



Regionale kartering bodemverdichting in de provincie Flevoland

Fenny van Egmond, Kees Teuling, Joani Kannekens, Wiebe Harder, Martin Knotters, Titia Mulder, Tijn van Orsouw, Jeroen Schoorl



WAGENINGEN
UNIVERSITY & RESEARCH

Regionale kartering bodemverdichting in de provincie Flevoland

Fenny van Egmond¹, Kees Teuling¹, Joani Kannekens², Wiebe Harder², Martin Knotters¹, Titia Mulder¹, Tijn van Orsouw^{1*}, Jeroen Schoorl¹

1 Wageningen University & Research

2 Aequator Groen & Ruimte

* voormalig

Wageningen Environmental Research
Wageningen, november 2024

Gereviewd door:
Guido Bakema, Wageningen Environmental Research

Akkoord voor publicatie:
Mirjam Hack, teamleider van Bodem, Water, Landgebruik

Rapport 3382
ISSN 1566-7197



Bodemverdichting of de aanwezigheid van storende, verdichte lagen in de bodem, kan leiden tot verminderde plantengroei en effecten op de waterhuishouding. Metingen van bulkdichtheid en indringingsweerstand worden veel gebruikt om verdichte lagen in kaart te brengen. In deze studie is gepoogd een kaart te maken van bodemverdichting in de provincie Flevoland op regionale schaal op basis van nieuwe veldmetingen. Deze metingen zijn ook vergeleken met de ervaren bodemverdichting door landgebruikers op de meetpunten. Op basis van metingen en ervaringen en gehanteerde grenswaarden wordt geen grootschalige bodemverdichting geconstateerd in de provincie. Met de gebruikte data en hulpinformatie kan geen bruikbare kaart worden gemaakt. Hierbij moet wel worden meegewogen dat Flevoland uit jonge gronden bestaat, die oorspronkelijk een veel lagere bulkdichtheid hadden. Ook wordt meer onderzoek voorgesteld naar de redenen waarom dit niet lukt, naar de grenswaarden voor bulkdichtheid en indringingsweerstand en naar het effect van verdichte lagen op plantengroei.

Soil compaction, or the occurrence of disturbing compacted layers in soil, can lead to reduced plant growth and effects on the water balance. Bulk density and penetration resistance are commonly used measurements to map compacted layers. This study attempted to produce a map of soil compaction in the province of Flevoland on a regional scale based on new field measurements. These measurements were also compared with perceived soil compaction by land users at the measurement points. Based on the measurements and experiences, no large-scale soil compaction is observed in the province. Based on the data and covariates used no useful map can be made. Also, more research is proposed on the reasons for failure of the map, on the thresholds for bulk density and penetration resistance and on the effect of compacted layers on plant growth.

Trefwoorden: bodemverdichting, regionale kaart, bodem, bulkdichtheid, indringingsweerstand, provincie Flevoland, enquête

Dit rapport is gratis te downloaden van <https://doi.org/10.18174/672577> 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 3382 | ISSN 1566-7197

Foto omslag: Joani Kannekens

Inhoud

Verantwoording	7
Woord vooraf	9
Samenvatting	11
Summary	13
1 Inleiding	15
1.1 Achtergrond	15
1.2 Probleemstelling	15
1.3 Onderzoeksvragen	16
1.4 Doel	16
1.5 Opbouw van het rapport	16
2 Opzet van het onderzoek	17
2.1 Onderzoeksgebied	17
2.2 Selectie van bemonsteringslocaties	17
2.3 Monsternamen en metingen	18
2.3.1 Meetplan	19
2.3.2 Uitvoering van veldwerk en laboratoriumbepalingen	19
2.4 Cartografie	23
2.5 Enquête	23
3 Resultaten	25
3.1 Resultaten veldonderzoek	25
3.1.1 Droge bulkdichtheid	25
3.1.2 Indringingsweerstand	29
3.1.3 Samenhang tussen dichtheid en indringingsweerstand	33
3.2 Resultaten cartografie	35
3.3 Resultaten enquête	39
4 Interpretatie resultaten veldonderzoek en enquête	42
4.1 Interpretatie bulkdichtheden en indringingsweerstand	42
4.2 Combinatie van veldwaarnemingen en enquêteresultaten	44
5 Conclusies en aanbevelingen	51
5.1 Conclusies	51
5.1.1 Meetmethodes	51
5.1.2 Grenswaarden per meetmethode	52
5.1.3 Deelvragen	52
5.2 Aanbevelingen	53
Literatuur	54

Verantwoording

Rapport: 3382

Projectnummer: 5200043298

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

Akkoord referent die het rapport heeft beoordeeld,

functie: senior bodemkundig onderzoeker

naam: Guido Bakema

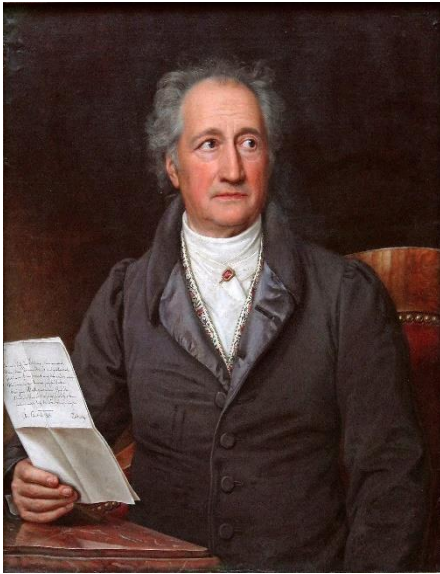
datum: 26 maart 2024

Akkoord teamleider voor de inhoud,

naam: Mirjam Hack-ten Broeke

datum: 25 oktober 2024

Woord vooraf



Verdichting en waarheid. Dat is de titel van de Nederlandse vertaling van 'Dichtung und Wahrheit' van Johann Wolfgang von Goethe (1749-1832). Von Goethe speelde in dit autobiografische werk met de ambiguïteit van het woord 'Dichtung', dat zowel poëzie als fictie kan betekenen. In de Nederlandse vertaling wordt daar nog een dimensie aan toegevoegd, namelijk die van een bodemstructuur die door menselijk toedoen compacter en vaster wordt, met nadelige gevolgen voor het functioneren van de bodem bij landbouwkundig gebruik. Ook in deze betekenis van verdichting zou Von Goethe, die behalve schrijver, dichter en filosoof ook natuurwetenschapper was, zeer geïnteresseerd zijn geweest.

In dit rapport vindt u geen poëzie en ook geen fictie. De absolute waarheid over verdichting zult u echter evenmin aantreffen. Wel hopen wij u en onszelf met dit rapport weer een stap dicht bij de waarheid over bodemverdichting te brengen, in elk geval dicht genoeg om de bodem op een verantwoorde manier te kunnen blijven gebruiken.

Een deel van het onderzoek waar wij in dit rapport verslag van doen, is uitgevoerd door Aeres Hogeschool onder regie van Stichting Innovatie Alliantie (SIA), als onderdeel van het project 'Flevoland in Beweging', dat is gefinancierd in het Raak-Pro-programma met cofinanciering van de Provincie Flevoland en Waterschap Zuiderzeeland. De resultaten van het onderzoek op punt- en veldschaal zijn eerder al gepubliceerd. In dit rapport beschrijven we de resultaten op regionale schaal.

Anatol Helfenstein (WU) bedanken wij voor zijn hulp bij de selectie van hulpvariabelen bij de ruimtelijke interpolatie van bodemdichtheden.

Samenvatting

Bodemverdichting is het proces van toename van de dichtheid van een bodem ten opzichte van de natuurlijke dichtheid als gevolg van menselijk handelen. Het resultaat van dit proces noemen we een verdichte laag. Deze verdichte lagen kunnen een storende werking hebben op plantengroei – omdat wortels niet of niet goed meer door deze laag heen kunnen groeien – en op de waterhuishouding van een bodem door een vermindering van de waterbergings- en infiltratiecapaciteit en de capillaire nalevering van vocht aan planten. Beide effecten zorgen ervoor dat planten op een bodem met een storende verdichte laag gevoeliger zijn voor weersextremen als droogte of veel neerslag in korte tijd.

Het meten van verdichting en met name van het voorkomen van een storend verdichte laag gebeurt veelal op veldniveau door de droge bulkdichtheid en of de indringingsweerstand te meten. Voor beide worden in de literatuur grenswaarden gerapporteerd, al zijn deze niet eenduidig.

Het doel van dit onderzoek was het maken van een regionale kaart van bodemverdichting voor de provincie Flevoland. Hiertoe zijn meer dan 300 metingen van zowel bulkdichtheid als indringingsweerstand uitgevoerd, waarbij kopakkers zijn uitgesloten, en zijn kaarten gemaakt van de bulkdichtheid op 30 cm diepte. Ook zijn de meetwaarden geanalyseerd en met elkaar vergeleken en is een enquête uitgevoerd onder de landgebruikers van de percelen waar metingen zijn gedaan, met als doel om ervaren verdichting te kunnen vergelijken met de metingen en het effect van genomen maatregelen op de meetwaarden en ervaren verdichting te kunnen bepalen.

Uit de resultaten van de metingen blijkt dat op basis van de in de literatuur gerapporteerde grenswaarden voor bulkdichtheid en indringingsweerstand op landbouwpercelen, exclusief de kopakkers, geen grootschalige verdichting is aangetroffen. Ook de resultaten van de enquête laten zien dat op het merendeel van de bemeten percelen geen verdichting wordt ervaren door de landgebruikers. Op een deel van de percelen wordt wel verdichting gemeten en ervaren en op een deel wordt dit wel ervaren, maar niet gemeten en andersom. Dit betekent dat de grenswaarden niet eenduidig de ervaringen van de landgebruikers en wellicht niet eenduidig het effect van verdichting op plantengroei weergeven. Ook nemen veel landgebruikers al maatregelen tegen verdichting, terwijl dit niet direct gerelateerd is aan ervaren verdichting.

Voor de provincie Flevoland kon op basis van de huidige data en ruimtelijke hulpvariabelen zoals satellietbeelden, bodemkaart en hoogtemodel geen bruikbare regionale kaart van het voorkomen van storende verdichte lagen worden gemaakt. Dit kan verschillende oorzaken hebben en specifiek zijn voor de jonge polderbodems in de provincie. Dit verdient meer onderzoek, evenals de grenswaarden en het effect van verdichting op plantengroei.

Summary

Soil compaction is the process of an increasing density of a soil, relative to its natural density, resulting from human activity. The result of this process is a compacted layer. These compacted layers can have a disruptive effect on plant growth, as roots can no longer or not properly grow through this layer. It also affects the water balance of a soil by reducing its water storage and infiltration capacity and the capillary supply of moisture to plants. Both effects make plants on a soil with a disturbing compacted layer more susceptible to weather extremes such as drought and a lot of precipitation in a short period of time.

Measuring compaction and, in particular, the occurrence of a disturbing compacted layer is mostly done at field level by measuring the dry bulk density and or penetration resistance. Threshold values for both measurements are reported in literature, although these are not unambiguous.

The aim of this study was to create a regional map of soil compaction for the province of Flevoland. To this end, more than 300 measurements of both bulk density and penetration resistance were taken, headlands were excluded, and maps of bulk density at 30 cm depth were made. The measured values were also analysed and compared, and a survey was carried out among the land users of the plots where measurements were taken. The aim was to compare experienced compaction with the measurements and to determine the effect of applied management practices on the measured values and experienced compaction.

The results of the measurements show that based on the bulk density and penetration resistance thresholds reported in literature, no large-scale compaction was found on agricultural plots in the province, excluding headlands. Survey results also show that no compaction is experienced by land users on most of the sampled plots. On some of the plots, compaction is measured and experienced, and on some it is experienced but not measured and vice versa. This means that the thresholds do not unambiguously reflect the experiences of land users and may not unambiguously reflect the effect of compaction on plant growth. Also, many land users apply management practices against compaction, this is not directly related to perceived compaction.

In the province of Flevoland, based on the current measurement data and covariates such as satellite images, soil maps and an elevation model, no useable regional map of the occurrence of disturbing compacted layers could be made. This may have several causes and be specific to the young polder soils in the province. This deserves more research, as well as the threshold values and the effect of compaction on plant growth.

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

De dichtheid van een bodem, de verhouding tussen vaste bestanddelen van een bodem en de poriën, is gerelateerd aan de textuur (klei-, silt- of zandgehalte), het organischestofgehalte, het landgebruik en de geschiedenis daarvan. Een bodem heeft een natuurlijke dichtheid die afhangt van de textuur, het organischestofgehalte en de diepte. Deze natuurlijke dichtheid kan veranderen onder invloed van het landgebruik. Het berijden van een bodem met zwaar materieel ten behoeve van akkerbouw of andere vormen van landgebruik, heeft een verdichtend effect op de bodem. Vooral onder natte omstandigheden en direct op de ondergrond kan dit een bodem verder verdichten. Keller e.a. (2022) rapporteren potentiële verdichting door belasting tot 1 meter of meer. Grondbewerking ten behoeve van akkerbouw is er vaak op gericht de bouwvoor, de bovenste circa 25 à 30 cm in Flevoland, losser te maken. Onder deze bouwvoor kan een verdichte laag voorkomen, de ploegzool, die het resultaat is van ondergrondverdichting door grondbewerking en die een grotere dichtheid heeft dan de natuurlijke dichtheid. Onder deze laag heeft een bodem ook een natuurlijke basisdichtheid als gevolg van zijn samenstelling en het gewicht van de bodem erboven.

We definiëren in deze studie verdichting als het proces van toename van de dichtheid ten opzichte van de natuurlijke dichtheid, als gevolg van menselijk handelen, wat vaak gerelateerd is aan landgebruik. Het resultaat van dit proces noemen we een verdichte laag. Verdichting onder de bouwvoor, zeg vanaf 25 cm, noemen we ondergrondverdichting. Daarboven spreken we van bovengrondverdichting. Bij verdichting wordt onderscheid gemaakt tussen de deelprocessen *compaction* en *shear*. *Compaction* heeft betrekking op de afname van het aandeel poriën in de bodem en gaat gepaard met een toename van de droge bulkdichtheid, het gewicht van een droge bodem in een vast volume, uitgedrukt in g/cm^3 . *Shear* heeft betrekking op verandering in de samenhang tussen vaste bodemdelen door ver- of afschuiving en hoeft niet *per se* met een verandering in de droge bulkdichtheid gepaard te gaan (Bakema e.a., 2022).

De droge bulkdichtheid van de bodem heeft een direct verband met het poriënvolume en daarmee met de waterdoorlatendheid, het watervasthoudend vermogen en de bewortelbaarheid. Bovengrondverdichting kan door grondbewerking eenvoudig worden opgeheven. Ondergrondverdichting is moeilijker op te heffen en kan soms tientallen jaren de structuur van de bodem, processen in de bodem, de hydrofysische eigenschappen van de bodem en uiteindelijk de plantengroei beïnvloeden. Droge of natte weersomstandigheden kunnen dan veel eerder plantengroei remmen, wat in de landbouw tot opbrengstverliezen kan leiden, zeker bij meer extreme weersomstandigheden als gevolg van klimaatverandering. Door oppervlakkige afstroming van neerslag naar het oppervlaktewater wordt de grondwatervoorraad onvoldoende aangevuld en kunnen nutriënten onbedoeld in het oppervlaktewater terechtkomen.

1.2 Probleemstelling

De Provincie Flevoland en Waterschap Zuiderzeeland willen meer inzicht krijgen in de factoren die bodemverdichting beïnvloeden, in de huidige status van (de effecten van) ondergrondverdichting en in het voorkómen van de risico's voor het optreden van bodemverdichting in ruimte en tijd. Dit inzicht is nodig om keuzes te maken in het beleid en beheer, om ondernemers van relevante informatie te voorzien en om inzicht te krijgen in het (mogelijke) effect van verdichting op waterbeheer en -overlast en op de effecten van klimaat(verandering).

Het waterschap heeft daarom belangstelling voor een kaart die informatie geeft over de invloed van bodemverdichting op de verticale doorlatendheid en daarmee op de stroming van water, in het bodemprofiel en de beschikbaarheid van water voor gewasgroei.

De provincie heeft voor het ontwikkelen van beleid, het informeren van ondernemers en het voorspellen van klimaateffecten een kaart nodig van de bodemkwaliteit, van de verspreiding van verdichte bodems, de bewortelbaarheid en de verticale doorlatendheid. Daarnaast hebben provincie en waterschap belang bij inzicht in de consequenties van verdichting op de waterhuishouding (waterbeheer) in zowel normale, droge als natte omstandigheden. Het effect van bodemverdichting op de waterhuishouding is op kleinere schaal verkend in andere onderdelen van het project waar dit rapport deel van uitmaakt (FlevoLand in Beweging, gefinancierd door SIA RAAK-PRO). In dit onderzoek is eerst gekeken naar het regionaal in kaart brengen van verdichting. Het effect daarvan op de waterhuishouding zou een vervolg hierop zijn en is niet uitgevoerd.

Een volgende stap kan zijn om een landevaluatiestudie of een bodemgeschiktheidsbeoordeling uit te voeren van de bodems in de huidige staat, voor bepaalde gewassen. Hoewel dit zeker relevant en interessant kan zijn voor de agrarische sector en andere belanghebbenden, past dit niet binnen de scope van dit project. Dit kan een mogelijke vervolgstap op dit onderzoek zijn.

1.3 Onderzoeksvragen

De onderzoeksvraag is: Hoe zijn de bulkdichtheid en de indringingsweerstand van de bodem ruimtelijk verdeeld in Flevoland? Deelvragen die hieruit voortkomen en in het onderzoek worden beantwoord, zijn:

1. Wanneer is sprake van bodemverdichting en een verdichte laag?
2. Komen de waargenomen verdichte lagen overeen met het beeld dat landgebruikers en andere belanghebbenden hebben van de huidige situatie?
3. Welke hulpvariabelen in de digitale bodemkartering correleren met de gemeten dichtheid en kunnen als voorspeller van verdichte lagen worden aangemerkt?
4. Is de gekozen methode geschikt voor het maken van een regionale kaart van (bulk)dichtheid en verdichte lagen in de provincie Flevoland?

1.4 Doel

Het onderzoek heeft de volgende doelen:

1. Op regionale schaal onderzoeken hoe het effect van bodemverdichting uit veldmetingen en hulpvariabelen kan worden afgeleid en mogelijke nieuwe technieken hiervoor te ontwikkelen en toe te passen. De resultaten van het onderzoek op punt- en veldschaal zijn eerder gepubliceerd.
2. Een regionale kaart maken van de droge bulkdichtheid en indringingsweerstand van de bodem in het agrarische deel van de provincie Flevoland, met behulp van digitale bodemkartering (DSM), en de kwaliteit van deze kaart vaststellen door middel van validatie.

1.5 Opbouw van het rapport

Hoofdstuk 2 beschrijft de opzet van 1) het veldonderzoek, 2) de verwerking van waarnemingen tot gebiedsdekkende kaarten, en 3) een enquête onder de gebruikers van de bemonsterde percelen.

Hoofdstuk 3 geeft de resultaten van de metingen van de droge bulkdichtheid en de indringingsweerstand, de verwerking tot kaarten en de uitkomsten van de enquête onder de landgebruikers. In hoofdstuk 4 worden de resultaten van de waarnemingen aan droge bulkdichtheid en indringingsweerstand geïnterpreteerd en wordt bepaald waar sprake zou kunnen zijn van een verdichte laag. Dit wordt vergeleken met het functioneren van de bodem zoals dat door de landgebruikers wordt ervaren en met de maatregelen die zij eventueel nemen om verdichting te voorkomen of te bestrijden. Hoofdstuk 5 sluit af met conclusies.

2 Opzet van het onderzoek

2.1 Onderzoeksgebied

Het onderzoeksgebied ligt in de drie polders die samen de provincie Flevoland vormen. De Noordoostpolder is in 1942 drooggelegd, Oostelijk Flevoland in 1957 en Zuidelijk Flevoland 1968. In Zuidelijk Flevoland komt nog ongerijpte of ten dele gerijpte klei voor. De algemene bodemopbouw is een ondergrond van pleistocene zand met daarop zavel- en kleiafzettingen, met plaatselijk een veenlaag. Het merendeel van het landgebruik in de provincie is agrarisch. Waterschap Zuiderzeeland is verantwoordelijk voor het waterbeheer in het gebied. De recentste kartering van de bodems van de provincie Flevoland, vervaardigd door Brouwer e.a. (2018), is gebruikt in dit onderzoek.

Het onderzoeksgebied is beperkt tot de agrarische gronden in de provincie Flevoland. Een tweede restrictie van het onderzoeksgebied is dat kopakkers buiten beschouwing zijn gelaten, omdat de dichtheden daar sterk kunnen afwijken van de rest van het perceel. Om deze reden is niet binnen 10 meter van de perceelsgrens bemonsterd.

2.2 Selectie van bemonsteringslocaties

De geselecteerde bemonsteringslocaties zijn gekozen uit de boorlocaties van de geactualiseerde bodemkaart van Flevoland in het kader van de Basisregistratie Ondergrond (BRO) (Brouwer e.a., 2018). Bij deze actualisatie zijn bodemkundige profielbeschrijvingen gemaakt op 1207 locaties in de provincie Flevoland. Door de dichtheidsdata te verzamelen op deze locaties was het niet nodig om op ieder meetpunt opnieuw een bodemkundige profielbeschrijving te maken.

Bij de selectie van de 1207 boorlocaties voor de geactualiseerde bodemkaart is optimale ruimtelijke spreiding nagestreefd (Brouwer e.a., 2018; Walvoort e.a., 2010). Van de 1207 boorlocaties vielen 1052 potentiële bemonsteringslocaties binnen het onderzoeksgebied (paragraaf 2.1).

