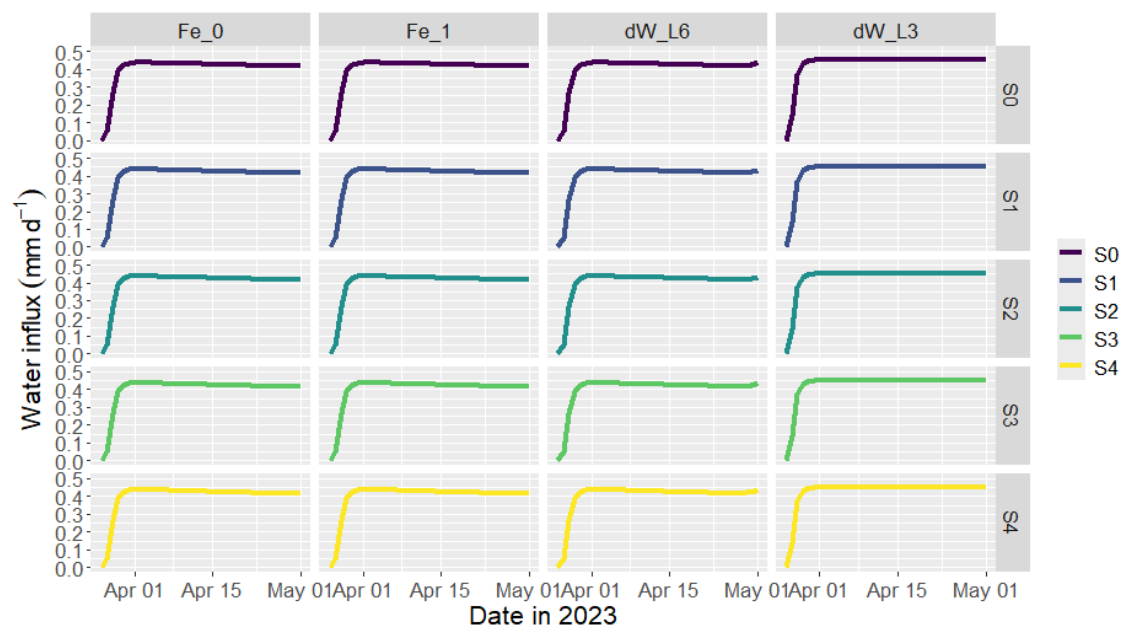
Net onder de verdichte laag (diepte 45 cm) zijn in alle kolommen van alle behandelingen de watergehaltes gemeten. Tot aan half april waren deze vrij constant: op dat moment waren er nog geen wortels in het onderste compartiment. Vanaf het moment waarop de beworteling door de verdichte laag doordringt, vindt er wateropname in de onderste laag plaats. We zien een geringe daling in de metingen en een iets snellere daling volgens de simulaties (Figuur 4). Uiteraard geldt ook hier dat de daling voor dW met $\lambda = 6$ nauwelijks zichtbaar is omdat weinig wateropname wordt gesimuleerd voor deze situatie. Er is dus een redelijk goede overeenstemming in gemeten en gesimuleerde watergehaltes op deze diepte.



Figuur 4 Gesimuleerde verloop van het volumetrisch watergehalte 45 cm (net onder de verdichte laag) voor de vijf behandelingen en de drie wateropname concepten. De licht-getinte meetpunten zijn de gemiddelden van de in viervoud gemeten watergehaltes per behandeling (zie Appendix 2). Voor concept dW zijn twee situaties gegeven: voor $\lambda = 6$ en $\lambda = 3$, zoals nader toegelicht in de tekst.

A5.3.4 Wateraanvoer vanuit grof zand

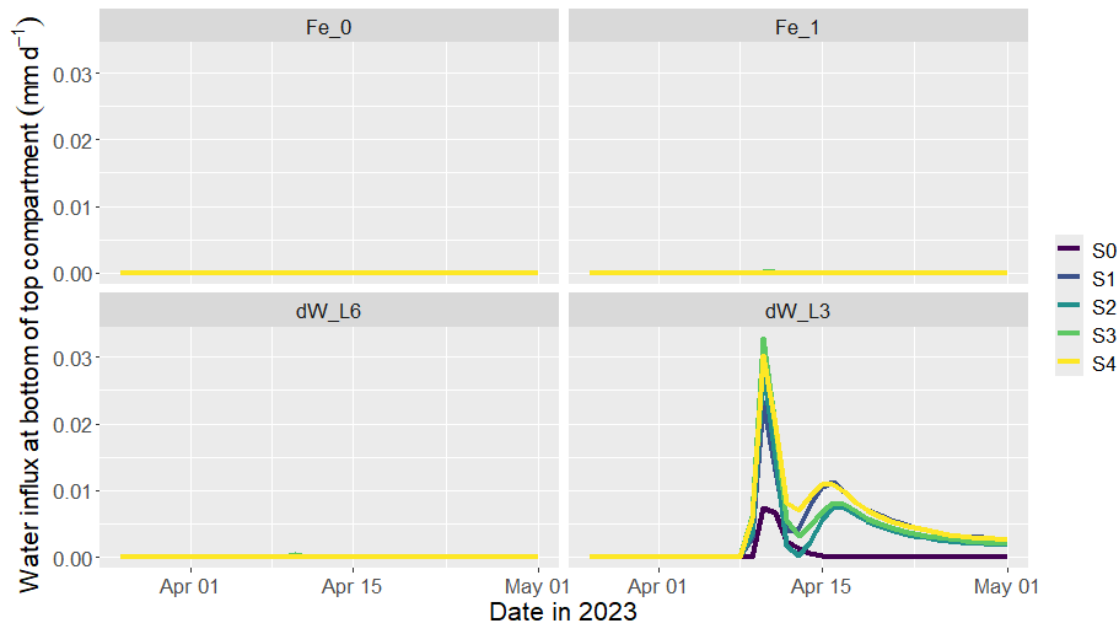
Omdat water wordt opgenomen vanuit de pot, vindt er aanvoer van water plaats vanuit de bak via het grof zand. De gesimuleerde water influx was in alle situaties zeer vergelijkbaar en kwam neer op ca. 0.45 mm d^{-1} (Figuur 5). Dat is duidelijk lager dan de watervraag van 2 mm d^{-1} , waardoor de gesimuleerde watergehaltes een duidelijke daling lieten zien. Het feit dat deze aanvoer onafhankelijk is van de behandeling komt omdat deze aanvoer wordt bepaald door de hydraulische eigenschappen van het grof zand. Meer aanvoer van water zou gerealiseerd kunnen worden door de onderdruk aan de onderzijde van de grof zand laag te verhogen of de dikte van de grof zand laag te verkleinen.



Figuur 5 Gesimuleerde toevoer van water aan de onderzijde van de kolom vanuit het grof zand voor de vijf behandelingen en de drie wateropname concepten. Voor concept dW zijn twee situaties gegeven: voor $\lambda = 6$ en $\lambda = 3$, zoals nader toegelicht in de tekst.

A5.3.5 Capillaire opstijging door verdichte laag heen

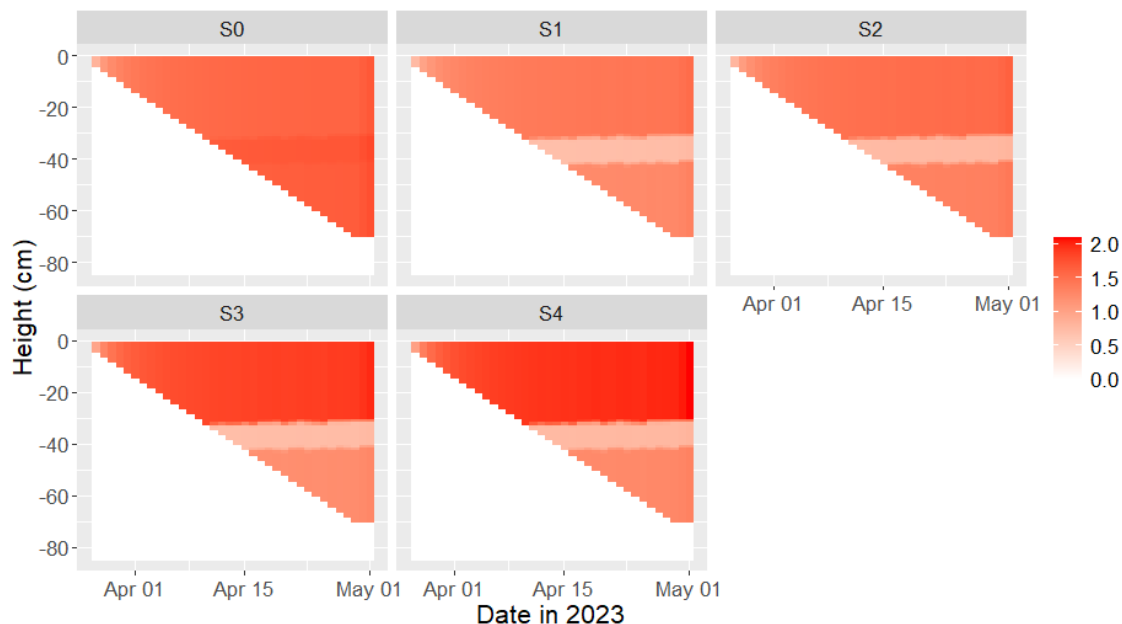
Met SWAP-WOFOST kan ook inzicht verkregen worden in de waterbalans van de diverse compartimenten. Bijvoorbeeld, de wateraanvoer via de verdichte laag naar boven ter aanvulling van water in het bovenste compartiment laat zien dat deze verwaarloosbaar klein is (Figuur 6). Alleen voor de simulatie waarbij de doorlatendheid van de niet-verdichte bodemlagen iets is verhoogd (dW_L3) laat enige opwaartse waterfluxen zien, maar die zijn $< 0.03 \text{ mm d}^{-1}$ en dus lang niet voldoende om de watervraag van 2 mm d^{-1} te kunnen leveren.



Figuur 6 Gesimuleerde toevoer van water aan de onderzijde van de laag 0-30 cm vanuit de verdichte laag voor de vijf behandelingen en de drie wateropname concepten. Voor concept dW zijn twee situaties gegeven: voor $\lambda = 6$ en $\lambda = 3$, zoals nader toegelicht in de tekst.

A5.3.6 Wortelverdeling en gesimuleerde wateropnameverdeling

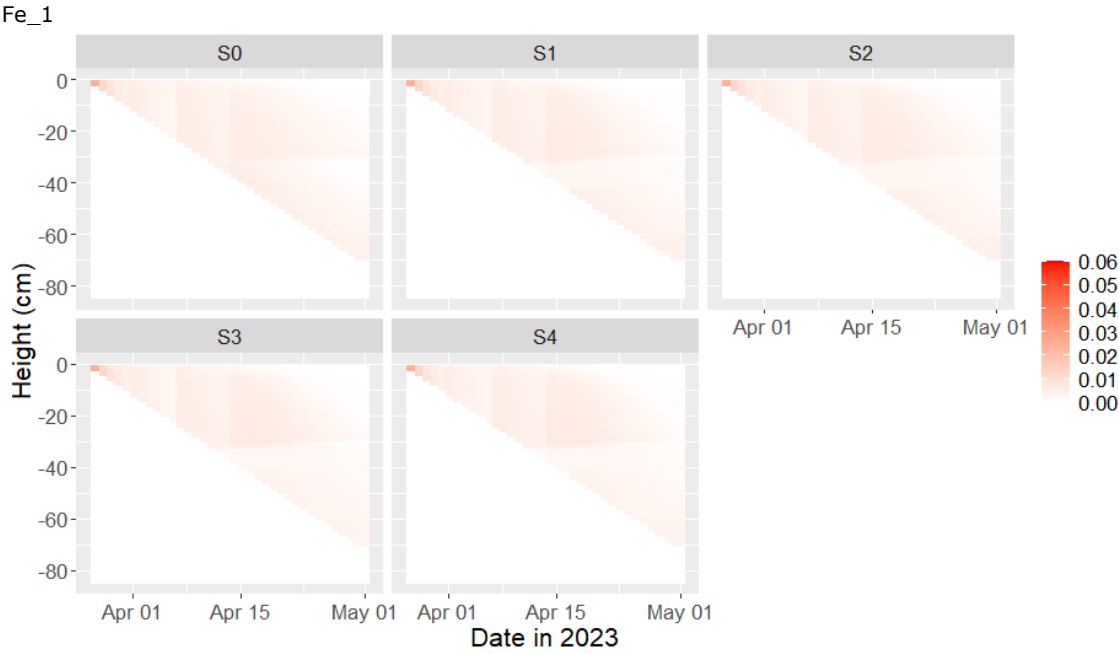
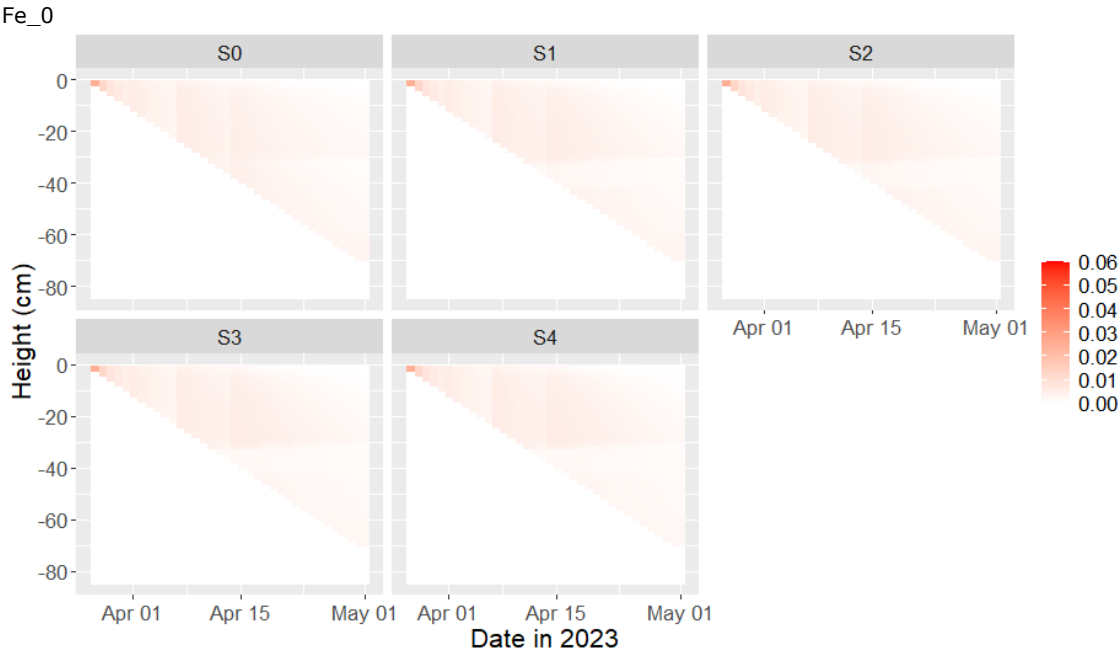
Met het simulatiemodel kan ook inzicht verkregen worden waar de feitelijke wateropname heeft plaatsgevonden volgens de gehanteerde wateropnameconcepten. De gehanteerde wortellengtedichtheidsverdelingen ($L_v(z,t)$, cm cm^{-3}) voor de vijf behandelingen is getoond in Figuur 7. Voor de wateropname concepten Fe_0 en Fe_1 zijn hiervan alleen de relatieve verdelingen gebruikt, en voor dW zijn de getoonde feitelijke waarden voor L_v gebruikt. De eindsituatie komt overeen met de metingen (zie Appendix 2), het verloop in de tijd is verondersteld (zie paragraaf 0).

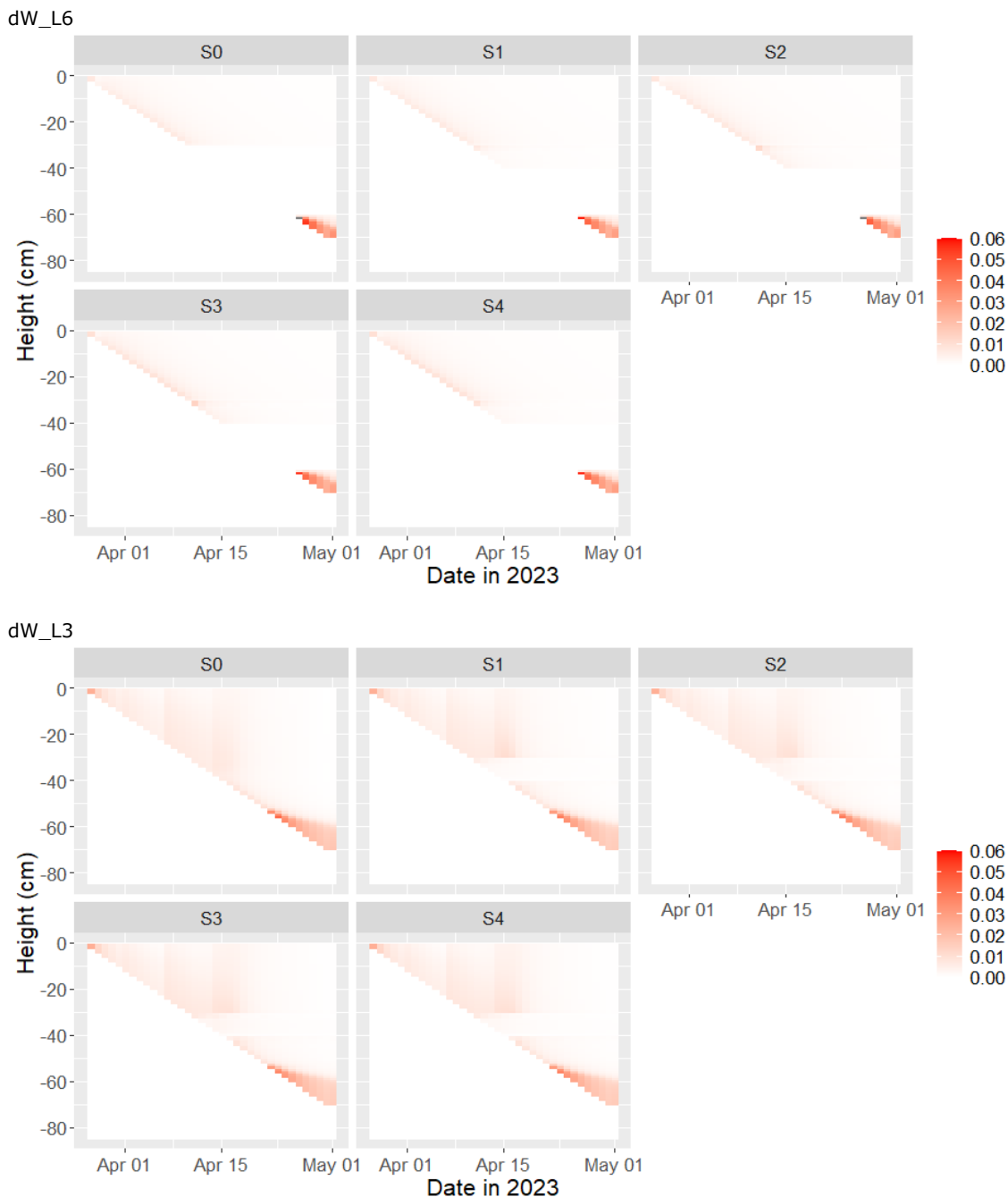


Figuur 7 Wortellengtedichtheidsverdelingen (L_{rv} , cm cm^{-3}) als functie van tijd en diepte voor de vijf behandelingen zoals die zijn gebruikt in de simulaties.

De gesimuleerde wateropname als functie van tijd en diepte is getoond in Figuur 8. De verschillen tussen Fe_0 en Fe_1 zijn gering, en het best zichtbaar in de rechterbovenhoek van de diagrammen: bij Fe_1 vindt daar duidelijk minder wateropname plaats. Als gevolg van de Jarvis compensatie vindt meer opname onder in de wortelzone plaats.

De verschillen tussen Fe en dW zijn heel duidelijk. Bij dW vindt wateropname vooral onder in de wortelzone plaats, daar waar het water het makkelijkst beschikbaar is. Met name aan het eind van de gesimuleerde periode valt dat duidelijk op: onderin de kolom vindt daar de wateraanvoer vanuit het grof zand plaats en dat water wordt direct opgenomen.





Figuur 8 Gesimuleerde wateropname verdelingen (cm d^{-1}) als functie van tijd en diepte voor de vijf behandelingen zoals die zijn gebruikt in de simulaties met de vier wateropname concepten: Fe_0 , Fe_1 , dW_L6 en dW_L3 . De verticale banden zijn het gevolg van de overgangen in watervraag, en de horizontale banden zijn het gevolg van de veranderingen in wortelverdelingen.

A5.3.7 Algemene discussie

Er is een kasproef uitgevoerd waarbij een gewas groeide in een pot waarin een verdichte laag aanwezig was. De doelstelling was om na te gaan of het wortelsysteem in staat was om door de verdichte laag heen te groeien om daarbij het onderste compartiment te bereiken waar relatief voldoende water beschikbaar zou zijn voor het vervolg van wateropname. Het bovenste compartiment had initieel voldoende water om te voorzien in de watervraag voor de eerste fase. Uit de gewasmetingen is gebleken dat de wortels door de verdichte laag heen konden groeien (zie Appendix 2). Daarnaast zijn aanvullende metingen gedaan die inzicht gaven in de dynamiek van het water in het bovenste en het onderste compartiment. Hieruit bleek inderdaad dat op het moment dat de wortels door de verdichte laag waren gegroeid, het bovenste compartiment sterk was uitgedroogd en de waterpotentiaal sterk was afgenomen. Nadat de wortels in het

onderste compartiment waren doorgedrongen nam aldaar het watergehalte af als gevolg van de wateropname uit die laag. Met het SWAP-WOFOST model werden vergelijkbare waarnemingen verkregen voor de dynamiek in het bovenste en onderste compartiment.

Hier volgen nog een paar kanttekeningen:

- In de simulaties is geen gebruik gemaakt van dag-nacht ritmes in de watervraag en is geen rekening gehouden met eventuele effecten van fluctuerende temperaturen, zodat er geen hoogfrequente fluctuaties zichtbaar zijn die wel aanwezig zijn in de metingen.
- De werkelijke wortelverdelingen tijdens de groeiperiode waren onbekend, en dus kan niet met zekerheid gesteld worden dat ook initieel de wortelverdeling uniform zijn geweest.
- Aan het eind van de proef bleek dat er wortels waren doorgedrongen in de laag grof zand. Daar zijn geen metingen over beschikbaar, en dit is niet meegenomen om in de modelsimulaties.
- Hydraulische eigenschappen zijn gemeten in andere monsters dan in de feitelijke compartimenten; ook wordt in de simulaties geen rekening gehouden met mogelijke aanpassingen van de hydraulische eigenschappen wanneer er grote hoeveelheden wortels aanwezig zijn. Daarnaast zijn de hydraulische eigenschappen van de niet-verdichte bodem in enkelvoud gemeten, waarbij de voorbehandeling van het bodemonster mogelijk anders is geweest dan de voorbehandelingen van de bodemonsters die gebruikt zijn om de verdichte lagen te creëren. Dat kan mede geleid hebben tot de extreem lage doorlatendheden die voor de basiseigenschappen voor S0 hebben geleid.
- Uit de getoonde simulatieresultaten is gebleken dat voor het wateropnamemodel van dW deze sterk afhankelijk is van de λ -parameter. Bij de vertaling van de laboratoriummetingen naar de Mualem – van Genuchten-parameters wordt een lager gewicht toegekend aan de doorlatendheidsmetingen in de overall-fit. Dat betekent dat we dus onzekerder zijn in de gefitte waarden voor zowel K_s als λ . In de simulatieresultaten speelt λ zowel een rol waar het gaat om de (verticale) transport van water tussen de (reken)lagen als het horizontale transport naar de wortelwand toe in het procesgebaseerde wateropnamemodel van dW.
- De sensoren zijn niet gekalibreerd voor de bodemlagen waarin ze zijn geïnstalleerd (er is gebruik gemaakt van de fabriekskalibratiecurve); dus ook de metingen zijn niet exact.

A5.4 Conclusies

Met het simulatiemodel SWAP-WOFOST is de kasproef van het project BOVER (zie Appendix 2) nagerekend waarbij gemeten hydraulische eigenschappen uit Appendix 3 zijn gebruikt. Op hoofdlijnen is er een redelijk goede overeenkomst in gemeten en gesimuleerde patronen in de dynamiek van water in de compartimenten boven en onder de verdichte laag verkregen. Volgens het simulatiemodel was de reductie in wateropname ongeveer gelijk voor alle behandelingen. Dat zou impliceren dat de reductie in gewasgroei (totale biomassa) ongeveer even groot zou zijn. Dat past bij de waarneming dat de totale biomassa (bovengrond en ondergronds) geen significante verschillen opleverden (zie Appendix 2).

De gesimuleerde actuele transpiratie was verschillend voor de vier wateropname modellen die zijn beschouwd (Fe_0, Fe_1, dW_6, dW_3). Omdat er geen metingen van actuele transpiratie als functie van de tijd beschikbaar zijn, kan dus niet vastgesteld worden welk concept de voorkeur verdient. Op een indirecte manier kan alleen het totaalgedrag van het model worden vastgesteld waarbij wordt gekeken naar gedrag van drukhoogte net boven de verdichte laag en het volumetrisch watergehalte net onder de verdichte laag. In dat geval lijken de concepten Fe_0 en dW_6 niet goed te functioneren.

Op basis van veronderstelde eigenschappen was het model voorafgaand aan de kasproef doorgerekend om na te gaan of de experimentele set-up geschikt zou zijn voor het doel. Na afloop blijkt inderdaad dat de proefopzet goed heeft gefunctioneerd, onderschreven door een verbeterde modelsimulatie. Het SWAP-WOFOST model kan in potentie gebruikt worden om scenario's met wel- en niet-verdichte lagen door te rekenen.

De proef heeft niet voldoende informatie opgeleverd om een gedetailleerd wortelontwikkelingsfunctie in SWAP-WOFOST te ontwikkelen. Daarvoor zouden aanvullende metingen tijdens de groeiperiode noodzakelijk zijn. Echter, dat zal praktisch lastig zijn omdat dergelijke waarnemingen vaak destructief zijn.

Aanbevelingen

Uit de simulaties bleek dat de reductie in wateropname ongeveer gelijk was voor alle behandelingen. De totale biomassa was ook ongeveer gelijk voor alle behandelingen, waarbij wel een verschuiving in verdeling tussen bovengrondse en ondergrondse biomassa werd geconstateerd. Indien het voor vervolggexperimenten wenselijk is om meer verschil in transpiratiereductie en daarmee een groter effect op de gewasgroei te realiseren, dan zou met de huidige modelconfiguratie nagegaan kunnen worden of aanpassingen in met name de onderrandvoorwaarde (dikte laag grof zand, onderdruk in Blokzijlzand) dat te realiseren is.

Het verdient de aanbeveling om tussentijdse waarnemingen van wortelontwikkeling te meten. Hiervoor moet worden nagegaan of *in-situ* metingen via CT-scans mogelijk is (zie bijv., Burr-Hersey et al., 2017; Steinwider, 2022).

In een vervolggexperiment verdient het de aanbeveling om wortelgroei vanuit de onderzijde van de kolom te verhinderen. Hiermee wordt verhinderd dat de wortels de laag met grof zand ingroeien en daarmee mogelijk makkelijker aan water zijn gekomen dan in de modelsimulaties verondersteld. Daarbij ook aandacht besteden om wortelgroei om de verdichte laag heen (langs de kolomwand) te verhinderen.

Het zou goed zijn om na te gaan in hoeverre de aanwezigheid van wortelbiomassa in een bodemonmonster leidt tot andere waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken in vergelijking tot bodemonsters zonder aanwezigheid van wortels.

A5.5 Referenties

- Burr-Hersey, J.E., S.J. Mooney, A.G. Bengough, S. Mairhofer, K. Ritz. 2017. Developmental morphology of cover crop species exhibit contrasting behaviour to changes in soil bulk density, revealed by X-ray computed tomography. PLoS ONE 12(7): e0181872. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0181872>
- de Willigen, P. and M. van Noordwijk. 1987. Roots, plant production and nutrient use efficiency. Ph.D. Thesis. Wageningen Agricultural Univ., Wageningen, the Netherlands. Available at: <https://edepot.wur.nl/202228>
- de Willigen, P. and M. van Noordwijk. 1991. Modelling nutrient uptake: From single roots to complete root systems. In: F.W.T. Penning de Vries et al., editors, Simulation and systems analysis for rice production (SARP): Selected papers presented at workshops on crop simulation of a network of national and international research centres of several Asian countries and the Netherlands, 1990–1991. PUDOC, Wageningen, the Netherlands. p. 277–295.
- Heinen M., M. Mulder. 2023. Microscopische wateropnamemodellen en dynamische wortelverdeling in SWAP. WENR rapport 3145, Wageningen Environmental Research. <https://edepot.wur.nl/583541>
- Jarvis, N.J. 2011. Simple physics-based models of compensatory plant water uptake: concepts and eco-hydrological consequences. Hydrology and Earth System Sciences 15: 3431–3446.
- Kroes, J.G., J.C. van Dam, R.P. Bartholomeus, P. Groenendijk, M. Heinen, R.F.A. Hendriks, H.M. Mulder, I. Supit and P.E.V. van Walsum. 2017. SWAP version 4. Theory description and user manual. Report 2780, Wageningen Environmental Research, Wageningen, the Netherlands. Available at: <https://edepot.wur.nl/416321>, <https://swap.wur.nl/>
- Steinwider, L. 2022. Remediation of agricultural subsoil compaction. Burrowing crops vs mechanical deep ripping. MSc Thesis, Ghent University, Faculty of Bioscience Engineering, Ghent, Belgium. https://libstore.ugent.be/fulltxt/RUG01/003/013/848/RUG01-003013848_2021_0001_AC.pdf

Appendix 6 Veldexperimenten naar de invloed van bodemverdichting op de water- en luchthuishouding in de bodem en op de plantontwikkeling

Auteur: Erik Van den Elsen
Review: Guido Bakema

Inhoudsopgave

A6.1	Inleiding	121
A6.2	Materiaal en Methoden	121
	A6.2.1 Beschrijving van het proefveld	121
	A6.2.2 Meetmethodes	125
	A6.2.3 Veldmetingen	130
A6.3	Resultaten en discussie	132
	A6.3.1 Indringingsweerstand	132
	A6.3.2 Bulkdichtheid	133
	A6.3.3 Zuurstofgehalte en zuurstofdiffusie	135
	A6.3.4 Plantparameters: gewasontwikkeling en biomassa opbrengst	136
	A6.3.5 Bodemvocht: Volumetrisch bodemvochtgehalte, neerslag, grondwaterstand	139
	A6.3.6 Nutriënten	143
	A6.3.7 Statistische analyse en correlatie van de veldmetingen	144
A6.4	Conclusies	153
A6.5	Referenties	154

A6.1 Inleiding

In Bakema et al. (2022; hoofdstuk 4, bijlage 1) wordt onder meer gesteld dat: *“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 deze appendix wordt de veldproef beschreven waar naar verschillende indicatoren is gekeken waarvan bekend is dat deze kunnen variëren onder invloed van bodemverdichting.

Het verdichten van de bodem in of nabij de wortelzone heeft invloed op de gewasgroei. Deze kan worden gehinderd door beperking van de water- en luchthuishouding en bewortelbaarheid (Bakema et al., 2022). Als onvoldoende bekend is welke factoren de plantengroei remmen, is het ook niet mogelijk om goed te kunnen beoordelen of en in welke mate bodemverdichting als belemmerende factor kan worden beschouwd en of dit geldt voor alle gewassen. Bodemverdichting wordt tot op heden in het veld vaak bepaald aan de hand van droge bulkdichtheid en/of indringingsweerstand. Deze indicatoren kunnen echter niet altijd de vermindering van de plantengroei verklaren. Als gewassen in voldoende mate zijn voorzien van water en nutriënten in de bovengrond kan het gewas zelfs in bodems met een sterk verdichte ondergrond goed groeien. Dus zelfs als bodemverdichting wordt geconstateerd, levert dit niet in alle gevallen en bij alle gewassen significante opbrengstderving op.

Het veldonderzoek focust zich in dit project voornamelijk op het testen van (nieuwe) meetapparatuur en efficiënt verzamelen van benodigde parameters (bulkdichtheid, indringingsweerstand, luchthuishouding) en hulpparameters (textuur, vochtgehalte, nutriënten, visuele beoordeling, zuurstofgehalte) om effecten van bodemverdichting te kunnen beoordelen. Er wordt gekeken naar structuur- en textuurvariëaties in het veld (onder invloed van verdichting) als ook naar plantontwikkeling en beworteling.

Belangrijk hierbij is de vraag: welke metingen leveren betrouwbare data op en onder welke omstandigheden. Meettechnieken in het veld en het effect van verdichtingsparameters op wortelgroei zijn vaak afhankelijk van het vochtgehalte. Dat betekent dat de gebruikte meettechnieken wellicht gecorrigeerd moeten worden voor vochtgehalte. Om te kunnen bepalen of de te monitoren parameters kunnen worden gecorreleerd aan gewasontwikkeling en opbrengst, werden ook deze indicatoren gemeten.

De volgende specifieke onderzoeksvragen zijn daarbij opgesteld:

- Welke indicatoren kunnen onder veldomstandigheden (eenduidig) uitsluitel geven over bodemverdichting en kunnen deze worden gecorreleerd aan gewasontwikkeling en opbrengst?
- Welke meettechnieken zijn in de praktijk nuttig, bruikbaar en eenvoudig toe te passen om bodemverdichting aan te tonen?

Om deze twee vragen te kunnen beantwoorden is een gedetailleerde set aan meetresultaten verzameld tijdens een praktijkproef gedurende een groeiseizoen.

A6.2 Materiaal en Methoden

A6.2.1 Beschrijving van het proefveld

Voor de veldproef werd een maisperceel in Wageningen geselecteerd, mede op basis van bodemtype, gewas (op dit perceel kon hetzelfde gewas worden verbouwd als gebruikt werd in de kasproeven (zie Appendix 2)), en locatie (praktische bereikbaarheid was een voordeel, zeker gezien de intensieve gewasmonitoring). Het geselecteerde perceel is te zien in Figuur 1. Binnen het proefveld zijn vijf random subplots (S1..S5) geselecteerd van 3x3 meter (zie Figuur 2). Deze subplots worden intensief gemonitord aan de hand van de diverse indicatoren. Ook de gewasontwikkeling en gewasopbrengst binnen de plots zijn gemonitord en gemeten.

In eerste instantie is geprobeerd met behulp van de penetrologger de subplots dusdanig over het veld te positioneren op locaties met variërende verdichting. Deze konden niet worden gevonden. Er was zeer veel variatie in verdichting in het perceel aanwezig op korte afstand, er was geen trend te ontdekken over bijvoorbeeld de lengte van het perceel. Vermoedelijk is het veld in het verleden gediepploegd.



Figuur 1 Het geselecteerde perceel voor de BOVER veldproef, ten westen van de Bornsesteeg in Wageningen (foto: Google Maps).

Tabel 1 De proefveld hoekpunt coördinaten met de coördinaten van de subplots.

Naam	GPS Coördinaat
Hoekpunt 1	5.6561894, 51.988812
Hoekpunt 2	5.6571603, 51.9870776
Hoekpunt 3	5.6560767, 51.9868463
Hoekpunt 4	5.6551165, 51.9885774
Subplot	GPS Coördinaat
S1a	5.65594, 51.988745
S1d	5.655955, 51.988719
S1c	5.655914, 51.98871
S1b	5.655898, 51.988736
S2a	5.655532, 51.988674
S2b	5.655491, 51.988667
S2c	5.655508, 51.988642
S2d	5.65555, 51.988649
S3b	5.655952, 51.987813
S3a	5.655994, 51.987822
S3d	5.656009, 51.987797
S3c	5.655964, 51.987788
S4c	5.656538, 51.987431
S4d	5.65658, 51.987439
S4a	5.656566, 51.987464
S4b	5.656524, 51.987458
S5a	5.656495, 51.987014
S5b	5.656453, 51.987004
S5c	5.65647, 51.986979
S5d	5.656511, 51.986989



Figuur 2 Luchtfoto van het proefveld met de vijf subplots S1..S5 en Noordpijl (foto: Erik van den Elsen).

In **Tabel** zijn de coördinaten van het proefveld en de coördinaten van de subplots weergegeven. Figuur 2 laat een luchtfoto van het proefveld met de vijf subplots S1..S5 zien.

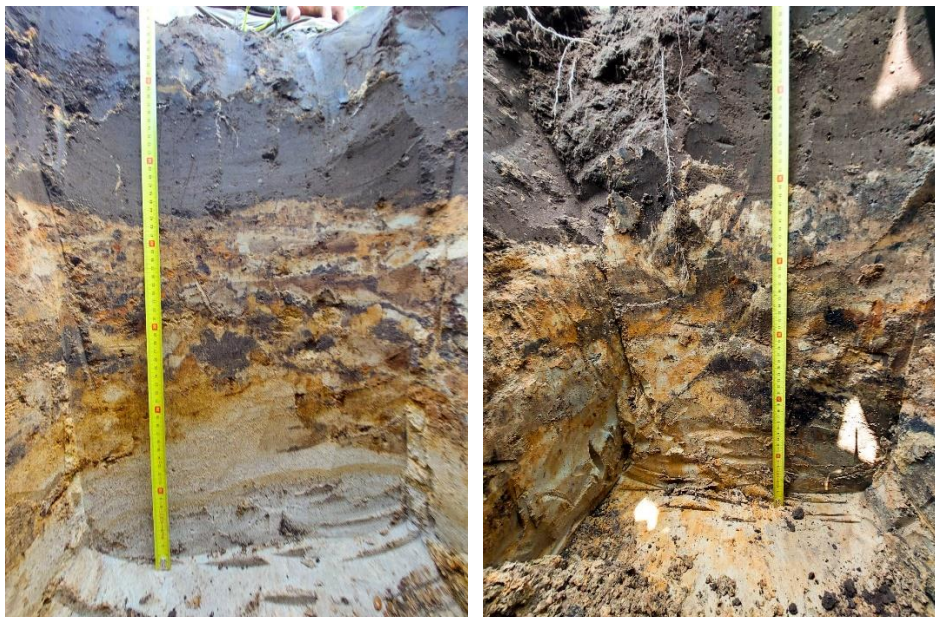
Nadat de vijf subplots zijn geselecteerd is van elk van de vijf subplots de profielopbouw van maaiveld tot 150 cm-mv bepaald. De profielopbouw van de subplots is vrij divers en niet uniform; er zijn verschillen in het aantal horizonten en ook de bodemsamenstelling is verschillend. In Tabel 2 is de profielopbouw van de vijf subplots te zien.

Om de bodemopbouw van de plots verder te onderzoeken is gebruik gemaakt van grondradar. Dit is een on-the-go meettechniek die verschillen in vocht- en luchtgehalte en textuur kan meten in de diepte. Het kan daardoor duidelijke verschillen in textuur in de profielopbouw meten en bij gelijke textuur mogelijk verschillen in dichtheid/verdichting door de aanwezigheid van vochtverschillen net boven of onder de verdichte laag. Als voorbeeld zijn de geïnterpreteerde radarbeelden van subplot 1 en subplot 2 in Figuur 4 en Figuur 5 weergegeven. Alleen grotere verschillen in textuur kunnen gemeten worden. Dus potentieel voor subplot 1 de overgangen tussen 1Ce en 1Cer (120 cm-mv) en voor subplot 2 tussen 1Ce, 1Ce1 en 1Ce2 (110 en 120 cm-mv). In de figuren is te zien dat de overgangen tussen 1Ce en 1Ce1 goed te zien zijn. De overgang tussen 1Ce1 en 1Ce2 is niet herkenbaar.

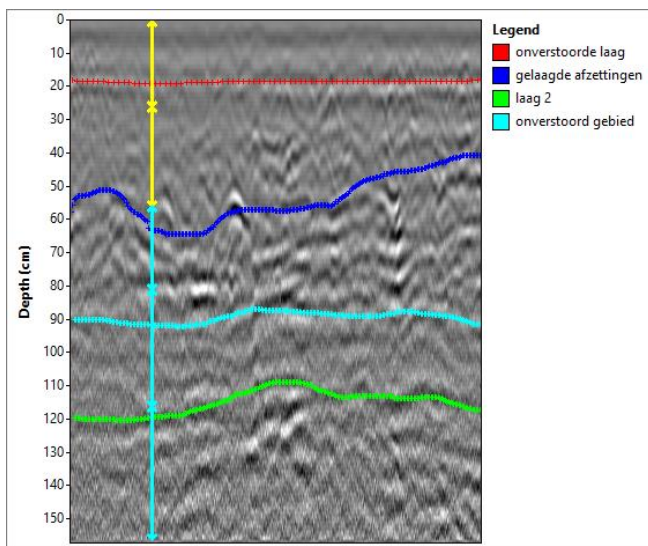
In Figuur 3 zijn twee foto's te zien van de profielkuilen van subplots 2 en 3. De organische stofrijke bouwvoor reikt vanaf het maaiveld tot ongeveer 27-30 cm diepte, waarna een zeer gemengde/verstoorde laag is te onderscheiden van geel zandig materiaal en organische grond. Dieper is een meer uniforme zandlaag zichtbaar. Het perceel is in het verleden gediepploegd om bodemverdichting ter hoogte van de ploegzool op te heffen. Deze twee profielfoto's zijn typerend voor het gehele perceel.

Tabel 2 De profielbeschrijving van de 5 subplots.

PLOT	LAAG_NR	BOVENGRENS	ONDERGRENS	HOR_CODE	ORG_STOF	LEEM	M50	SILT
S1	1	0	30	1Ap	3.5	16	160	24
	2	30	50	1Ah/Cg	1.5	14	160	22
	3	50	90	1Cg	0.2	11	160	16
	4	90	120	1Ce	0.2	17	140	25
	5	120	150	1Cer	0.2	8	400	12
S2	1	0	30	1Ap	3.5	19	160	30
	2	30	55	1A/Cgc	1.0	12	160	18
	3	55	80	1Cg	0.2	12	160	18
	4	80	110	1Ce	0.2	20	140	30
	5	110	120	1Cer1	0.2	8	250	12
	6	120	150	1Cer2	0.2	27	120	40
S3	1	0	30	1Ap	4.0	16	160	20
	2	30	70	1Ah/Cg	1.5	16	160	21
	3	70	115	1Cg	0.1	17	165	22
	4	115	150	1Cer	0.1	20	140	30
S4	1	0	25	1Ap	3.0	15	160	25
	2	25	60	1A/B/Cgc	2.0	15	160	25
	3	60	100	1Cg	0.2	25	150	40
	4	100	140	1Cer	0.2	30	130	45
	5	140	150	1Cr	0.2	30	130	45
S5	1	0	30	1Ap	3.0	15	160	25
	2	30	60	1A/B/Cg	1.5	15	160	25
	3	60	70	1Cg	0.2	15	160	25
	4	70	100	2Cg	0.2	40	100	40
	5	100	140	3Cgr	2.0	8	190	12
	6	140	150	3Cr	0.2	25	120	40

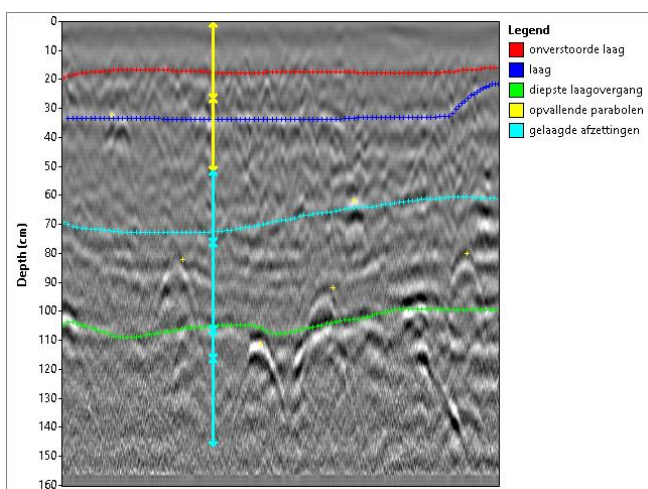


Figuur 3 De profielkuilen van subplot 2 en 3 (foto's: Falentijn Assinck).



PLOT	LAAG_NR	BOVENGRENS	ONDERGRENS	HOR_CODE	ORG_STOF	LEEM	M50	SILT
S1	1	0	30	1Ap	3.5	16	160	24
	2	30	50	1Ah/Cg	1.5	14	160	22
	3	50	90	1Cg	0.2	11	160	16
	4	90	120	1Ce	0.2	17	140	25
	5	120	150	1Cer	0.2	8	400	12

Figuur 4 Grondradarbeeld subplot 1, met boring 1 geplot als gekleurde pijlen. Boorbeschrijving in de tabel rechts.



PLOT	LAAG_NR	BOVENGRENS	ONDERGRENS	HOR_CODE	ORG_STOF	LEEM	M50	SILT
S1	1	0	30	1Ap	3.5	16	160	24
	2	30	50	1Ah/Cg	1.5	14	160	22
	3	50	90	1Cg	0.2	11	160	16
	4	90	120	1Ce	0.2	17	140	25
	5	120	150	1Cer	0.2	8	400	12
S2	1	0	30	1Ap	3.5	19	160	30
	2	30	55	1A/Cgc	1.0	12	160	18
	3	55	80	1Cg	0.2	12	160	18
	4	80	110	1Ce	0.2	20	140	30
	5	110	120	1Cer1	0.2	8	250	12
	6	120	150	1Cer2	0.2	27	120	40

Figuur 5 Grondradarbeeld subplot 2, met boring 1 geplot als gekleurde pijlen. Boorbeschrijving in de tabel rechts.

A6.2.2 Meetmethodes

A6.2.2.1 Indringingsweerstand

De indringingsweerstand wordt gemeten door een metalen conusvormig lichaam met een bepaald conusoppervlak verticaal de bodem in te drukken en de benodigde kracht te meten (Figuur 6). Als tegelijkertijd de diepte van de conus wordt gemeten, kan een indringingsweerstandprofiel worden opgesteld.



Figuur 6 De penetrologger; meetapparaat en drijfstang in gebruik in de praktijk met rechts een conus die aan het eind van de drijfstang is gemonteerd (foto's: Royal Eijkelkamp BV).

De benodigde kracht voor het in de grond drukken van de conus hangt naast de dichtheid van de bodem af van het oppervlak van de conus, het bodemtype en het vochtgehalte van het bodemprofiel. Vanwege deze afhankelijkheid van meerdere parameters kan met een penetrologger slechts een globale indruk krijgen van op welke diepten de dichtheid toe- en/of afneemt.

A6.2.2.2 Bulkdichtheid

Het soortelijk gewicht van de bodem wordt altijd in droge toestand weergegeven in g/cm^3 . Het soortelijk gewicht heet ook wel de droge bulkdichtheid of bulkdichtheid. De droge bulkdichtheid van de bodem is afhankelijk van de fysische bodemsamenstelling, ofwel de bodemtextuur, de dichtheid van bodemmineralen (zand, slib en klei) en het organische stofgehalte, evenals de pakking van deze componenten. In het veld wordt altijd de natte bulkdichtheid gemeten en zal deze gecorrigeerd moeten worden voor het vochtgehalte om de droge bulkdichtheid te krijgen.

Het nauwkeurig meten van de bulkdichtheid van de bodem is lastig omdat de bulkdichtheid wordt beïnvloed door de bemonsterings- en/of meetmethode en door verschillende in veldomstandigheden. In dit project is de natte bulkdichtheid bepaald aan de hand van de klassieke bepaling met 100cc ringen (Figuur 7) en de MS-RhoC bulkdichtheidssensor van de firma Medusa Radiometrics B.V. (Figuur 8). Omdat het werken met 100cc ringen arbeidsintensief is en de RhoC sensor snel een bodemprofiel tot 1 meter diep kan meten, is dit in potentie een interessant alternatief om snel en relatief goedkoop de bulkdichtheid in het veld te meten.



Figuur 7 Het afwerken van een 100cc ringmonster in het veld (foto: WENR).

De 100cc ringen worden in veldvochtige toestand naar het laboratorium getransporteerd, waar de grond in de ringen wordt gedroogd en de massa bepaald. Hierna kan de droge bulkdichtheid eenvoudig worden berekend, aangezien het volume van de ringen precies 100 cm^3 bedraagt.

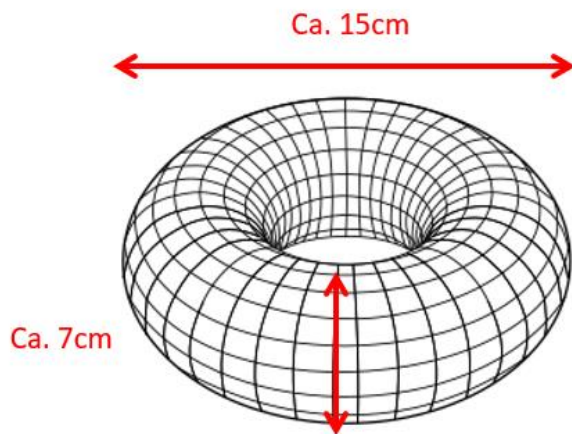


Figuur 8 De MS RhoC sensor van de firma Medusa Radiometrics BV (foto's: Medusa Radiometrics BV).

Met de RhoC sensor wordt de natte bulkdichtheid in het veld *in situ* bepaald. De RhoC meet de verstrooiing van gammastraling uitgezonden door een (laag actieve) bron in de sensor. De sensor kan tot 100 cm -mv meten en heeft voor een dergelijke meting slechts een gat van 30 mm diameter nodig. Met deze sensor is het graven van een kuil of laboratoriumwerk niet nodig om de bulkdichtheid van de grond te bepalen; de sensor levert de gemeten dichtheden tijdens metingen in het veld. Door de diepte van de meetsonde in het voorgeboorde gat te variëren, kan een dichtheidsprofiel worden opgesteld.

Omdat de door de RhoC gemeten verstrooiing van gammastralen mede afhankelijk is van het vochtgehalte van de bodem, moet hiervoor worden gecorrigeerd. In dit project is de door de RhoC sensor gemeten natte bulkdichtheid gecompenseerd voor het bodemvochtgehalte door hier de meetwaarden van het automatische bodemvocht meetstation voor te gebruiken. Het meetvolume van de RhoC sensor is toroïde-vormig rondom de sensorstaf (zie Figuur 9) met een diameter van ongeveer 15 cm en een hoogte van circa 7 cm – informatie van de fabrikant). Het meetvolume wordt daardoor circa 1.250 cm^3 . Het bodemtype heeft ook

invloed op de meetnauwkeurigheid van de RhoC sensor. De RhoC sensor is geschikt voor alle minerale gronden maar is tot nog toe alleen gevalideerd in zandgronden.



Figuur 9 Grafische voorstelling van het meetvolume van de RhoC sensor (bron: Medusa Radiometrics BV).

De door de RhoC-sensor gemeten dichtheid is gelijk aan de 'resultante' (dichtheid) van het medium waarin wordt gemeten. Deze 'resultante' van de dichtheid is een optelling van de bulkdichtheid van het bodemdeel (minerale delen, organische stof, etc. dichtheid is $x \text{ kg/m}^3$; de te meten waarde), het luchtdeel (luchtgevulde poriën = porositeit-watergehalte, dichtheid van lucht is 1.2 kg/m^3) en waterdeel (het watergehalte $\times \rho$ water, 1000 kg/m^3). Om de droge bulkdichtheid te kunnen bepalen, moet het waterdeel en het luchtdeel worden afgetrokken van de meting. Het luchtdeel kan worden verwaarloosd omdat de dichtheid van lucht ongeveer 1000 maal kleiner is dan die van water. De zuivere droge bulkdichtheid van de bemeeten grond wordt dan de gemeten dichtheid door de RhoC sensor [g/cm^3] min het gemeten volumetrisch vochtgehalte [m^3/m^3].

A6.2.2.3 Zuurstofdiffusie en Zuurstofgehalte

Zoals in paragraaf 7.2 van Bakema et al. 2022 wordt gesteld, kan plantengroei ernstig worden beperkt door verlaging van zuurstofconcentratie en beperking van de zuurstoftoevoer in de wortelzone. Er kan hier onderscheid worden gemaakt in beperkingen ten gevolge van de directe reductie van het zuurstoftransport (ten gevolge van verminderd poriënvolume, dus nauwere poriën) zelf maar ook indirecte reductie van zuurstoftransport omdat de voor zuurstoftransport beschikbare poriën vollopen met water doordat bijvoorbeeld de ploegzool verdicht is en regenwater niet wegzakt naar diepere bodemlagen en blijft 'hangen' in de wortelzone.

Het zuurstofgehalte in de nabijheid van de plantenwortel is belangrijk, en daarmee ook het transport van zuurstof naar de wortelomgeving. Zuurstoftransport in de bodem vindt niet plaats ten gevolge van luchtstroming maar ten gevolge van vereffening van het zuurstof concentratieverschil: zuurstofdiffusie.

Tijdens de veldproef werden twee soorten meetapparatuur ingezet om zuurstofparameters te meten: de zuurstofconcentratie en zuurstofdiffusie-snelheid.

Zuurstofconcentratie

De zuurstofconcentratie op bepaalde diepten in de bodem wordt gemeten met een zogenaamde zuurstofmeter. Het apparaat wat hiervoor gebruikt werd is de GX-8000 zuurstofmeter met daarop aangesloten een bodemgassonde (Figuur 10).



Figuur 10 De zuurstofmeter met bodemgassonde (foto en tekening: Royal Eijkelpark BV).

De zuurstofmeter voor bodemlucht werkt via het volgende principe: de bodemgassonde wordt tot bepaalde diepte in de bodemgedrukt. Door de verticaal naar beneden gerichte kracht wordt de opening onder aan de holle buis (1) dichtgedrukt door de conus (2). Wordt nu het handvat van de bodemgassonde iets omhooggetild, dan opent zich de opening onderaan de buis net boven de conus en kan de bodemlucht via de buis (1) door een nylon slangetje in de zuurstofmeter worden gezogen. In de zuurstofmeter bevindt zich een zuurstofsensoren die het zuurstofgehalte meet en op het display weergeeft.

Doordat de bodemlucht op diepte wordt weggezogen ontstaat er een onderdruk die moet worden aangevuld met atmosferische lucht. Dit kan alleen dan gebeuren wanneer er voldoende poriën in de bodem aanwezig zijn om dit luchttransport (luchtstroming) te faciliteren.

Zuurstofdiffusie

De zuurstofdiffusie op bepaalde diepten in de bodem wordt gemeten met een zuurstofdiffusiesnelheidsmeter (Figuur 11). De zuurstofdiffusiesnelheidsmeter (Oxygen Diffusion Rate, ODR) meet de mobiliteit van zuurstof in de bodem. De methode omvat het meten van de elektrische stroom die nodig is voor de reductie van alle beschikbare zuurstof aan het oppervlak van een cilindrische Platina elektrode in de bodem. Zo wordt de zuurstofstroom door de met lucht gevulde poriën en de waterfilm op de elektrode tot een nul concentratie op het elektrodeoppervlak gemeten.

Het transport van zuurstof gaat in lucht veel sneller dan in water. Bij een gegeven grondsoort zal de diffusiesnelheid dus sterk afhangen van de lucht-waterverhouding in de poriën van de bodemmatrix. Plantenwortels hebben voor hun groei voldoende zuurstof nodig, zoals zal worden geleverd door matig of goed beluchte bodems. Er moet voor worden gezorgd dat elke verandering van de beluchting op het meetpunt wordt vermeden. De ODR-sensor mag geen verdichting van de grond veroorzaken.

De voltmeter in de zuurstofdiffusiemeter meet de spanning die ontstaat door een elektrochemische reactie, waarbij zuurstof aan een elektrode diffundeert en daar wordt gereduceerd tot water of hydroxide-ionen. Deze spanning is een directe indicatie van de zuurstofconcentratie in de bodem. Door de spanning te vergelijken met een kalibratiecurve kan de zuurstofbeschikbaarheid worden bepaald. Daarnaast geeft de gemeten spanning inzicht in de snelheid van zuurstofdiffusie, wat belangrijke informatie oplevert over de structuur en luchtdoorlatendheid van de bodem.



Figuur 11 De zuurstofdiffusiesnelheidsmeter meetset (foto: Royal Eijkelkamp BV).