Kalibratielocaties

Met de beschikbare capaciteit was het niet haalbaar om alle 1052 boorlocaties binnen de beschikbare tijd opnieuw te bezoeken om dichtheidsdata te verzamelen. Uit de 1052 boorlocaties zijn daarom in totaal 150 bemonsteringslocaties geselecteerd. Ruimtelijke spreiding is nagestreefd door deze selectie uit te voeren met *spatial coverage sampling* (Walvoort e.a., 2010, 2021). Hierbij is de provincie Flevoland in 150 compacte geografische deelgebieden van gelijke grootte ingedeeld, met behulp van *k-means*-stratificatie. Binnen ieder deelgebied is aselekt een van de BRO-boorlocaties geloot voor de kartering van droge bulkdichtheid en indringingsweerstand en verdichte lagen, wat tot 150 basisbemonsteringslocaties leidde. Tevens is in ieder deelgebied een reservelocatie geloot die bezocht kon worden indien de eerst gelote locatie niet bezocht kon worden.

Om informatie te verkrijgen over de variatie in bodemdichtheid op korte afstand, zijn de 150 basisbemonsteringslocaties aangevuld met 75 korteafstandslocaties. Deze extra locaties zijn geselecteerd door aselekt 75 basisbemonsteringslocaties te kiezen uit het totaal van 150 en vervolgens een extra bemonsteringspunt toe te voegen op 25, 50, 100 of 200 m van ieder van deze 75 aselekt gelote locaties. De verdeling over de afstanden is nagenoeg evenredig: 19 locaties op 25, 50 en 100 m afstand, 18 locaties op 200 m afstand. De 75 korteafstandslocaties zijn telkens exact ten noorden van de originele basisbemonsteringslocaties gepositioneerd, tenzij de locatie dan buiten het onderzoeksgebied (zie paragraaf 2.1) zou komen te liggen. In die gevallen is de locatie verplaatst naar het oosten en is opnieuw gekeken of de nieuwe locatie binnen het studiegebied lag. Indien nodig is de locatie vervolgens nog naar het

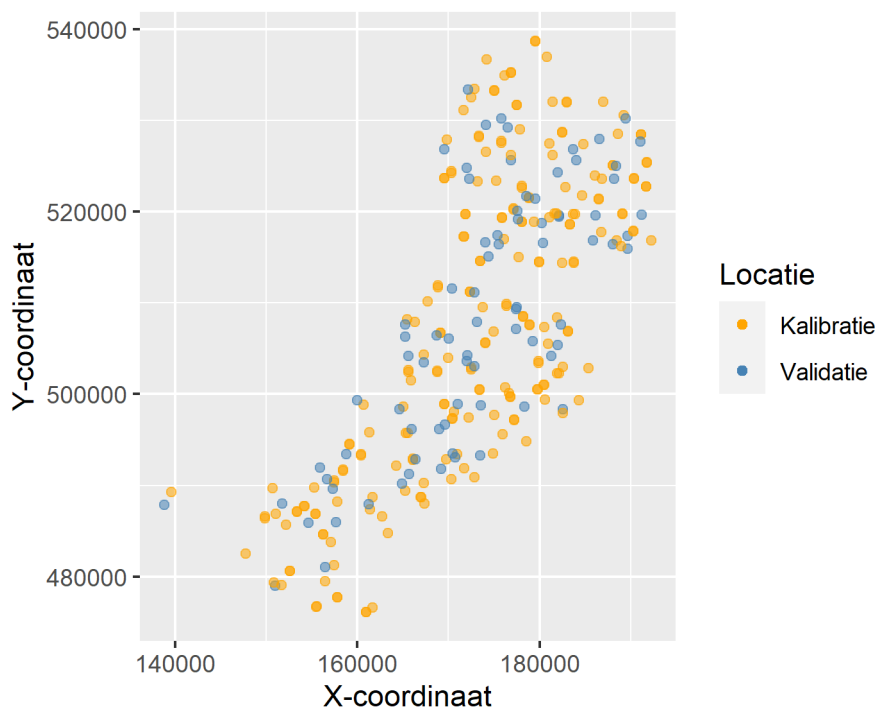
zuiden of westen verplaatst, met telkens dezelfde criteria als voorheen. Voor de extra locatie op korte afstand was niet vereist dat deze binnen hetzelfde perceel lag als een basisbemonsteringslocatie.

In totaal zijn dus 225 bemonsteringslocaties geselecteerd voor de kalibratie van de digitale bodemkartering, plus een set aan reservelocaties.

Validatielocaties

Om de kaarten van droge bulkdichtheid en indringingsweerstand te valideren, is gebruikgemaakt van een aparte set van 112 validatielocaties die waren geselecteerd voor de validatie van de geactualiseerde bodemkaart (Brouwer e.a., 2018). Deze 112 locaties waren met een kanssteekproef geselecteerd. Uit deze 112 locaties zijn aselect 80 locaties binnen het onderzoeksgebied geselecteerd om de kaart van droge bulkdichtheid en indringingsweerstand te valideren.

Het aantal kalibratie- en validatielocaties samen is 305. Figuur 1 geeft de ligging van deze locaties weer.



Figuur 1 Ligging van de 225 kalibratielocaties (oranje) en 80 validatielocaties (blauw).

2.3 Monsternamen en metingen

Op iedere bemonsteringslocatie zijn monsters genomen en waarnemingen verricht om het verticale verloop van droge bulkdichtheid en indringingsweerstand in het bodemprofiel te bepalen en daaruit conclusies over het proces van bodemverdichting af te leiden. Gekozen is voor deze twee parameters, omdat beide in de praktijk vaak gebruikt worden om een kwantitatieve indicatie van de aanwezigheid van een verdichte laag te bepalen. Voor beide zijn referentie- of grenswaarden bekend in de literatuur, zij het niet eenduidig. Ook waren de metingen tijdens de uitvoering praktisch inzetbaar en betaalbaar op deze schaal. Alle handelingen en protocollen waren gelijk voor zowel kalibratie- als validatiepunten, waardoor de lijst aan verzamelde gegevens ook gelijk was, ongeacht het type bemonsteringslocatie. Gekozen is voor het nemen van ringmonsters voor het bepalen van de droge bulkdichtheid, omdat dit een ISO-gestandaardiseerde en de nauwkeurigste, gevalideerde meetmethode is voor droge bulkdichtheid in natuurlijke bodems in het veld in Nederland. Wel is de methode relatief tijdrovend en vereist deze een ervaren veldwerker.

Indringingsweerstandsmetingen met een penetrologger zijn vrij gangbaar in de landbouw in Nederland op dit

moment als snelle, indicatieve meting van het profielverloop van dichtheid. De gemeten weerstand wordt niet alleen door dichtheid bepaald, maar ook door het vochtgehalte van de bodem op het moment van meten, de textuur(opbouw) van de bodem en de (kracht en consistentie van de) monsternemer. Alle monsternames en metingen zijn uitgevoerd door bodemkundigen. Hierbij is het werk verdeeld tussen twee personen (30 punten, 270 punten).

2.3.1 Meetplan

Om inzicht te krijgen in de staat van bodemverdichting zijn op iedere bemonsteringslocatie ongestoorde ringmonsters gestoken en penetrologgermetingen uitgevoerd. Hiermee zijn respectievelijk de droge bulkdichtheid en de indringingsweerstand bepaald. De penetrologgermetingen zijn verricht vanaf het maaiveld, de ringmonsters zijn genomen in profielkuilen. Verder is een aantal ondersteunende waarnemingen verricht om de bemonsteringsdiepte vast te stellen en context te geven bij de verdere analyse van de resultaten. De bemonstering op een locatie verliep volgens het vooraf vastgestelde meetplan dat in deze paragraaf wordt beschreven.

De coördinaten van iedere bemonsteringslocatie zijn, voorafgaand aan de veldwerkdag, ingevoerd in een draagbaar gps-apparaat. Hiermee is de bemonsteringslocatie op de veldwerkdag in het veld gelokaliseerd met een nauwkeurigheidsmarge van doorgaans een aantal meters. Van de aldus geselecteerde locatie werd alleen afgeweken wanneer:

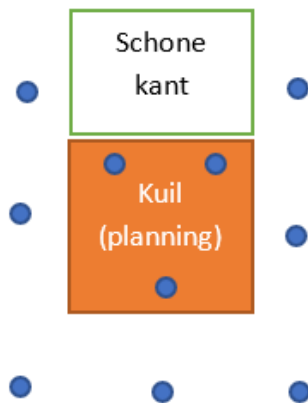
1. er een directe instructie van de landeigenaar was, omdat deze bijvoorbeeld geen verstoring van bepaalde plekken binnen het perceel wilde;
2. de monsternemer vanuit eigen expertise vaststelde dat de bodem op de monsterlocatie ongebruikelijk en niet-representatief verstoord was.

Met deze redenen mocht de bemonsteringslocatie maximaal 20 m worden verlegd van de vooraf bepaalde locatie, waarbij de nieuwe gps-coördinaten werden vastgelegd. Indien de verlegging meer dan 20 m was, werd het punt afgekeurd, ongeacht de reden van de verlegging. Bij afkeuring is een nieuwe vervangende locatie geselecteerd uit de lijst van reservelocaties, waarbij de ruimtelijke spreiding van bemonsteringslocaties over Flevoland in stand werd gehouden.

Op de bemonsteringslocatie is eerst bepaald waar de profielkuil gegraven ging worden en werd een 'schone kant' van deze kuil gemarkeerd, zie Figuur 2. De profielkuil was tussen 50 x 50 cm en 100 x 100 cm breed. Deze 'schone kant' is niet betreden of verstoord totdat alle monsters genomen waren, om beïnvloeding van de metingen te voorkomen. Voordat de profielkuil is gegraven, zijn de penetrologgermetingen uitgevoerd. Om informatie te krijgen over de ruimtelijke variatie op korte afstanden, zijn penetrologgermetingen verricht op tien punten met maximaal 1 m onderlinge afstand, zie Figuur 2 voor het geprefereerde patroon. Van dit geprefereerde patroon kon worden afgeweken als dat nodig was. Aan de schone kant zijn geen penetrologgermetingen uitgevoerd, om te voorkomen dat in een later stadium een ringmonster zou worden genomen van grond die door de penetrologgermeting verstoord zou zijn.

2.3.2 Uitvoering van veldwerk en laboratoriumbepalingen

Op elke bemonsteringslocatie zijn als eerste de penetrologgermetingen uitgevoerd. Alle penetrologgermetingen zijn uitgevoerd met een geijkte penetrologger van Eijkelkamp (Royal Eijkelkamp, 2022) met een conus met een oppervlak van 1 cm² en een hoek van 60°. De metingen zijn uitgevoerd met een doelsnelheid van 2 cm s⁻¹ zonder correctie voor het vochtgehalte.



Figuur 2 Inrichting van een bemonsteringslocatie. De blauwe stippen zijn de locaties van de penetrologgermetingen.

Na het uitvoeren van de penetrologgermetingen is de profielkuil gegraven (Figuur 3). Wanneer tijdens het graven dichte of losse lagen werden waargenomen, is dit door de monsternemer genoteerd. Voor de ongestoorde monsternamen is bemonsterd op twee diepten: een vaste diepte van 30 cm onder maaiveld en een variabele diepte die in het veld werd bepaald. Het doel was om direct onder de ploegdiepte te bemonsteren die kan variëren (zowel hoger als lager) tussen percelen, afhankelijk van het beheer. Uit analyses van de bodemprofielbeschrijvingen van de actualisatie van de bodemkaart (Brouwer e.a., 2018) die beschikbaar zijn in de BRO, bleek dat de gemiddelde bouwvoordikte in Flevoland 30 cm is. Deze diepte is daarom op alle locaties bemonsterd, ook als uit de profielkuil bleek dat de ploegdiepte ondieper of dieper was. Voor de bemonstering heeft de monsternemer op basis van de volgende criteria vastgesteld wat de lokale, variabele ploegdiepte was:

1. Is er een voelbaar of zichtbaar dichtere laag?
(Bijvoorbeeld: weerstand gevoeld tijdens het graven, massieve structuur zichtbaar, brokkelt in grote stukken af, weerstand gevoeld met een mes)
2. Is een ploegzool zichtbaar?
(Bijvoorbeeld: diepte van ploegschaar zichtbaar)
3. Zijn er reductievlekken, ofwel verschijnselen die duiden op anaerobe condities, zichtbaar als gevolg van waterstagnatie op een ploegzool?
(Bijvoorbeeld: blauwkleuring die niet door gewasresten komt)
4. Wordt de wortelgroei zichtbaar belemmerd?
(Bijvoorbeeld: wortels gaan horizontaal groeien op de ploegdiepte, wortels verdikken plotseling, aantal wortels neemt plotseling af)
5. Is een duidelijke en plotselinge toename van de indringingsweerstand zichtbaar die niet door een textuurovergang komt?
6. Wordt in de bodemkundige profielbeschrijving (Brouwer e.a., 2018) een diepte van de ploegzool aangegeven?

Criteria die hoger in de lijst staan, wegen zwaarder mee voor het vaststellen van de ploegdiepte. Indien het zwaarstwegende criterium (voelbare of zichtbare verdichting) geen uitsluitel geeft over de ploegdiepte wordt het volgende criterium gebruikt (ploegzool zichtbaar). Geeft deze ook geen uitsluitel, dan wordt de volgende gebruikt et cetera. De volgorde en daarmee het gewicht van de criteria is gebaseerd op de relevantie van de waarneming volgens de betrokken experts, hoe duidelijk een fenomeen is waar te nemen en hoe recent de waarneming is gedaan. Dit laatste is enkel van toepassing op de BRO-boorprofielen, die een aantal jaren geleden gemaakt zijn. Indien uit geen enkel criterium een ploegdiepte afgeleid kon worden, is dit genoteerd en is de te bemonsteren variabele diepte gelijkgesteld aan de vaste diepte van 30 cm.



Figuur 3 *Het graven van een profielkuil.*

Na het vaststellen van de ploegdiepte werden voor de monsternamen in de schone kant trapsgewijs twee plateau's uitgegraven op de meetdiepten, zonder verstoring van de ondergrond. Op iedere meetdiepte zijn drie ringmonsters van 100 cm³ genomen volgens ISO 11272:2017 (International Organization for Standardization, 2017; Stichting Koninklijk Nederlands Normalisatie Instituut, 2017). De monsterringen zijn voorzichtig met een opzetstuk verticaal de bodem in geslagen en uit de bodem getrokken (Figuur 4). Tussen monsters is voldoende ruimte gelaten, zodat er geen scheuren in het monster zouden komen, aangezien het uit de bodem trekken van monsters soms tot scheuren in de omliggende bodem leidt. De monsters zijn ter plaatse op maat gesneden en gecontroleerd op visuele tekenen van verdichting, waarna ze zijn afgesloten met plastic doppen voor vervoer. Waarnemingen over de monsters en monsternamen zijn genoteerd, onder andere over de bodemvochtomstandigheden tijdens monsternamen indien dit de monsternamen zou kunnen beïnvloeden. Indien monsters verstoord waren, zijn vervangende monsters genomen.

Het veldwerk is uitgevoerd tussen september 2020 en juni 2021, gedurende drie seizoenen. De verschillen in vochtgehalte van de bodem in deze periode kunnen effect hebben gehad op de kwantitatieve resultaten van de penetrometermetingen. De laboratoriumbepalingen zijn verricht in dezelfde periode door het laboratorium van Aeres Hogeschool volgens ISO 11272:2017. Dit betekent dat niet gecorrigeerd is voor verschillen in bulkdichtheid als gevolg van de verschillen in zwel en krimpcurves van een kleigrond. Dit kan tot verschillen in de droge bulkdichtheid hebben geleid.



Figuur 4 *Het steken van ringmonsters.*

2.4 Cartografie

Om op basis van de verzamelde gegevens over bodemdichtheid en indringingsweerstand kaarten te kunnen maken van bodemdichtheid en de ruimtelijke verspreiding van verdichte lagen, zijn de volgende stappen gezet:

1. Keuze voor de eerste doelvariabele die in kaart wordt gebracht (bulkdichtheid op 30 cm onder maaiveld).
2. Inverse Distance Weighing en Ordinary kriging als eerste interpolatiemethode, waarbij geen gebruik wordt gemaakt van correlatie tussen de doelvariabele en hulpvariabelen.
3. Selectie van hulpvariabelen, zoals het Algemeen Hoogtemodel Nederland (AHN) en satellietdata op basis van mogelijk oorzakelijke, bodemkundige verbanden.
4. Verdere selectie uit de gekozen set van hulpvariabelen op basis van correlatie met de doelvariabele.
5. Ruimtelijke voorspelling van de doelvariabele met behulp van Random Forest machine learning, met de geselecteerde hulpvariabelen.
6. Validatie van de ruimtelijke voorspellingen.
7. Visuele analyse van de patronen in de ruimtelijke voorspellingen.
8. Herhalen van het proces voor andere doelvariabelen, zoals maximale indringingsweerstand.

2.5 Enquête

Uit de analyse van de waargenomen bulkdichtheden en indringingsweerstand en de grenswaarden die gesteld worden in de literatuur kan worden opgemaakt waar verdichte lagen als gevolg van verdichting of een natuurlijk hoge waarde voorkomen. De bevindingen (hoofdstuk 3) kwamen niet volledig overeen met het beeld dat leefde in de provincie. Of agrariërs het optreden van verdichting en de aanwezigheid van verdichte lagen herkennen en als probleem ervaren, is daarom onderzocht door middel van een enquête. Een vergelijking van de resultaten van het veldonderzoek en de enquêteresultaten moet antwoord geven op de volgende vragen:

1. Is het wel/niet ervaren van verdichting terug te zien in de meetwaarden en wat betekent dat voor de huidige referentie- of streefwaarden?
2. Is er een verband tussen genomen managementmaatregelen om verdichting te voorkomen of te bestrijden en de meetwaarden? Hierbij gaat het om het effect te bepalen van:
 - a. langdurige maatregelen;
 - b. de duur of het moment van aanvang van langdurige maatregelen;
 - c. eenmalige grondbewerking om gevolgen van verdichting op te heffen.

De enquête is ontworpen door Aequator en Wageningen University & Research en uitgewerkt door Aequator met Google Forms, zie Figuur 5 voor een voorbeeld. Vervolgens is de enquête door Wageningen Environmental Research verspreid onder alle agrariërs bij wie veldonderzoek heeft plaatsgevonden en waar adresgegevens van beschikbaar waren. Om de respons te vergroten, heeft Aeres de potentiële respondenten nagebeld. De respons is geanalyseerd door Aequator en Wageningen Environmental Research.

Bodemverdichting Flevoland

Korte enquête over het bemonsterde perceel

* Required

Voor welke locatiecode vult u deze enquête in? *

Zie afbeelding voor voorbeeld



Your answer

Ervaart u bodemverdichting op het onderzochte perceel? *

☐ Ja, ik ervaar (enige mate van) bodemverdichting op het perceel

☐ Nee, ik ervaar geen bodemverdichting

Next Clear form

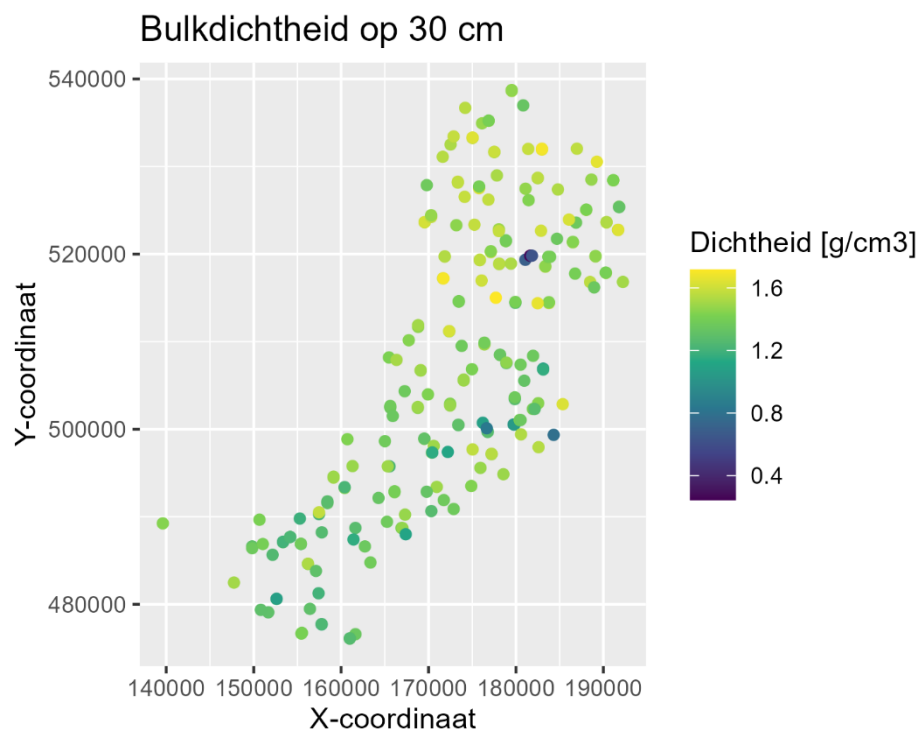
Figuur 5 Voorbeeld van een enquêtevraag.