A6.2.3 Veldmetingen

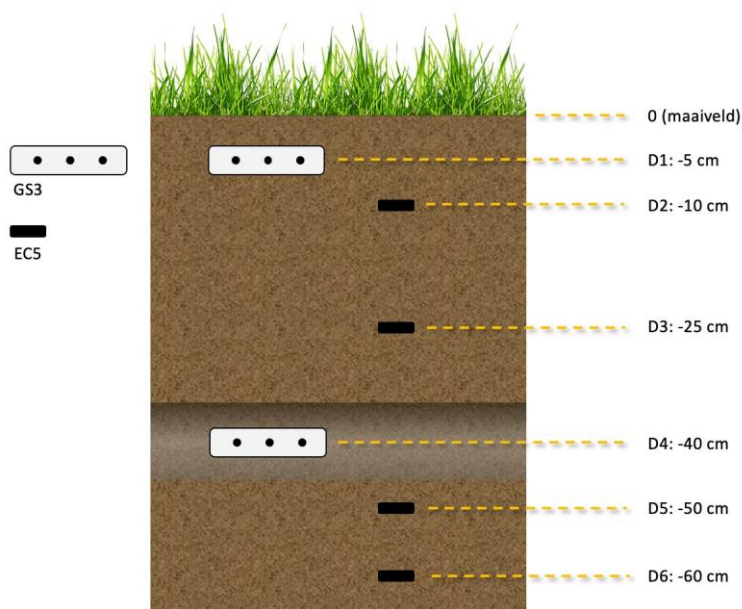
A6.2.3.1 Plantparameters: gewasontwikkeling, biomassa opbrengst, wortelontwikkeling

Ondersteunend aan de metingen aan dichtheid en verdichting gerelateerde indicatoren zijn een aantal plantparameters gemonitord om deze te kunnen relateren aan deze verdichting gerelateerde indicatoren. Er werden per subplot van 3 x 3 meter, random vijf planten geselecteerd, gemarkeerd (P1..P5) waarvan wekelijks de planthoogte is gemeten. Na de oogst is de totale biomassa van de 3x3 meter plot gemeten en ook de biomassa van de vijf geselecteerde planten per subplot.

Het maisperceel is ingezaaid op 22 mei 2023; de oogst van de subplots heeft plaatsgevonden op 12 oktober 2023. De totale groeitijd is 143 dagen.

A6.2.3.2 Bodemvocht: volumetrisch bodemvochtgehalte, neerslag, grondwaterstand

Op elk van de subplots zijn in een profielkuil bodemvochtsensoren geïnstalleerd om de status van het bodemvocht gedurende het groeiseizoen te kunnen monitoren. De sensoren zijn zowel boven, in als onder de mogelijk verdichte zone in de profielkuilen geïnstalleerd. Op de diepten -5 cm en -40 cm werden METER GS3 sensoren gebruikt die bodemvochtgehalte [m^3/m^3], temperatuur [$^{\circ}\text{C}$] en elektrische geleidbaarheid, EC [mS/m] kunnen meten. Op de andere diepten, -10 cm, -25 cm, -50 cm en -60 cm werden METER EC5 sensoren gebruikt. Deze sensoren meten alleen bodemvochtgehalte [m^3/m^3]. De manier van installeren is te zien in Figuur 12. De sensoren werden per subplot aangesloten op een METER datalogger, type ZL6. De meetwaarde van de sensoren werden elk uur opgeslagen in de dataloggers. De dataloggers werden regelmatig draadloos uitgelezen.



Figuur 12 Installatiediepten D1..D6 van de zes bodemvochtsensoren per subplot S1..S5. De sensoren 1 en 4 zijn METER GS3 sensoren, de overige sensoren zijn METER EC5 sensoren.

Bij subplot S5, in de buurt van het midden van het perceel, werd een additionele datalogger geïnstalleerd met daarop aangesloten een regenmeter en een grondwaterstandsensor. Deze hydrologische gegevens zijn bij de analyse gebruikt om eventueel het gedrag van het gewas te kunnen verklaren.

A6.2.3.3 Nutriënten in de bodem

De bodem is de eerste week van juli bemonsterd en de nutriënten zijn bepaald bij Eurofins Agro in Wageningen, met behulp van de geaccrediteerde NIRS-methode (Tabel 3).

Tabel 3 De gemeten nutriënten in de bodem van de subplots S1..S5.

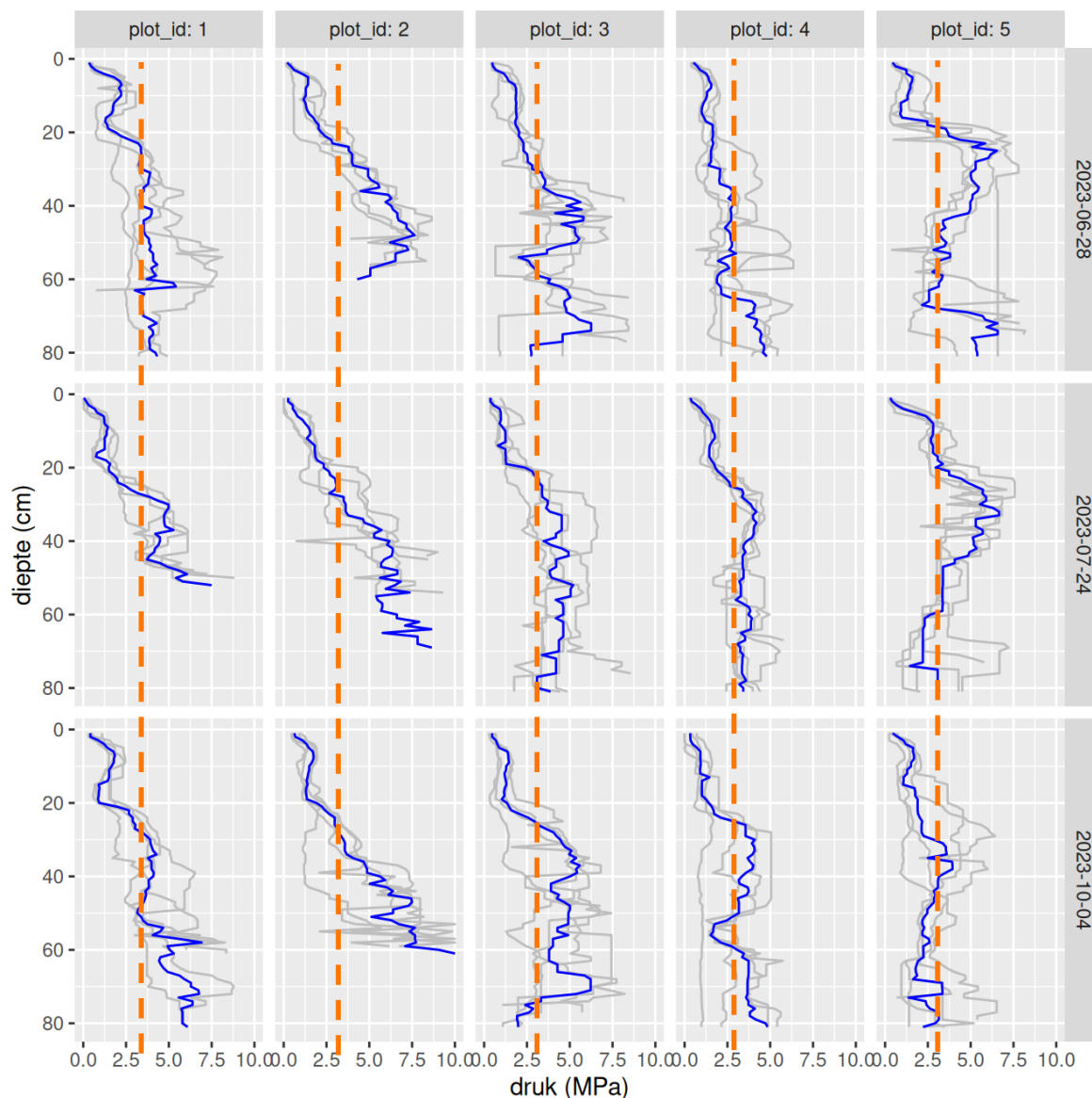
BEGINMETING	Unit
N-totaal bodemvoorraad	mg N/kg
S-plantbeschikbaar	mg S/kg
S-totaal bodemvoorraad	mg S/kg
P-plantbeschikbaar	mg P/kg
P-bodemvoorraad	mg P ₂ O ₅ /100 g
K-plantbeschikbaar	mg K/kg
Mg-plantbeschikbaar	mg Mg/kg
Na-plantbeschikbaar	mg Na/kg
Zuurgraad (pH)	
Zuurgraad (pH-KCl)	
Organische stof	%
C-anorganisch	%
Koolzure kalk	%

A6.3 Resultaten en discussie

In dit hoofdstuk worden de meetresultaten gepresenteerd en er wordt besproken in hoeverre de apparatuur heeft gefunctioneerd gedurende de meetcampagne, en of de metingen en de apparatuur geschikt zijn voor het detecteren en kwantificeren van bodemverdichting.

A6.3.1 Indringingsweerstand

Bij de start van de veldproef, na de oogst en tweemaal gedurende het groeiseizoen zijn met de penetrologger metingen gedaan van de indringingsweerstand op de vijf subplots. De data waarop dit is gebeurd zijn 28 juni, 24 juli en 04 oktober 2023 (Figuur 13). Elke grafiek is een gemiddelde van vier steken met de penetrologger. De grijze lijnen zijn de originele grafieken geven de variatie aan van de afzonderlijke steken.



Figuur 13 Indringingsweerstand (MPa) als functie van de diepte voor drie datums, vijf plots (kolommen) en vier herhalingen (grijze lijnen). De blauwe lijn is de mediane indringingsweerstand. De mediane i.p.v. de gemiddelde indringingsweerstand is hier gebruikt om omdat die minder gevoelig is voor uitbijters. De oranje stippellijnen is de 3 MPa indicatie voor de indringings-weerstand: zie tekst. Voorbeelden van uitbijters zijn de verticale lijnsegmenten waar de druk schijnbaar constant is. NB de 'PenetroViewer'-software van Eijkelkamp laat de rekenkundig gemiddelde indringingsweerstand zien.

De oranje stippellijnen zijn toegevoegd om de 3 MPa indringingsweerstand grens aan te geven. Dit is de grens waarbij plantenwortels niet meer door kunnen dringen door een verdichte laag (Whalley 2014). Dat zou betekenen dat op overal in het perceel wortelgroei wel ergens, op een bepaalde diepte, ernstig zou worden belemmerd, en dat dit perceel als ernstig verdicht kan worden beoordeeld. Of plantenwortels hier ook daadwerkelijk last van hebben en de opbrengst ook daadwerkelijk wordt gereduceerd, hangt uiteraard ook af van de diepte waar deze verdichting wordt gevonden en van de omstandigheden van het groeiseizoen voor wat betreft neerslag en vochtvoorraad in het profiel boven de verdichte laag. Per plot S1..S5 is de mediane indringingsweerstand in de tijd te volgen (juni, juli, oktober). Daarbij valt op dat de vorm van de mediane indringingsweerstand in de tijd en per plot wel ongeveer dezelfde relatie tussen indringingsweerstand en diepte blijft beschrijven, maar niet exact dezelfde vorm heeft. Dit is ook niet te verwachten aangezien nooit op *exact* dezelfde locatie is gemeten en gezien de grote variabiliteit die in het veld werd geconstateerd met de penetrologger. Aan de hand van de foto's van de profielkuilen (Figuur 3), is deze grote variatie op kleine afstand (meters) ook wel te begrijpen; het diepploegen dat in het verleden is gedaan op het profiel heeft veel variatie veroorzaakt. Met de penetrologger is een duidelijk beeld te krijgen van de indringingsweerstand in het profiel en op welke diepte deze indringingsweerstand optreedt.

Een algemene observatie die voor alle metingen in S1..S5 geldt, is dat de vorm van de profielen in de loop van het groeiseizoen nauwelijks verschilt, behalve de indringingsweerstand van 0-40 cm op 23 april: deze indringingsweerstand is aanmerkelijk lager dan de indringingsweerstand op deze diepte in de rest van het groeiseizoen. Waarschijnlijk is dit het gevolg van de bewerking van het perceel op 3 april 2023, waarbij het perceel is geploegd. Ook de indringingsweerstand van 0-40 cm diepte is tijdens de derde meting op 23 juli anders van vorm. Dieper dan 30 cm neemt de indringingsweerstand snel toe tot waarden boven de 4 MPa.

A6.3.2 Bulkdichtheid

Er zijn aan het begin en aan het eind van het groeiseizoen met zowel 100cc ringen als met de RhoC sensor bulkdichtheidsmetingen gedaan (Tabel 4).

Tabel 4 Meetdata van dichtheid met 100cc ring en de RhoC sensor.

	Datums 100cc ring bepaling	Datums RhoC veldmeting
Begin	07 juli 2023	02 juni 2023
Eind	13 oktober 2023	04 november 2023

De Medusa Radiometrics RhoC sensor die is gebruikt tijdens de veldmetingen was niet voorzien van een vochtsensor om te compenseren voor het veldvochtgehalte tijdens de meting. Daarom is achteraf gecompenseerd voor het bodemvochtgehalte met behulp van de afzonderlijke metingen die zijn gedaan met behulp van de meetwaarden van de vochtsensoren zoals geïnstalleerd in elk subplot. In Tabel 5 en Tabel 6 staan de gemeten waarden voor de bulkdichtheid met de twee gebruikte meetmethoden.

Tabel 5 De droge bulkdichtheid van subplots S1..S5, gemeten met 100cc ringen op verschillende diepten. De 100cc ringen zijn met hun midden uitgelijnd op de bemonsteringsdiepten van de horizonten.

100cc ringen - bulkdichtheid [kg/m ³]			
Diepte [cm -mv]	Locatie subplot	7-Jul-'23	13-okt-'23
20	S1	1550.4	1564.4
40		1563.4	1543.7
65		1654.7	1666.0
95		1794.4	1738.6
20	S2	1586.1	1625.3
40		1633.5	1651.0
65		1643.1	1674.3
85		1729.5	1704.5
20	S3	1578.0	1509.7
50		1625.8	1659.9
80		1703.2	1730.2
10	S4	1354.4	1341.0
35		1636.5	1455.0
80		1773.4	1742.8
15	S5	1362.7	1599.4
35		1705.6	1458.5
80		1626.7	1708.2

Tabel 6 De droge bulkdichtheid van de subplots S1..S5 gemeten met de RhoC sensor. De waarden zijn gecorrigeerd voor het bodemvochtgehalte.

RhoC - gecorrigeerde bulkdichtheid [kg/m³]						
	S1	S2	S3	S4	S5	
Diepte [cm -mv]						
10	1391.7	1262.3	1300.0	1275.3	1299.7	02/Jun/23
20	1304.0	1503.3	1492.7	1400.7	1448.3	
30	1415.3	1690.0	1604.3	1366.7	1586.3	
40	1575.3	1506.7	1557.3	1444.3	1514.3	
50	1646.0	1596.7	1487.0	1345.7	1634.3	
60	1490.3	1763.7	1394.7	1364.3	1560.3	
70	1501.3	1487.7	1298.7	1481.3	1564.7	
80	1504.0	1906.7	1385.0	1527.3	1565.7	
90	1506.0	1866.7	1462.0	1500.3	1530.0	
100	1594.3	1857.0	1544.0	1584.3	1605.0	
10	1482.3	1416.0	1393.0	1382.3	1284.7	04/Okt/23
20	1508.3	1535.7	1502.7	1537.0	1313.3	
30	1572.0	1598.7	1568.7	1641.7	1332.0	
40	1592.3	1538.3	1495.3	1591.0	1170.7	
50	1630.3	1572.3	1605.0	1525.3	1359.3	
60	1765.0	1732.7	1626.0	1482.7	1188.7	
70	1848.0	1757.0	-	1612.0	1428.0	
80	1941.0	-	-	1831.5		
90	-	-	-	1816.0		
100	-	-	-	-	-	

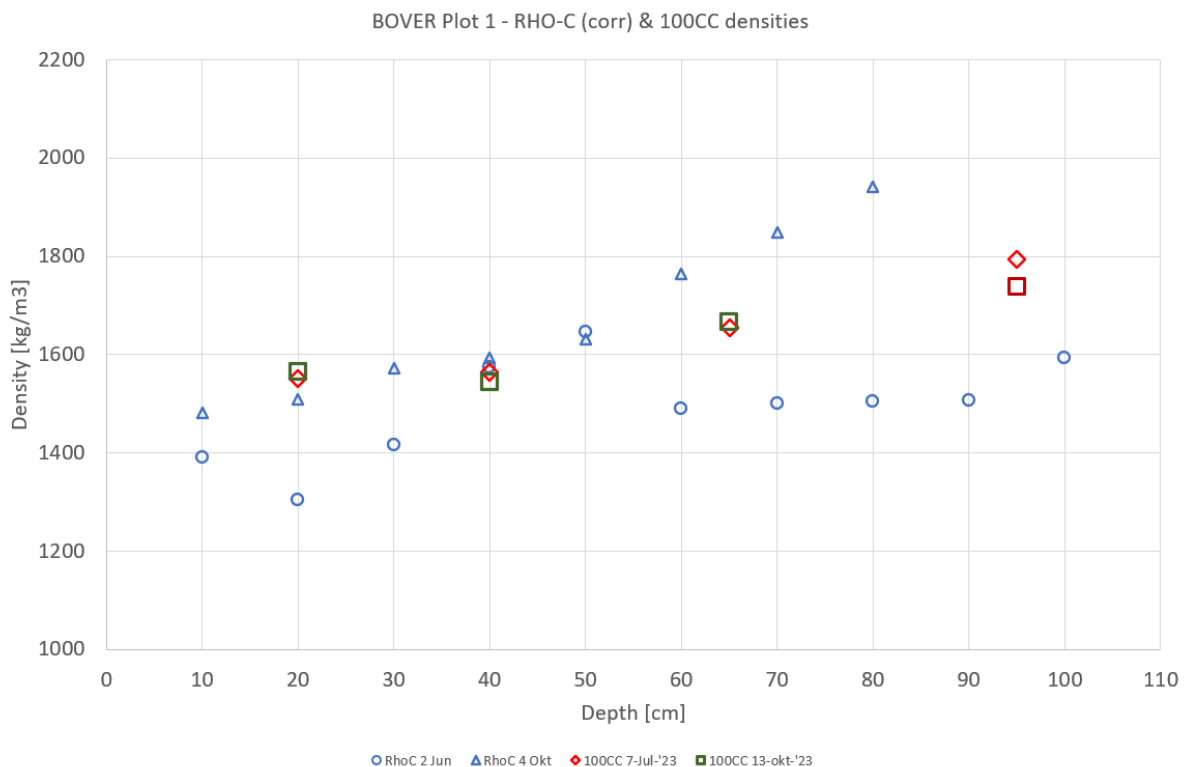
De meting van de dichtheid met behulp van de RhoC sensor en met behulp van 100cc ringen hebben op verschillende momenten plaatsgevonden: met de RhoC sensor is gemeten op 2 juni 2023 en 4 oktober 2023, met de 100cc ringen is gemeten op 7 juli 2023 en 13 oktober 2023. Bij de vergelijking van de dichtheden met 100cc ringen vallen een aantal dingen op in alle afzonderlijke plots, namelijk:

- De dichtheden gemeten met de 100cc ringen aan het begin en het eind van het groeiseizoen komen vrijwel allemaal overeen; dit zou erop duiden dat de dichtheid tussen juli en oktober 2023 nauwelijks is

veranderd. Een uitzondering hierop zijn de meting op 35 cm -mv in plot 4 en de metingen op 15 en 35 cm -mv van plot 5.

- De dichtheid op 20cm diepte lijkt iets groter dan die op 40 cm diepte, maar het is de vraag of dit niet wordt vertekend door een eventuele meetonnauwkeurigheid.
- De gemeten bulkdichtheid vertoont op alle subplots een positieve trend; de dichtheid neemt toe met de diepte. Dit is consistent te zien in alle subplots.

Door een te groot verschil in meetvolume, meettijdstip en meetlocatie zijn de metingen met RhoC en 100cc ringen moeilijk te vergelijken zowel in absolute meetwaarde als voor trend in de tijd. Dit maakt het lastig om duidelijke conclusies te trekken over de toepasbaarheid van de RhoC sensor voor het bepalen van absolute waarden van de droge bulkdichtheid. Een 100cc ring heeft een heel andere 'footprint' dan de RhoC sensor: het meetvolume van een 100cc ring is, per definitie, 100cc, 5x5cm, terwijl het meetvolume van de RhoC sensor veel groter is, namelijk ongeveer 1250 cm³ (informatie van de fabrikant). De bodemstructuur en indringingsweerstand in het veld vertonen veel variatie op kleine schaal (zie Figuur 3). Of dit ook voor de bulkdichtheid geldt is niet vastgesteld, maar dit is niet ondenkbaar. Een variatie op kleine schaal kan worden vastgesteld door het relatief kleine volume van een 100cc ring, terwijl een dergelijke kleine schaal variatie door het veel grotere meetvolume van 1250 cm³ van de RhoC sensor zal worden uitgemiddeld. Dit maakt dat beide meetmethoden in een dergelijk perceel met veel variatie op kleine schaal moeilijk te vergelijken zijn. Ter illustratie van de bulkdichtheidsmetingen zijn in Figuur 14 de afzonderlijke waarnemingen voor plot S1.



Figuur 14 Vergelijking tussen 100cc en RhoC bepalingen voor dichtheid: de dichtheden gemeten op plot 1 met 100cc ringen en de RhoC sensor. De 100cc ringen zijn per horizont gestoken, de RhoC metingen zijn per 10cm diepte gedaan. De RhoC metingen zijn voor het bodemvochtgehalte gecorrigeerd.

A6.3.3 Zuurstofgehalte en zuurstofdiffusie

Het apparaat voor zuurstofgehalte (Figuur 10) in het veld is op verschillende momenten ingezet. Tijdens de metingen bleek dat meten op geringe diepte redelijk gaat, maar op diepten groter dan 30 à 40 centimeter al snel problemen oplevert. De luchtstroming door de aanzuigslang en het apparaat wordt beperkt door de sterkte van de aanzuigpomp in het apparaat en de aanvulling van deze lucht op diepte door het poriënstelsel van de bodem. Als de luchtstroming door het apparaat te laag is, genereert het apparaat een foutcode en

wordt de luchtpomp gestopt. Vooral onder natte omstandigheden (poriën in de bodem (deels) gevuld met water) trad deze fout sneller op en was het meten van zuurstofconcentratie onmogelijk. Hierdoor bleek het onmogelijk om een zinnige meetserie op te bouwen.

Begin juli 2023 werd ook een start gemaakt met de zuurstofdiffusiemetingen. De metingen waren dusdanig complex, bewerkelijk en tijdrovend dat slechts enkele zinvolle metingen konden worden gedaan. De bezwaren van deze methode waren:

- Volgens de handleiding leveren 10 metingen een betrouwbaar gemiddelde op. Oftewel arbeidsintensief als je meerdere plots en lagen wilt bemeten;
- Het advies is om eerst Redox te meten in droge grond en daarna pas ODR;
- Redox vergde in onze testmetingen 10-15 min om tot een evenwicht te komen, is dus zeer tijdrovend;
- Voor ODR moet het vochtgehalte ter plekke van de metingen in de buurt van veldcapaciteit zijn. Er moet een vochtfilmje rond de platina elektrode zitten. Veldcapaciteit is een toestand van het bodemprofiel wat (lang) niet altijd voor komt.

Na de eerste paar keer toepassen van zowel het zuurstofgehalte apparaat als de ODR-meetopstelling is besloten af te zien van verder gebruik, de meetopstelling is voor praktisch gebruik in het veld te complex en kost te veel tijd. Daarnaast zijn de metingen ook lastig te interpreteren.

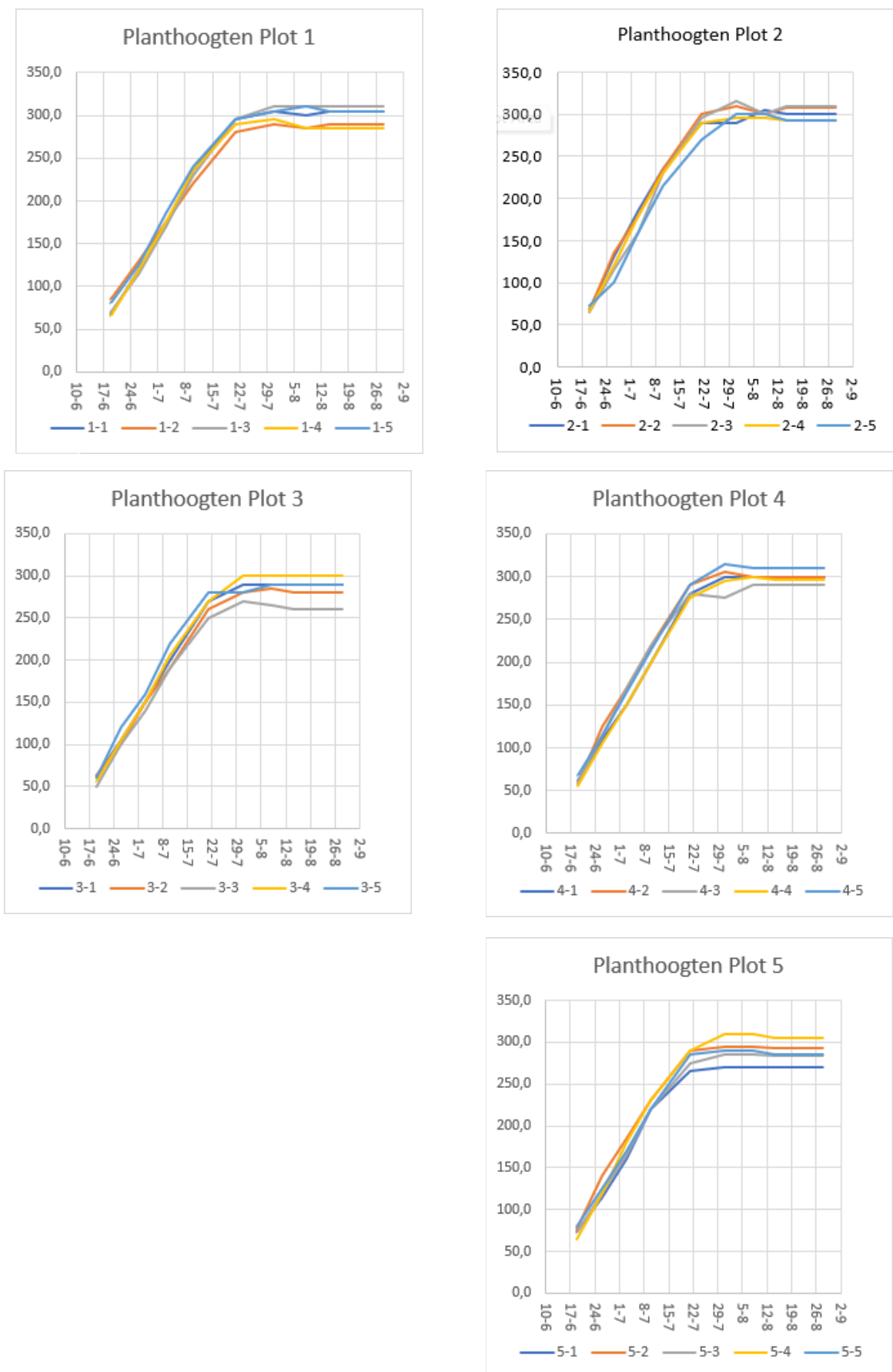
A6.3.4 Plantparameters: gewasontwikkeling en biomassa opbrengst

Planthoogte

De planthoogte werd gemeten door een rolmaat uit te rollen en vanaf maaiveld omhoog te steken langs de plant en de hoogte vanaf ooghoogte af te lezen. Deze meetmethode heeft een beperkte nauwkeurigheid; naarmate de planten hoger werden werd het lastiger de planthoogte nauwkeurig af te lezen. De flexibiliteit en beweeglijkheid van de hoogste maisbladeren bemoeilijkte ook een nauwkeurige aflezing. Hierdoor wordt de afleesnauwkeurigheid van de planthoogte op ± 2 cm geschat. Deze beperkte nauwkeurigheid is waarschijnlijk ook de reden dat het bij sommige waarnemingen lijkt alsof de planthoogte op een gegeven moment weer afneemt.

Er vallen een aantal zaken op wanneer wordt gekeken naar deze plantontwikkeling:

- Alle planten op alle subplots bereiken zo rond 10 weken na het zaaien hun maximale hoogte waarna de planthoogte niet meer toeneemt (zie Figuur 19);
- Gedurende de groeifase is de maximale groeisnelheid rond de 70 cm per week, dat is zo'n 10 centimeter per etmaal;
- De grootste planthoogte wordt bereikt in plots 2 en 4 met 3.15 meter, terwijl de laagste planthoogte wordt bereikt in de plots 3 en 5 met 2.70 meter.



Figuur 15 De planthoogte ontwikkeling van de afzonderlijke sample planten in plots S1..S5 gedurende het groeiseizoen.

Opbrengst

De opbrengst werd per subplot S1-S5 en per monsterplant P1-P5 afzonderlijk bepaald. De resultaten worden in Tabel 7, Figuur 20 (de gemiddelde plantgewichten van alle planten in de subplots S1..S5) en in Figuur 21 (de gemiddelde plantgewichten voor de afzonderlijke vijf monsterplanten per plot S1..S5) weergegeven.