3 Resultaten

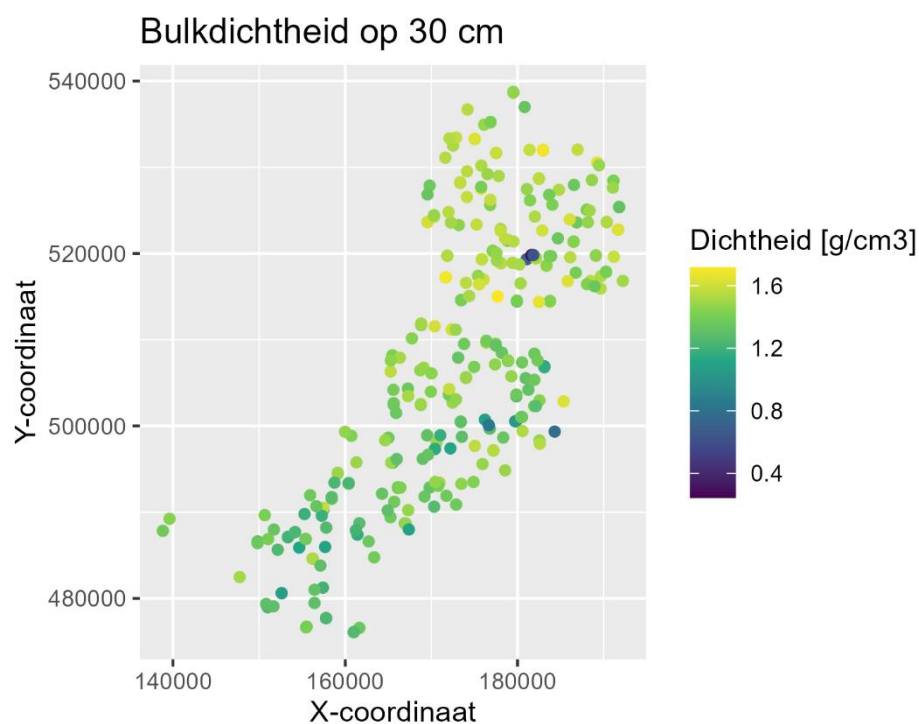
3.1 Resultaten veldonderzoek

3.1.1 Droge bulkdichtheid

Figuur 6 geeft een overzicht van de bulkdichtheden die zijn gemeten in ringmonsters, gestoken op 30 cm diepte op de kalibratie (A) en de kalibratie- en validatielocaties (B) in Flevoland. Per punt is het gemiddelde van de dichtheden die in de drie ringmonsters per locatie zijn gemeten, weergegeven. De gemeten waarden liggen tussen 0,25 en 1,74 g/cm³.



A

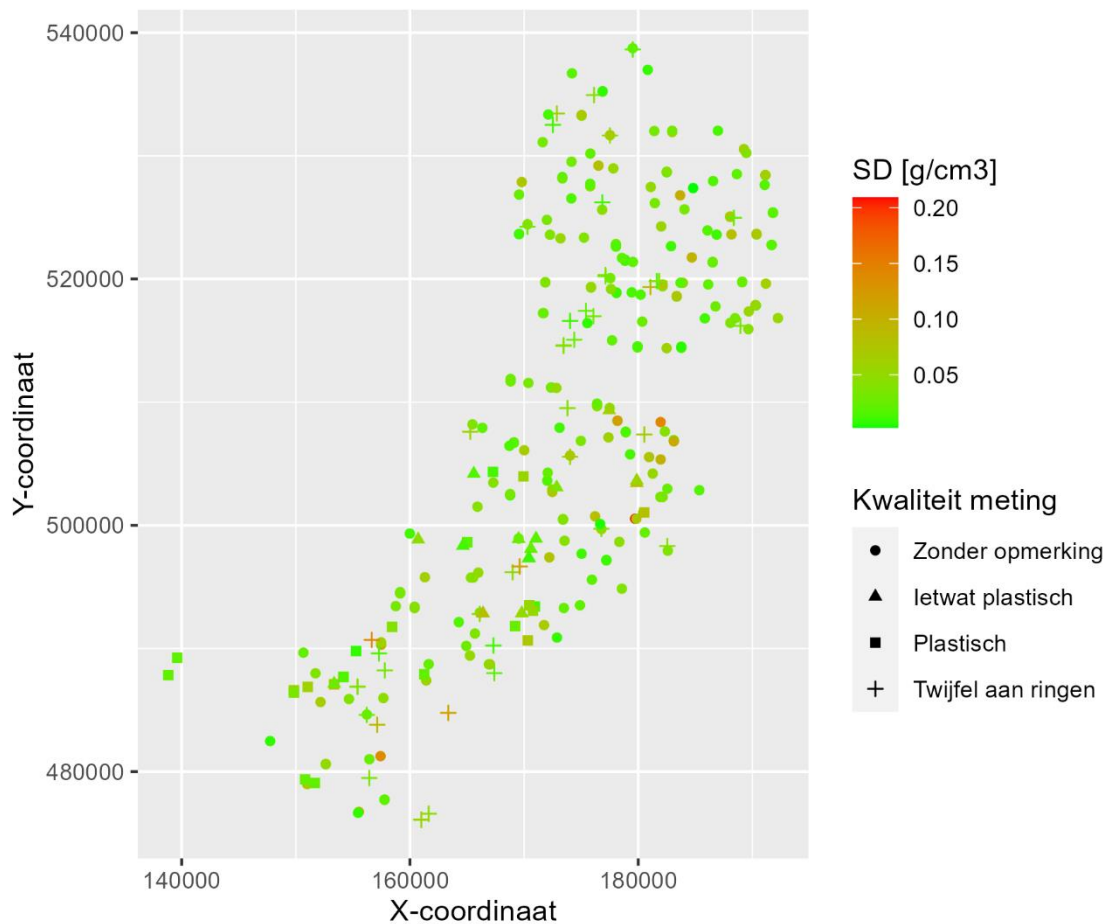


B

Figuur 6 Waargenomen bulkdichtheden op 30 cm onder maaiveld op de waarnemingslocaties voor kalibratie in de provincie Flevoland (A) en op de waarnemingslocaties voor kalibratie en validatie (B).

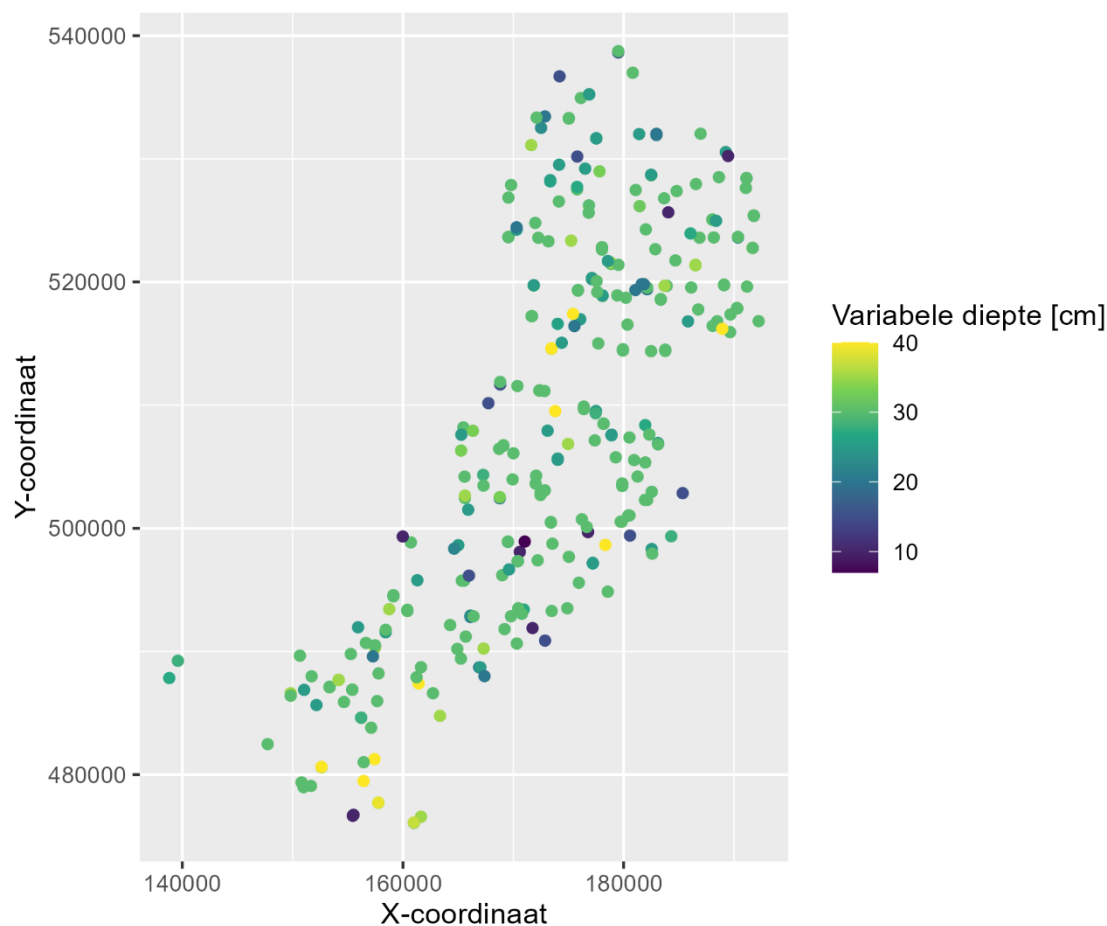
Figuur 7 geeft de ruimtelijke verdeling van de standaardafwijkingen van de drie bulkdichtheden die op elk van de kalibratie- en validatiewaarnemingslocaties zijn gemeten op 30 cm diepte. Tevens geeft deze figuur de indicatie van de kwaliteit van de monsternamen volgens de veldmedewerker. Hierbij verwijst 'plastisch' en 'ietwat plastisch' naar plastische of makkelijk vormbare klei, wat een goede monsternamen bemoeilijkt en mogelijk tot te lage meetwaarden kan leiden. 'Twijfel aan ringen' betekent dat mogelijk grond ontbreekt die wel bij het meetvolume hoort, bijvoorbeeld doordat grond bij het afsnijden of afdoppen uit de ring is gevallen. Dit is steeds weergegeven in de relevante grafieken later in dit hoofdstuk.

Een hoge standaardafwijking duidt op grote variatie in bulkdichtheid op korte afstand. Er is geen duidelijk ruimtelijk patroon in korteaafstandsvariatie van bulkdichtheid op 30 cm te herkennen. Ook lijkt geen verband aanwezig te zijn tussen korteaafstandsvariatie in bulkdichtheid op 30 cm en de kwaliteit van de monsternamen zoals geïndiceerd door de veldmedewerker.

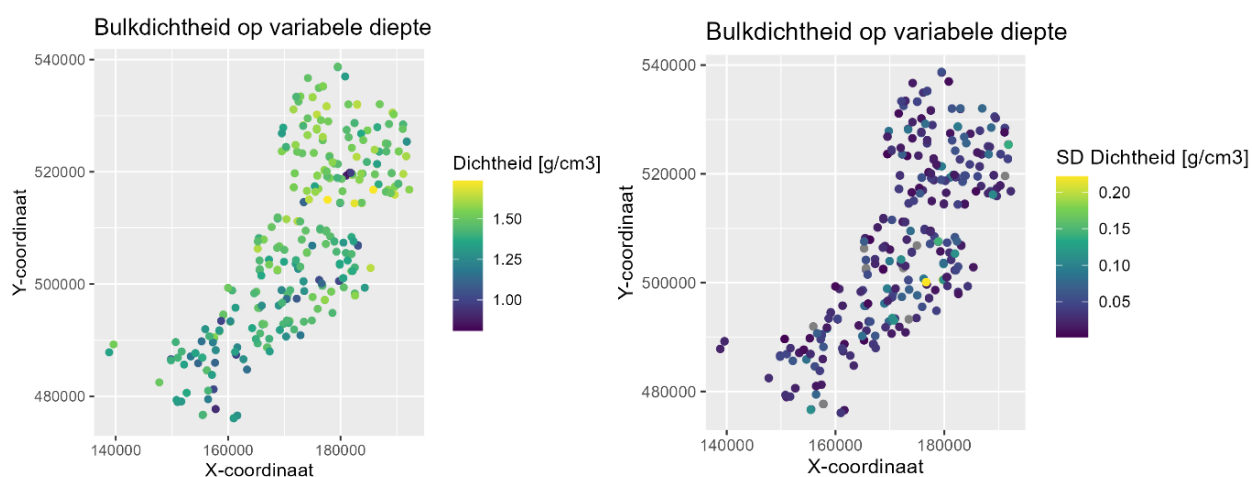


Figuur 7 Standaardafwijkingen van dichtheden, gemeten in drie ringen op 30 cm diepte, en indicatie van de kwaliteit van de veldmeting volgens de veldmedewerker. De kalibratie- en validatiepunten zijn weergegeven.

Bulkdichtheid is zowel op de vaste diepte van 30 cm als op variabele diepten gemeten, dat wil zeggen op diepten waar de veldmedewerkers aan de hand van een aantal criteria een verdichte laag vermoedden, zie paragraaf 2.3. Figuur 10 geeft de variabele diepten waarop veldmedewerkers een verdichte laag vermoedden op basis van de criteria in paragraaf 2.3. Figuur 9 geeft de gemiddelde bulkdichtheden die gemeten zijn in drie ringen op deze variabele diepten en de standaardafwijkingen van deze drie metingen.

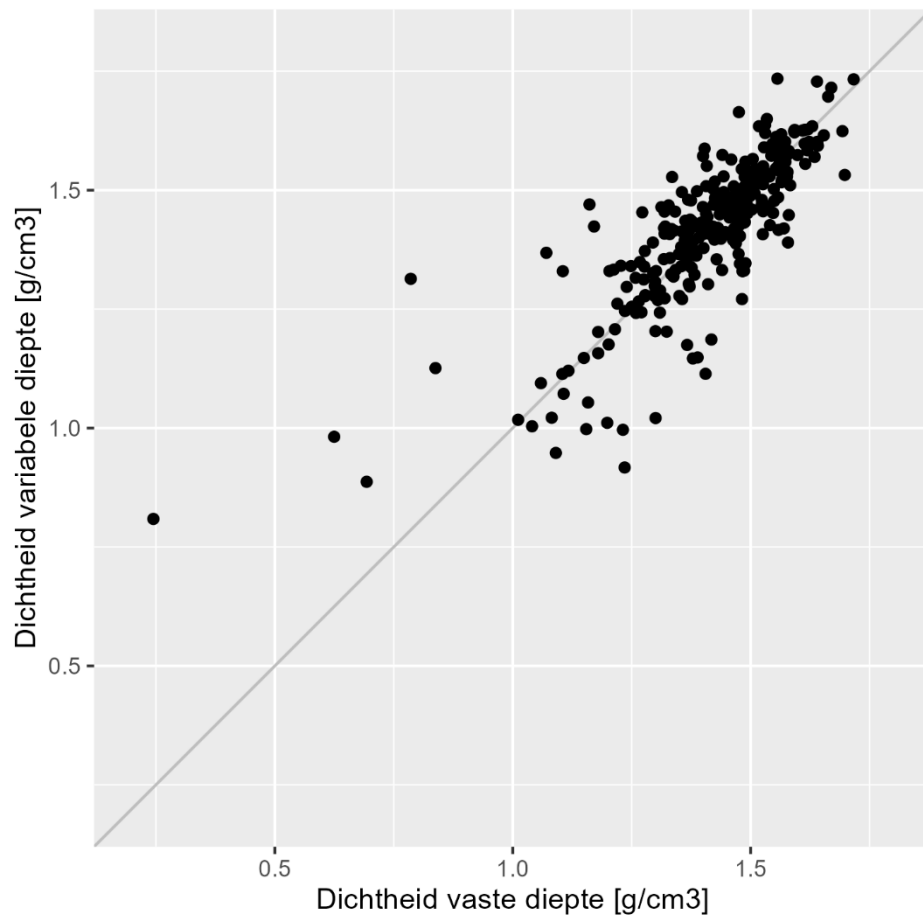


Figuur 8 Diepte waarop de ringen op variabele diepte zijn genomen.



Figuur 9 Bulkdichtheid en de standaarddeviatie van de bulkdichtheid, gemeten de op de variabele diepten, weergegeven in Figuur 8.

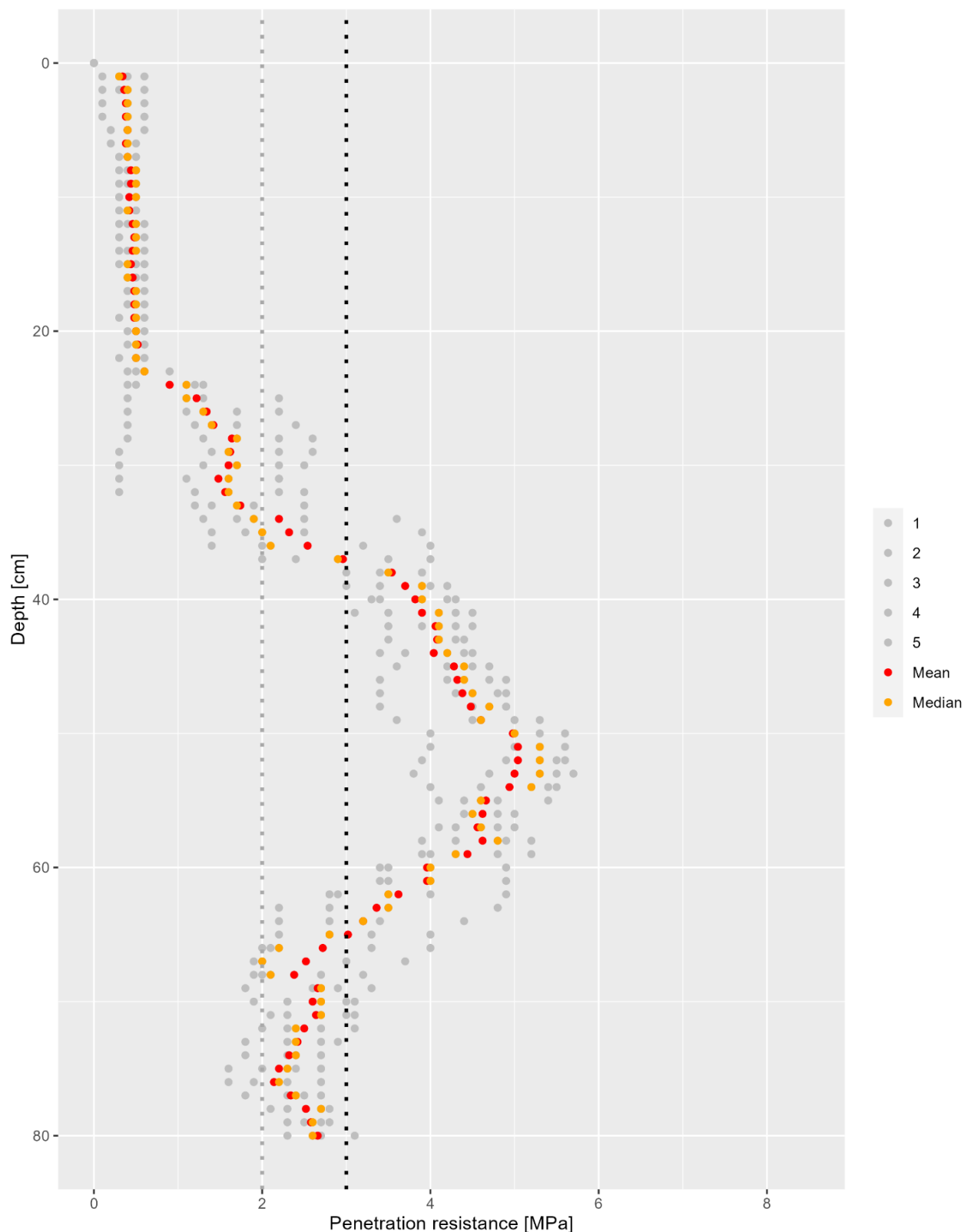
In Figuur 10 zijn de dichtheden die op de vaste en op de variabele diepten zijn gemeten tegen elkaar uitgezet. Uit Figuur 10 blijkt dat deze dichtheden met elkaar samenhangen. Hoewel duidelijk spreiding rondom de een-op-een-lijn aanwezig is, kan gesteld worden dat bij dichtheden tot ca. 1,25 g/cm³ op variabele diepte, de dichtheid op vaste diepte groter is (meer punten onder de lijn). Vanaf een dichtheid op variabele diepte van ca. 1,375 g/cm³ is de dichtheid op vaste diepte vaak kleiner (meer punten boven de lijn).



Figuur 10 *Correlatie tussen dichtheid op variabele diepten (waar de veldwerker een verdichte laag vermoedde) en de vaste diepte van 30 cm. De zwarte lijn is de een-op-een-lijn.*

3.1.2 Indringingsweerstand

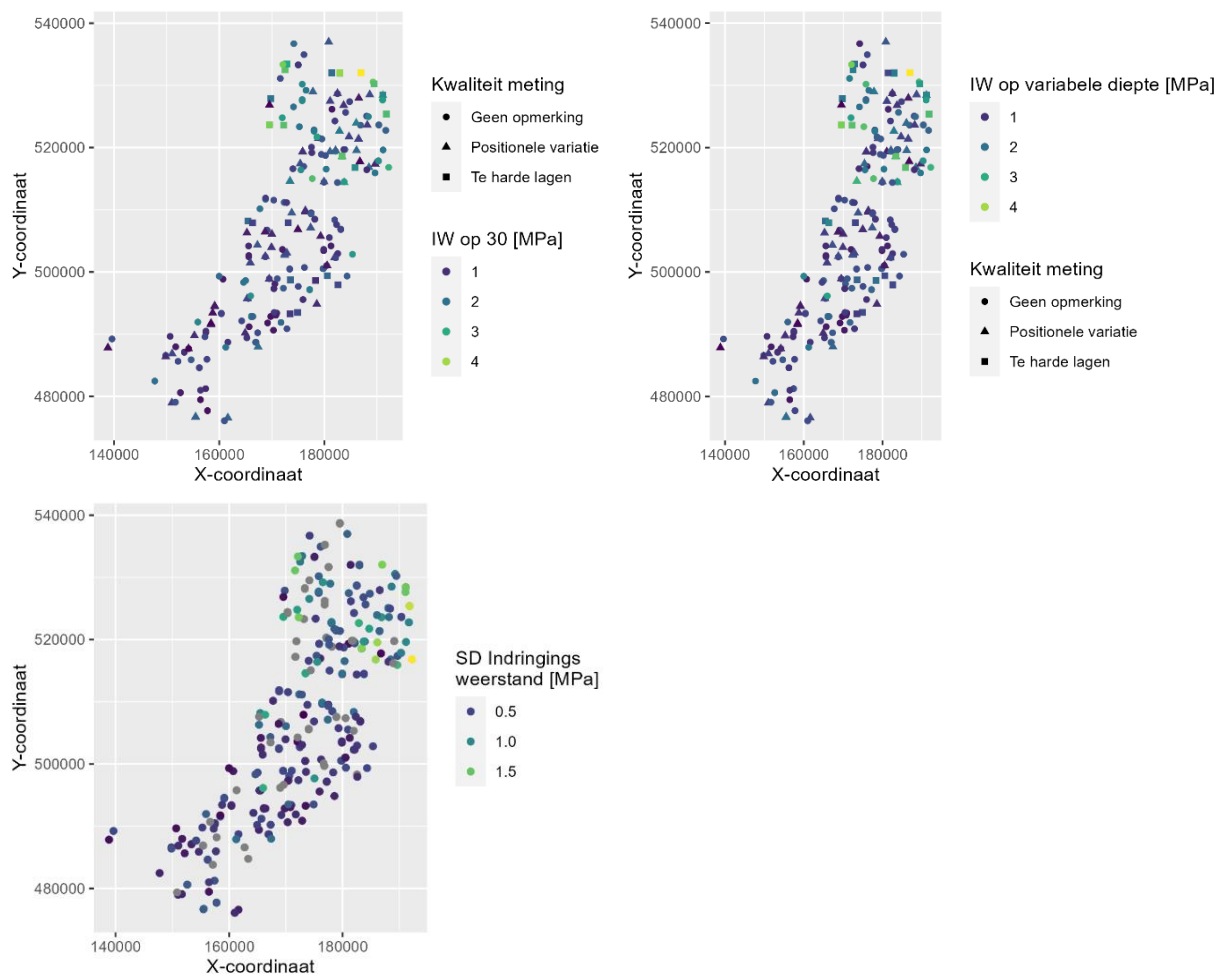
Figuur 11 geeft een voorbeeld van indringingsweerstand die op één locatie met een penetrologger zijn gemeten. Hier is te zien dat verschillende metingen op dezelfde locatie een spreiding aan meetwaarden laat zien. Dit kan een indicatie zijn van verschillen in weerstand op zeer korte afstand, verschillen in vochtgehalte of verschillen in het uitvoeren van de meting. Over het algemeen wordt het gemiddelde van een aantal metingen genomen per locatie voor verdere analyse.



Figuur 11 Voorbeeld van een profiel van indringingsweerstand, vijf herhalingen gemeten met een penetrologer op dezelfde locatie. Verticaal: diepte onder maaiveld (cm), horizontaal: indringingsweerstand (MPa).

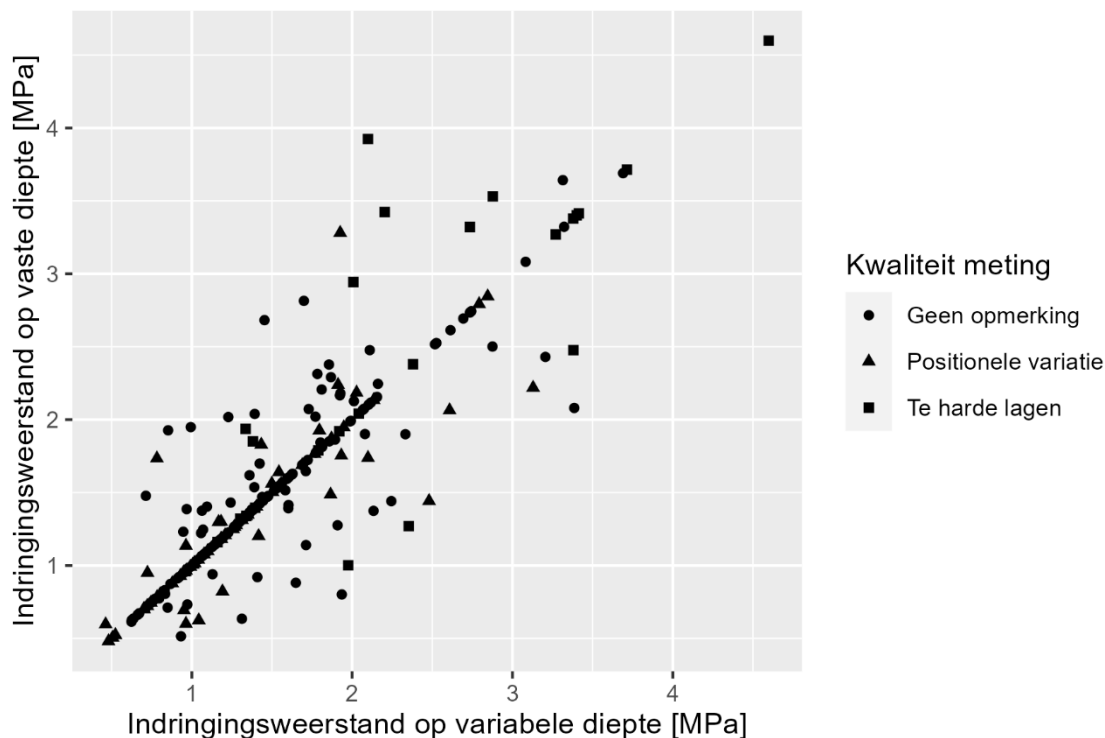
Figuur 12 geeft de indringingsweerstand die zijn gemeten op de vaste diepte van 30 cm (links) en op de variabele diepte waarop de veldmedewerker een verdichte laag vermoedde (rechts) en de standaarddeviatie van de metingen (onder). Dit is steeds het gemiddelde van 10 steken. De grootste indringingsweerstand, zowel op 30 cm als op variabele diepte, blijken voor te komen in de Noordoostpolder. Hier werden ook 'te harde lagen' vermeld door de veldmedewerker, dit betekent dat het niet mogelijk was de

indringingsweerstand over de volledige meetdiepte (0-80 cm -mv) te meten, omdat de penetrologger niet verder de grond in kon. Positionele variatie betekent dat iets is afgeweken van de geplande veldlocatie-inrichting zoals beschreven in paragraaf 2.3.2.



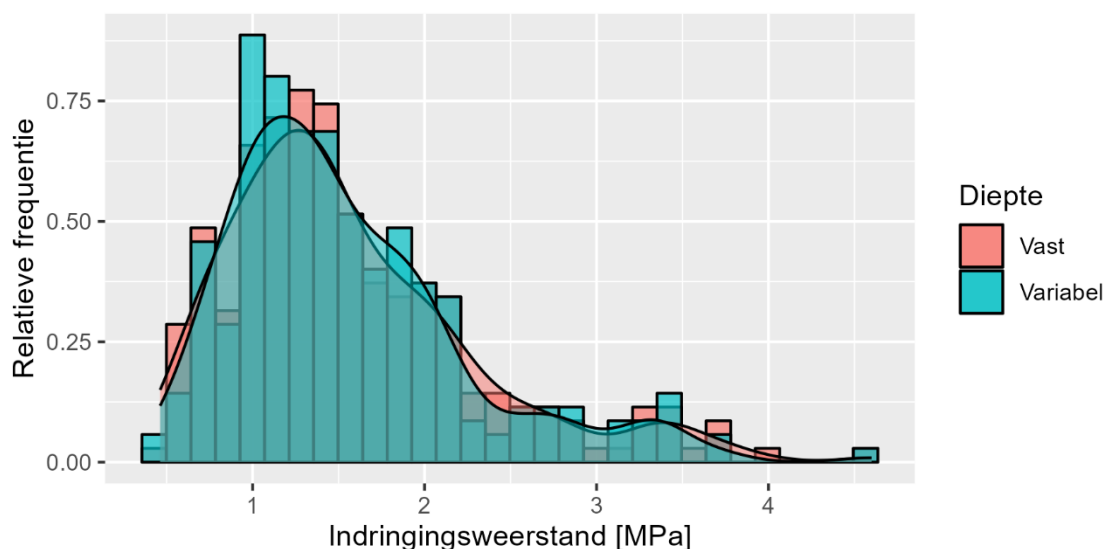
Figuur 12 Indringingsweerstand op 30 cm diepte (links) en op variabele diepte waarop de veldmedewerker een verdichte laag vermoedde op basis van de criteria in paragraaf 2.3 (rechts). Tevens is de indicatie die in het veld is gemaakt van de kwaliteit van de meting weergegeven.

In Figuur 13 zijn de indringingsweerstand die behoren bij de variabele en vaste diepten waarop dichtheden zijn gemeten tegen elkaar uitgezet. Wanneer op basis van de criteria die genoemd zijn in paragraaf 2.3 de veldwerker geen verdichte laag kon vermoeden, was de variabele diepte gelijk aan de vaste diepte van 30 cm. Dit verklaart dat een aantal punten in Figuur 13 exact op de een-op-een-lijn liggen. Voor de overige meetpunten is een grote spreiding te zien, maar wel met een lineaire samenhang.



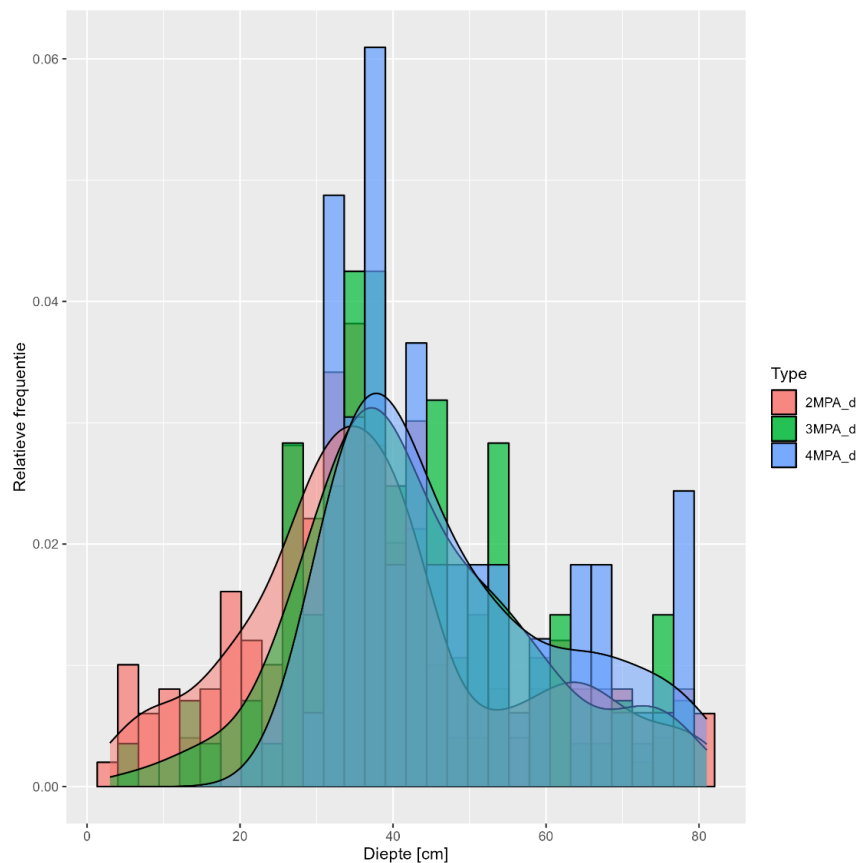
Figuur 13 Indringingsweerstand, gemeten op variabele diepten waarop de veldwerkers een verdichte laag vermoedden, uitgezet tegen indringingsweerstand op de vaste diepte van 30 cm op dezelfde locatie.

Uit Figuur 14 blijkt dat de indringingsweerstand die behoren bij de variabele en vaste diepten waarop dichtheden zijn gemeten, vergelijkbare verdelingen hebben. Meten op een standaarddiepte van 30 cm is dus voldoende en alleen deze waarden gebruiken voor het maken van de kaart levert geen grote fout op.



Figuur 14 Relatieve frequenties van indringingsweerstand behorende bij dichtheidsmetingen op variabele diepte en op de vaste diepte van 30 cm.

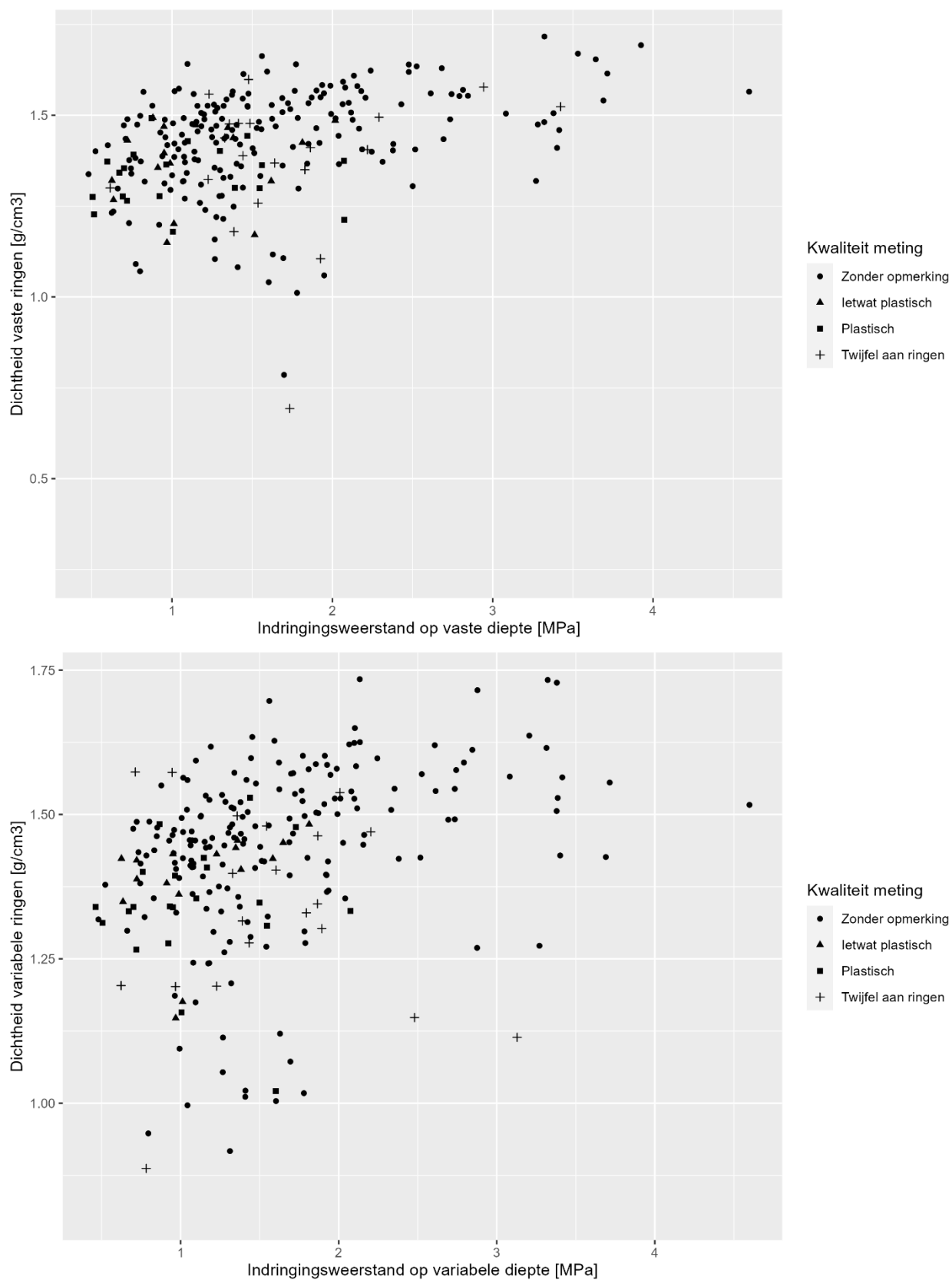
Figuur 15 geeft histogrammen van diepten waarop indringingsweerstand van 2, 3 en 4 MPa worden overschreden. De pieken van deze verdelingen zijn opeenvolgend in de diepte en liggen dichtbij elkaar tussen de 30 en 40 cm onder maaiveld.



Figuur 15 Histogrammen van de diepten waarop indringingsweerstand van 2, 3 en 4 MPa worden overschreden. Op de y-as staat de relatieve frequentie.

3.1.3 Samenhang tussen dichtheid en indringingsweerstand

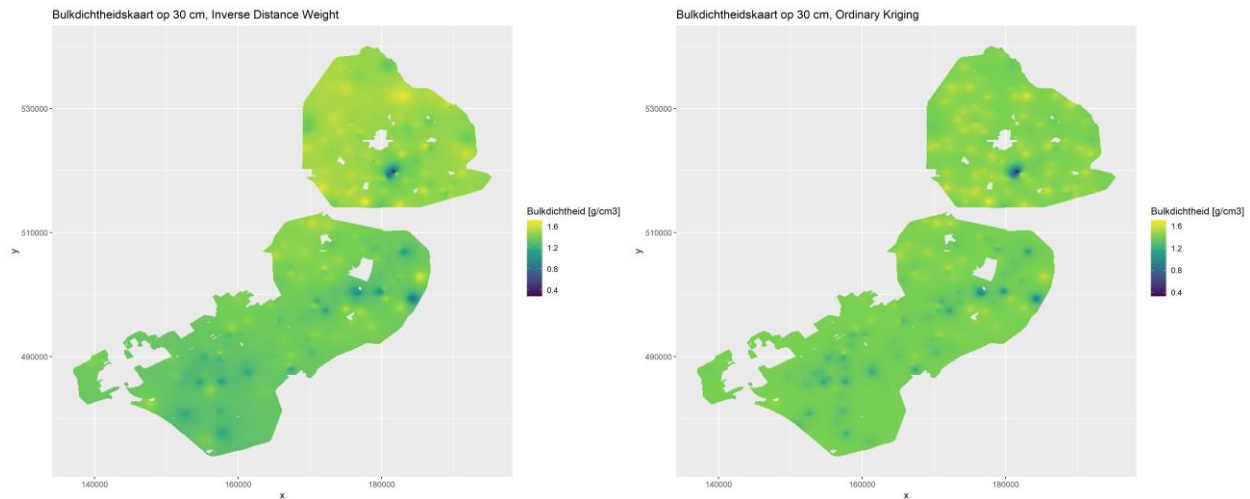
Figuur 16 geeft *scatterplots* van droge bulkdichtheid *versus* indringingsweerstand, op de vaste diepte van 30 cm en op de variabele diepten waarop in het veld op basis van een aantal criteria verdichte lagen zijn gedetermineerd (zie paragraaf 2.3). Er is geen samenhang tussen beide variabelen te zien. Opgemerkt moet worden dat de droge bulkdichtheid het effect van *compaction* reflecteert, terwijl indringingsweerstand ook andere processen zou kunnen weergeven. In de literatuur wordt beschreven dat de indringingsweerstand een optelsom is van de schijnbare cohesie, de bulkdichtheid, dichtheid van de zode en mogelijk de wrijvingsweerstand en schuifweerstand (Keller, 2004). De meetmethoden meten principieel iets anders, maar worden in de praktijk beide regelmatig gebruikt om een beeld van de aanwezigheid van verdichte lagen te krijgen. Daarbij kan op basis van bovenstaande geconcludeerd worden dat de indringingsweerstand wel geschikt is om op lokale schaal een indicatie te krijgen van verschillen in weerstand of dichtheid, maar op regionale schaal minder goed toepasbaar is. Dit wordt onderschreven door het geringe verband tussen beide metingen in Figuur 16.



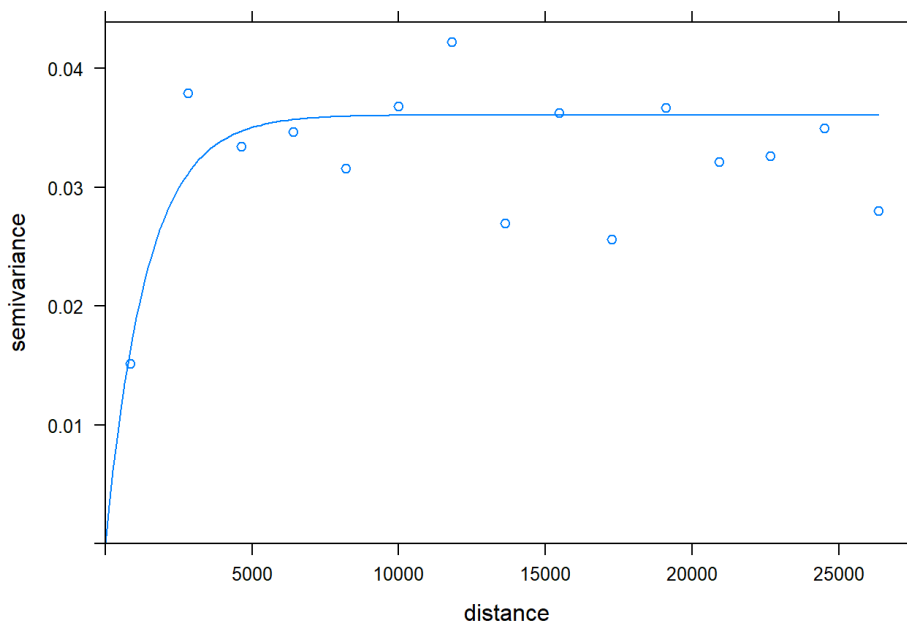
Figuur 16 Droge bulkdichtheid uitgezet tegen indringingsweerstand. Boven: op de vaste diepte van 30 cm. Onder: op de variabele diepte waar de veldmedewerker op basis van een aantal criteria een verdichte laag vermoedde (zie paragraaf 2.3).