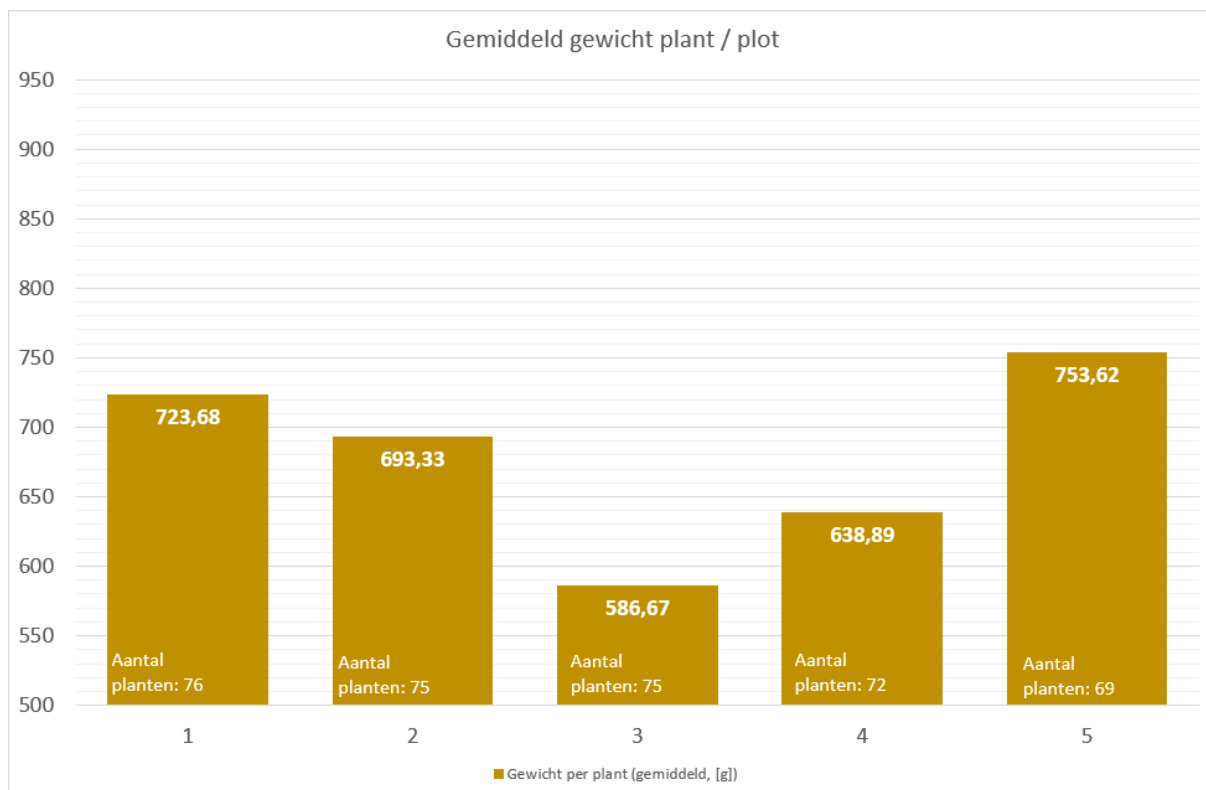
Tabel 7 De algehele plotopbrengsten en de gemiddelde gewichten per plant.

Algemene plotopbrengst			
Plot #	Aantal planten in de plot	Oogstgewicht hele plot [g]	Gemiddeld gewicht per plant [g]
1	76	55000	723,7
2	75	52000	693,3
3	75	44000	586,7
4	72	46000	638,9
5	69	52000	753,6

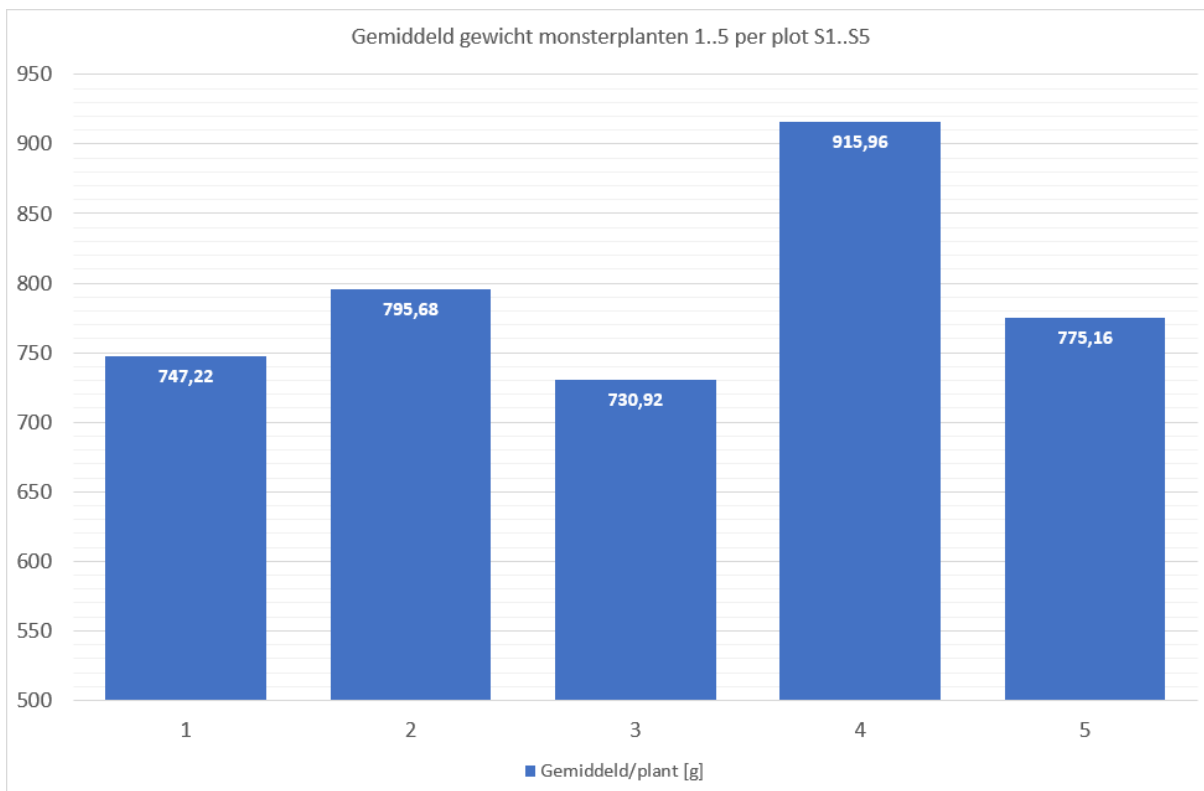
De volgende observaties kunnen worden gemaakt voor wat betreft de algehele plotopbrengst:

- Subplot S1 (76 planten) heeft absoluut gezien de hoogste opbrengst met 55 kg, subplot S3 (75 planten) de laagste opbrengst met 44 kg, een verschil van 25%.
- Het aantal planten per subplot is verschillend. Hoewel er wel ongeveer evenveel maiszaden worden geplant per strekkende meter rij, kan het aantal variëren door dat bijvoorbeeld niet alle maiszaden opkomen, er maisplanten afsterven tijdens de groeifase en er niet evenveel planten binnen de random geselecteerde plot van 3 x 3 meter vallen. Het aantal planten van subplots S1-S5 bedraagt respectievelijk 76, 75, 75, 72 en 69.
- Als het gemiddelde gewicht van de planten wordt bekeken, varieert die van 586,7 g voor subplot S3 tot 753,6 g voor subplot S5. Hiermee is de opbrengst per plant voor S5 28.5% hoger dan die van S3.

De volgende observatie kan worden gemaakt voor de geselecteerde monsterplanten (zie Figuur 21: van de vijf geselecteerde planten per subplot varieert de totale biomassa opbrengst (5 planten) van 3654,6 g voor plot S3 tot 4579,8 g voor plot S4; een verschil van 25.3%.



Figuur 16 De gemiddelde plantgewichten van alle planten in de 3x3 meter plots S1..S5.

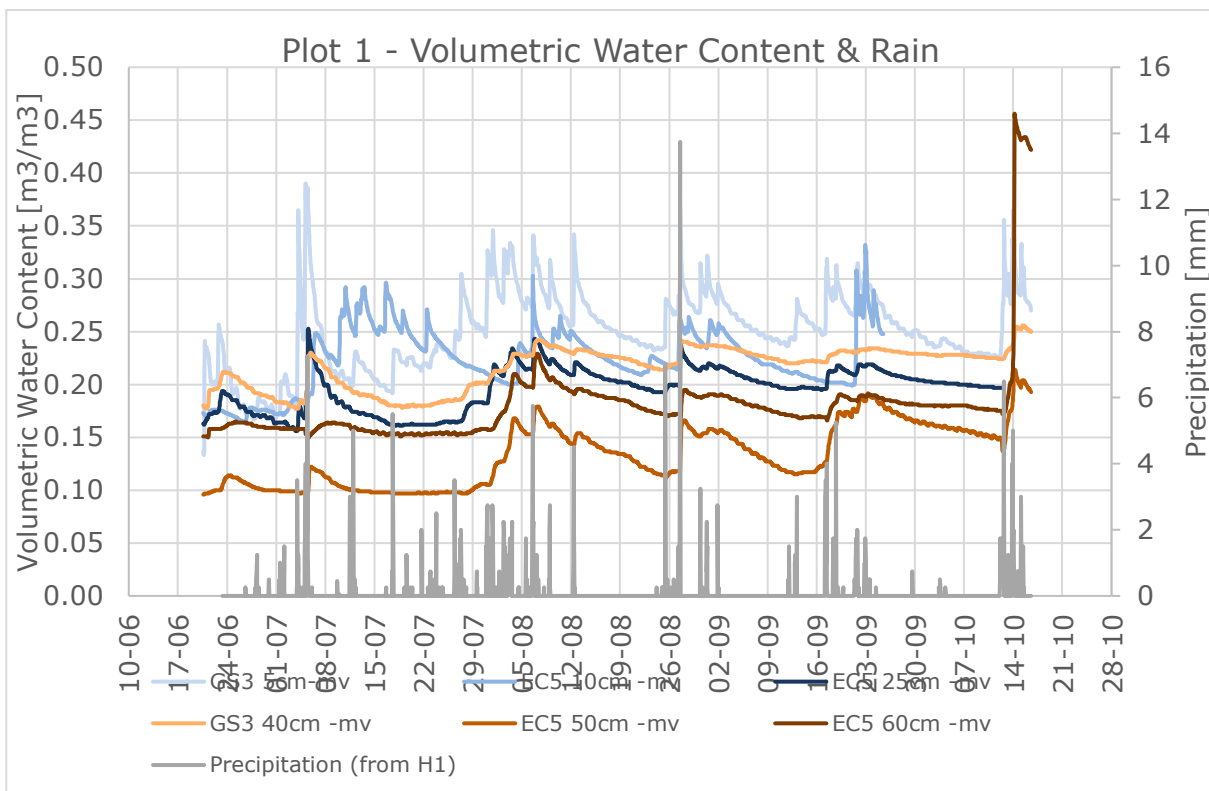


Figuur 17 De gemiddelde plantgewichten voor de afzonderlijke vijf monsterplanten per plot S1..S5.

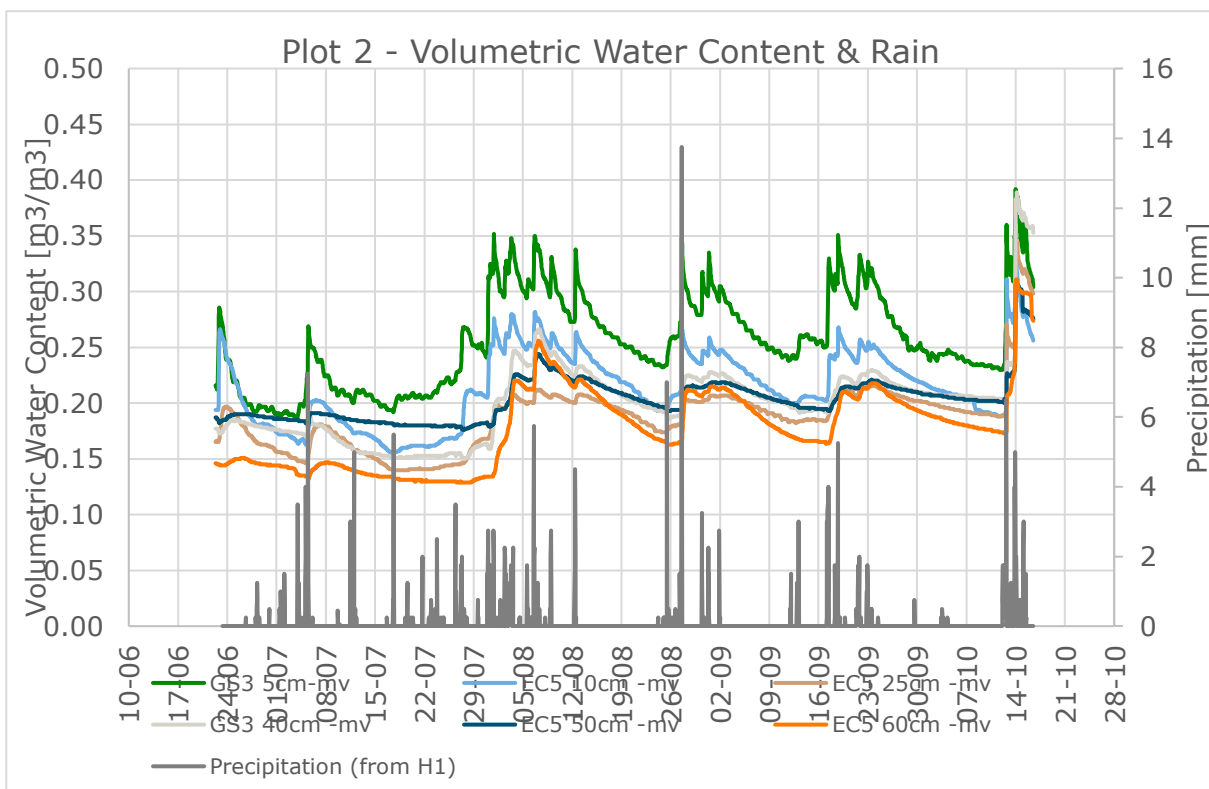
A6.3.5 Bodemvocht: Volumetrisch bodemvochtgehalte, neerslag, grondwaterstand

In Figuur 22 tot en met Figuur 27 zijn de metingen van de bodemvochtsensoren in de verschillende subplots en de neerslaggegevens uitgezet in de tijd. Enkele algemene waarnemingen voor het bodemvochtgehalte zijn:

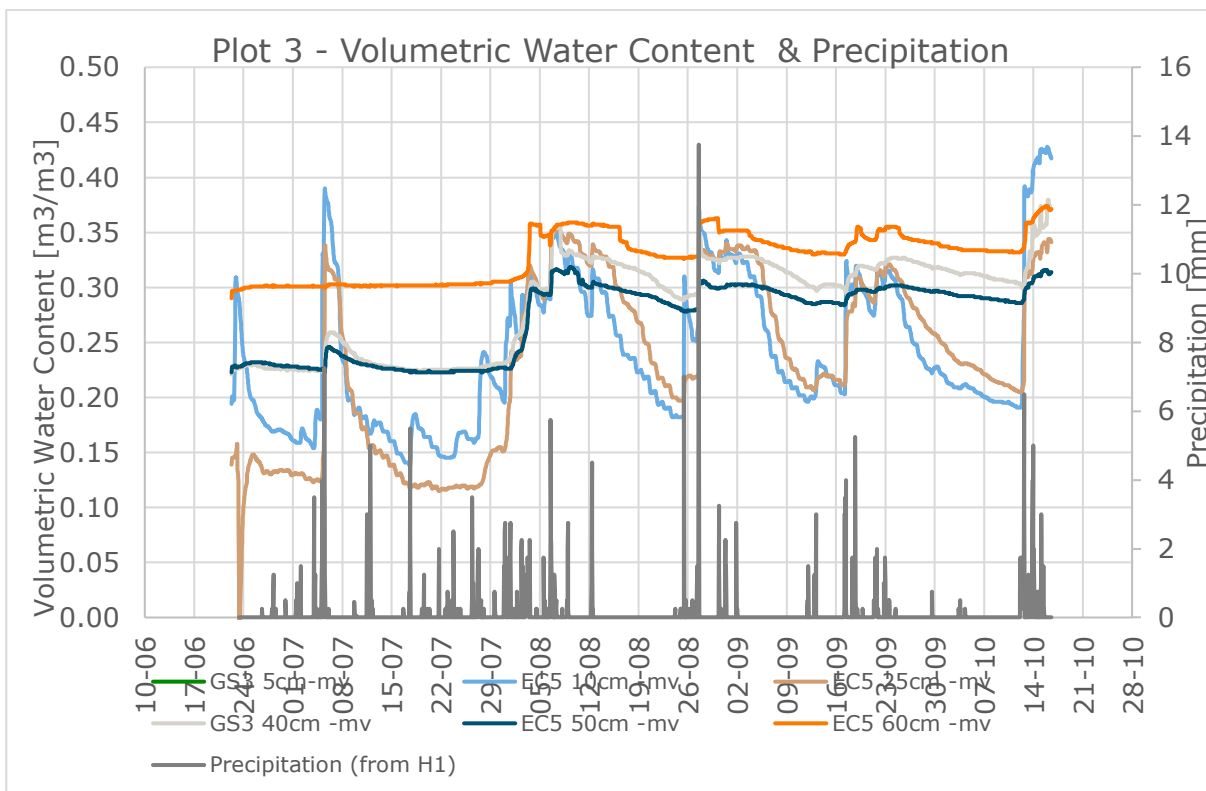
- Voor alle plots geldt dat de minst diepe sensoren op 5 cm -mv het snelst reageren op neerslag, terwijl de diepste sensoren op 60 cm -mv het minst snel reageren op neerslag.
- De minst diepe sensoren op 5 en 10 cm -mv geven de hoogste bodemvochtgehalten, omdat deze het meest bloot worden gesteld aan neerslag en het water zich verdeelt dieper het perceel in.
- Op Plot 3, 4 en 5 geven de diepste sensoren op 50 en 60 cm -mv juist de hoogste bodemvochtgehalten aan. Na gesprek met de beheerder van het perceel, blijkt dat het perceel te maken heeft met kwel vanuit de ondergrond vanaf ongeveer halverwege het perceel richting het zuiden. Dit zou de hogere vochtgehalten verklaren op grotere diepten in het profiel.



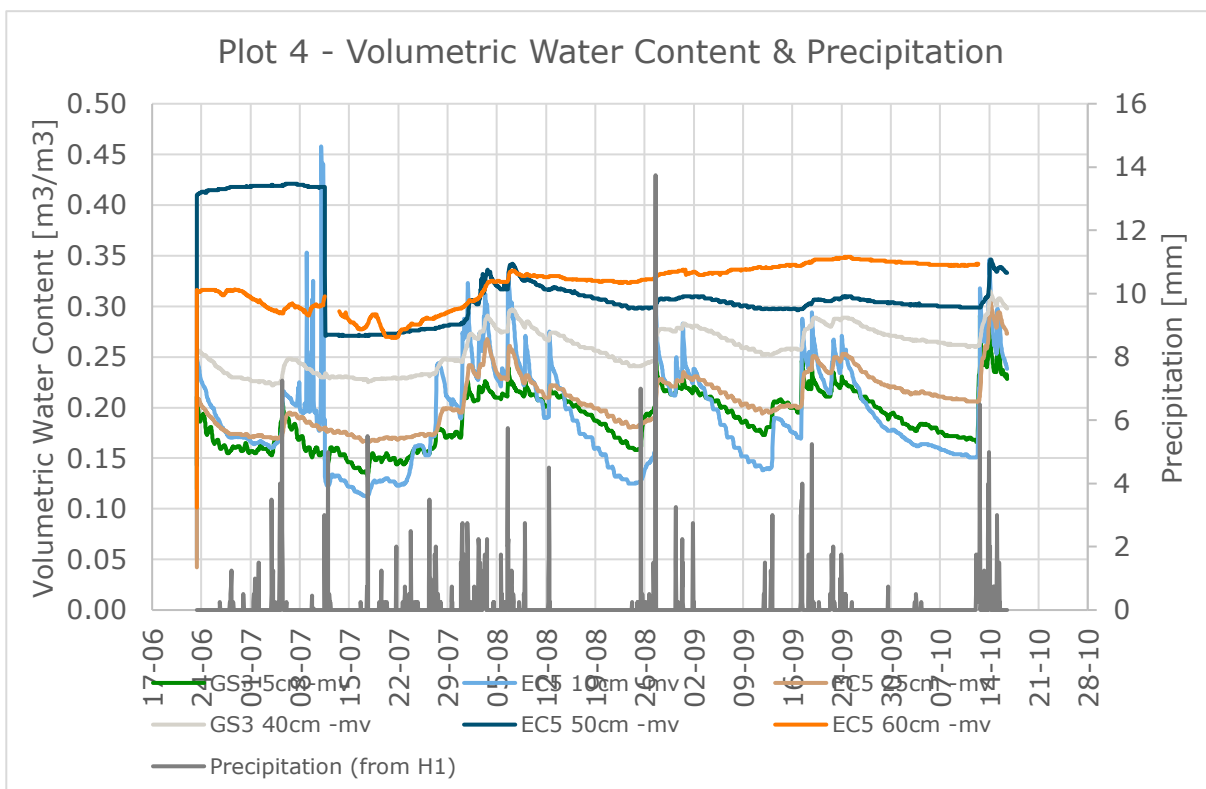
Figuur 18 De hydraulische metingen van plot 1: bodemvochtgehalten op zes diepten en de neerslag uitgezet tegen de tijd.



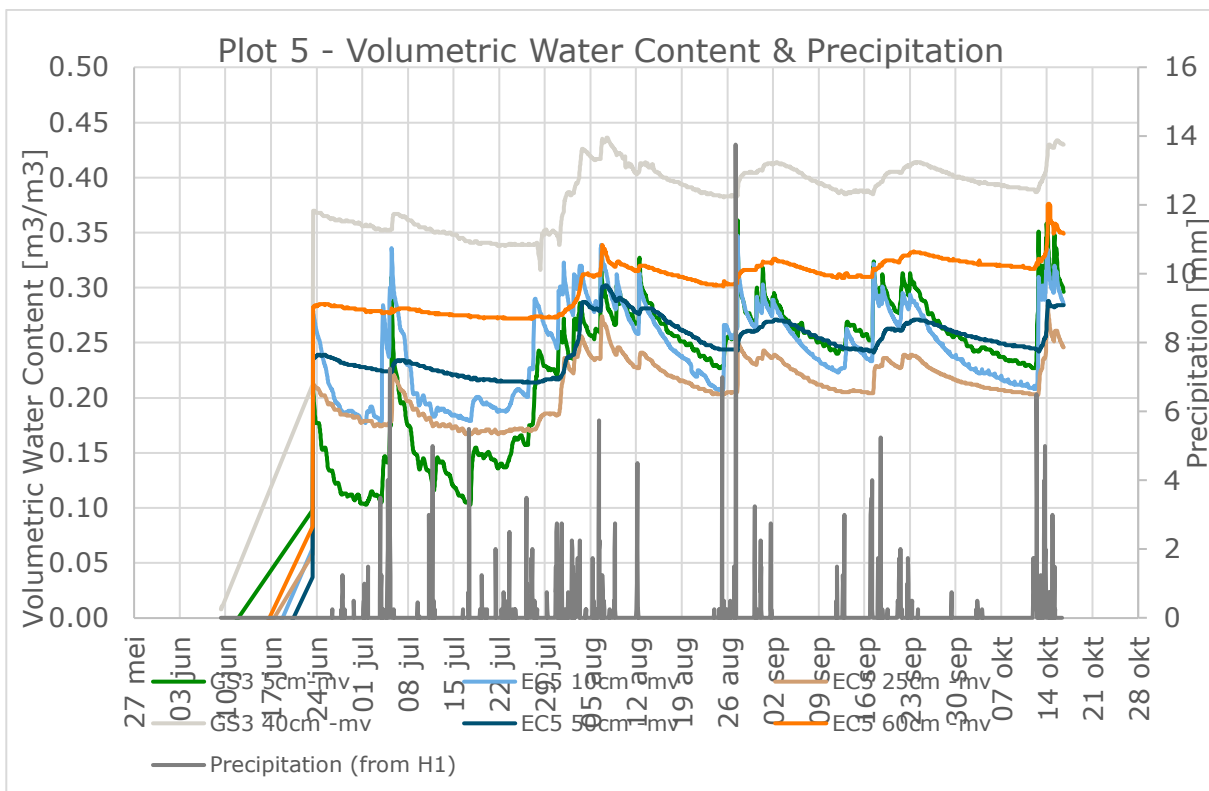
Figuur 19 De hydraulische metingen van plot 2: bodemvochtgehalten op zes diepten en de neerslag uitgezet tegen de tijd.



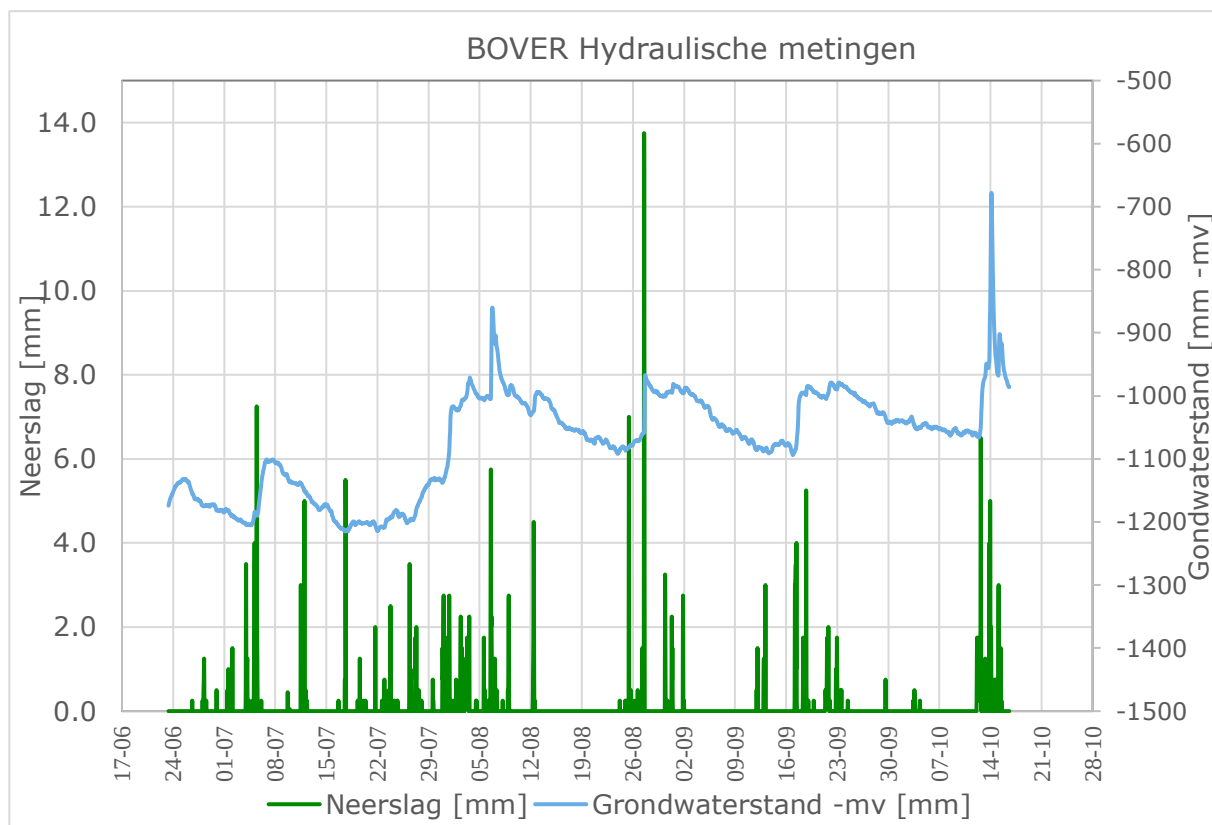
Figuur 20 De hydraulische metingen van plot 3: bodemvochtgehaltes op zes diepten en de neerslag uitgezet tegen de tijd.



Figuur 21 De hydraulische metingen van plot 4: bodemvochtgehaltes op zes diepten en de neerslag uitgezet tegen de tijd.



Figuur 22 De hydraulische metingen van plot 5: bodemvochtgehalten op zes diepten en de neerslag uitgezet tegen de tijd.



Figuur 23 De neerslag data en waterstandsgegevens gedurende het meetseizoen.

A6.3.6 Nutriënten

In Tabel 8 zijn de resultaten van de nutriënten bepaling van de vijf subplots te zien aan het begin van de proef. De bemonstering vond plaats in de eerste week van juli.