3.2 Resultaten cartografie

De cartografie heeft zich beperkt tot de ruimtelijke verdeling van de droge bulkdichtheid op 30 cm diepte. Als eerste test zijn de droge bulkdichtheden geïnterpoleerd met *inverse distance weighting*, zie Figuur 17 links. Een toegankelijke beschrijving van de gebruikte geostatistische methoden in dit onderzoek is te vinden in Webster en Oliver (2007). Figuur 18 laat een semivariogram zien van de droge bulkdichtheid op 30 cm. Dit semivariogram is gebruikt bij interpolatie met *ordinary kriging*, zie Figuur 17 rechts. Hieruit blijkt dat de ruimtelijke samenhang tussen de meetpunten (de range) kleiner is dan 4000 m.



Figuur 17 Kaart van droge bulkdichtheid op 30 cm diepte. Links: interpolatie met *inverse distance weighing*, rechts interpolatie met *ordinary kriging*.



Figuur 18 Semivariogram van de metingen van bulkdichtheid op 30 cm diepte voor de provincie Flevoland. Distance (afstand) is in meters.

Op beide kaarten zijn de meetpunten duidelijk terug te zien. Dit duidt erop dat de afstand tussen de meetpunten groter is dan de *range* waarbinnen sprake is van ruimtelijke afhankelijkheid. Ook zijn de correlatiecoëfficiënten voor de validatieresultaten laag (Tabel 1).

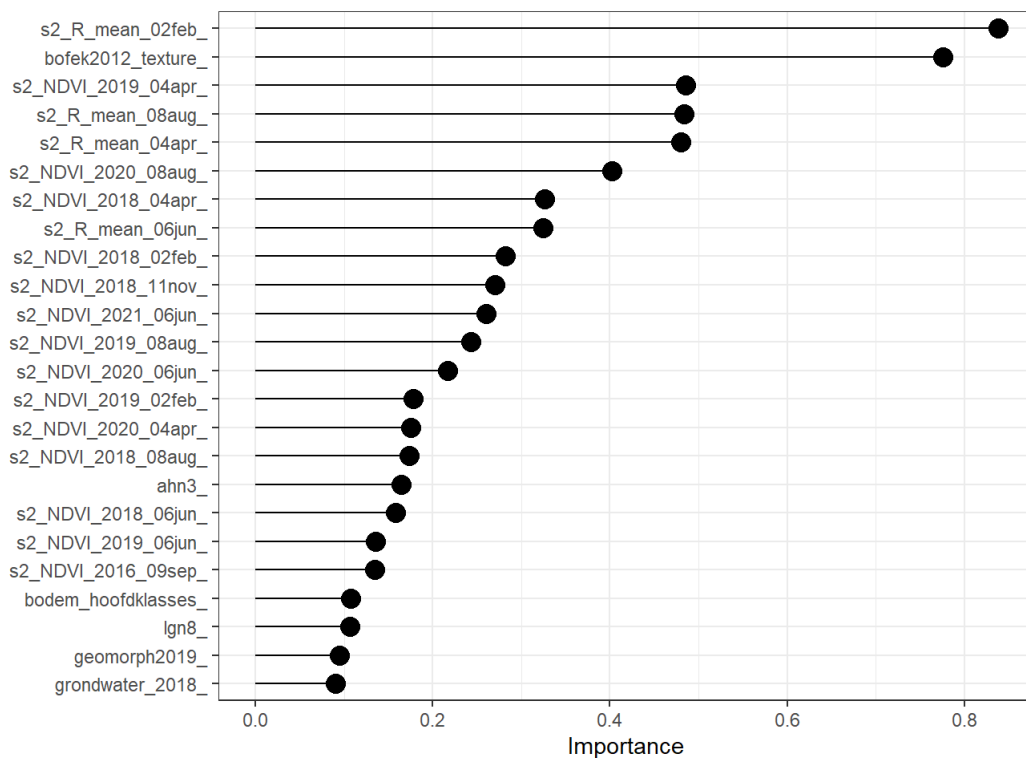
Vervolgens is onderzocht of de interpolatie kon worden verbeterd door gebruik te maken van de volgende hulpvariabelen:

- De hoofdklassen van de 1:50.000 Bodemkaart van Nederland (Brouwer e.a., 2018);
- Het Algemeen Hoogtemodel Nederland 3 (<https://www.pdok.nl/introductie/-/article/actueel-hoogtebestand-nederland-ahn>);
- Landelijk Grondgebruik Nederland (LGN) 8 (2018);
- Geomorfologische kaart Nederland, hoofdklassen;
- Grondwaterspiegeldieptekaart Nederland;
- Bodemfysische Eenheden Kaart Nederland 2012, hoofdklassen;
- De Normalised Difference Vegetation Index (NDVI) op verschillende data tussen 2016 en 2021, toegepast op Sentinel 2-satellietbeelden;
- De gemiddelde reflectie in de rode band van het zichtbare licht gemeten door Sentinel 2-satellietbeelden in februari van de jaren 2016 tot 2021.

De hulpvariabelen zijn geselecteerd op basis van beschikbaarheid en verwachte mogelijke correlatie met het voorkomen van een verdichte laag.

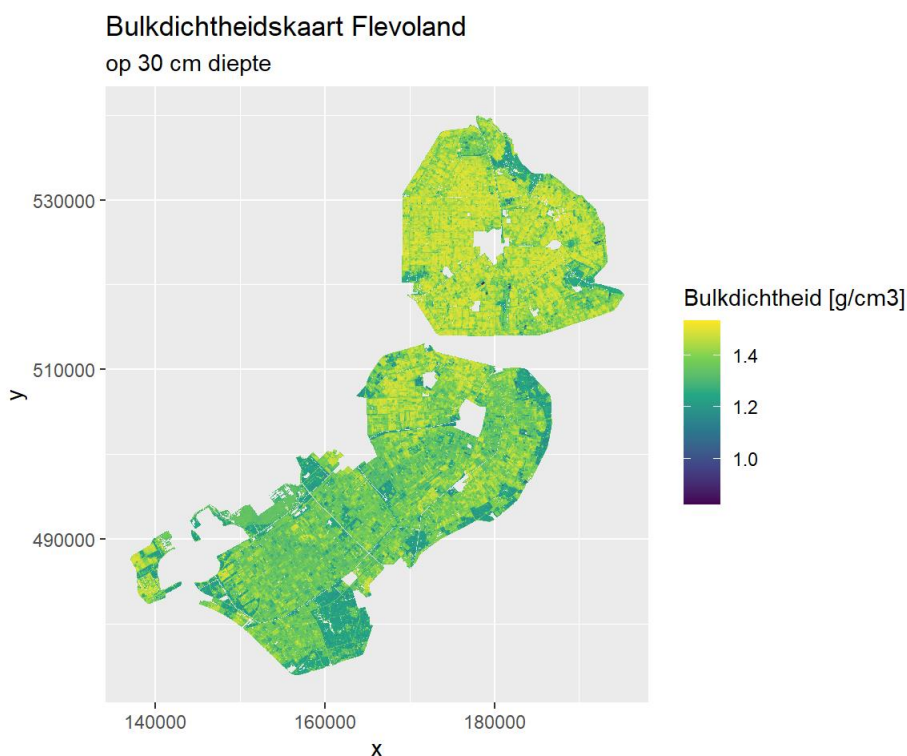
Bij geen van de hulpvariabelen was sprake van een lineaire samenhang met droge bulkdichtheid op 30 cm diepte. Daarom is gekozen voor ruimtelijke interpolatie met behulp van Random Forest (Breiman, 2001). Met deze methode is het mogelijk om de relatieve bijdrage van hulpvariabelen aan de ruimtelijke voorspelling van de doelvariabele te kwantificeren, zie Figuur 19. Hieruit blijkt dat de ruimtelijke variatie van droge bulkdichtheid op 30 cm diepte vooral wordt verklaard door de reflectie in de rode band van het Sentinel- beeld in februari (s2_R_mean_02feb) en de textuurcode van de bodemfysische eenhedenkaart BOFEK (Wösten e.a., 2012).

Dat textuurpatronen bijdragen aan het verklaren van de patronen van gemeten bulkdichtheid is niet verrassend en wordt bevestigd in de literatuur (Bakema e.a., 2023). De sterke bijdrage van de ruimtelijke patronen gemeten in de rode band van het satellietbeeld in de winter kan mogelijk verklaard worden door vegetatie en bouwplanverschillen. De rode band is indicatief voor vegetatie, in de winter zijn dat percelen met gras, een groenbemester of andere vegetatie. Ook is het wellicht een indicatie van kleurverschil op de akkers, bijvoorbeeld als gevolg van vochtverschillen of grondsoort. De aan- of afwezigheid van vegetatie en/of kleurverschillen op de akkers zijn mogelijk dus goede voorspellers voor het al dan niet voorkomen van verdichting op een perceel. Waarom de rode band een betere verklarende variabele is dan de NDVI, ontworpen voor het onderscheiden van groene vegetatie, is niet duidelijk. Ook is het opvallend dat de AHN, de bodemhoofdklassen-, LGN-, geomorfologie- en grondwaterspiegeldieptekaarten zo weinig verklarende kracht hebben in deze kartering, hoewel bekend is dat zij een relatie kunnen hebben met het voorkomen van verdichte lagen. Een lager gelegen deel van een veld of peilgebied zal langer nat blijven en dus een groter risico lopen op verdichting, omdat grondbewerking volvelds plaatsvindt op een moment dat het merendeel van een perceel dat aan kan. De geomorfologische kaart en de bodemkaart hebben doorgaans een goede correlatie met de hoogtekarte, ook omdat het voorkomen van veen of ongerijpte klei in de ondergrond kan leiden tot lager gelegen delen door inklinking van klei en oxidatie van veen. Een reden voor deze lage verklarende kracht van deze variabelen kan zijn dat de polders van de provincie Flevoland nog relatief jong zijn en het herstellend vermogen van de bodem, zeker op kleiige, niet-gediepploegde percelen, relatief groot is. Daarbij geldt dat door hun oorsprong, drooggemalen zeebodem, de bodemopbouw in de bovengrond relatief homogeen is en de hoogteverschillen klein zijn. Op de kaarten en in de grafieken met puntdata is een trend te zien in toenemende dichtheid met leeftijd van de polder (drooglegging is begonnen met de Noordoostpolder, via oostelijk Flevoland naar westelijk Flevoland) en dus met de mate van bodemvorming die heeft plaatsgevonden. Dit ligt in de lijn der verwachting. Hoewel leeftijd van de polder of de bodem niet is meegenomen in de verklarende variabelen, kan dit wel een factor zijn met verklarende kracht. Gezien de uitkomst van de verklarende-krachtanalyse (Figuur 19) en het verschil in leeftijd en ontstaansgeschiedenis van de provincie Flevoland ten opzichte van het merendeel van de rest van Nederland, kan op basis van deze studie worden geconcludeerd dat herhaling van deze studie in andere delen van Nederland mogelijk tot andere resultaten zal leiden. Opgemerkt moet worden dat de kopakkers van percelen niet zijn meegenomen in dit onderzoek (paragraaf 2.1).



Figuur 19 Relatieve bijdrage (relative importance) van hulpvariabelen bij de ruimtelijke voorspelling van droge bulkdichtheid op 30 cm diepte met Random Forest.

Figuur 20 geeft de ruimtelijke voorspellingen met Random Forest.



Figuur 20 Droge bulkdichtheid van de bodem op 30 cm diepte, ruimtelijke voorspelling met Random Forest.

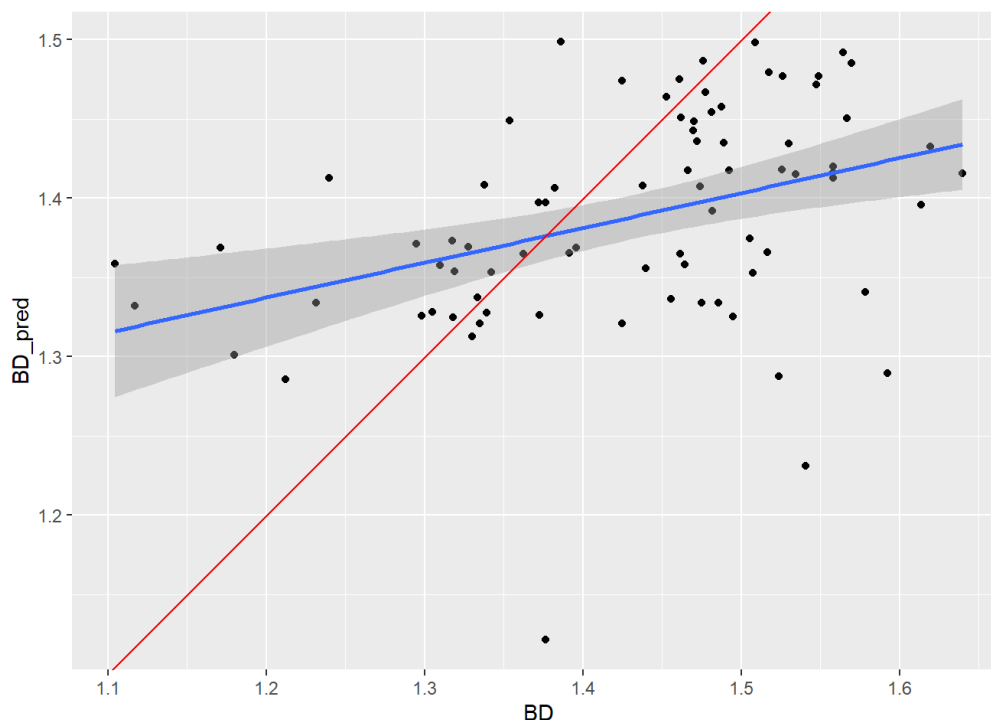
De verschillende kaarten zijn gevalideerd met behulp van de waarnemingen op de 112 validatielocaties (paragraaf 2.2). De resultaten staan in Tabel 1. De resultaten voor Inverse Distance Weighting en Ordinary Kriging zijn vergelijkbaar, de resultaten voor Random Forest zijn iets hoger. Dit betekent iets beter voor de correlatiecoëfficiënt, maar slechter voor de RMSE en de *bias*.

Tabel 1 Validatieresultaten van de verschillende kaarten van bulkdichtheid op 30 cm diepte. De correlatiecoëfficiënt geeft de correlatie weer tussen de geschatte waarden en de eigenlijke waarden op de validatielocaties.

Metriek	Inverse Distance Weight (IDW)	Ordinary Kriging (OK)	Random Forest (RF)
RMSE (g/cm ³)	0,15	0,14	0,18
Correlatiecoëfficiënt	0,25	0,24	0,38
ME (Bias)	0,03	0,02	0,04

Figuur 21 vat de resultaten van de validatie samen voor de kaart gemaakt met Random Forest, weergegeven in Figuur 20. De *root mean squared prediction error* bedraagt 0,18 g/cm³, de *bias* is 0,04 g/cm³, de correlatiecoëfficiënt is 0,38. Deze waarden geven aan dat de kaart (en de andere kaarten in Figuur 17) niet of slechts beperkt in staat is (zijn) de ruimtelijke variatie in droge bulkdichtheid op 30 cm diepte in Flevoland weer te geven. Dit heeft mogelijk te maken met de geringe verklarende kracht van de hulpvariabelen en de geringe ruimtelijk samenhang tussen de metingen dan wel de meetdichtheid. De kaart in Figuur 20 geeft ruimtelijke patronen gedetailleerd weer, met hoge resolutie, als gevolg van de hoge resoluties in de gebruikte hulpinformatie. Hoge resolutie mag echter niet worden verward met een hoge nauwkeurigheid.

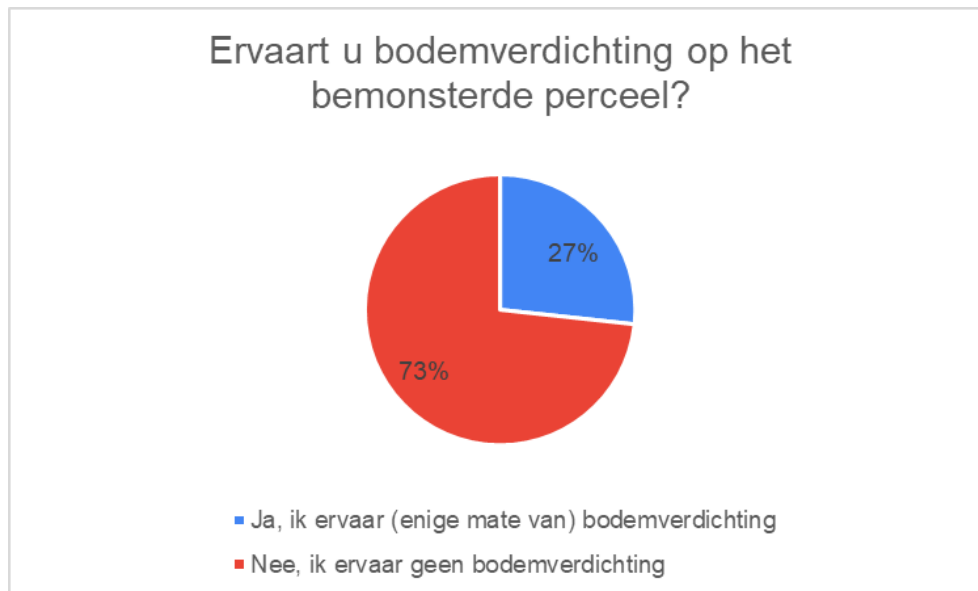
De ruimtelijke voorspellingen met Random Forest zijn herhaald voor de Noordoostpolder en oostelijk en zuidelijk Flevoland afzonderlijk, maar dit leidde niet tot nauwkeurigere ruimtelijke voorspellingen. Gezien de tegenvallende resultaten van de cartografie van de droge bulkdichtheid op 30 cm en het ontbreken van de verwachting dat dit beter zou kunnen uitpakken voor de andere in het veld gemeten parameters, is besloten de cartografie van de andere parameters niet uit te voeren.



Figuur 21 Ruimtelijke voorspellingen van droge bulkdichtheid van de bodem op 30 cm diepte (g/cm³), gemaakt met Random Forest, uitgezet tegen waarnemingen op de 112 validatielocaties. De rode lijn is de een-op-een-lijn, de blauwe lijn een least-squares regressielijn met 95%-betrouwbaarheidsinterval.

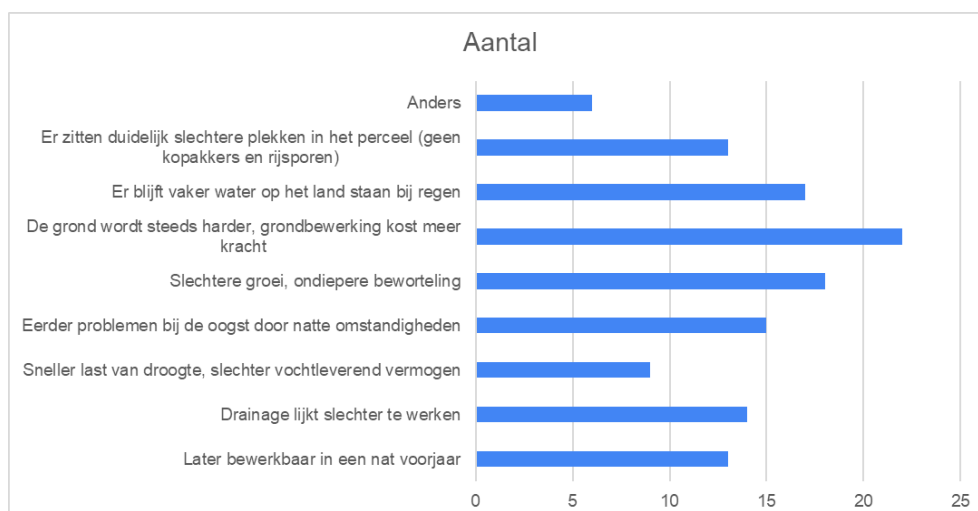
3.3 Resultaten enquête

Voor 171 van de 305 punten waar veldonderzoek heeft plaatsgevonden, hebben landgebruikers de enquête ingevuld geretourneerd, dit is 55% van het totaal. Opgemerkt moet worden dat de kopakkers niet zijn meegenomen in deze studie en respondenten zijn gevraagd naar de situatie op de locatie in het perceel waar een meting heeft plaatsgevonden zoals aangegeven op het meegeleverde kaartje (Figuur 5). De hierna volgende resultaten geven percentages ten opzichte van het totaal aantal geretourneerde enquêtes. Figuur 22 laat zien dat op 73% van de punten de respondenten geen bodemverdichting ervaren.



Figuur 22 Respons op "Ervaaft u bodemverdichting op het bemonsterde perceel?"

De respondenten (27%) die antwoordden verdichting te ervaren, konden aangeven hoe deze verdichting zich volgens hen manifesteerde. Figuur 23 geeft een overzicht van de antwoorden.



Figuur 23 Verschuinselen die 27% van de respondenten (Figuur 22) als resultaat van verdichting ervaart.