De volgende zaken vallen op voor wat betreft nutriënten in de bodem:

- De totale stikstofvoorraad in de bodem (N-totaal) is voor S1 wat hoger en voor S4 wat lager dan gemiddeld;
- De zwavel die voor de plant beschikbaar is (S-plantbeschikbaar) is voor S4 lager dan gemiddeld, terwijl de S-bodemvoorraad precies het omgekeerde het geval is;
- Het kalium wat voor de plant beschikbaar is (K-plantbeschikbaar) is voor S1 laag en voor S2 hoog, vergeleken met de gemiddelde waarde van de vijf percelen.

Tabel 8 De nutriënten status van de vijf subplots aan het begin van het groeiseizoen.

BEGINMETING	Unit	S1	S2	S3	S4	S5
N-totaal bodemvoorraad	mg N/kg	1150	1030	1070	840	1020
S-plantbeschikbaar	mg S/kg	6.3	6.4	4.9	8.3	4.7
S-totaal bodemvoorraad	mg S/kg	220	220	240	170	190
P-plantbeschikbaar	mg P/kg	2.2	4.6	3.8	3.4	4.6
P-bodemvoorraad	mg P ₂ O ₅ /100 g	58	61	61	55	57
K-plantbeschikbaar	mg K/kg	103	225	129	199	172
Mg-plantbeschikbaar	mg Mg/kg	55	76	57	87	68
Na-plantbeschikbaar	mg Na/kg	9	14	8	16	10
Zuurgraad (pH)		6.0	6.3	6.4	6.5	5.9
Zuurgraad (pH-KCl)		6.0	6.3	6.4	6.5	5.9
Organische stof	%	3.4	2.6	3.1	2.6	2.6
C-anorganisch	%	0.03	< 0,03	0.04	< 0,03	0.04
Koolzure kalk	%	0.2	< 0,2	0.3	< 0,2	0.3
Klei (<2 µm)	%	3	3	2	1	3
Silt (2-50 µm)	%	16	11	11	8	12
Zand (>50 µm)	%	77	83	84	88	82
Vocht	g H ₂ O/100 g luchtdroog	0.7	0.6	0.6	0.5	0.6

In Figuur 28 is de nutriënten status van aan het begin van de veldproef en na afloop van de veldproef te zien (de eindbemonstering is in oktober 2023 uitgevoerd). Voor de nutriënten die door de plant worden opgenomen is te verwachten dat de gehalten van deze stoffen in de bodem aan het einde van het groeiseizoen zijn afgenomen. Dit geldt dan voor stikstof, fosfor, zwavel, kalium, magnesium en natrium. De zuurgraad van de bodem (pH) wordt niet beïnvloed door opname door de plant, evenals het organische stofgehalte van de bodem. Bij de bepaling van de nutriënten wordt nog een onderscheid gemaakt tussen het gehalte in de bodem en de vorm (verbinding) van die stof die door de plant opneembaar is (bijvoorbeeld met 'S-plant' wordt bedoeld *plant beschikbare zwavel*). Opvallend is dat in een aantal gevallen de concentratie na de oogst hoger is dan aan het begin van het groeiseizoen (in 45% van de nutriëntbepalingen).



Figuur 24 Gehalten van nutriënten aan het begin van het groeiseizoen (blauw) vergeleken met de gehalten na de oogst (rood). Opvallend is dat de gehalten na de oogst in een aantal gevallen hoger zijn terwijl een lager gehalte logischer zou zijn.

A6.3.7 Statistische analyse en correlatie van de veldmetingen

In deze paragraaf wordt door middel van statistische toetsing gekeken of er een correlatie bestaat tussen de gemeten indicatoren en de gewashoogte. Er is specifiek gekozen voor gewashoogte omdat deze tijdens het groeiseizoen regelmatig is gemeten en hier beter aan kan worden gecorreleerd dan aan de gewasopbrengst die slechts een keer is gemeten. Voor deze analyse is exploratieve data-analyse en lineaire regressie gebruikt. Allereerst een opsomming en grafische weergave van de indicatoren die zijn gebruikt voor de correlatie berekeningen.

Hieronder enkele definities van statistische termen die in de begeleidende tekst worden gebruikt:

- **Exploratieve data-analyse:** type statistische analyse waarbij wordt geprobeerd vragen te beantwoorden die nog niet eerder uitgebreid onderzocht zijn; er wordt gekeken met welke statistische analyse de vraag het best wordt beantwoord.
- **Lineaire regressie:** lineaire regressie is een statistische techniek die wordt gebruikt om de relatie tussen een afhankelijke variabele en een (of meer) onafhankelijke variabelen (ook wel voorspellers of verklarende variabelen genoemd) te modelleren.
- **p-value of p-waarde:** de term p-waarde geeft aan hoe waarschijnlijk het is om een bepaald resultaat waar is, of wel of bepaalde correlaties wel of niet bestaan. Als $p < 0.05$ is er geen correlatie, als $p > 0.05$ is er wel een verband, wat sterker wordt naarmate p groter wordt.
- **Correlatie:** met de term correlatie (of ook de R^2 waarde) wordt bedoeld de mate van samenhang of verband tussen twee variabelen. Als twee variabelen gecorreleerd zijn, betekent dit dat veranderingen in de ene variabele samenhangen met veranderingen in de andere. De correlatie kan variëren tussen -1 en

+1, waarbij bij de waarde -1 totaal geen verband bestaat en bij de waarde +1 een totale afhankelijkheid tussen de variabelen bestaat.

De volgende correlaties worden aan de R^2 waarde toegekend:

- $R^2 = 0$: geen correlatie
- R^2 ligt tussen 0 en 0.05 : zeer zwakke correlatie
- R^2 ligt tussen 0.05 en 0.3 : zwakke correlatie
- R^2 ligt tussen 0.3 en 0.6 : matige correlatie
- R^2 ligt tussen 0.6 en 0.9 : sterke correlatie
- R^2 is groter dan 0.9 : zeer sterke correlatie

- **Enkelzijdig toetsen:** enkelzijdig toetsen in de statistiek verwijst naar een hypothesetoets waarbij slechts één richting van een effect of verschil wordt onderzocht. Het betekent dat je specifiek wilt weten of een parameter (zoals een gemiddelde of regressiecoëfficiënt) groter dan óf kleiner dan een bepaalde waarde is, maar niet beide tegelijkertijd.
- **Significant:** Met het begrip significant wordt bedoeld:
 - 'De kans dat het resultaat door toeval is ontstaan (de p-waarde) kleiner is dan de vooraf vastgestelde drempel (α)'.
- Voorbeeld: als een p-waarde 0,03 is en de drempelwaarde $\alpha = 0,05$, wordt het resultaat significant genoemd, omdat $0,03 < 0,05$.
- **Automatische modelselectie:** dit verwijst naar het gebruik van algoritmen of systematische methoden om automatisch het beste statistische model te kiezen uit een set van mogelijke modellen. Het doel is om het meest geschikte model te identificeren op basis van bepaalde criteria, zoals voorspellingsnauwkeurigheid, eenvoud of verklarende kracht.
- **Uitleg statistische figuren:**

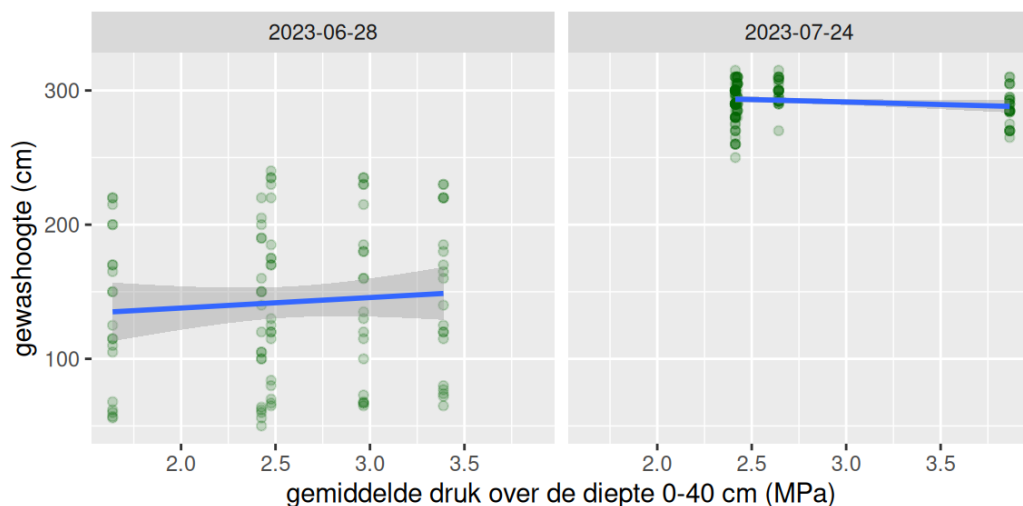
In de Figuren 31 en verder worden blauwe lijnen, grijs gearceerde gebieden en punten weergegeven. De betekenis hiervan is als volgt:

 - Grijze punten: afzonderlijke waarnemingen (meetpunten)
 - Blauwe lijn: lineaire regressielijn door de meetpunten
 - Gearceerd grijs gebied: onzekerheidsgebied voor de blauwe regressielijn t.o.v. de afzonderlijke waarnemingen; hierbinnen is de waarneming voor 95% zeker (en dus voor 5% onzeker).

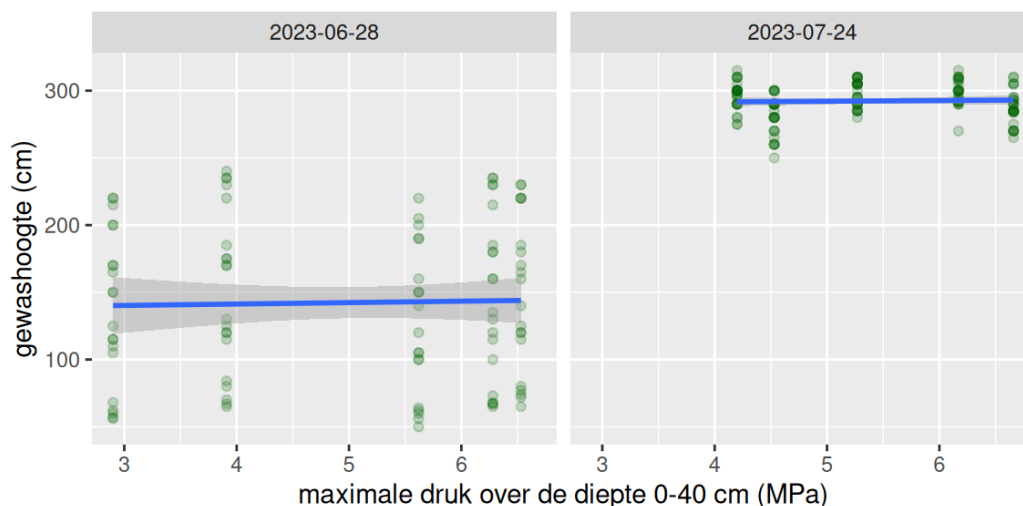
Gewashoogte versus indringingsweerstand

Allereerst wordt gekeken of er een verband bestaat tussen de gemeten gewashoogte en de gemiddelde indringingsweerstand tot 40 cm diepte, voor twee metingen. Er is hier voor een gemiddelde indringingsweerstand in de eerste 40 centimeter van het profiel, omdat hier de meeste wortels zitten, en deze wortels dus het meest te maken krijgen met de dichtheid en verdichting tot deze diepte beneden maaiveld. Te zien is dat dit verband alleen op 2023-07-24 *zwak* significant is voor de gemiddelde indringingsweerstand (Figuur 29): er wordt een R^2 van 0.0063 berekend. Voor de meting op 24 juli is geen correlatie te vinden tussen gewashoogte en indringingsweerstand. Dit betekent dat in dit perceel en in dit groeiseizoen er op één meetmoment een zwakke correlatie is gevonden tussen planthoogte en gemiddelde indringingsweerstand. Op het andere meetmoment is dit verband niet gevonden.

Vervolgens is gekeken of er een verband bestaat tussen de gemeten gewashoogte en de maximale indringingsweerstand tot 40 cm diepte; in Figuur 30 is te zien dat deze analyse op dezelfde twee data geen significant verband oplevert. Een sterk verband tussen bodemverdichting (gelieerd aan indringingsweerstand) wordt tijdens deze proef niet gevonden. Dit is te verklaren door de relatief natte zomer. De plant hoeft niet op zoek naar water in de diepere ondergrond en wordt in zijn groei dus ook niet gehinderd door al dan niet aanwezige verdichte laag.



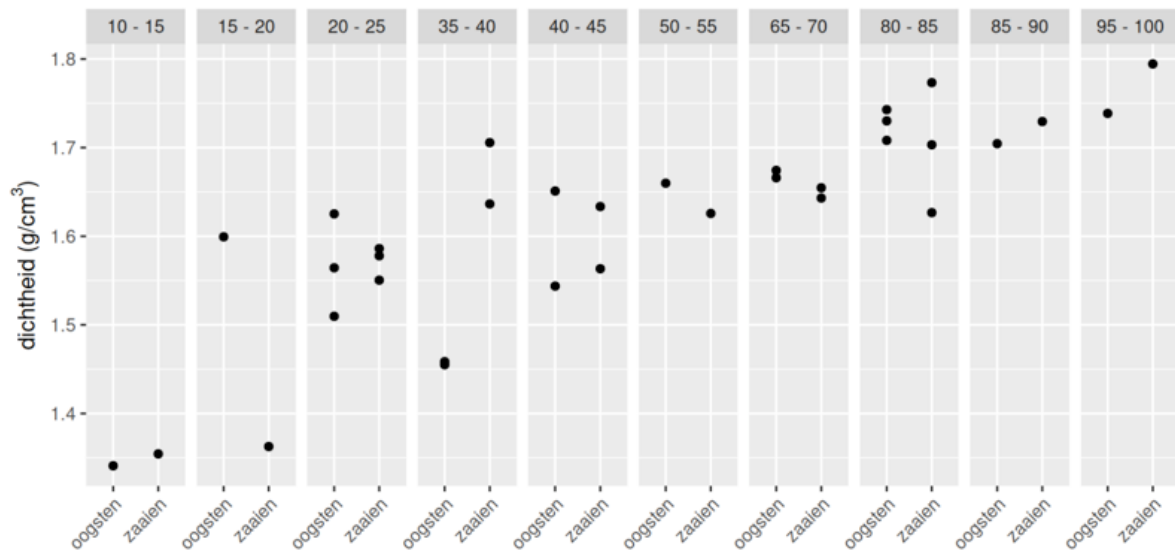
Figuur 25 Verband tussen gewashoogte (cm) en gemiddelde indringingsweerstand (MPa) tot 40 cm diepte op 28 juni en 24 juli 2023 en voor vijf plots (vijf planten per plot).



Figuur 26 Verband tussen gewashoogte (cm) en maximale indringingsweerstand (MPa) tot 40 cm diepte op 28 juni en 24 juli 2023 en voor vijf plots (vijf planten per plot).

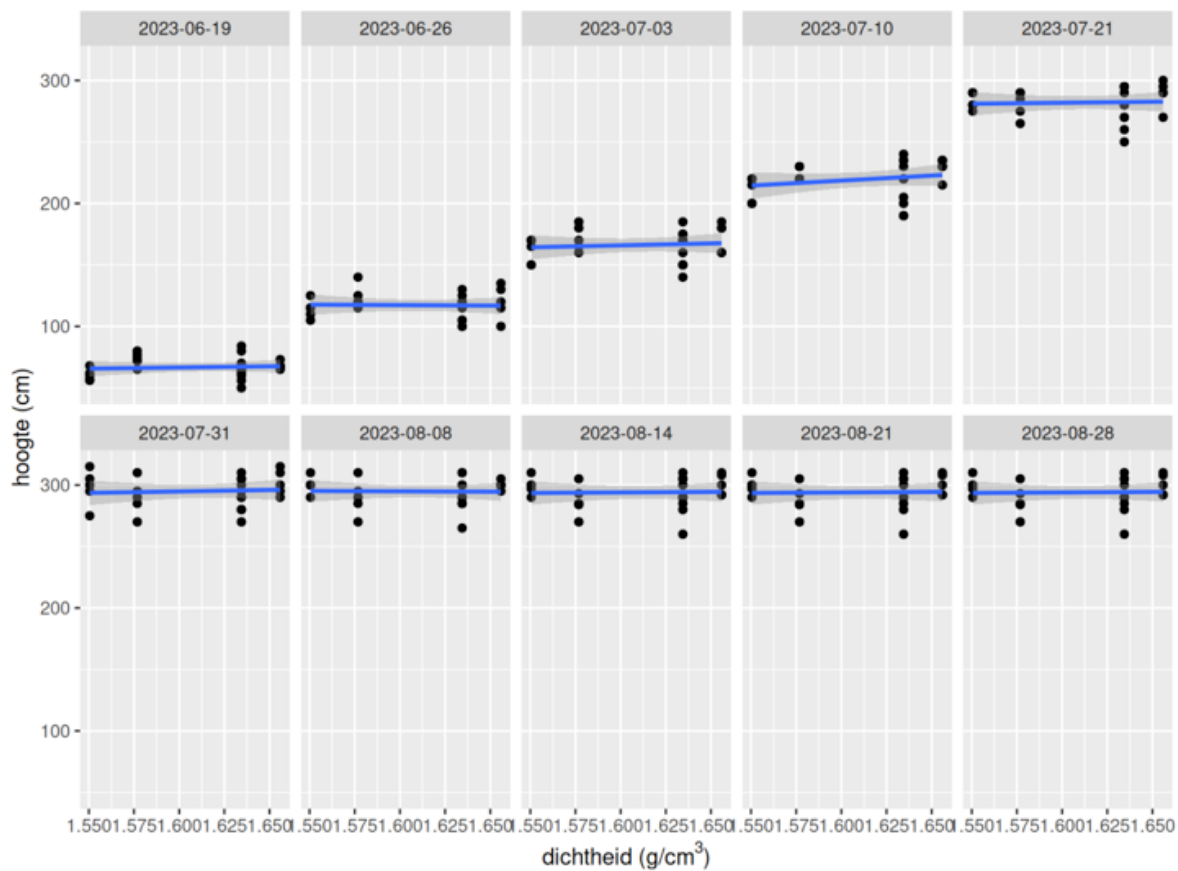
Gewashoogte versus bulkdichtheid

Er wordt eerst gekeken naar de bulkdichtheid aan het begin en einde van het seizoen en of er een significante verandering tussen deze twee momenten heeft plaatsgevonden; het zou aannemelijk zijn dat, in ieder geval voor de bovengrond tot ca. 20cm diepte, de bulkdichtheid na bewerking en zaaien kleiner is dan na oogsten aan het eind van het seizoen. In Figuur 27 zijn de dichtheden na zaaien en na oogsten voor verschillende bodemlagen uitgezet. Het betreft hier de droge bulkdichtheid gemeten met de 100cc ring methode. Op grond van de beschikbare data kan er geen statistisch significant verschil worden aangetoond tussen de dichtheid na oogsten en na zaaien. Pas op: dit is *niet* hetzelfde als stellen dat de dichtheden gelijk zijn! Deze claim kan/mag niet worden gedaan. In Figuur 27 is voor een aantal diepten de droge bulkdichtheid na oogsten wel groter dan na zaaien, maar het verband is niet statistisch significant voor alle diepten.



Figuur 27 De droge bulkdichtheid van de verschillende bodemlagen, na het oogsten en na het zaaien.

Omdat er geen verband kon worden aangetoond van droge bulkdichtheid tussen zaaien en oogsten is het statistisch het meest logisch uit te gaan van de *gemiddelde waarden* van de droge bulkdichtheden en deze waarden te correleren aan de gewashoogten per plot. Ook weten we dat planthoogtes en dichtheden niet op dezelfde plek zijn bepaald, maar wel in dezelfde plot. Daarom middelen we de resultaten ook per plot en datum. Eerst kijken we naar het effect van de gemiddelde dichtheid van elk profiel op de gewashoogte per plot (Figuur 28).



Figuur 28 De planthoogte van vijf geselecteerde planten per plot gedurende 10 meetmomenten in het groeiseizoen (de zwarte stippen), uitgezet tegen de gemiddelde bulkdichtheid van de subplots S1..S5. Er zijn slechts vier droge bulkdichtheden te onderscheiden omdat de gemiddelde waarden hiervan in twee subplots hetzelfde waren.

Uit de statistische analyse tussen maximale droge bulkdichtheid per plot en de gewashoogte ontwikkeling per plot wordt een 'Multiple R²' berekend van 0.0006434. Dit betekent dat er een 'zeer zwakke' correlatie wordt gevonden tussen deze twee parameters; praktisch gezien is er dus geen verband.

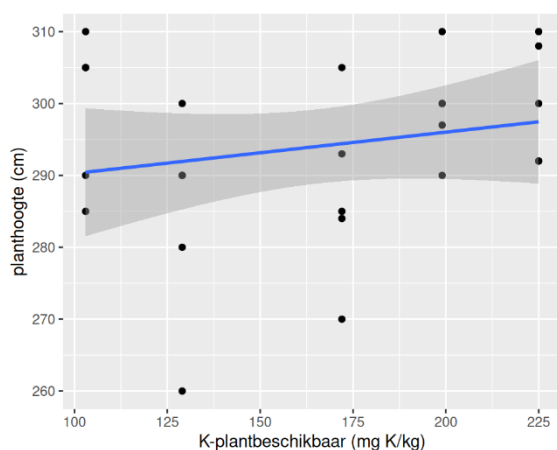
Gewashoogte versus nutriënten

Er wordt gekeken naar de gewashoogte aan het einde van het seizoen als functie van nutriënten toestand aan het begin van het seizoen; het is logisch om deze test uit te voeren omdat de nutriënten in de bodem aanwezig moeten zijn voor de ontwikkeling van het gewas naarmate het seizoen vordert. In Figuur 29 tot en met Figuur 39 wordt de afhankelijkheid tussen planthoogte versus respectievelijk kalium, magnesium, stikstofvoorraad, plantbeschikbare natrium, organische stof concentratie, fosforvoorraad in de bodem, plant beschikbare fosfor, plant beschikbare zwavel, de in de bodem aanwezige zwavelvoorraad en de zuurgraad van de bodem weergegeven. De correlatie van de afhankelijkheden, de R² waarde, wordt onder de figuren weergegeven.

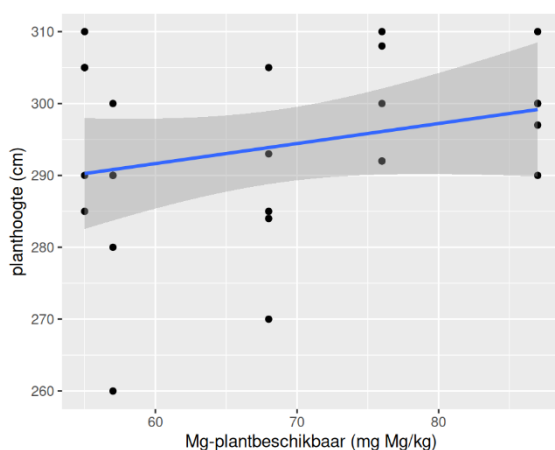
Samenvattend kunnen uit de nutriënten analyse kunnen volgende conclusies worden getrokken:

- Een zeer zwakke correlatie (R² tussen 0 en 0.05) wordt gevonden voor de toets op plantbeschikbaar magnesium. Magnesium is voor planten een essentiële voedingsstof. De hoeveelheid beschikbare magnesium is hier echter statistisch gezien geen verklarende parameter voor de gewasontwikkeling zoals die wordt waargenomen.
- Een zwakke correlatie wordt gevonden tussen planthoogte en plant beschikbaar zwavel (R² = 0.21) en slechts 4.3 cm extra maishoogte per mg/kg S. Zwavel is een essentiële voedingsstof.
- Bij de toets tussen plantbeschikbaar natrium en planthoogte is het verband alleen significant als enkelzijdig wordt getoetst op een positief verband. Dat er überhaupt een verband is, is opmerkelijk. Natrium is immers niet strikt nodig voor gewasgroei. De R² waarde is hiervoor 0.15.
- Automatische modelselectie is gebruikt om op basis van een of meerdere nutriënten de planthoogte te voorspellen; het criterium was hier de voorspellingsnauwkeurigheid. Ook hier rolt de relatie tussen planthoogte en plant beschikbare zwavel er als beste verklarende variabele uit.

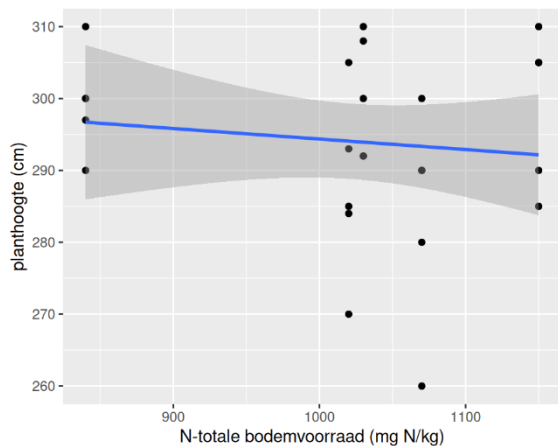
Concluderend kan worden gesteld dat de variatie in gewashoogte die in het veld is waargenomen een zwak statistisch verband houdt met de aanwezigheid met de hoeveelheid plant beschikbare zwavel in de bodem. Dit is echter het enige zwakke verband wat gevonden kan worden met de planthoogte in deze proef.



Figuur 29 De correlatie tussen planthoogte en de voor de plant beschikbare Kalium.
R²: 0.04385

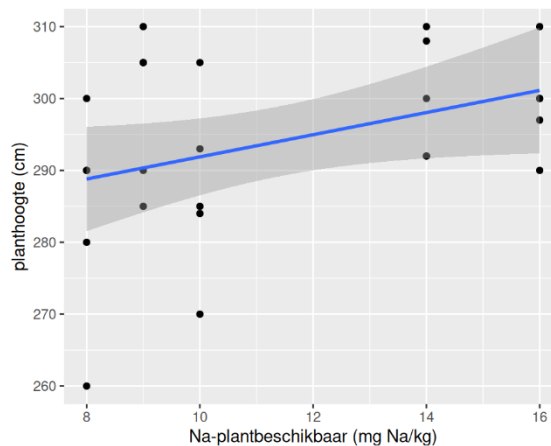


Figuur 30 De correlatie tussen planthoogte en de voor de plant beschikbare Magnesium.
R²: 0.07394



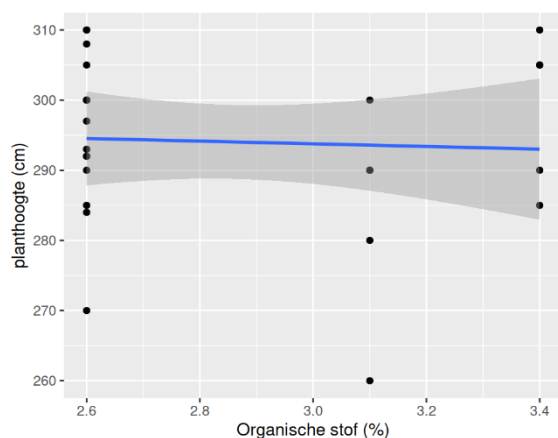
Figuur 31 De correlatie tussen planthoogte en de totale stikstofvoorraad in de bodem.

R^2 : 0.01481



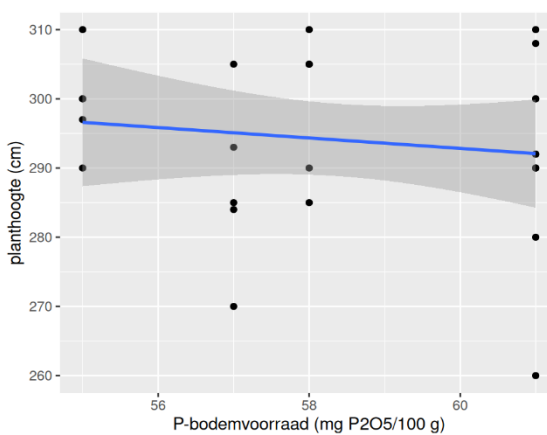
Figuur 32 De correlatie tussen planthoogte en de voor de plant beschikbare Natrium.

R^2 : 0.1497



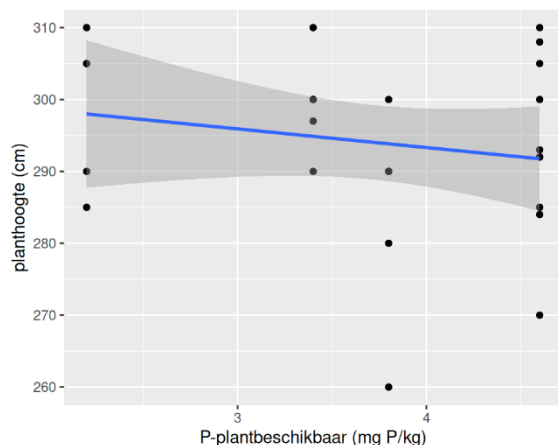
Figuur 33 De correlatie tussen planthoogte en de organische stof concentratie in de bodem.

R^2 : 0.002678



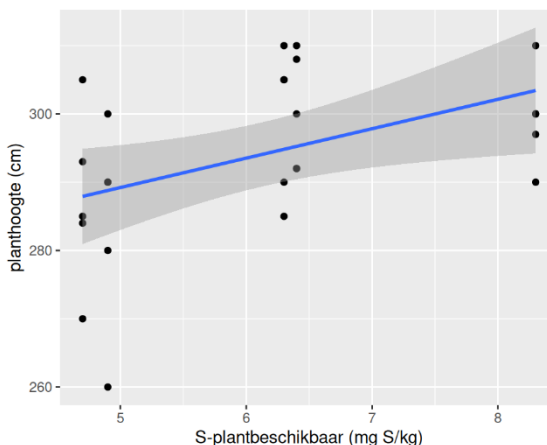
Figuur 34 De correlatie tussen planthoogte en de totale fosforvoorraad in de bodem.

R^2 : 0.0206



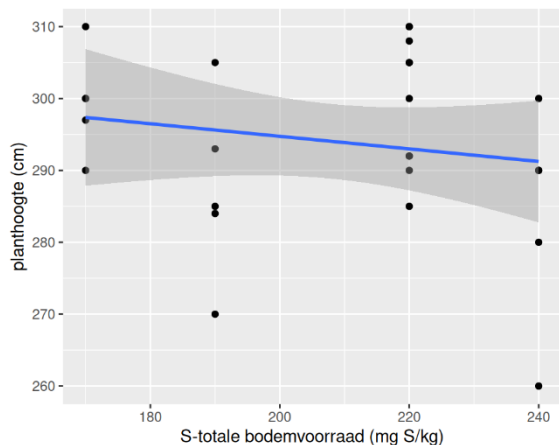
Figuur 35 De correlatie tussen planthoogte en de voor de plant beschikbare fosfor.

R^2 : 0.03574



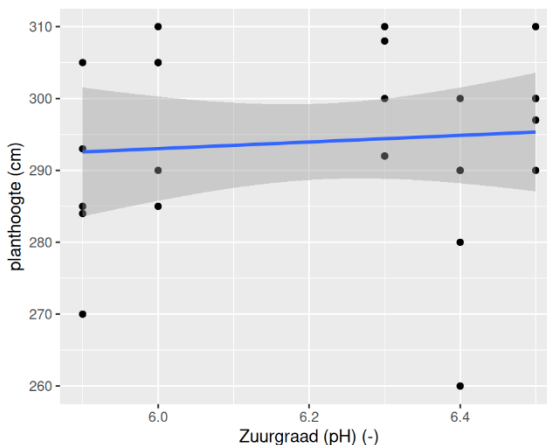
Figuur 36 De correlatie tussen planthoogte en de voor de plant beschikbare zwavel.

R^2 : 0.2073



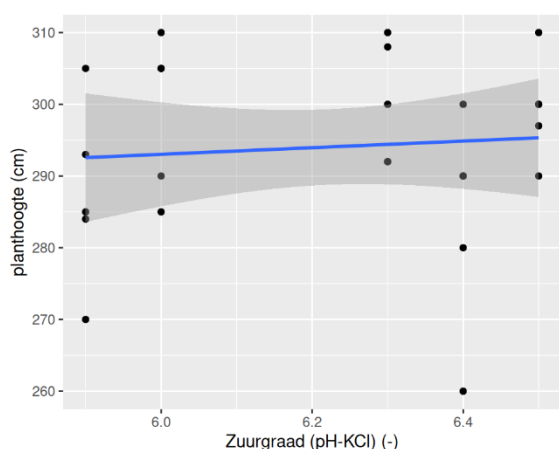
Figuur 37 De correlatie tussen planthoogte en de in de bodem aanwezige zwavelvoorraad.

R^2 : 0.03152



Figuur 38 De correlatie tussen planthoogte en de zuurgraad van de bodem.

R^2 : 0.007615



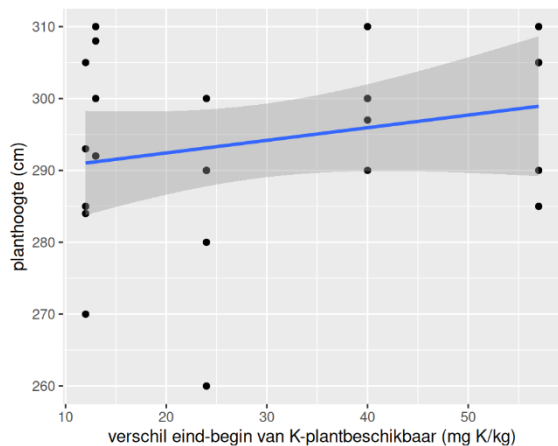
Figuur 39 De correlatie tussen planthoogte en de in zuurgraad van de bodem, bepaald met KCl.

R^2 : 0.007615

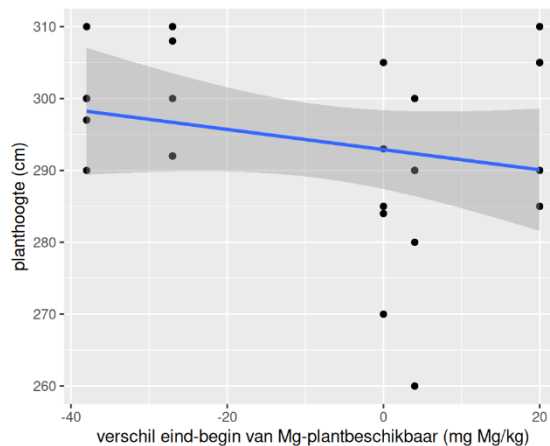
Verder is gekeken naar de gewashoogte aan het einde van het seizoen als functie van *het verschil* in nutriëntentoestand aan het begin en einde van het seizoen (Figures 40 tot en met 50). Dit is de verandering in nutriëntenvoorraad gedurende het groeiseizoen.

De belangrijkste bevindingen zijn:

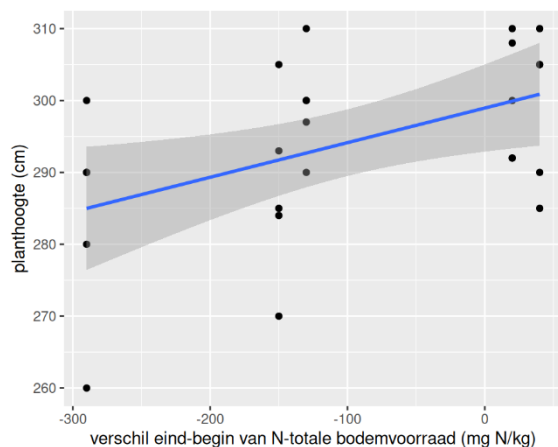
- Uit de statistische analyse tussen maximale droge bulkdichtheid per plot en de gewashoogte ontwikkeling per plot wordt een 'Multiple R^2 ' berekend van 0.0006434; een 'zeer zwakke' correlatie.
- Opvallend is dat de nutriëntenvoorraad niet altijd afneemt maar ook kan toenemen. Is dit het gevolg van bemesting tijdens het seizoen? Of het vrijkomen van nutriënten? Of komt dit door de kwaliteit van de spectrometrisch modellen (zie ook de tabellen in Viscarra Rossel *et al.*, 2006)?
- De totale stikstof voorraad in de bodem heeft een significant positief effect op de gewashoogte. Het verband is zwak significant ($R^2 = 0.23$). Je zou een omgekeerd effect verwachten: hoe meer wordt opgenomen, hoe hoger de gewashoogte (en dus een afname van N-totaal in de bodem). Mogelijk speelt hier het effect van bemesting een rol, of van de bepalingmethode (NIRS).
- Bij het plant beschikbare natrium wordt een zwak significant negatief effect op de gewashoogte gevonden ($R^2 = 0.17$). Dit effect wordt niet verwacht omdat Na niet tot de essentiële voedingsstoffen behoort. Waarschijnlijk speelt hier iets anders mee (bepalingmethode?);
- Bij de fosforvoorraad in de bodem wordt ook een significant positief verband gevonden ($R^2 = 0.25$). Ook hier is eigenlijk een negatief verband te verwachten: hoe meer fosfor wordt opgenomen, hoe hoger het gewas; een negatief verband dus;
- Bij plant beschikbaar zwavel wordt een significant negatief verband gevonden ($R^2 = 0.21$). Het gewas is lager naarmate de voorraad S-plantbeschikbaarheid toeneemt. Ook dit is niet verwacht.



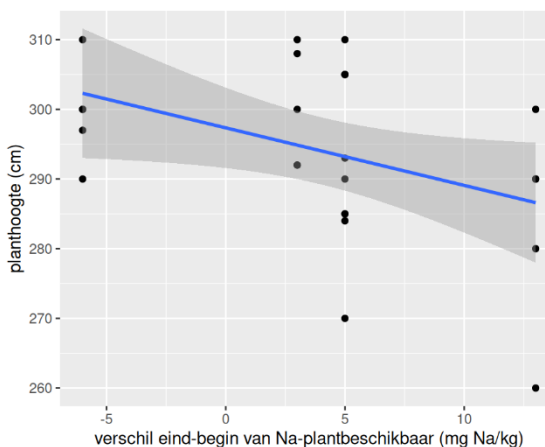
Figuur 40 Correlatie tussen de planthoogte en het verschil tussen de begin- en eindmeting van plantbeschikbare Kalium.
 $R\text{-squared: } 0.06084$



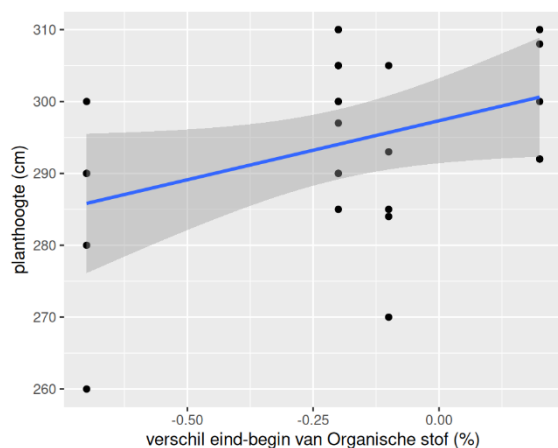
Figuur 41 Correlatie tussen de planthoogte en het verschil tussen de begin- en eindmeting van plantbeschikbare Magnesium.
 $R\text{-squared: } 0.05935$



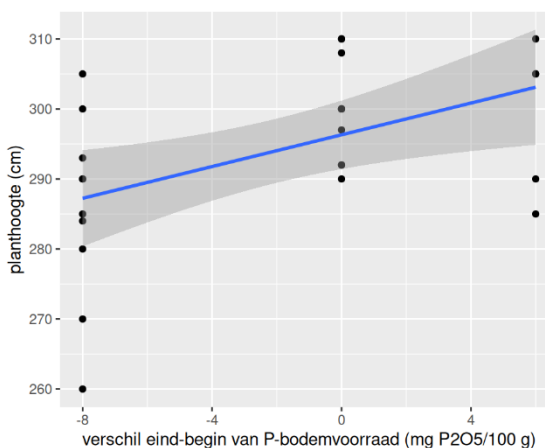
Figuur 42 Correlatie tussen de planthoogte en het verschil tussen de begin- en eindmeting van de in de bodem aanwezige voorraad stikstof.
 $R^2: 0.2274$



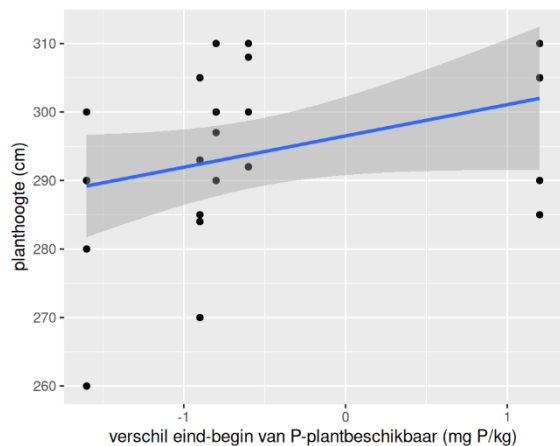
Figuur 43 Correlatie tussen de planthoogte en het verschil tussen de begin- en eindmeting van plantbeschikbare Natrium.
 $R^2: 0.1677$



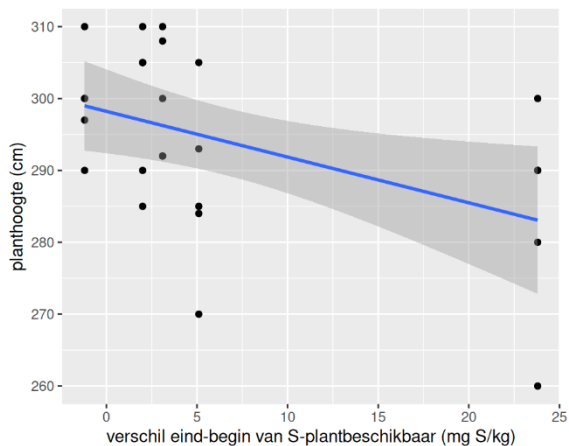
Figuur 44 Correlatie tussen de planthoogte en het verschil tussen de begin- en eindmeting van de in de bodem aanwezige organische stof concentratie.
 $R^2: 0.1514$



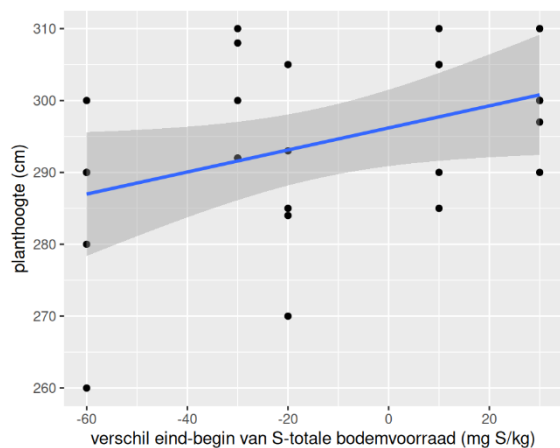
Figuur 45 Correlatie tussen de planthoogte en het verschil tussen de begin- en eindmeting van de in de bodem aanwezige voorraad fosfor.
 $R^2: 0.2471$



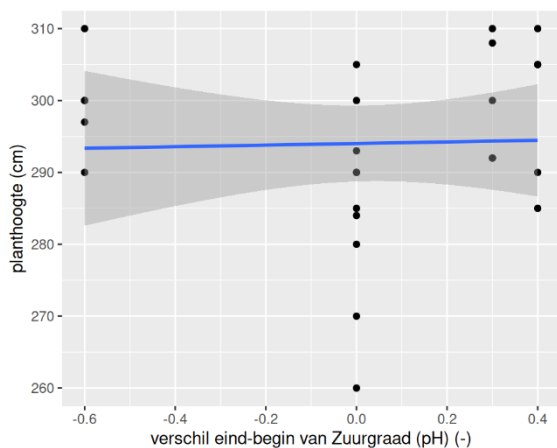
Figuur 46 Correlatie tussen de planthoogte en het verschil tussen de begin- en eindmeting van de plantbeschikbare fosfor.
 R^2 : 0.1214



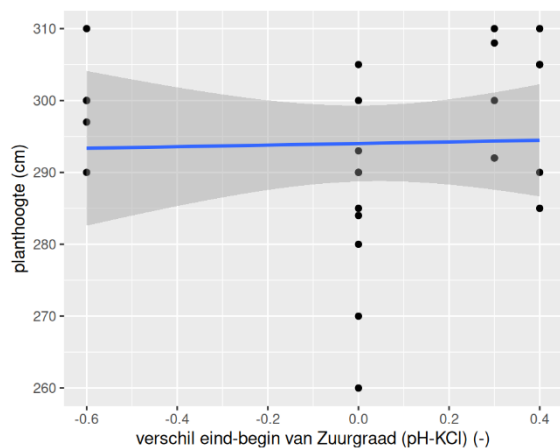
Figuur 47 Correlatie tussen de planthoogte en het verschil tussen de begin- en eindmeting van de plantbeschikbare zwavel.
 R^2 : 0.2121



Figuur 48 Correlatie tussen de planthoogte en het verschil tussen de begin- en eindmeting van de bodemvoorraad zwavel.
 R^2 : 0.1179



Figuur 49 Correlatie tussen de planthoogte en het verschil tussen de begin- en eindmeting van de zuurgraad van de bodem.
 R^2 : 0.001004



Figuur 50 Correlatie tussen de planthoogte en het verschil tussen de begin- en eindmeting van de zuurgraad van de bodem - KCl methode.
 R^2 : 0.001004

A6.4 Conclusies

Hieronder volgen puntsgewijs de belangrijkste uit deze veldproef die gekoppeld zijn aan de specifieke onderzoeksvragen.

Welke meettechnieken zijn in de praktijk nuttig, bruikbaar en eenvoudig toe te passen om bodemverdichting aan te tonen?

In het onderzoek werden de penetrologger, de RhoC-meter, 100 CC ringen, grondradar en apparatuur voor zuurstofmeting en zuurstofdiffusie getest. Al deze technieken meten verschillende bodemfysische eigenschappen. Omdat bodemverdichting van invloed is op diverse bodemfysische eigenschappen is het interessant om in een veldproef meerdere technieken te gebruiken. Ten aanzien van de specifieke metingen zijn de volgende conclusies te trekken:

- Met de penetrologger is een duidelijk beeld te krijgen van de indringingsweerstand in het profiel, en op welke diepte deze indringingsweerstand optreedt. Indringingsweerstand is een meting die voornamelijk iets zegt over de pakking van de afzonderlijke bodemdeeltjes (de dichtheid) en de schijnbare cohesie van de bodem. De pakking van de bodemdeeltjes wordt bepaald door de deeltjesgrootteverdeling (textuur) en de wijze waarop deze deeltjes per zijn verdeeld en de hoeveelheid deeltjes per volume-eenheid (de verdichting). Dit laatste maakt de methode met name geschikt om lokaal verschillen in weerstand en dus de aanwezigheid van lagen met een hoge weerstand op te sporen. De schijnbare cohesie wordt bepaald door de zuigspanning en daarmee dus ook vochtgehalte. Dit maakt de weerstand afhankelijk is van fluctueren door de tijd en in de ruimte van het vochtgehalte. Dit maakt eenduidige detectie van verdichte lagen zonder duidelijke vochtmeting lastiger.

Indringingsweerstand is een andere bodemparameter dan droge bulkdichtheid, het meet andere processen in de bodem en de resultaten kunnen dus niet 1 op 1 vergeleken worden.

- De 100cc ring -methode is een geschikte methode om droge bulkdichtheidsmetingen te doen. De methode is omslachtig en tijdrovend maar kan betrouwbare resultaten opleveren indien de bemonstering nauwgezet en consequent wordt uitgevoerd.
- De RhoC sensor is een apparaat waarmee snel een dichtheidsprofiel kan worden opgesteld in het veld; zeker vergeleken met 100cc ringen werkt het apparaat een stuk sneller dan afzonderlijke 100cc ring bemonstering en kan in korte tijd veel informatie worden verzameld. Om een betrouwbare meting te krijgen van de droge bulkdichtheid is de meting van de RhoC sensor afhankelijk van onder andere vochtgehalte. In deze veldtest is de door RhoC gemeten natte bulkdichtheid gecorrigeerd voor het vochtgehalte zoals gemeten met aparte geplaatste vochtsensoren om een droge bulkdichtheid te krijgen. Dit is een omslachtige methode en heeft een grote kans op fouten. Er zijn inmiddels RhoC-meter op de markt waarin standaard een vochtsensor is zit.
- De droge bulkdichtheid gemeten met de 100cc-ringen wijkt sterk af van de droge bulkdichtheid zoals gemeten met de RhoC. Een eenduidige verklaring hiervoor is niet gevonden, wel zijn het meetbereik en de vochtcorrectie voor beide methodes verschillend. Ook zijn de meetvolumes van de 100cc en de RhoC methoden afwijkend: de 100cc ring heeft per definitie een meetvolume van 0.1 liter, terwijl de RhoC sensor een meetvolume heeft van ongeveer 1.25 liter, meer dan 10 keer zo groot. Met de 100cc ring is men dus in staat relatief lokaal de dichtheid te meten, terwijl de RhoC sensor de dichtheid veel meer uitmiddelt. Dit betekent dat als de dichtheid op korte afstand sterk varieert, zoals in dit perceel het geval is, er relatief grote verschillen in dichtheid zullen worden gemeten met beide methoden. Verder is niet exact op dezelfde locatie gemeten. Een statistische vergelijking tussen de twee methoden in dit perceel met een dermate grote ruimtelijke variatie is om deze reden niet zinvol en niet betrouwbaar, en is daarom ook niet uitgevoerd.

Tenslotte is de RhoC een apparaat dat nog in ontwikkeling is en nog niet voor alle type gronden voldoende is gekalibreerd.

- Zuurstofgehalte en zuurstofdiffusiemetingen voor het detecteren van de gevolgen van bodemverdichting zijn voor praktisch gebruik te complex en te tijdrovend. De veldomstandigheden moeten aan bepaalde eisen qua vochtomstandigheden voldoen om met de meetapparatuur te kunnen werken, daarom zijn de methoden erg beperkend en daardoor niet geschikt als veldmethode om bodemverdichting te kunnen detecteren. De metingen zijn ook lastig te interpreteren.
- Grondradar is een apparaat om scherpe overgangen van textuur, vochtgehalte en bodemmateriaal aan te tonen. Omdat niet altijd duidelijk wat een bepaalde overgang veroorzaakt zijn altijd aanvullende boringen

nodig om de metingen te kunnen calibreren. In dit onderzoek zijn met name de overgangen van de toplaag naar onderliggende zand goed te detecteren. Een eventuele verdichte bouwvoor is niet aangetoond.

Welke indicatoren kunnen onder veldomstandigheden (eenduidig) uitsluitel geven over bodemverdichting in het proefveld en kunnen deze worden gecorreleerd aan gewasontwikkeling en opbrengst?

- Tijdens de statistische analyses van de metingen is de indringingsweerstand gecorreleerd aan planthoogte. Er is slechts een zwakke correlatie vastgesteld. Een van de redenen voor de zwakke correlaties is dat er gedurende het seizoen altijd voldoende vocht in de bovenste 30 cm aanwezig was. Hierdoor is het gewas nooit gedwongen door te groeien naar diepere al dan niet verdichte lagen.
- Er is een zwakke correlatie vastgesteld tussen gewashoogte en nutriëntenvoorraad van plantbeschikbaar magnesium, plantbeschikbaar zwavel, en plantbeschikbaar natrium (enkelzijdig).
- Er is geen correlatie vastgesteld tussen de gemiddelde droge bulkdichtheid per plot en de planthoogten per plot.
- Het BoVer veld was zeer heterogeen en heeft in zijn algemeenheid een vrij hoge bulkdichtheid op 30 cm - mv ($> 1600 \text{ kg/m}^3$). Deze bulkdichtheid heeft niet geleid toe gewasgroei-beperkingen, deels door de klimatologische omstandigheden; deels ook omdat het perceel in het verleden is gediëpplagd waardoor er nieuwe verticale structuren zijn ontstaan. In zijn algemeenheid is in het veld geen patroon met meer of minder verdichte gebieden te ontdekken (zie ook Appendix 7). Dit maakt ook dat de gewasontwikkeling per plot niet veel verschilde. Voor toekomstige proeven is het aan te bevelen zelf een gedeelte van een proefveld extra te verdichten en, indien mogelijk, om het vochtregime te sturen. Hierdoor is de opbrengst minder afhankelijk van meerdere variabelen en wordt de analyse eenvoudiger. Verder zijn meerjarige metingen nodig om klimatologische omstandigheden te vereffenen.

A6.5 Referenties

- Bakema, G., G. Bakker, J. Crujisen, F. van Egmond, E. van den Elsen, M. Heinen, H. Schneider. 2022. De invloed van bodemverdichting op de water- en luchthuishouding in de bodem en op de plantontwikkeling. Literatuuronderzoek. Rapport 3225, Wageningen Environmental Research. <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/583342>
- de Moraes, M.T., H. Debiasi, J.C. Franchini, J. de Andrade Bonetti, R. Levien, A. Schnepf, D. Leitner. 2019. Mechanical and Hydric Stress Effects on Maize Root System Development at Different Soil Compaction Levels. *Front. Plant Sci.* 10, 1358. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01358>
- de Willigen, P. and M. van Noordwijk. 1987. Roots, plant production and nutrient use efficiency. Ph.D. Thesis. Wageningen Agricultural Univ., Wageningen, the Netherlands. Available at: <https://edepot.wur.nl/202228>
- Duruoha, C., C.R. Piffer, P.A. Silva. 2007. Corn root length density and root diameter as affected by soil compaction and soil water content. *Irriga, Botucatu* 12(1), 14-26. <https://irriga.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/3283>
- Kirkegaard, J.A., So, H.B., Troedson, R.J. 1992. The effect of soil strength on the growth of pigeonpea radicles and seedlings. *Plant and Soil* 140, 65-74. <https://doi.org/10.1007/BF00012808>
- Konôpka, B., L. Pagès, C. Doussan. 2009. Soil compaction modifies morphological characteristics of seminal maize roots. *Plant Soil Environ.* 55(1): 1-10. <https://doi.org/10.17221/380-PSE>
- Meulenbergh, I. 2023. Maize root architecture response to different levels of soil compaction. BSc Thesis report. Wageningen University, Chair group Crop System Analysis (CSA).
- Ordóñez, R.A., S.V. Archontoulis, R. Martinez-Feria, J.L. Hatfield, E.E. Wright, M.J. Castellano. 2020. Root to shoot and carbon to nitrogen ratios of maize and soybean crops in the US Midwest. *European Journal of Agronomy*, 120, 126130. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126130>
- Popova, L., D. van Dusschoten, K.A. Nagel, F. Fiorani, B. Mazzolai. 2016. Plant root tortuosity: an indicator of root path formation in soil with different composition and density. *Annals of Botany* 118, 685-698. <https://doi.org/10.1093/aob/mcw057>
- R Core Team. 2023. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.
- Shan, K. 2023. Effects of Subsoil Compaction on Above-ground Architecture of Maize. MSc Thesis report. Wageningen University, Chair group Crop System Analysis (CSA).

-
- Van den Akker, J.J.H., J.G.C. Deru, J.W.M. Sleiderink, M. van Agtmaal, I.G.A.M. Noij, M. Heinen. 2021. Effecten van sorghum en mais op bodem en gewas op een verdichte zandgrond. WENR rapport 3081, Wageningen Environmental Research. <https://edepot.wur.nl/545414>
- Zhang, X., L. Shao, H. Sun, S. Chen, Y. Wang. 2012. Incorporation of Soil Bulk Density in Simulating Root Distribution of Winter Wheat and Maize in Two Contrasting Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 76: 638–647. <https://doi.org/10.2136/sssaj2011.0187>
- Viscarra Rossel, R. A., Walvoort, D. J. J., McBratney, A. B., Janik, L. J. & Skjemstad, J. O., 2006, Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties In: *Geoderma*. 131, 1/2, p. 59-75.
- Whalley, W.R., Clark, L.J. (2011). Drought Stress, Effect on Soil Mechanical Impedance and Root (Crop) Growth. In: Gliński, J., Horabik, J., Lipiec, J. (eds) *Encyclopedia of Agrophysics*. *Encyclopedia of Earth Sciences Series*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-90-481-3585-1_43.

Appendix 7 Remote en proximal sensing bij onderzoek naar de invloed van bodemverdichting op de water- en luchthuishouding in de bodem en op de plantontwikkeling

Auteurs: Pim Dik en Fenny van Egmond, Diana Vigah Adetsu
Reviewer: Guido Bakema

Inhoudsopgave

A7.1	Inleiding	157
	A7.1.1 Probleemstelling	157
	A7.1.2 Doelstelling	157
A7.2	Methode	157
	A.7.2.1 Studiegebied	157
	A7.2.2 Overzicht gegevens	158
	A7.2.3 Analyse van gammastralingsgegevens	159
	A7.2.4 Analyse van spectrale vegetatie-indices	162
A7.3	Resultaten en Discussie	163
	A.7.3.1 Gammastraling	163
	A7.3.2 Spectrale indices	164
	A7.3.3 Correlatie matrix	166
A7.4	Conclusies	168
A7.5	Referenties	169
	Appendices	170

A7.1 Inleiding

In Bakema et al. (2022) zijn de diverse methoden om bodemverdichting in het veld aan te tonen beschreven. Naast de puntdata zoals metingen van bulkdichtheid en indringingsweerstand (zie Appendix 6) is het ook mogelijk vlakdekkende data te verzamelen met drones, satellietdata, gammastaling en grondradar. Omdat de grondradar alleen op de subplots is ingezet zijn de resultaten besproken in Appendix 6.