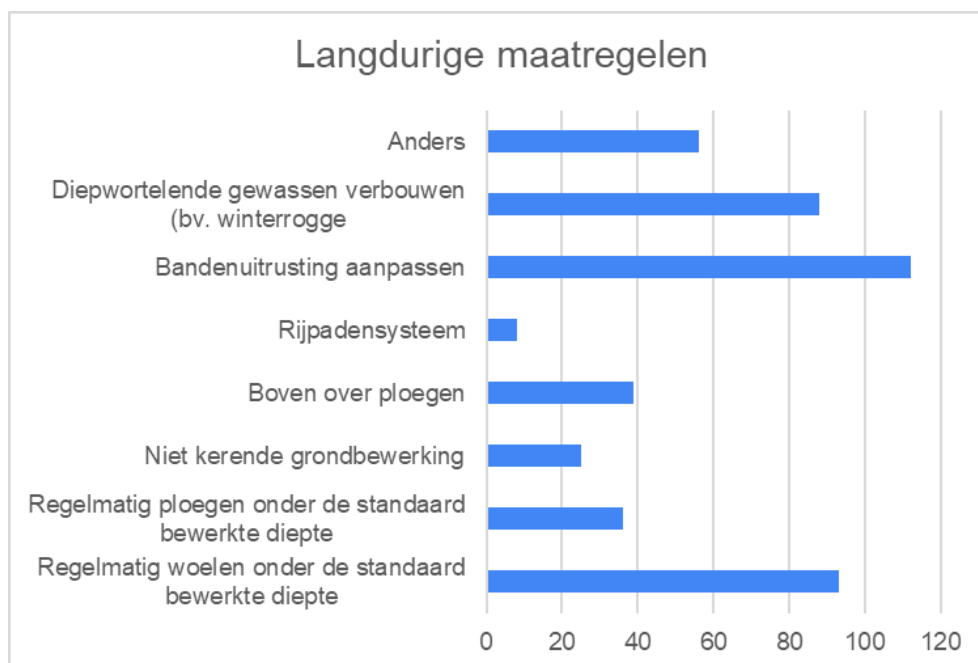
Op de vraag of er (langdurig) maatregelen worden genomen om bodemverdichting te voorkomen, antwoordde 85% van de respondenten (van het totaal aantal respondenten) bevestigend, zie Figuur 24. Uit vergelijking met ervaren bodemverdichting blijkt dat 0 tot 15% van de respondenten wel verdichting ervaart,

maar geen (langdurige) maatregelen treft om verdichting te voorkomen. Verder blijkt dat 58 tot 73% van de respondenten geen verdichting ervaart, maar wel (langdurig) maatregelen treft om verdichting te voorkomen. Een mogelijkheid kan zijn dat geen verdichting (in gewasgroei) wordt ervaren, omdat dit nog gecompenseerd kan worden door managementmaatregelen zoals bemesting en beregening. Dit zou mogelijk het hoge percentage kunnen verklaren dat wel maatregelen neemt zonder ervaren bodemverdichting.



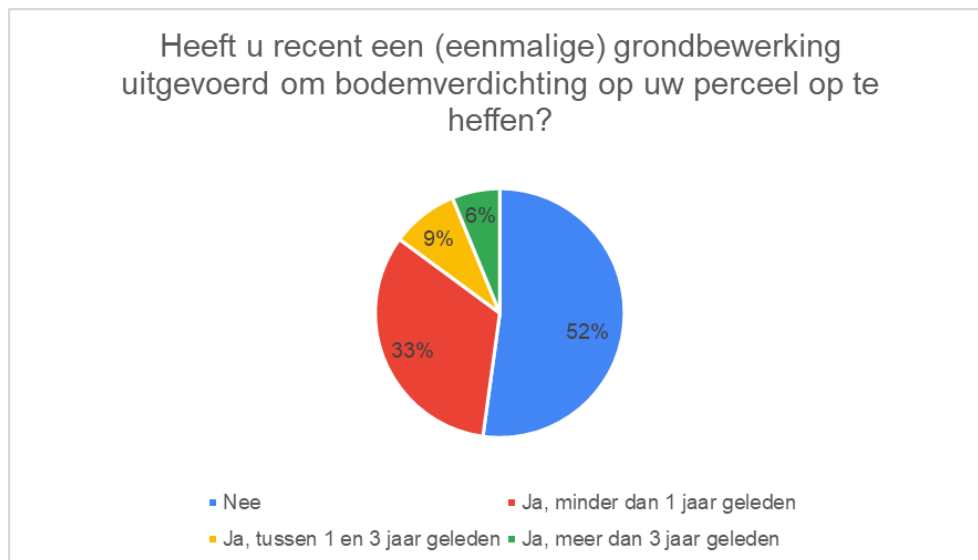
Figuur 24 Respons op de vraag of (langdurig) maatregelen worden genomen om bodemverdichting te voorkomen.

Figuur 25 vat de (langdurige) maatregelen samen die 85% van de respondenten neemt.



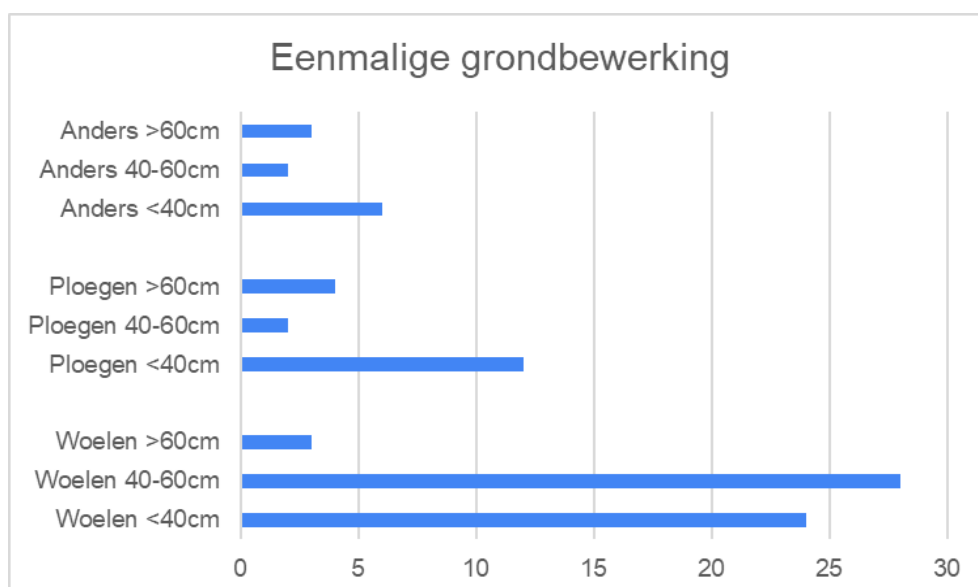
Figuur 25 Langdurige maatregelen die 85% van de respondenten (Figuur 24) neemt om bodemverdichting te voorkomen.

Naast het langdurig nemen van maatregelen kunnen landgebruikers ook eenmalig een grondbewerking uitvoeren om effecten van bodemverdichting op te heffen. Figuur 26 geeft een overzicht van de antwoorden op de vraag of recentelijk een dergelijke, eenmalige grondbewerking heeft plaatsgevonden. Uit een vergelijking met Figuur 22 blijkt dat 21 tot 48% van de respondenten geen bodemverdichting ervoer, maar wel een eenmalige grondbewerking heeft uitgevoerd om bodemverdichting op te heffen. Dit kan betekenen dat de bodemverdichting een relict van eerdere bedrijfsvoering was en de eenmalige grondbewerking effectief is geweest, waardoor ze geen bodemverdichting meer ervaren of dat de eenmalige grondbewerking preventief is uitgevoerd.



Figuur 26 Respons op de vraag of recentelijk een (eenmalige) grondbewerking is uitgevoerd om bodemverdichting op een perceel op te heffen.

Figuur 27 laat zien welke eenmalige maatregelen respondenten hebben uitgevoerd om bodemverdichting op te heffen. Mogelijk is deze vraag ook opgevat als het uitvoeren van een bodembewerking om verdichting te voorkomen.



Figuur 27 Type (eenmalige) grondbewerking die 48% van de respondenten (Figuur 26) heeft uitgevoerd om bodemverdichting op te heffen.

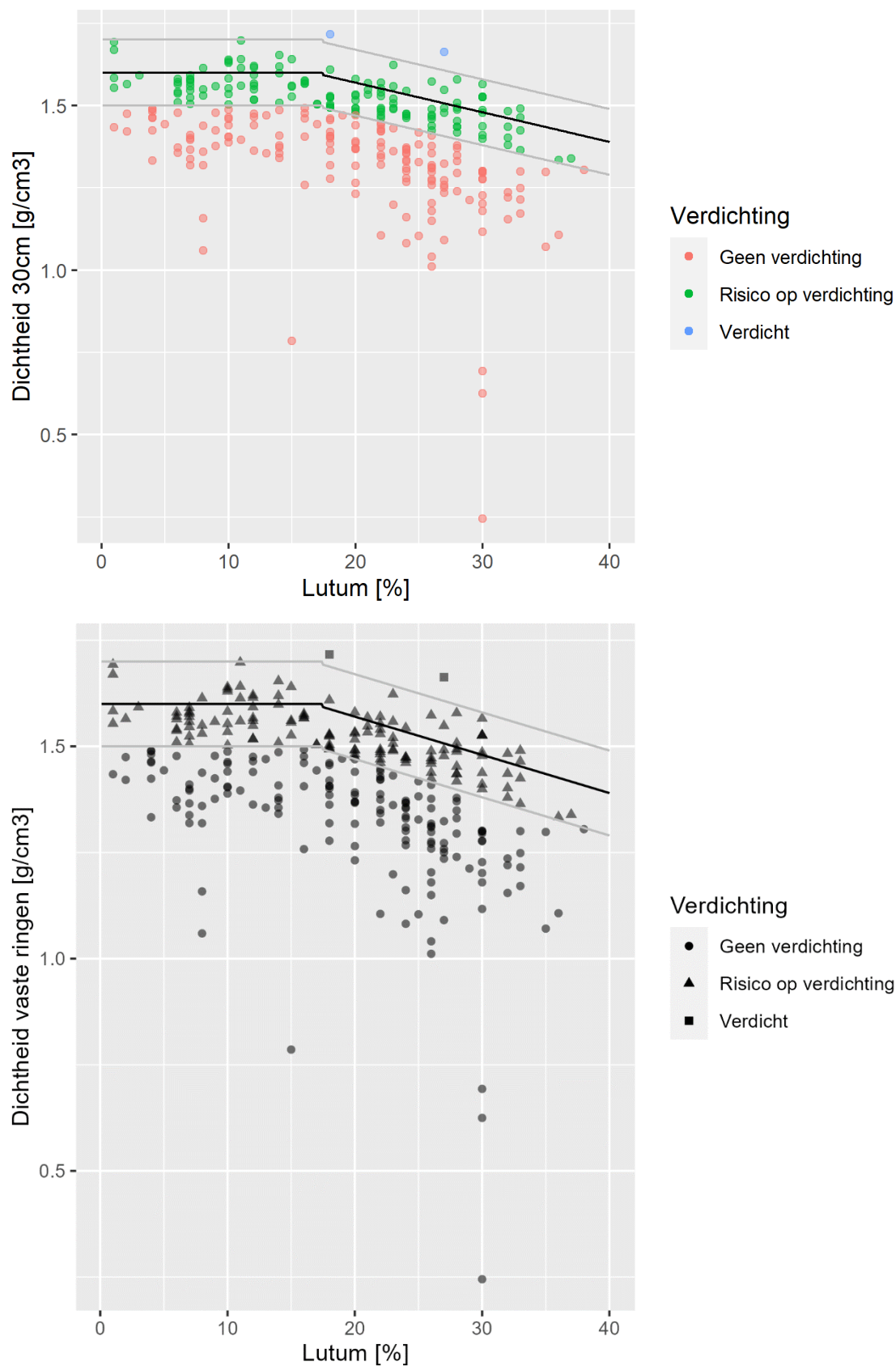
4 Interpretatie resultaten veldonderzoek en enquête

4.1 Interpretatie bulkdichtheden en indringingsweerstand

Voor de droge bulkdichtheid hebben Van den Akker en De Groot (2008) een grenswaarde van $1,6 \text{ g/cm}^3$ voor zandgrond en lichte zavel (tot 17,5% lutum) voorgesteld, waarbij boven deze waarde sprake is van een verdichte laag. Voor kleigrond (vanaf 17,5% lutum) wordt deze grenswaarde gecorrigeerd voor het lutumgehalte. Deze definitie van verdichting was het uitgangspunt voor het beoordelen van de meetresultaten van dit onderzoek. Gezien zowel de waargenomen onzekerheid door meetomstandigheden en normale meetonzekerheid van ringmonsters ($0,06 \text{ g/cm}^3$) als de constatering door Bakema e.a. (2023) dat de grenswaarde niet is gevalideerd in Nederland en met de nodige terughoudendheid moet worden toegepast, is het inzichtelijker en wellicht reëler om drie klassen te hanteren voor al dan niet verdichte lagen, in plaats van twee als operationele indicatie van de aanwezigheid van een verdichte laag. Ten tijde van dit onderzoek was geen informatie voorhanden om de klassengrenzen onderbouwd te kiezen, afgezien van de normale meetonzekerheid. Daarom is gekozen voor klassengrenzen die $0,1 \text{ g/cm}^3$ van de door Van den Akker en De Groot voorgestelde grenswaarde af liggen. Dit betekent dat de interpretatie van de klassen alleen indicatief kan worden gebruikt. Ook moet in dit kader opgemerkt worden dat verschillende bronnen in de literatuur, en recent ook Nederlandse resultaten in het BoVer-project¹, laten zien dat een verschil in bulkdichtheid, ook als deze onder de grenswaarden ligt, kan leiden tot verschillen in gewasopbrengsten. De constatering dat de grenswaarden beperkt onderbouwd zijn en dat het merendeel van de gemeten droge bulkdichtheden in de provincie onder de grenswaarde liggen terwijl door de provincie, het waterschap en landbouwers in het gebied waarnemingen van verdichting worden gerapporteerd en waarden onder de grenswaarde al kunnen leiden tot een afname van gewasproductie, was een van de aanleidingen voor het opzetten en uitvoeren van de enquête (paragraaf 2.5 en 3.3).

In figuur 4 zijn de meetwaarden van bulkdichtheid voor dit onderzoek weergegeven ten opzichte van het lutumpercentage ter illustratie van de gekozen klassen en de grenswaarde van $1,6 \text{ g/cm}^3$ (zwarte lijn). Wat opvalt in figuur 4 is dat de maxima en de wolk van waarnemingen het door de grenswaarde gedefinieerde verband met het lutumgehalte onderschrijven. Dit ondersteunt de keuze voor het gebruik van de BOFEK-klassen als hulpvariabele, eventueel had ook een lutumkaart van de provincie gebruikt kunnen worden. Wat ook opvalt, is dat het merendeel van de meetwaarden onder de grenswaarde(n) valt, met slechts enkele punten die worden aangemerkt als verdicht en/of boven de zwarte lijn liggen.

¹ <https://tkideltatechnologie.invoermodule.nl/project/bodemverdichting-verdiept-bover/>



Figuur 28 Gemeten dichtheden uitgezet tegen het lutumpercentage op de locatie. Lutumpercentages zijn afkomstig uit de profielbeschrijvingen van Brouwer e.a. (2018). De zwarte lijn geeft de grenswaarden aan uit Van den Akker en de Groot (2008), de legenda is operationeel gekozen in dit project, maar kan niet onderbouwd worden.

Voor indringingsweerstand worden verschillende streef- of grenswaarden gehanteerd in de literatuur en de praktijk. Een vrij gangbare interpretatie is dat wortels van gewassen boven een waarde van 2 MPa moeite krijgen om door een laag heen te groeien en dat dit boven een waarde van 3 MPa bijna onmogelijk wordt of dat wortelgroei belemmerd wordt in de laag, en wortels eerder horizontaal over de laag gaan groeien (Van Tol e.a., 2018; Bakema e.a., 2023). In de literatuur worden ook lagere waarden genoemd (Van Orsouw e.a., 2022). Wel is bekend dat de indringingsweerstand, en dus de hinder die wortels daarvan ondervinden, sterk afhankelijk is van het vochtgehalte van de bodem, en dus verandert gedurende een groeiseizoen.

De daadwerkelijke hinder die planten van een verdichte laag zullen ondervinden, hoe deze ook gedefinieerd is in grenswaarden van droge bulkdichtheid of indringingsweerstand, is daarnaast afhankelijk van de weers- en groeiomstandigheden voor een plant. Zolang er geen vochtoverschot of -tekort dreigt of is, zal de schade voor de plant beperkt zijn. Iedere plantensoort heeft een andere gevoeligheid voor vochttekort of overschot en een verschillende groeikracht in de wortels. Ook maakt het voor de uiteindelijke ontwikkeling van de plant uit wanneer in het groeiseizoen een plant stress ervaart door een teveel of tekort aan water (Bakema e.a., 2023; Dik e.a., 2022).

Figuur 14 laat zien dat het verband tussen bulkdichtheid en indringingsweerstand beperkt tot niet aanwezig is in deze studie. Omdat beide parameters fundamenteel iets anders weergeven en omdat de indringingsweerstand niet genormaliseerd is voor verschillen in vochtgehalte, is dat niet onverwacht. Wel laat het zien dat, hoewel beide metingen in de praktijk worden gebruikt om een beeld te krijgen van de aanwezigheid van mogelijk verdichte lagen, het resultaat afhankelijk is van de definitie van een verdichte laag (*compaction* versus *shear*), de data-analyse (boven een grenswaarde versus de vorm van de indringingsweerstandcurve, in dit onderzoek niet onderzocht), de meetomstandigheden en opzet. Daarbij is de spreiding in indringingsweerstand gemeten op de vaste (30 cm) en op de variabele diepte gelijk, in tegenstelling tot de spreiding in droge bulkdichtheden.

4.2 Combinatie van veldwaarnemingen en enquêteresultaten

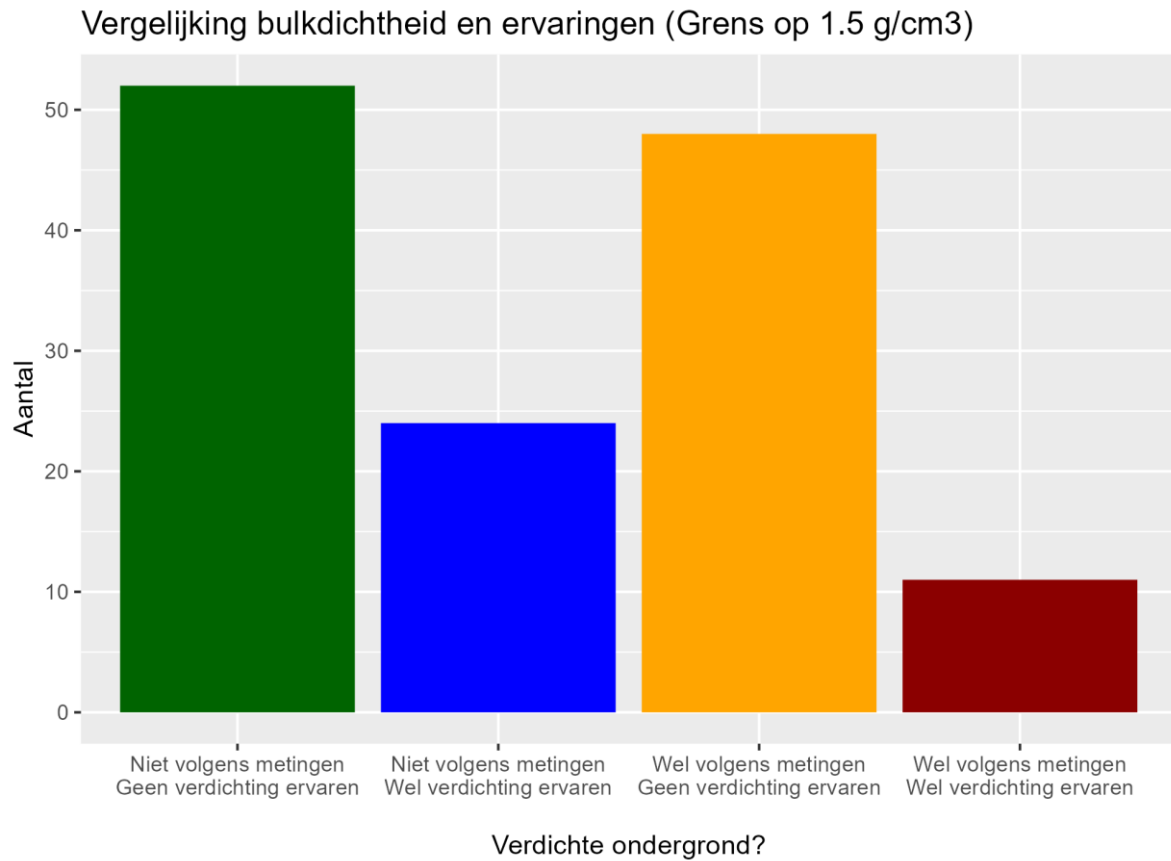
De resultaten van de bemonstering in het veld en de enquête zijn gecombineerd om de volgende vragen te kunnen beantwoorden:

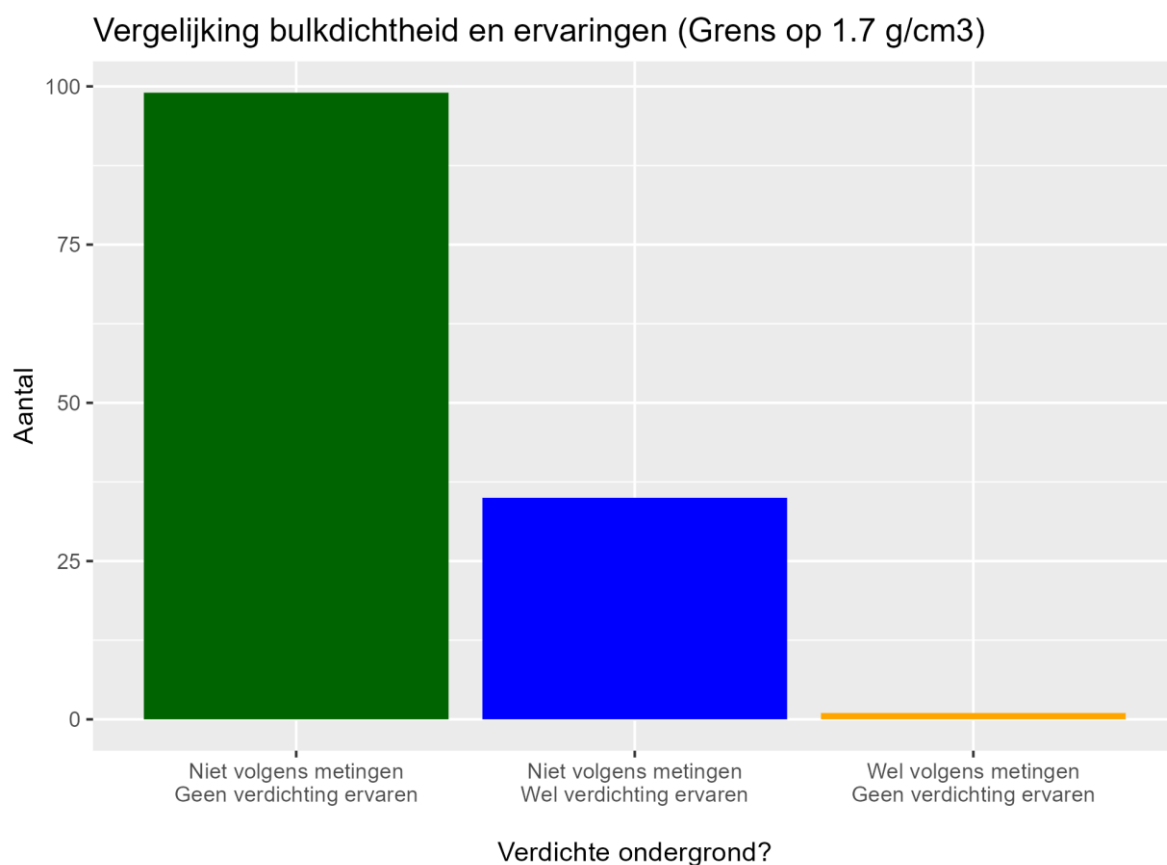
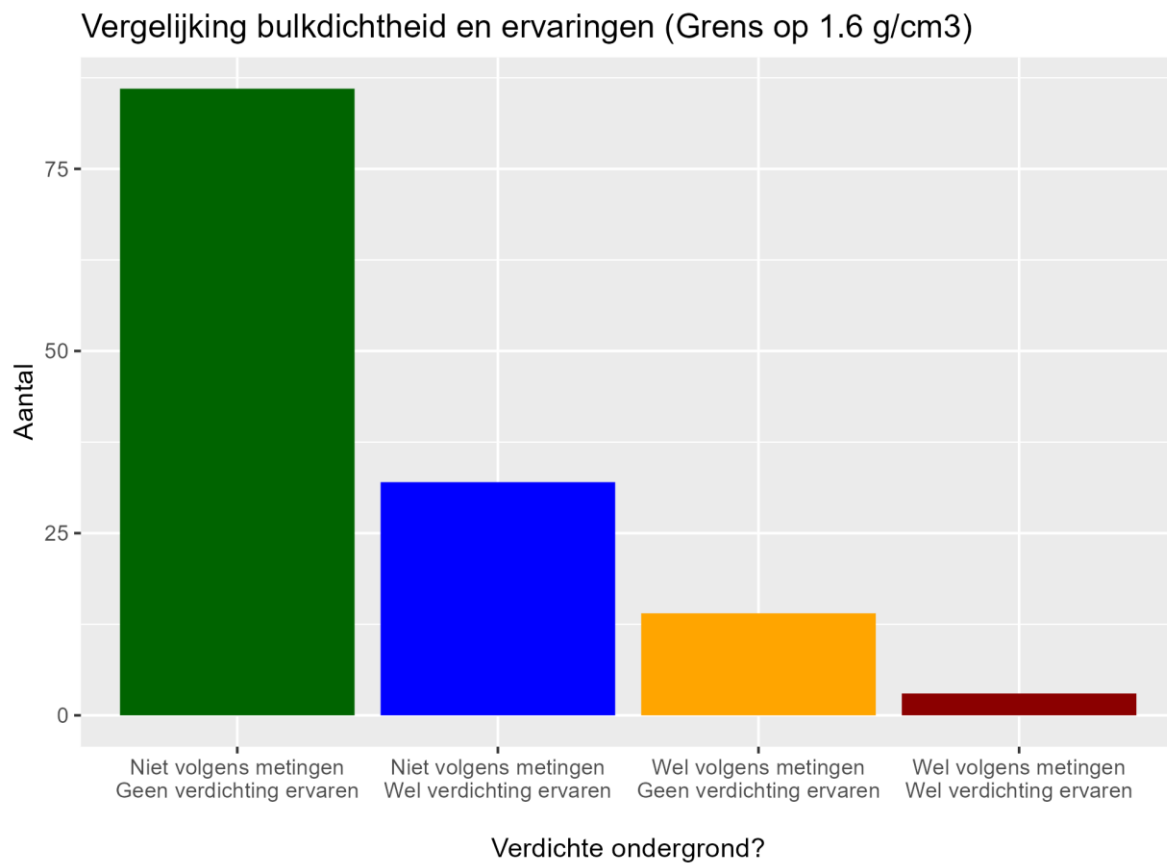
1. Is het al of niet ervaren van de effecten van een verdichte laag terug te zien in de gemeten droge bulkdichtheden en indringingsweerstand en is hierbij een verband te zien met referentie- en streefwaarden die voor het interpreteren van de effecten van een verdichte laag worden gehanteerd?
2. Is een effect van grondbewerkingsmaatregelen op bulkdichtheid en indringingsweerstand waar te nemen? Hierbij gaat het om:
 - o het effect van langdurige maatregelen;
 - o het effect van eenmalige grondbewerking en hoe lang geleden deze is uitgevoerd.

Allereerst beschouwen we de relatie tussen droge bulkdichtheid op 30 cm diepte en de ervaren verdichting, waarbij we drie grenswaarden gebruiken voor het interpreteren van de aanwezigheid van een verdichte laag, hier weergegeven voor zand en lichte zavel waarbij in de analyse de correctie voor het kleigehalte wel is toegepast (zie hoofdstuk 4.1): 1,5 g/cm³ niet verdicht, 1,6 g/cm³ risico op een verdichte laag en 1,7 g/cm³ aanwezigheid van een verdichte laag (zie paragraaf 4.1). Opgemerkt moet worden dat het aantal meetwaarden in de groep boven 1,7 g/cm³ erg laag is. Er zijn telkens vier combinaties mogelijk van boven en onder de grenswaarde en het wel of niet ervaren van de aanwezigheid van een verdichte laag. De staafdiagrammen in Figuur 29 geven de frequenties waarmee deze combinaties optreden.

Hieruit blijkt dat meetwaarden boven de grenswaarde voor droge bulkdichtheid de ervaren aanwezigheid van een verdichte laag in een beperkt aantal gevallen bevestigt bij 1,5 g/cm³ en 1,6 g/cm³ en helemaal niet bij 1,7 g/cm³. Alle categorieën, en vooral de categorie 'niet gemeten' en 'niet ervaren', vallen hoger uit dan de categorie met een gemeten en ervaren verdichte laag. Dit kan betekenen dat het merendeel van het gebied geen verdichte lagen bevat, of dat de bodem wel verdichte lagen bevat, maar dat deze door de landgebruiker niet als storend (voor gewasgroei) worden ervaren, maar ook dat de grenswaarde van 1,5 g/cm³ voor zand en lichte zavel te laag is. De grenswaarde van 1,7 g/cm³ voor zand en lichte zavel lijkt hoog, omdat een ervaren aanwezigheid van een verdichte laag dan niet wordt gemeten. Voor alle

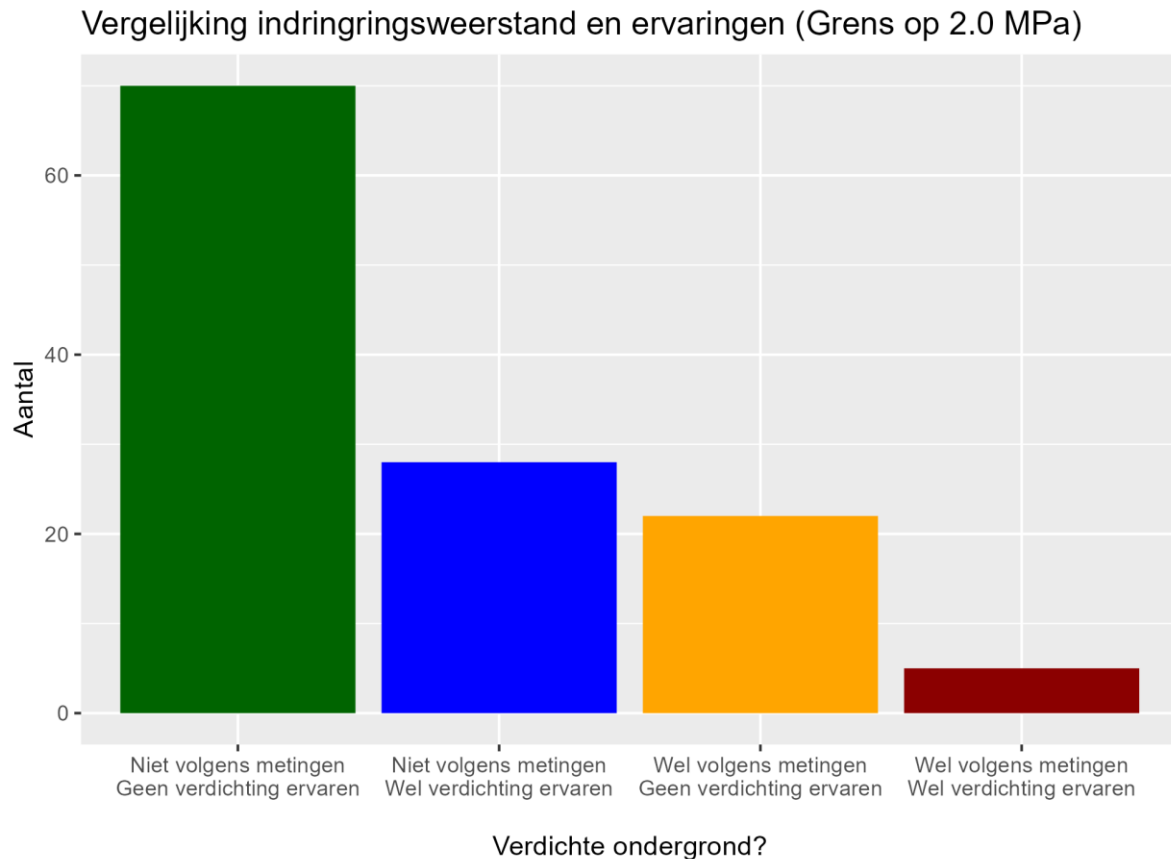
grenswaarden geldt een zekere spreiding van metingen en ervaringen rondom de grenswaarde, wat betekent dat een harde grens voor het identificeren van de aanwezigheid van een verdichte laag op basis van metingen die overeenkomt met de ervaringen van landgebruikers, niet aanwezig is. Dit ondersteunt onderzoek (Bakema e.a. 2024), dat aangeeft dat een verschil in gewasgroei ook kan optreden bij verschillen in bulkdichtheid onder de grenswaarde (paragraaf 4.1) en een grenswaarde dus niet een harde grens zou moeten zijn. De twee middencategorieën ('wel ervaren, niet aangetroffen' en 'niet ervaren, wel aangetroffen') zijn waarschijnlijk even groot voor een grenswaarde van 1,5 en 1,6 g/cm³ (voor zand of lichte zavel).

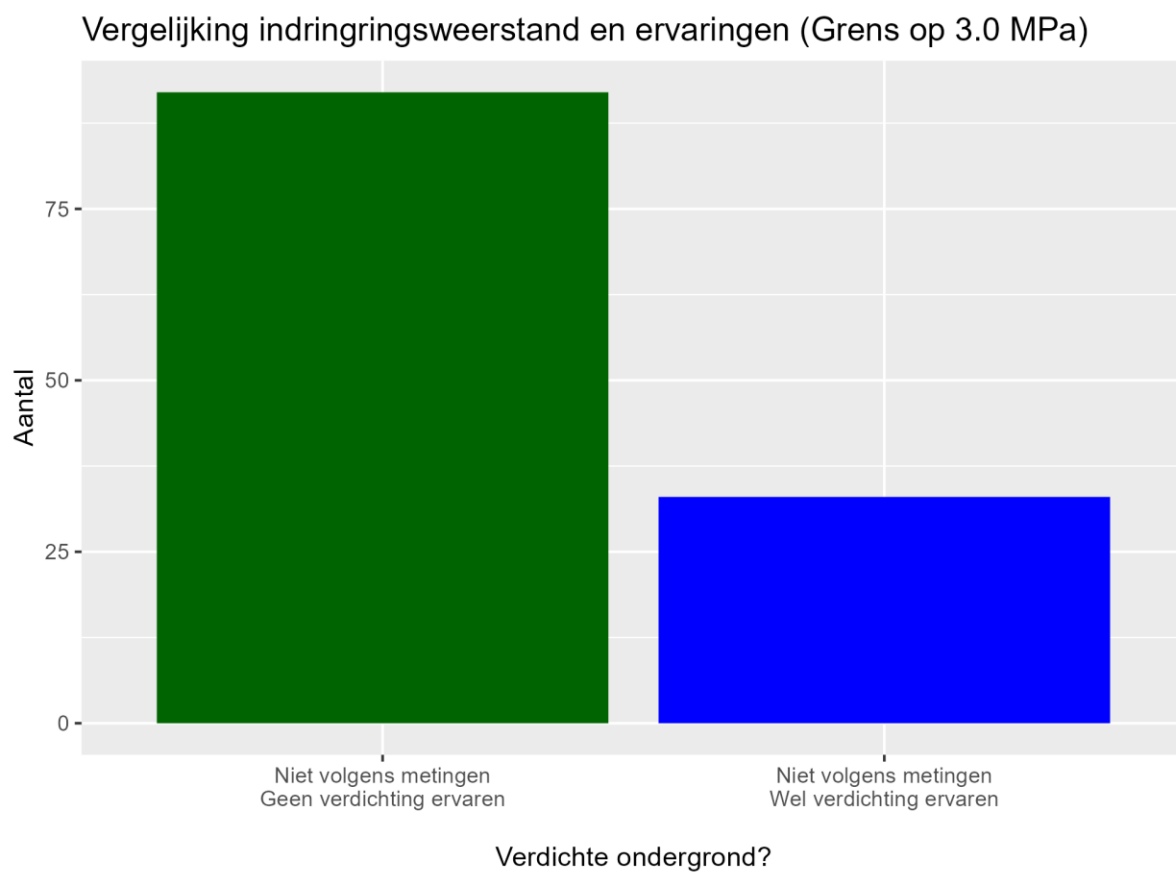
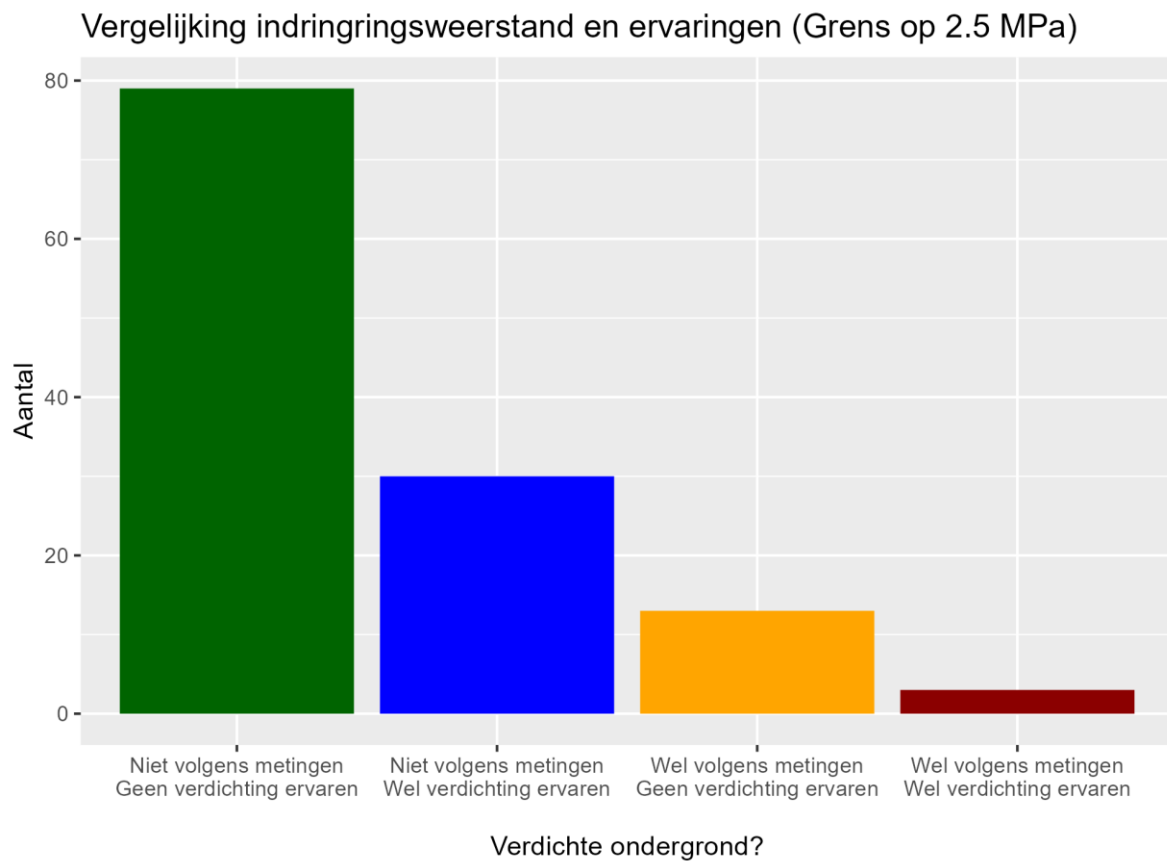




Figuur 29 Combinaties van wel of niet ervaren van verdichting en droge bulkdichtheid op 30 cm boven of onder grenswaarden van 1,5 g/cm³, 1,6 g/cm³ of 1,7 g/cm³.

Vervolgens beschouwen we de relatie tussen indringingsweerstand en ervaren aanwezigheid van een verdichte laag, waarbij we drie grenswaarden gebruiken waarboven sprake zou zijn van de aanwezigheid van een verdichte laag: 2,0 MPa, 2,5 MPa en 3,0 MPa (zie paragraaf 4.1, Van Orsouw e.a., 2022). Er zijn telkens vier combinaties mogelijk van metingen boven en onder de grenswaarde en het wel of niet ervaren van de aanwezigheid van een verdichte laag. De staafdiagrammen in Figuur 30 geven de frequenties weer waarmee deze combinaties optreden. Hieruit blijkt dat meetwaarden boven de grenswaarde voor indringingsweerstand de ervaren verdichting in een beperkt aantal gevallen bevestigen bij 2,0 MPa en 2,5 MPa en helemaal niet bij 3,0 MPa. Ook hier komt naar voren dat op het merendeel van de locaties de aanwezigheid van een verdichte laag volgens de grenswaarden niet wordt gemeten of wordt ervaren door de landgebruikers. Een grenswaarde van 2,5 MPa lijkt de ervaren verdichting het best weer te geven. omdat de categorieën 'niet gemeten, niet ervaren' en 'wel gemeten, wel ervaren' groter zijn dan bij 2 en 3 MPa, terwijl de categorieën 'niet ervaren, wel gemeten' en 'wel ervaren, niet gemeten' kleiner zijn.