A7.1.1 Probleemstelling

Een achterblijvende groei van planten en een verminderde opbrengst kunnen indicatief zijn voor verdichte gebieden in het veld. Er is nog veel onduidelijk over welke indicatoren het meest relevant zijn voor het identificeren van verdichte bodems en de impact van verdichte bodems op plantengroei en productiviteit. Op basis van deze vooronderstelling is het BoVer project opgezet met als doel het begrip van bodemverdichting op veldschaal te verdiepen en de meest indicatieve parameters voor bodemverdichting en hun invloed op gewasgroei en opbrengst te identificeren. Verschillende laboratorium- en veldmetingen (waaronder stationaire, remote en on-the-go proximal sensing datasets) die betrekking hebben op de fysisch-chemische en biologische eigenschappen van de bodem en op biofysische parameters van planten zijn verzameld.

A7.1.2 Doelstelling

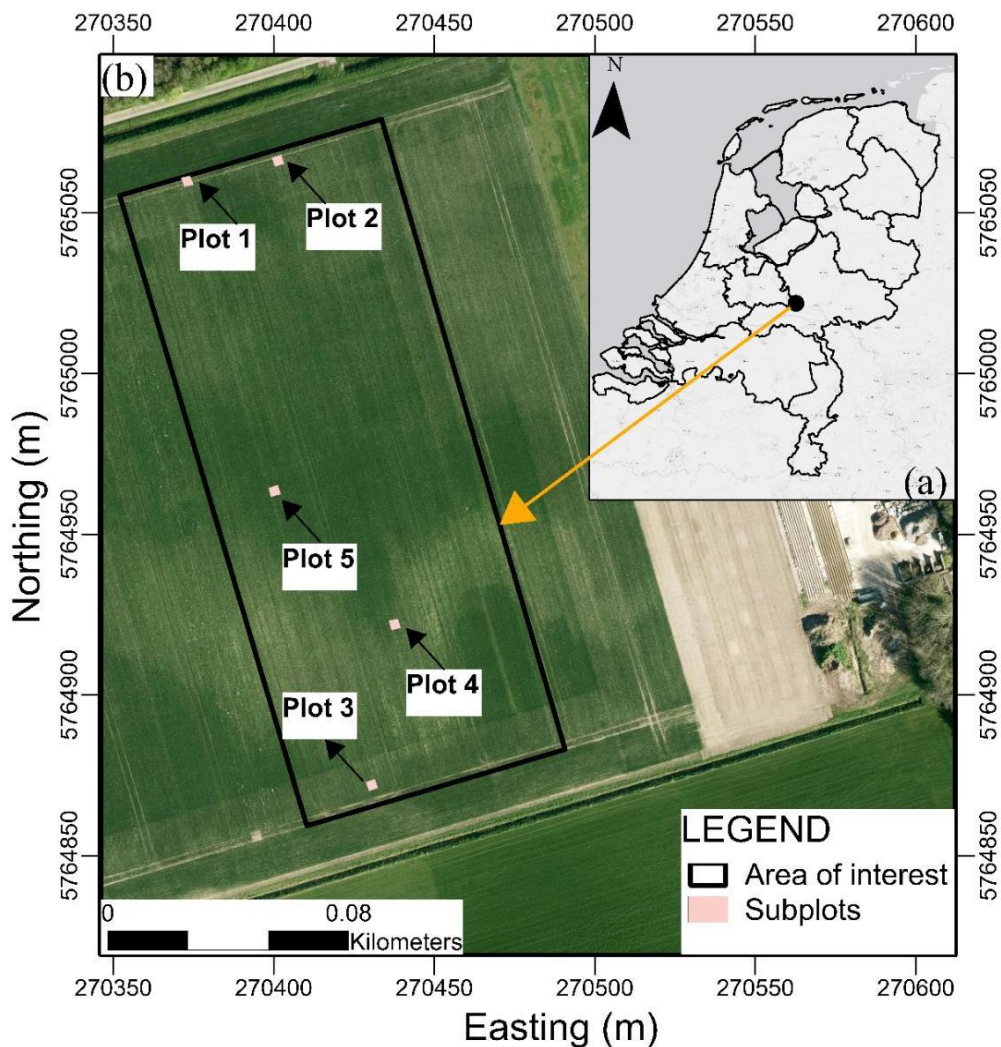
Dit rapport beschrijft de gebruikte methodologie voor de analyse van proximal en remote sensing datasets. Met name proximal gammastralingsgegevens en biofysische indicatoren voor planten afgeleid van multispectrale remote sensing beelden zijn gebruikt als input voor het onderzoek naar bodemverdichting en de respons van gewassen op verdichting voor een geselecteerd studiegebied in Nederland. De gegevensanalyse is uitgevoerd op twee schalen - respectievelijk veldschaal en plotschaal. De specifieke doelstellingen waren:

- Om de gemiddelde waarden van de gammavariabelen op de veldschaal te berekenen;
- Om de gemiddelde waarden van de gammavariabelen op de plotschaal te berekenen;
- Om de gemiddelde waarden van de vegetatie-indexen op veldschaal en voor elk seizoen te berekenen;
- Om de gemiddelde waarden van de vegetatie-indexen op plotschaal en voor elk seizoen te berekenen;
- Correlaties tussen gammastralingsdata en de vegetatie-indexen berekenen en interpreteren naar de mogelijke aanwezigheid van bodemverdichting.

A7.2 Methode

A.7.2.1 Studiegebied

Het studiegebied bevindt zich op de UNIFARM-proeflocatie van Wageningen Universiteit en Research, Nederland (Figuur 1). Hier werd bodemverdichting gemonitord voor een geselecteerd veld dat is gediepploegd. Het onderzoek richt zich op zowel veld- of plotvariatie in bodemverdichting. Onderscheiden zijn een hoofdonderzoeksgebied met afmetingen van ongeveer 200 m bij 80 m en vijf plots met afmetingen van 3 m bij 3 m elk, die zich binnen het hoofdonderzoeksgebied bevinden. De bodem in het studiegebied heeft over het algemeen een zandige textuur (zie ook Appendix 6, veldmetingen). Het vochtgehalte neemt toe van het noorden naar het zuiden van het veld. In het studiegebied werd tussen mei en september 2023 maïs geteeld.



Figuur 1 Locatie van het studiegebied in Nederland (a) en het studiegebied, die wordt weergegeven door de zwarte omtrek, evenals de locaties van de vijf deelploots die worden weergegeven door roze vierkanten (b).

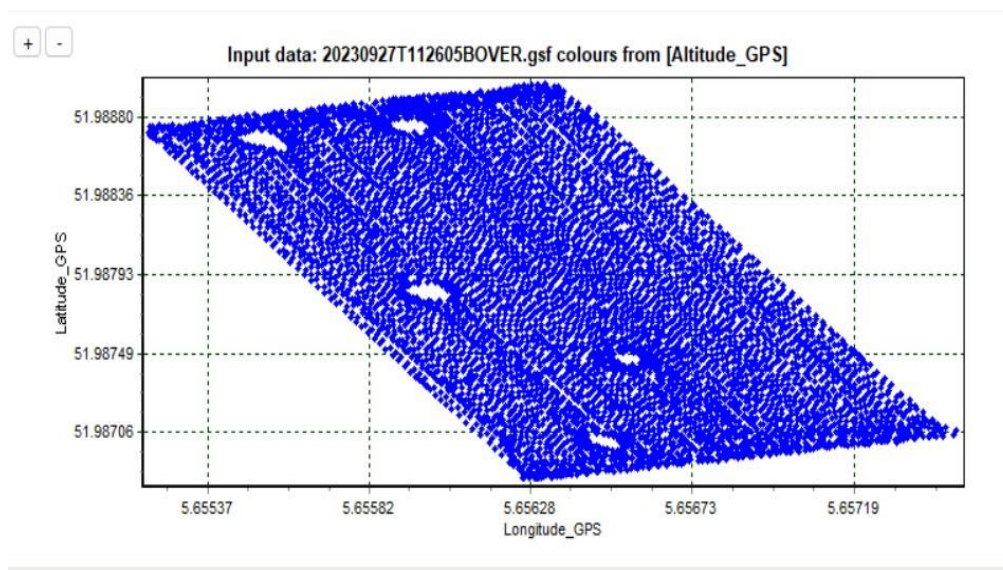
A7.2.2 Overzicht gegevens

Hoewel in het kader van het project verschillende vlakdekkende datasets zijn verzameld, worden slechts drie van deze datasets in dit rapport gepresenteerd. Dit zijn proximal sensing gammastralingsgegevens, remote sensing beelden die zijn verkregen met een UAV multispectrale camera en satellietbeelden op verschillende tijdstippen (2020-04-17, 2020-07-13, 2021-03-31 SuperView-1 en 2023-05-03 SuperView-Neo met resp. 0,5 en 0,3 m resolutie, geresampled naar 3 m) en het Nederlandse hoogtemodel AHN. De vlakdekkende gammastralingsgegevens zijn verkregen met de MS-2000 spectrometer gemonteerd op een quadbike door Medusa Explorations BV op 9 mei en 27 september 2023. De plots zijn niet bemonsterd ten tijde van de onderzoeken, vanwege de aanwezigheid van maïs op het veld. De gammastralingsdataset bestaat uit concentraties van de radionucliden Kalium (^{40}K), Thorium (^{232}Th), Uranium (^{238}U), Cesium (^{137}Cs), de totaal gemeten gammastraling en de countrate. De multispectrale beelden (MSI) zijn opgenomen op twee tijdstippen, respectievelijk het begin van het groeiseizoen (28 juni 2023) en laat in het groeiseizoen (9 augustus 2023). Van de MSI beelden zijn verschillende biofysische indicatoren voor planten oftewel vegetatie-indexen afgeleid. Dit wordt in meer detail beschreven in paragraaf 2.4. De satellietdata en hoogtedata zijn alleen gebruikt in de correlatiematrix.

A7.2.3 Analyse van gammastralingsgegevens

A7.2.3.1 Gegevensverwerking

De gebruikte MS-2000 gammaspectrometer is een passieve sensor, wat betekent dat de sensor geen radioactieve bron bevat maar alleen de van nature voorkomende achtergrondstraling van de bodem meet. Voor het bepalen van de concentraties van de radionucliden (^{40}K , ^{238}U , ^{232}Th en ^{137}Cs) is Full Spectrum Analysis (FSA) toegepast, gebruikmakend van Gamman®-software. In full spectrum analysis wordt gebruikt gemaakt van het standaardspectrum van elk van de nucliden (spectrum bij aanwezigheid van 1 Bq/kg van alleen deze nuclide) en wordt met behulp van een least-squares analyse de concentratie van de nuclides in het totaal gemeten spectrum bepaald (Hendriks et al., 2001). In dit geval is een repeated average fit gebruikt waarbij het gemiddelde wordt genomen van elke vijf spectrale records voor een hogere nauwkeurigheid. Figuur 2 toont de meetdichtheid van de gammastralingsmeting. Figuur 3 geeft de geanalyseerde meetpunten waarbij het gemiddelde van de vijf punten wordt getoond in meetwaarde en locatieweergave.

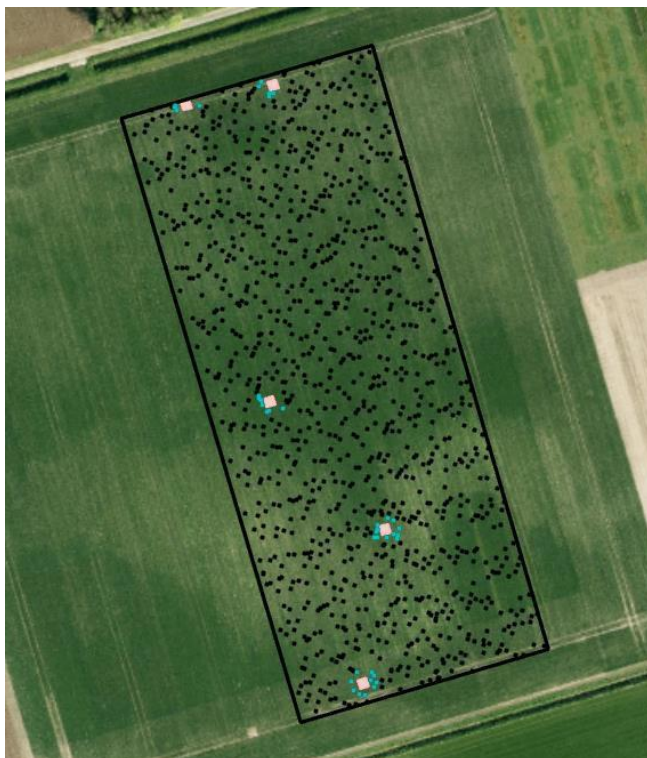


Figuur 2 Bemonsteringsdichtheid van de gegevens van het gammaonderzoek in het onderzoeksgebied. De niet-bemonsterde locaties binnen het onderzochte gebied geven de plots aan die niet konden worden onderzocht vanwege de aanwezigheid van niet-geoogste gewassen ten tijde van het onderzoek.



Figuur 3 De weergegeven gammastralingsdatapunten zijn de output van het herhaalde gemiddelde dataverwerkingsschema.

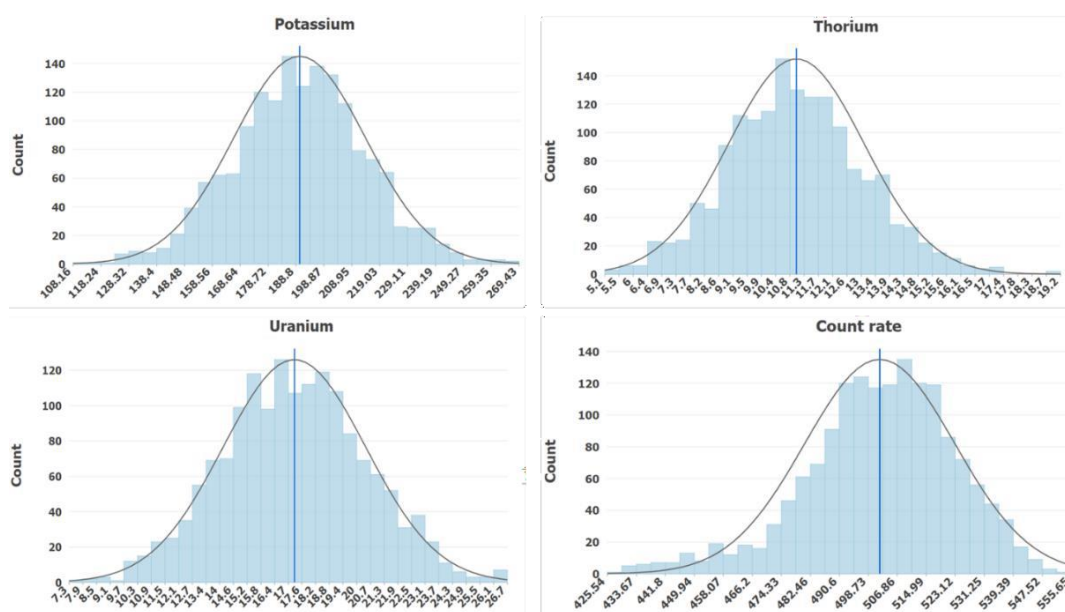
Om representatieve gemiddelde waarden te verkrijgen van elke variabele voor gammastraling op veldschaal, zijn de verwerkte gegevens binnen het belangrijkste onderzoeksgebied (Figuur 4) geselecteerd en verder geanalyseerd in ArcGIS Pro software versie 3.0 (ESRI, Redlands, Californië, VS). Beschrijvende statistieken voor elke gegevensvariabele zijn berekend, inclusief het veldgemiddelde. Voor de subplots zijn gammaspectrumgegevens binnen een afstand van 3 m van die plots geselecteerd. Net als bij de gegevensanalyse op veldschaal zijn beschrijvende statistieken berekend voor elk plot en is het gemiddelde per plot bepaald.



Figuur 4 De locatie van de verwerkte gammaspectrumgegevens binnen het hoofdonderzoeksgebied. De gemarkeerde gegevenspunten (cyaan) tonen de locaties van de geselecteerde gegevenspunten voor de plotanalyse.

A7.2.3.2 Geostatistische analyse

De geanalyseerde velddekkende gammastralingsgegevens (Figuur 3), zijn geïnterpoleerd door middel van ordinary kriging in ArcGIS Pro software versie 3.0 (ESRI, Redlands, Californië, VS). Alle gegevensvariabelen zijn bij benadering normaal verdeeld (Figuur 5) dus normalisatie vooraf was niet nodig. In de Geostatistical Analyst van de software zijn semivariogrammen per nuclide geschat en gemodelleerd met een sferische functie. Deze zijn gebruikt voor het generen van geïnterpoleerd rasterlagen of kaarten met een ruimtelijke resolutie van 3 meter. Deze zijn vervolgens bijgesneden naar de omvang van het hoofdonderzoeksgebied. Kaarten die de ruimtelijke variatie in gammavariabelen laten zien, worden gepresenteerd in hoofdstuk 3.



Figuur 5 Histogrammen met de verdeling van kalium-, thorium- en uraniumconcentraties en gammastralinggegevensvariabelen.

A7.2.4 Analyse van spectrale vegetatie-indices

A7.2.4.1 Gegevensverwerving en overzicht

Statistieken op basis van biofysische indicatoren voor planten of vegetatie indices afgeleid van satelliet of dronebeelden behoren tot de meest gebruikte en eenvoudigste methoden voor het schatten van biomassa en plantengroei. In dit onderzoek naar bodemverdichting kunnen vegetatie indices inzicht bieden in variatie in bodemverdichting als functie van gewasgroei en -ontwikkeling en opbrengstvermindering. In dit project zijn verschillende vegetatie indices afgeleid van multispectrale beelden tijdens twee verschillende groeistadia van de maïsgewassen – respectievelijk op 28 juni (vroeg in het groeiseizoen) en 8 september 2023 (laat in het groeiseizoen). Per beeld zijn zeventien vegetatie-indexen berekend. Details van de multispectrale camera en de verzamelde beelden staan in tabel 1, terwijl de afgeleide vegetatie indices in tabel 2 staan.

Tabel 1 Overzicht van de instellingen voor de multispectrale beeldacquisities en spectrale bandinformatie.

Instellingen voor multispectrale gegevensverwerving		Spectrale bandinformatie	
Drone	DJI P1	Naam	Golflengte (nm)
Multispectrale camera	Micasense	Blauw	475
Hoogte	30 m	Groen	560
Resolutie	17 mm, 5 mm	Rood	668
Afmeting afbeelding	280 m x 120 m	Red edge	717
		Nabij infrarood	842
		Thermisch	11000

Tabel 2 Lijst van afgeleide vegetatie-indices van multispectrale beelden die zijn verkregen voor het studiegebied.

Vegetatie-indices	Volledige naam
ARVI2	Atmosferisch resistente vegetatie-index 2
CCCI	Index voor chlorofylgehalte in het bladerdak
CG	Chlorofyl Groen
Cirededge	Chlorofyl Index rode rand
CTVI	Gecorrigeerde getransformeerde vegetatie-index
CVI	Chlorofyl Vegetatie-index
GNDVI	Groen Genormaliseerde Verschil Vegetatie Index
GSAVI	Groene bodem aangepaste vegetatie-index
MSAVI	Gewijzigde bodemgecorrigeerde vegetatie-index
NDRE	Genormaliseerd verschil rode randindex
NDVI	Genormaliseerde verschillen vegetatie-index
OSAVI	Geoptimaliseerde bodemgecorrigeerde vegetatie-index
RTVIcone	Driehoeksvegetatie-index voor rode randen (alleen kern)
SAVI	Bodemgecorrigeerde vegetatie-index
SR800550	Eenvoudige verhouding 800/500
TriVI	Driehoekige vegetatie
WDRVI	Breed dynamisch bereik vegetatie-index

A7.2.4.2 Gegevensverwerking

Om beschrijvende statistieken te berekenen voor elke vegetatie-index en per groeiseizoen, is zonale statistiek uitgevoerd in ArcGIS Pro. Voor de berekening werd de tool Zonal Statistics as a table gebruikt. Het algoritme berekent verschillende statistieken, waaronder het minimum, maximum, gemiddelde en standaardafwijking van alle pixels binnen gedefinieerde zones. Net als bij de verwerking van de variabelen voor gammastralingsgegevens, werden ook hier de beschrijvende statistieken berekend op veldschaal en plotschaal. Voor de analyse op veldschaal werden rasterlagen van de afgeleide vegetatie-indexen geleverd als invoerrasterlagen en werd de polygoon van het hoofdonderzoeksgebied geleverd als zonekenmerk

waarbinnen de statistieken van de rasterpixels werden berekend. Voor de plots werd een enkel shapefile met de geometrieën van de vijf plots gebruikt als zonekenmerk. Alle analyses zijn in een batch uitgevoerd. Het gemiddelde en de verdeling van de waarden voor elke index zijn in tabel weergegeven en gevisualiseerd met boxplots en vergeleken tussen de seizoenen.

A7.3 Resultaten en Discussie

A.7.3.1 Gammastraling

Tabel 3 toont de gemiddelde waarden voor alle gammastralingsvariabelen voor het veld en de plots. De plots laten vergelijkbare waarden zien ten opzichte van het veldgemiddelde. Hoewel geen van de plots een duidelijke trend van hoge of lage waarden voor de variabelen laat zien, heeft het meest centraal gelegen veld (plot 5) de hoogste gemiddelde waarden voor de countrate en de total counts.

Tabel 3 Radionuclideconcentraties en total counts voor de plots.

	Plot 1	Plot 2	Plot 3	Plot 4	Plot 5	Veld
Gammavariabelen	Gemiddelde waarden van de gamma-variabelen					
⁴⁰ K	180.5	183.7	202.1	206.2	203.4	190.3
²³² Th	8.2	9.4	10.7	10.7	11.9	11.0
²³⁸ U	22.7	16.8	18.6	17.2	18.1	17.2
¹³⁷ Cs	6.8	8.6	5.7	5.3	7.2	6.9
Countrate	499.5	492.8	510.4	479.7	520.2	500.5
Total counts	484.7	478.1	495.6	467.7	505.0	485.9

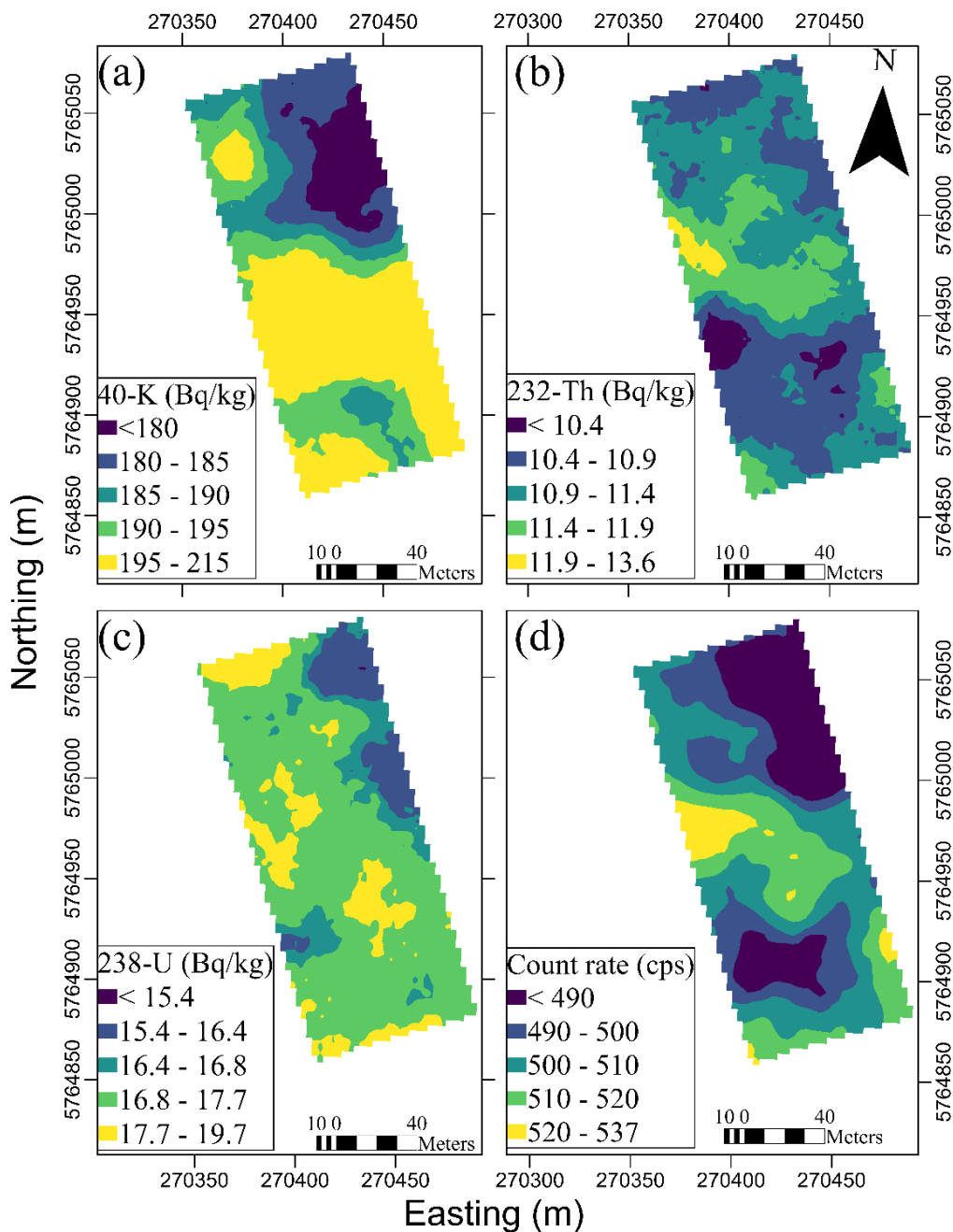
Tabel 4 toont de kwaliteit van de geschatte semivariogrammodellen die zijn gebruikt om de gammavariabelen voor het onderzoeksgebied te interpoleren. De nugget, de major range en de partial sill zijn weergegeven voor alle variabelen. De nugget is de variantie op afstand nul, die kan ontstaan door meetonzekerheid, niet-ruimtelijk afhankelijke variatie of variatie op zeer korte afstand. De range is de afstand waarop monsters als onafhankelijk worden beschouwd ofwel waar geen ruimtelijke correlatie tussen monsters meer bestaat. De sill geeft het verschil in variantie aan tussen de nugget en de maximale variantie binnen de range. De kwaliteit van het geschatte semivariogram is beoordeeld aan de hand van een Leave-One-Out cross-validation uitgevoerd in de Geostatistical Analyst van ArcGIS pro. De RMSE (root mean squared error) is gebruikt als nauwkeurigheidsmaat.

Tabel 4 Kwaliteit van de geschatte semivariogrammodellen.

Gamma-stralingsvariabelen	Nugget	Range	Sill	RMSE
⁴⁰ K (Bq/kg)	473	80	129	22.5
²³² Th (Bq/kg)	3.78	0.36	1.57	2.09
²³⁸ U (Bq/kg)	9.94	0.03	2.76	3.15
Countrate (cps)	279	61.4	198	17.4
Total counts	216	61.9	185	15.4

Figuur 6 toont de ruimtelijke variatie van de geselecteerde gammastralingsvariabelen voor het onderzoeksgebied. De kaarten laten variatie in gammastralingsconcentraties zien. Dit is het duidelijkst in de kalium- en countrate kaarten. De kaliumconcentratie is het laagst in het noordoosten en neemt toe naar het zuidelijke deel van het studiegebied. Ook de thorium- en uraniumkaarten laten ruimtelijke variatie zien. De countrate kaart toont twee grotere zones met lage concentraties in respectievelijk het noordoosten en zuidwesten. De zone tussen de bovengenoemde gebieden wordt gekenmerkt door hogere countrates. Deze resultaten kunnen geïnterpreteerd worden op basis van gepubliceerde relaties voor gammastraling en bodemtextuur in Nederland (van der Klooster e.a., 2011). Hierbij heeft kalium een negatieve relatie met

mediane korrelgrootte en thorium een positieve relatie met het kleigehalte. Deze relaties zijn niet gevalideerd op dit veld.



Figuur 6 Geïnterpoleerd kaarten met de ruimtelijke variatie in gammastraling per nuclideconcentraties van (a) kalium, (b) thorium, (c) uranium en (d) countrate voor het studiegebied.

A7.3.2 Spectrale indices

Tabel 5 toont de gemiddelde waarden van de afgeleide vegetatie-indexen voor de plots en het veld in kwestie in het begin van het groeiseizoen van het gewas. Voor elke index zijn vergelijkbare resultaten verkregen voor alle plots, en deze komen goed overeen met de gemiddelden op veldniveau. Desondanks toonde perceel 3, het meest zuidelijke subplot dat onderzocht werd en aan de rand van het veld ligt, lagere gemiddelden voor verschillende biofysische parameters in vergelijking met andere percelen. Dit suggereert waarschijnlijk een lagere groei-kracht van de planten op deze locatie in het begin van het groeiseizoen. De resultaten voor laat in het groeiseizoen (Tabel 6) laten ook vergelijkbare waarden zien voor de plots en het veld. Plot 3 laat niet langer een afwijkend beeld zien zoals in het begin van het groeiseizoen. Dit suggereert

dat hoewel de gewasontwikkeling traag was bij het begin van de groei, de lage groeikracht niet aanhield gedurende de hele ontwikkeling van de gewassen op dit perceel.

Tabel 5 Gemiddelde waarden van vegetatie indices van multispectrale beelden die zijn opgenomen op 28 juni 2023 voor de plots en het gehele veld.

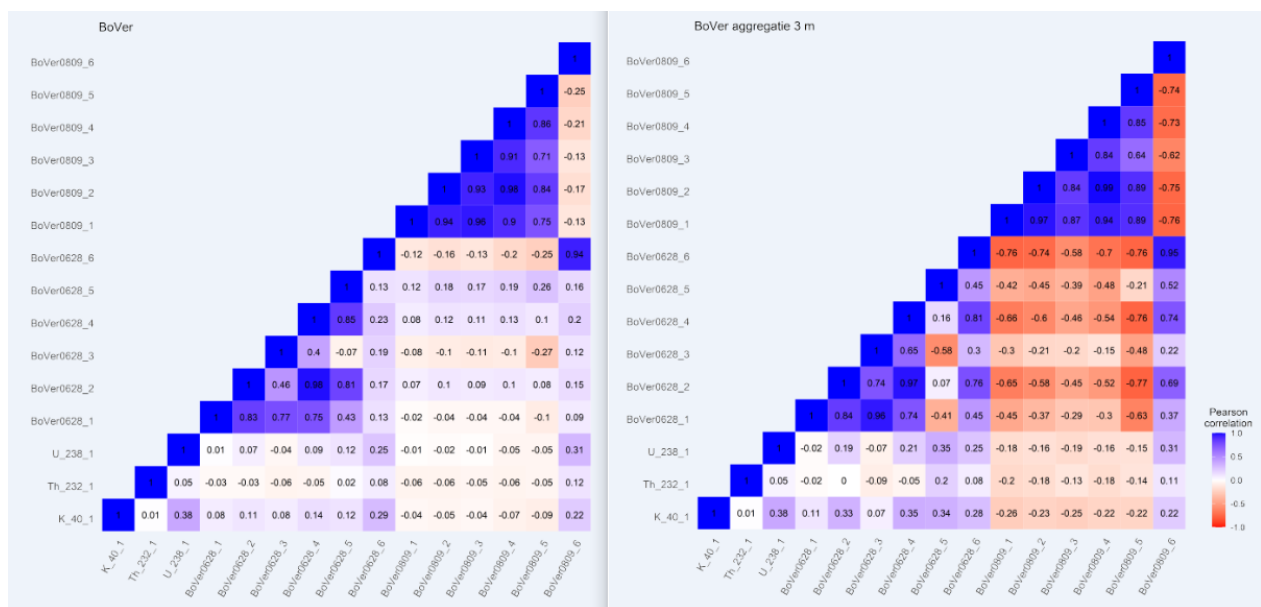
Vegetatie-indices 20230628	Plot 1	Plot 2	Plot 3	Plot 4	Plot 5	Veld
Gemiddelde waarden						
ARVI2	0.48	0.50	0.43	0.45	0.48	0.47
CCCI	-1.02	-1.02	-1.01	-1.03	-1.03	-0.53
CG	0.50	0.50	0.49	0.50	0.50	0.50
Clrededge	3.50	3.74	3.08	3.34	3.58	3.45
CTVI	1.03	1.04	1.01	1.02	1.03	1.02
CVI	1.17	1.13	1.40	1.31	1.18	1.24
GNDVI	0.33	0.34	0.34	0.34	0.33	0.34
GSAVI	0.50	0.51	0.51	0.51	0.50	0.51
MSAVI	0.71	0.73	0.67	0.69	0.71	0.70
NDRE	-0.54	-0.57	-0.50	-0.53	-0.55	-0.54
NDVI	0.56	0.58	0.52	0.54	0.56	0.56
OSAVI	0.84	0.88	0.79	0.81	0.84	0.83
RTVCore	-1.36E+6	-1.31E+6	-1.17E+6	-1.21E+6	-1.38E+6	-1.29E+6
SAVI	0.84	0.88	0.79	0.81	0.84	0.83
SR800550	2.01	2.03	2.05	2.03	2.01	2.03
TriVI	1.08E+6	1.04E+6	9.51E+5	9.73E+5	1.09E+6	1.02E+6
WDRVI	-0.43	-0.42	-0.47	-0.46	-0.43	-0.44

Tabel 6 Gemiddelde waarden van vegetatie indices van multispectrale beelden die zijn opgenomen op 8 september 2023 voor de plots en het gehele veld.

Vegetatie-indices 20230809	Plot 1	Plot 2	Plot 3	Plot 4	Plot 5	Veld
Gemiddelde waarden						
ARVI2	0.49	0.51	0.51	0.49	0.50	0.50
CCCI	-1.14	-1.13	-1.11	-1.12	-1.13	-1.13
CG	0.48	0.47	0.46	0.48	0.47	0.47
Clrededge	4.96	5.16	4.90	4.68	4.95	4.93
CTVI	1.04	1.04	1.04	1.03	1.04	1.04
CVI	1.26	7.57E+18	1.31	1.29	1.25	1.52E+18
GNDVI	0.36	0.36	0.37	0.36	0.36	0.36
GSAVI	0.54	0.54	0.56	0.54	0.54	0.54
MSAVI	0.73	0.74	0.74	0.72	0.73	0.73
NDRE	-0.65	-0.66	-0.65	-0.63	-0.65	-0.65
NDVI	0.58	0.59	0.59	0.57	0.58	0.58
OSAVI	0.86	0.88	0.88	0.86	0.88	0.87
RTVCore	-1.60E+6	-1.90E+6	-1.69E+6	-1.64E+6	-1.50E+6	-1.66E+6
SAVI	0.86	0.88	0.88	0.86	0.88	0.87
SR800550	2.15	1.75E+8	2.24	2.16	2.17	3.52E+7
TriVI	1.17E+6	1.39E+6	1.24E+6	1.21E+6	1.10E+6	1.22E+6
WDRVI	-0.45	-0.43	-0.43	-0.45	-0.44	-0.44

A7.3.3 Correlatiematrix

Voor het proefveld is een aanzienlijk aantal meetgegevens beschikbaar. Om te analyseren of deze onafhankelijk van elkaar zijn is een correlatiematrix opgesteld op basis van de waarden per gridcel. Hierin worden de verbanden tussen de basisgegevens in beeld gebracht met de Pearsons correlatie (Deze geeft weer hoe goed een lineaire relatie gelegd kan worden tussen de beide parameters. Als er bijvoorbeeld een kwadratisch verband is tussen de beide basisreeksen dan geeft de Pearsons correlatie dat niet aan). Hierbij is van belang de resolutie die gebruikt wordt bij het bepalen van de correlaties goed te kiezen. Als er op korte afstand veel variatie is, dan kan dat de onderliggende trend verhullen. Aggregeren kan dan helpen om verbanden tussen basisgegevens te tonen. Dit is weergegeven in Figuur 7 met links de niet-geaggregeerde satellietgegevens en rechts satellietgegevens geaggregeerd op een 3 meter resolutie. Duidelijk is dat de rechter figuur over het algemeen aanzienlijk hogere correlaties berekend. Dat geldt niet alleen voor satellietgegevens onderling maar ook voor de correlatie van satellietgegevens met gammastralingsmetingen. Dit kan betekenen dat de onderliggende trend van meetwaarden en de correlaties daartussen over het hele perceel zeker aanwezig is, maar op hoge resolutie korte afstand variatie of meetruis deze patronen verhuult. Hiertussen is op basis van de beschikbare gegevens geen onderscheid te maken.



Figuur 7 Correlatiematrix met links de niet-geaggregeerde gegevens en rechts geaggregeerd voor een grid met 3 m resolutie

Naast de resolutie van de brondata en of deze is aangepast aan het schaalniveau waarover correlatie informatie nodig of gewenst is, is ook de spreiding in meetwaarden van invloed op het vinden van correlaties. Wanneer geen spreiding in meetwaarden aanwezig is, bijvoorbeeld als het hele veld in 1 satellietbeeldpixel valt of geen variatie in de gemeten bodemeigenschap aanwezig is, zal geen correlatie met deze informatiebron worden gevonden.

Uit de correlatieanalyse blijkt dat de verschillende gammastralingsnuclideconcentraties niet tot weinig met elkaar gecorreleerd zijn. De spreiding op het veld is niet groot, maar normaliter voldoende voor het meten van een correlatie. Voor ^{40}K en ^{238}U geldt dat deze negatief gecorreleerd zijn met het multispectrale UAV beeld en het satellietbeeld in 2020 die zijn opgenomen later in het groeiseizoen. Terwijl een positieve correlatie zichtbaar is met de UAV en satellietbeelden die eerder in de groeiseizoenen zijn opgenomen. Wel geldt dat de mate van correlatie wisselt per nuclide en opgenomen UAV of satellietbeeld.

De banden van de multispectrale beelden opgenomen met UAV's zijn per opnametijdstip deels gecorreleerd, de uitzondering hierop is de thermische band van het tweede opnametijdstip. Mogelijk zorgt meer biomassa voor een lagere temperatuur? Ook is een negatieve correlatie te zien tussen beide UAV beelden. Dit kan

betekenen dat de groei- of biomassapatronen op het veld tussen het eerste en tweede opnametijdstip zijn omgedraaid.

Naast de UAV's is ook gekeken of er correlaties zijn met satellietbeelden en met het hoogtemodel (AHN) (Figuur 8). Voor de satellietbeelden geldt dat allen een positieve correlatie laten zien tussen de banden op dezelfde opnamedatum. In 2020 is zeer weinig tot weinig correlatie tussen de informatie op de twee opnametijdstippen in dat jaar (17 april en 13 juli 2020). Daarentegen laat het eerste beeld van 2020 een positieve correlatie zien met de (ook eerder opgenomen) beelden in 2021 en 2023 (opgenomen op resp. 31 maart 2021 en 3 mei 2023). Het eerste multispectrale UAV beeld (29 juni 2023) laat voor enkele banden een licht positieve correlatie zien met de vroeger in het seizoen opgenomen satellietbeelden. Echter zijn de banden die correleren wisselend, wat het moeilijk maakt de correlaties te begrijpen of te generaliseren. Het later opgenomen multispectrale UAV beeld (9 augustus 2023) laat negatieve correlaties zien met de satellietbeelden uit 2020, 2021 en 2023, maar niet met het tweede satellietbeeld van 2021.

Het hoogtemodel van het perceel (AHN) is positief gecorreleerd met het tweede UAV beeld (opgenomen in augustus) en negatief gecorreleerd met het UAV beeld in juni. Ook voor de satellietbeelden in 2020 geldt dit patroon. Hoogte is negatief gecorreleerd met het eerste satellietbeeld maar positief met het tweede. Dat betekent dat gewasgroei eerder is begonnen of vroeger in het seizoen harder gaat dan op de hogere delen. Dit kan komen door verschillen in temperatuur of vochtgehalte. In de andere jaren wordt weinig tot geen correlatie gevonden tussen satellietbeelden en hoogte. De hoogte van het perceel is negatief gecorreleerd met de ^{40}K en ^{238}U concentraties van de gammaspectrometer, maar niet met ^{232}Th . Omdat ^{40}K in Nederland normaliter negatief gecorreleerd is met de mediane korrelgrootte van zand, betekent dit waarschijnlijk dat op de hogere delen fijner zand voorkomt. Of de textuur of de hoogteligging bepalend is voor bodemtemperatuur of bodemvochtgehalte en daardoor voor een eerdere of latere gewasgroei en dus hoeveelheid biomassa is niet goed te zeggen.

zijnde factoren kunnen deze eventueel gebruikt worden om mogelijke verdichting op te sporen. Omdat geen informatie voorhanden was over de patronen van bodemverdichting op dit veld en op basis van de subplots geen aanwijzingen zijn gevonden voor een correlatie tussen gewasgroei en bodemverdichting in het onderzochte groeiseizoen, kon dit niet verder onderzocht worden.

A7.5 Referenties

- Bakema, G., G. Bakker, J. Cruijssen, F. van Egmond, E. van den Elsen, M. Heinen, H. Schneider. 2022. De invloed van bodemverdichting op de water- en luchthuishouding in de bodem en op de plantontwikkeling. Literatuuronderzoek. Rapport 3225, Wageningen Environmental Research. <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/583342>
- Cardoso, E. J. B. N., Vasconcellos, R. L. F., Bini, D., Miyauchi, M. Y. H., Santos, C. A. d., Alves, P. R. L., Paula, A. M. d., Nakatani, A. S., Pereira, J. d. M., & Nogueira, M. A. (2013). Bodemgezondheid: op zoek naar geschikte indicatoren. Wat moet in overweging worden genomen om de effecten van gebruik en beheer op de bodemgezondheid te beoordelen? *Scientia Agricola*, 70, 274-289.
- Hendriks, P., Limburg, J., & De Meijer, R. (2001). Full-spectrum analyse van natuurlijke γ-ray spectra. *Tijdschrift voor Milieuradioactiviteit*, 53(3), 365-380.
- Huber, S., Prokop, G., Arrouays, D., Banko, G., Bispo, A., Jones, R. J., Kibblewhite, M., Lexer, W., Möller, A., & Rickson, R. J. (2008). Environmental assessment of soil for monitoring: volume I, indicators & criteria. Bureau voor officiële publicaties der Europese Gemeenschappen, Luxemburg, 339.
- SSSA. (2008). Woordenlijst van bodemkundige termen 2008. ASA-CSSA-SSSA.
- Stolte, J., Tesfai, M., Øygarden, L., Kværnø, S., Keizer, J., Verheijen, F., Panagos, P., Ballabio, C., & Hessel, R. (2015). Bodembedreigingen in Europa. Publicatiebureau Luxemburg.
- Assouline, S. 2006. Modeling the Relationship between Soil Bulk Density and the Hydraulic Conductivity Function. *Vadose Zone Journal* 5(2), 697-705. <http://dx.doi.org/10.2136/vzj2005.0084>
- Van den Akker, J. J., & Hoogland, T. (2011). Comparison of risk assessment methods to determine the subsoil compaction risk of agricultural soils in The Netherlands. *Soil and Tillage Research*, 114(2), 146-154.
- Van der Klooster, E., F.M. van Egmond, M.P.W. Sonneveld (2011). Mapping soil clay contents in Dutch marine districts using gamma-ray spectrometry. *European Journal of Soil Science* 62 (5), 743-753. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2011.01381.x>
- Van Orsouw, T. L., Mulder, V. L., Schoorl, J. M., Van Os, G. J., Van Essen, E. A., Pepers, K. H., & Heuvelen, G. B. (2022). Practical Implications of the Availability of Multiple Measurements to Classify Agricultural Soil Compaction: Een Case-Study in Nederland. *Agronomie*, 12(7), 1669.

Appendices

1. Estimated semivariogram models for the gamma-ray data variables

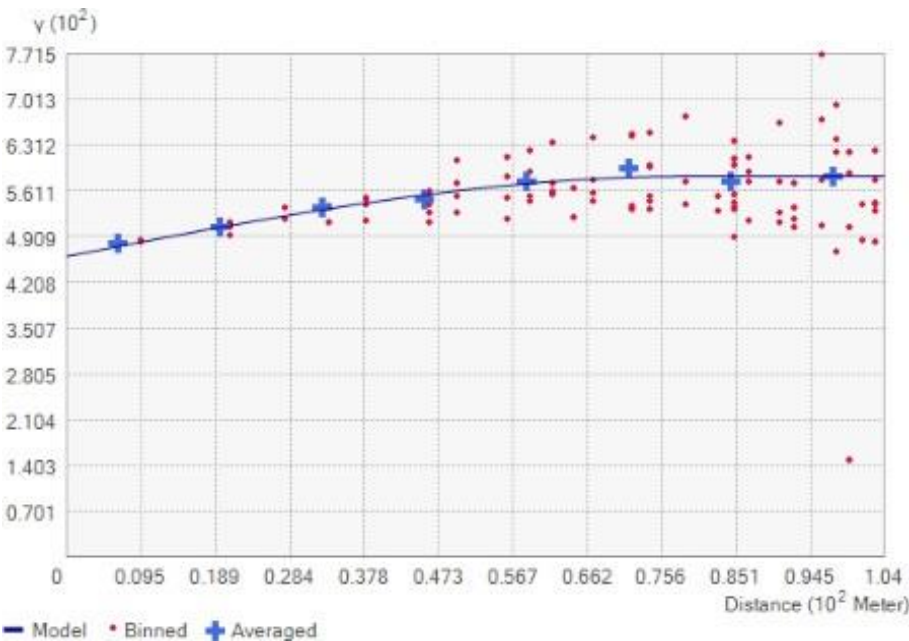


Figure S1 Fitted semivariogram model for predicting potassium concentrations.

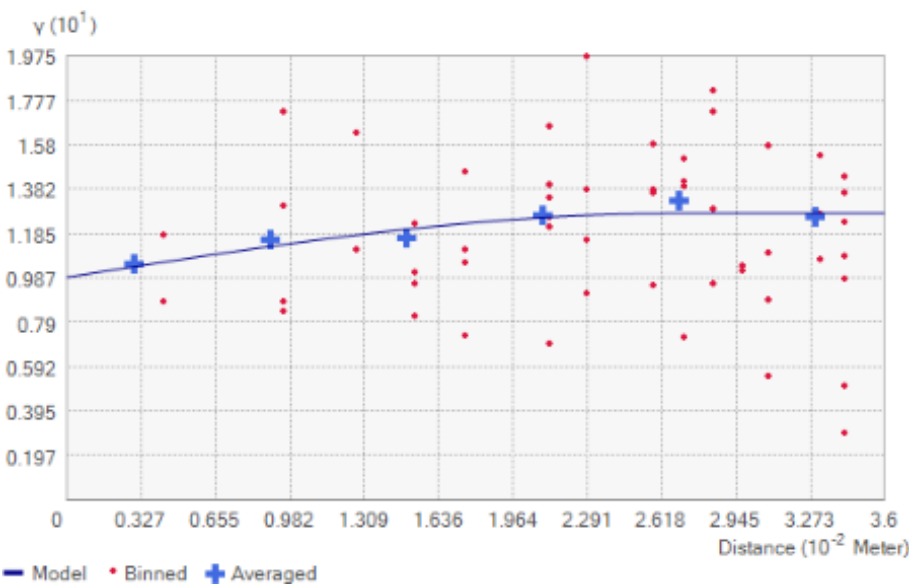


Figure S2 Fitted semivariogram model for predicting uranium concentrations.

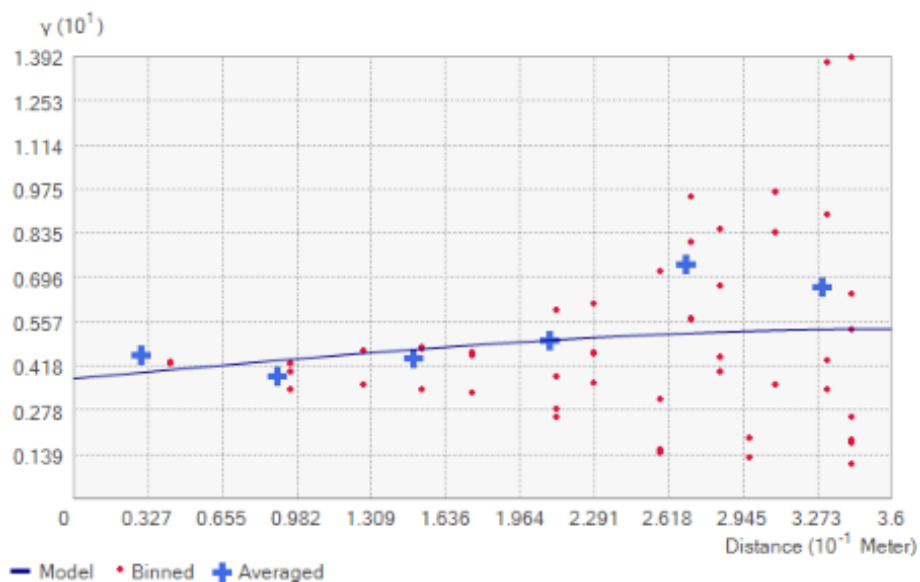


Figure S3 Fitted semivariogram model for predicting thorium concentrations.

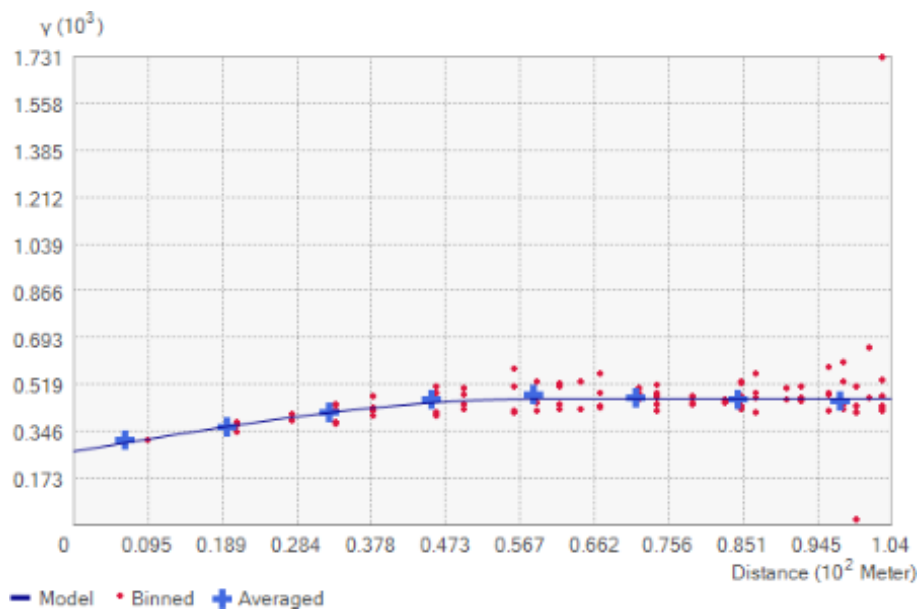


Figure S4 Fitted semivariogram model for predicting countrate.

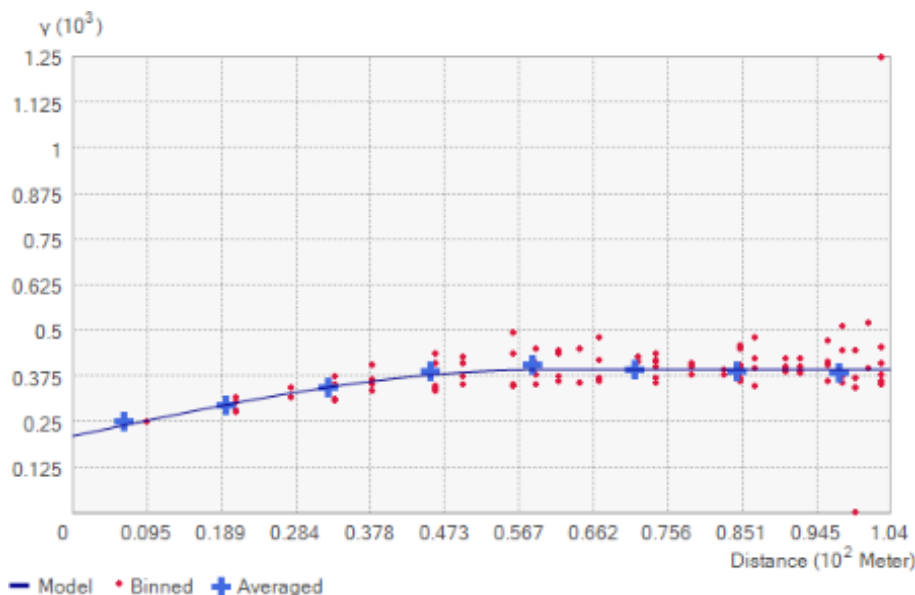


Figure S5 Fitted semivariogram model for predicting total counts.

2. Further description and usefulness of spectral vegetation indices in crop growth monitoring

- NDVI (Normalized Difference Vegetation Index):** One of the most popular vegetation indices, NDVI is used to understand vegetation health and land use remotely. It is an indicator that shows the greenness, density, and health of vegetation in each pixel of a satellite image. NDVI is calculated using the near-infrared and red bands of the electromagnetic spectrum to estimate a dimensionless indicator between -1 and 1. The higher the NDVI value, the more vigorous the vegetation ¹.
- SAVI (Soil-Adjusted Vegetation Index):** SAVI is an improvement over NDVI as it corrects for soil brightness and reduces the influence of soil background. It is calculated using the near-infrared and red bands of the electromagnetic spectrum and a soil brightness correction factor. SAVI values range from -1 to 1, with higher values indicating denser vegetation ².
- GSAVI (Green Soil-Adjusted Vegetation Index):** GSAVI is similar to SAVI but uses the green band instead of the red band. It is less sensitive to atmospheric interference and soil background noise. GSAVI values range from -1 to 1, with higher values indicating denser vegetation ³.
- MSAVI (Modified Soil-Adjusted Vegetation Index):** MSAVI is another improvement over NDVI that reduces the influence of soil background. It is calculated using the near-infrared and red bands of the electromagnetic spectrum and a soil brightness correction factor. MSAVI values range from -1 to 1, with higher values indicating denser vegetation ⁴.
- CVTI (Corrected Transformed Vegetation Index):** CVTI is a vegetation index that is used to estimate vegetation cover and biomass. It is calculated using the blue, green, and red bands of the electromagnetic spectrum. CVTI values range from 0 to 1, with higher values indicating denser vegetation ⁵.
- WDRVI (Wide Dynamic Range Vegetation Index):** WDRVI is a vegetation index that is used to estimate vegetation cover and biomass. It is calculated using the near-infrared and red bands of the electromagnetic spectrum. WDRVI values range from -1 to 1, with higher values indicating denser vegetation.
- GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index):** GNDVI is a vegetation index that is used to estimate vegetation cover and biomass. It is calculated using the near-infrared and green bands of the electromagnetic spectrum. GNDVI values range from -1 to 1, with higher values indicating denser vegetation ¹.

-
- **CCCI (Canopy Chlorophyll Content Index):** CCCI is a vegetation index that is used to estimate the chlorophyll content of vegetation. It is calculated using the near-infrared and red bands of the electromagnetic spectrum. CCCI values range from 0 to 1, with higher values indicating higher chlorophyll content.
 - **CG (Chlorophyll Green Index):** CG is a vegetation index that is used to estimate the chlorophyll content of vegetation. It is calculated using the green and red bands of the electromagnetic spectrum. CG values range from 0 to 1, with higher values indicating higher chlorophyll content.
 - **CLREDEGE (Chlorophyll Red Edge):** CLREDEGE is a vegetation index that is used to estimate the chlorophyll content of vegetation. It is calculated using the near-infrared and red edge bands of the electromagnetic spectrum. CLREDEGE values range from 0 to 1, with higher values indicating higher chlorophyll content.
 - **CVI (Chlorophyll Vegetation Index):** CVI is a vegetation index that is used to estimate the chlorophyll content of vegetation. It is calculated using the near-infrared and red bands of the electromagnetic spectrum. CVI values range from 0 to 1, with higher values indicating higher chlorophyll content.
 - **ARVI (Atmospherically Resistant Vegetation Index):** ARVI is a vegetation index that is used to estimate vegetation cover and biomass. It is calculated using the near-infrared and red bands of the electromagnetic spectrum and is resistant to atmospheric interference. ARVI values range from -1 to 1, with higher values indicating denser vegetation.
 - **OSAVI (Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index):** OSAVI is a vegetation index that is used to estimate vegetation cover and biomass. It is calculated using the near-infrared and red bands of the electromagnetic spectrum and a soil brightness correction factor. OSAVI values range from -1 to 1.

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

Wageningen Environmental Research
Rapport 3404
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, 7.700 medewerkers (7.000 fte), 2.500 PhD- en EngD-kandidaten, 13.100 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 3404
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, 7.700 medewerkers (7.000 fte), 2.500 PhD- en EngD-kandidaten, 13.100 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.