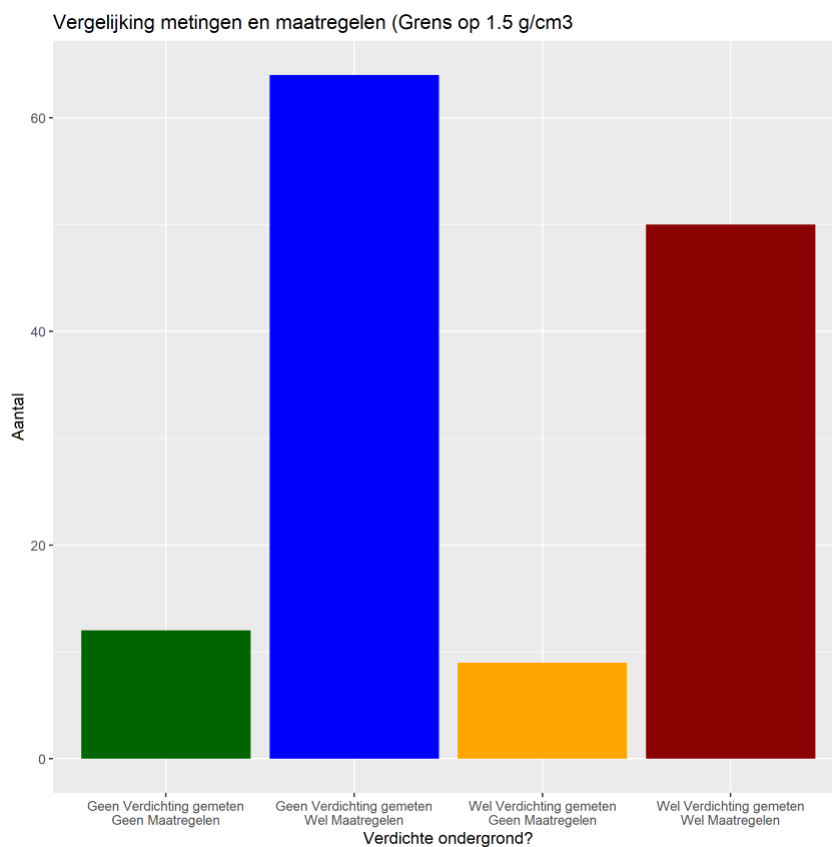




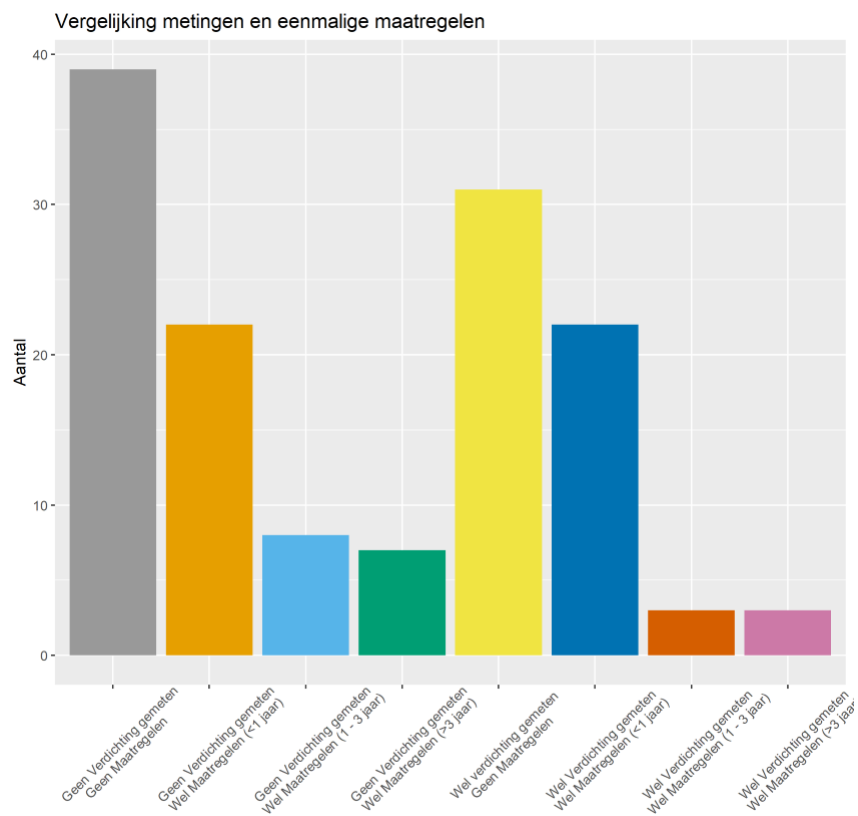
Figuur 30 Combinaties van wel of niet ervaren van verdichting en indringingsweerstand op 30 cm boven of onder grenswaarden van 2,0 MPa, 2,5 MPa en 3,0 MPa.

Op basis van de resultaten in Figuur 29 en Figuur 30 kan geconcludeerd worden dat beide parameters, de droge bulkdichtheid op 30 cm gemeten met ringen en de indringingsweerstand op 30 cm gemeten met een penetrologger, de afwezigheid van als verdicht ervaren lagen goed indiceren. De aanwezigheid van een als verdicht ervaren laag blijkt niet eenduidig vast te stellen op basis van metingen van bulkdichtheid en indringingsweerstand en de gehanteerde grenswaarden. Dit kan te maken hebben met het feit dat ieder gewas anders reageert op een verdichte laag of dat effecten op gewasgroei niet goed worden weergegeven door de gehanteerde grenswaarden. Wellicht is een combinatie van meerdere parameters, andere meetmethoden of een andere evaluatie van de meetresultaten nodig. Dit kan onderdeel zijn van vervolgonderzoek.

Vervolgens is onderzocht of het wel of niet nemen van maatregelen effect heeft op het optreden van droge bulkdichtheden op 30 cm diepte die groter zijn dan $1,5 \text{ g/cm}^3$. In dat geval zou het meten van de aanwezigheid van een verdichte laag moeten leiden tot het nemen van maatregelen. Uit de resultaten in Figuur 31 blijkt niet dat het nemen van langdurige maatregelen effect heeft op het optreden van de droge bulkdichtheid van meer dan $1,5 \text{ g/cm}^3$ op 30 cm diepte. Het is mogelijk dat het nemen van de maatregelen een positief preventief effect heeft op het niet voorkomen van de hogere bulkdichtheden of deze regelmatig opheft, en dat dit de reden is dat dit verband niet is aangetoond. Tegelijk kan een conclusie zijn dat het nemen van langdurige maatregelen voor de locaties waar wel een verdichte laag wordt gemeten, nog effect moet gaan hebben op de droge bulkdichtheid van de bodem. Immers, het is bekend dat het langdurig oplossen van ondergrondverdichting moeilijk is en tijd nodig heeft (zie paragraaf 1.1). Dit wordt onderschreven door de resultaten in Figuur 32, waaruit blijkt dat het nemen van een eenmalige maatregel niet in alle gevallen effect heeft op het optreden van de droge bulkdichtheid van meer dan $1,5 \text{ g/cm}^3$ op 30 cm diepte. Opgemerkt moet wel worden dat gekeken is naar waarden boven $1,5 \text{ g/cm}^3$. Het is goed mogelijk dat de bulkdichtheid is afgenomen door het nemen van een eenmalige maatregel, maar dat deze nog steeds boven de $1,5 \text{ g/cm}^3$ ligt.



Figuur 31 Relatie tussen het nemen van langdurige maatregelen en het optreden van een bulkdichtheid groter dan $1,5 \text{ g/cm}^3$ op 30 cm diepte.



Figuur 32 Relatie tussen eenmalige maatregelen en het optreden van een dichtheid groter dan $1,5 \text{ g/cm}^3$ op 30 cm diepte.

5 Conclusies en aanbevelingen

5.1 Conclusies

De onderzoeksvraag was: hoe zijn bulkdichtheid van de bodem en indringingsweerstanden ruimtelijk verdeeld in Flevoland? Wij concluderen dat in de Noordoostpolder de droge bulkdichtheden en indringingsweerstand op 30 cm diepte over het algemeen hoger zijn dan in oostelijk en zuidelijk Flevoland. Wij hebben niet kunnen aantonen dat grenswaarden voor droge bulkdichtheid in zand of lichte zavel van 1,5, 1,6 of 1,7 g/cm³ en gecorrigeerd voor het kleigehalte, noch de grenswaarden van 2 of 3 MPa voor indringingsweerstand op grote schaal worden overschreden.

De deelvragen waren:

1. Wanneer is sprake van bodemverdichting resulterend in de aanwezigheid van een storende verdichte laag?
2. Komen de waargenomen verdichte lagen overeen met het beeld dat landgebruikers en andere belanghebbenden hebben van de huidige situatie?
3. Welke hulpvariabelen in de digitale bodemkartering correleren met de gemeten dichtheid en kunnen zo als voorspeller van verdichte lagen worden aangemerkt?
4. Is de gekozen methode geschikt voor het maken van een regionale kaart van (bulk)dichtheid en verdichte lagen in de provincie Flevoland?

Om de deelvragen te kunnen beantwoorden, zijn eerst de conclusies nodig die op basis van dit onderzoek getrokken kunnen worden over de gebruikte meetmethodes, hoe deze onderling te vergelijken en welke inzichten zijn verkregen over de grenswaarden. Deze worden eerst besproken, alvorens de deelvragen een voor een te beantwoorden.

5.1.1 Meetmethodes

We concluderen dat bemonstering met ringen een goede methode is om de droge bulkdichtheid op een gewenste diepte te bepalen. Wel is de ervaring en nauwkeurigheid van werken van de monsternemer en het vochtgehalte tijdens het nemen van de ring van belang voor de nauwkeurigheid van het resultaat (paragraaf 2.3.2 en 3.1.1). De standaarddeviatie van de ringen wordt geschat op 0,06 g/cm³.

Indringingsweerstand is een meting die naast de dichtheid iets zegt over de schijnbare cohesie van de bodem. De schijnbare cohesie wordt bepaald door de zuigspanning en dus het vochtgehalte. Omdat de meting afhankelijk is van het vochtgehalte, zullen de meetwaarden afhankelijk van het vochtgehalte fluctueren door de tijd en in de ruimte. Dit maakt de methode met name geschikt om lokaal verschillen in weerstand en de aanwezigheid van lagen met een hoge weerstand op te sporen. Verdichting kan de oorzaak zijn van deze lagen met hoge weerstand, maar dat hoeft niet. Ook zijn de kracht en de ervaring van de monsternemer van belang (paragraaf 3.1.2). Indringingsweerstand is een andere bodemparameter dan droge bulkdichtheid, het meet andere processen in de bodem en de resultaten kunnen dus niet een-op-een vergeleken worden, zoals blijkt uit paragraaf 3.1.3.

De afgenomen enquête geeft een goed beeld hoe landgebruikers (de aanwezigheid van) verdichting ervaren. Dit kan echter wel beïnvloed worden door de geteelde gewassen en de maatregelen die al genomen worden om bodemverdichting te voorkomen of op te heffen. Dit kan mede de inconsistentie verklaren tussen de ervaren bodemverdichting (25%) en de mate waarin men dit voorkomt of aanpakt (48%). Gezien de invloed van geteelde gewassen is te overwegen om per gewas(groep) een grenswaarde vast te stellen. De enquête en de metingen van bulkdichtheid door middel van ringen leveren een consistent beeld op (op basis van de gehanteerde grenswaarden) voor de provincie.

5.1.2 Grenswaarden per meetmethode

Grenswaarden zijn waarden die op basis van wetenschappelijke literatuur de mate aangeven waarin een grond gevoelig is voor (verdere) verdichting. In het geval van dit onderzoek geven zij aan wanneer een laag in de bodem als verdicht kan worden beschouwd op basis van de droge bulkdichtheid via ringmetingen of via indringingsweerstand.

Deze grenswaarden beschrijven een punt in een proces van verdichting en zijn vaak niet als harde grens maar als indicatieve waarde bedoeld, waarboven een bodem als verdicht kan worden beschouwd. Dit is dus een glijdende schaal en geen binaire, harde grens. Dit wordt ondersteund door de resultaten van de enquête. Voor de bodems in de provincie Flevoland geldt dat deze over het algemeen niet boven de grenswaarden uitkomen zoals genoemd in de literatuur. Deze zijn echter gebaseerd op oudere bodems dan de jonge bodems van Flevoland, waar nog diverse bodemvormende processen gaande zijn (zoals rijping). Hierdoor ontstaat de indruk dat de bodems geen verdichting hebben ondergaan (in de laatste decennia), maar dit is zeer twijfelachtig gezien de uitgangssituatie waarbij de bodem een veel lagere bulkdichtheid had.

5.1.3 Deelvragen

Bij de beantwoording van de deelvragen moet opgemerkt worden dat in dit onderzoek niet is gemeten op de kopakkers, omdat gezien de opzet van de bemonstering dit een vertekend beeld van de verdichting in de provincie Flevoland op zou kunnen leveren.

1. Wanneer is sprake van bodemverdichting resulterend in de aanwezigheid van een storende verdichte laag?

Ad 1: Op basis van de resultaten kan niet aangegeven worden wat goede indicatoren zijn voor verdichting, omdat het onderscheid tussen antropogene en natuurlijke verdichting en indringingsweerstand niet gemaakt kan worden. De twee geteste parameters correleren niet en het is waarschijnlijk dat zij verschillende aspecten van een verdichte laag meten. Beide kunnen niet geëvalueerd worden met een harde grenswaarde.

2. Komen de waargenomen verdichte lagen overeen met het beeld dat landgebruikers en andere belanghebbenden hebben van de huidige situatie?

Ad 2: Voor zowel de droge bulkdichtheid op 30 cm als de indringingsweerstand geldt dat een harde grenswaarde niet gekozen kan worden op basis van de ervaren aanwezigheid van een verdichte laag door landgebruikers. Wel is een grenswaarde rond 1,6 g/cm³ voor droge bulkdichtheid gecorrigeerd voor het kleigehalte en een grenswaarde rond 2,5 MPa voor de indringingsweerstand het best in staat de ervaringen van landgebruikers weer te geven (ten opzichte van de geteste 1,5 en 1,7 g/cm³ en 2 en 3 MPa). Op basis van de enquête en metingen kan geconcludeerd worden dat de bodems in Flevoland niet boven de grenswaarden op basis van literatuur en enquête uitkomen. Kanttekeningen bij deze conclusie zijn:

- De grenswaarden zijn maar zeer beperkt gevalideerd voor Nederlandse gronden en zijn gebaseerd op oudere bodems. De bodems in de provincie Flevoland zijn jong en nog onderhevig aan bodemvormende processen zoals rijping. Het is dus mogelijk of zelfs aannemelijk dat de bodems in de provincie dichter zijn geworden, ook al komen de meetwaarden niet boven de grenswaarden uit.
- In de enquête rapporteert 25% van de respondenten de gevolgen van bodemverdichting te ervaren. Omdat 48% al maatregelen neemt om verdichting te beperken, te voorkomen of op te heffen, is niet duidelijk of hier verdichting heeft plaatsgevonden.
- In deze studie zijn de kopakkers niet bemeten, alhoewel kan worden aangenomen dat deze meer verdicht zijn dan de rest van het veld.

3. Welke hulpvariabelen in de digitale bodemkartering correleren met de gemeten dichtheid en kunnen zo als voorspeller van verdichte lagen worden aangemerkt?

Ad 3: Uit dit onderzoek bleek dat de ruimtelijke variatie van droge bulkdichtheid op 30 cm diepte vooral wordt verklaard door reflectie in de rode band van een Sentinel 2-satellietbeeld, genomen in de winter (s2_R_mean_02feb) en de textuurcode van de bodemfysische eenhedenkaart BOFEK (Wösten e.a., 2012). De eerste is waarschijnlijk indicatief voor de aanwezigheid van vegetatie in de winter of kleurverschillen in het bodemoppervlak, mogelijk door vocht. De relatie met de textuurcode van BOFEK komt overeen met het

bekende verband tussen bulkdichtheid en textuur. Geconcludeerd kan worden dat vocht, textuur en worteling in de winter in deze studie de meest verklarende variabelen zijn.

Samenhang met andere gebruikte hulpvariabelen kon niet worden aangetoond. Dit strookt met de ontstaansgeschiedenis en leeftijd van de provincie. Het verdient aanbeveling om andere hulpvariabelen met een betere voorspellende waarde toe te voegen aan de cartografie. Een voorbeeld kan zijn informatie over geteelde gewassen en lokaal bodembeheer.

4. Is de gekozen methode geschikt voor het maken van een regionale kaart van (bulk)dichtheid en verdichte lagen in de provincie Flevoland?

Ad 4: Uit de validatieresultaten blijkt dat de nauwkeurigheid van de gemaakte kaart van droge bulkdichtheid op 30 cm diepte (zeer) beperkt is. Dit kan verschillende oorzaken hebben, zoals de beperkte verklarende kracht van de hulpvariabelen, de beperkte ruimtelijke afhankelijkheid van de meetwaarden, de meetdichtheid en het vochtgehalte ten tijde van het steken van de ringen. Beide redenen zijn mogelijk het gevolg van de zeer lokale aard van het voorkomen van verdichte lagen. Het verdient aanbeveling om aanvullende verklarende variabelen en een grotere meetdichtheid te onderzoeken als startpunt voor een verbetering van de methode (zie paragraaf 5.2) en de huidige kaart niet te gebruiken gezien de zeer beperkte nauwkeurigheid.

5.2 Aanbevelingen

De eerste deelvraag van dit onderzoek kon niet goed beantwoord worden. Wij adviseren daarom om vervolgonderzoek uit te voeren naar voor vochtgehalte genormaliseerde droge bulkdichtheid, eventueel indringingsweerstand (ook genormaliseerd) en ook andere mogelijke parameters om verdichting te beschrijven, zoals verzadigde doorlatendheid en porositeit en het mogelijke effect van verschillen in meetwaarden op plantengroei en de waterhuishouding. Ook wordt geadviseerd om voor de indringingsweerstanddata niet alleen de grenswaarde te gebruiken, maar ook een kwantitatieve methode af te leiden om de vorm van de curve te gebruiken in de beoordeling.

Uit de analyse blijkt eens te meer dat het voorkomen van een verdichte laag sterk lokaal is en een beperkte ruimtelijke afhankelijkheid heeft. Dit roept de vraag op of de gekozen meetdichtheid en het weglaten van kopakkers in de gebruikte cartografiemethode de goede keuze was. De methode zou op kleinere schaal met een hogere meetdichtheid herhaald kunnen worden om te onderzoeken of dit tot een betere kaart zou leiden. Vanzelfsprekend leidt een hogere meetdichtheid ook tot hogere kosten voor de meetcampagne bij de gevolgde meetmethode.

De verklarende kracht van de hulpvariabelen voor cartografie van bulkdichtheid op 30 cm diepte was beperkt, mogelijk door de ontstaansgeschiedenis en leeftijd van de bodems in de provincie. Dit betekent niet dat dezelfde hulpvariabelen in andere delen van het land ook slechts een beperkte verklarende kracht hebben. Het lijkt daarom zinvol het onderzoek te herhalen in andere regio's, inclusief de aanbevelingen hierboven, om de methodiek verder te testen. Voor de provincie Flevoland zouden andere, nu niet beschikbare hulpvariabelen getest kunnen worden, zoals een kaart van het kleigehalte (beschikbaar gekomen sinds het uitvoeren van dit onderzoek), informatie over geteelde gewassen, bodembeheer inclusief grondbewerking en een gammaspectrometrie-meting, maar het is niet gezegd dat dit tot betere resultaten zal leiden.

Verschillende gewassen en planten reageren verschillend op verschillen in bodemsoort en dichtheid of weerstand in bodems. Pengewassen hebben bijvoorbeeld meer wortelkracht dan planten met een breder wortelgestel. Onderzocht kan worden welke gewassen geen hinder zullen ondervinden van een deels verdichte bodem en de effecten op de waterhuishouding die hierbij horen, en welke juist wel. Landgebruikers kunnen dit dan meewegen in de keuze voor een gewasrotatie of vegetatie op een perceel.

Literatuur

- Bakema, G., G. Bakker, J. Cruijssen, F. van Egmond, E. van den Elsen, M. Heinen en H. Schneider, 2023. De invloed van bodemverdichting op de water- en luchthuishouding in de bodem en op de plantenontwikkeling. Literatuuronderzoek. Wageningen, Wageningen Environmental Research, Rapport 3225.
- Bakema, G., G. Bakker, M. Heinen, E. van den Elsen, 2024. Lab-, kolom- en veldexperimenten naar de invloed van bodemverdichting op de water- en luchthuishouding in de bodem en op de plantontwikkeling, Wageningen, Wageningen Environmental Research (nog niet gepubliceerd)
- Breiman, L., 2001. Random Forests. Machine Learning 45: 5-32.
- Brouwer, F., F. de Vries en D.J.J. Walvoort, 2018. Basisregistratie Ondergrond (BRO); Actualisatie bodemkaart: herkartering van de bodem in Flevoland. Wageningen, Wettelijke Onderzoekstaken Natuur en Milieu. Wot-technical report 143.
- Dik, P., van Egmond, F., & Barbieri, L., 2022. Exploration of the simulation of crop growth and water holding capacity for regenerative agriculture: Soil Heroes Foundation - Hoeksche Waard case study. (Report / Wageningen Environmental Research; No. 3216). Wageningen Environmental Research. <https://doi.org/10.18174/582324>
- International Organization for Standardization, 2017. ISO 11272:2017. Beschikbaar via: <https://www.iso.org/standard/68255.html>
- Keller, T. 2004. Soil Compaction and Soil Tillage - Studies in Agricultural Soil Mechanics Doctoral dissertation. ISSN 1401-6249, ISBN 91-576-6769-1. <https://core.ac.uk/download/pdf/11694792.pdf>
- Keller, T., D. Or, 2022. Farm vehicles approaching weights of sauropods exceed safe mechanical limits for soil functioning. PNAS <https://doi.org/10.1073/pnas.2117699119>
- Stichting Koninklijk Nederlands Normalisatie Instituut, 2017. NEN-EN-ISO 11272: Bodemkwaliteit - Bepaling van de droge bulkdichtheid. Beschikbaar via: <https://www.nen.nl/en/nen-en-903-iso-11272-2017-en-232321>
- Royal Eijkelpark, 2022. Penetrologger - User manual (41 pp.). Beschikbaar via: https://www.eijkelpark.com/download.php?file=M0615SAe_Penetrologger_bd1b.pdf
- Van den Akker, J.J.H. en de Groot, W.J.M. 2008. Een inventariserend onderzoek naar de ondergrondverdichting van zandgronden en lichte zavel, Alterra-rapport 1450, Alterra, Wageningen. <https://edepot.wur.nl/60379>
- Van Orsouw, T. L., Mulder, V. L., Schoorl, J. M., van Os, G. J., van Essen, E. A., Pepers, K. H. J., & Heuvelink, G. B. M., 2022. Practical Implications of the Availability of Multiple Measurements to Classify Agricultural Soil Compaction: A Case-Study in The Netherlands. Agronomy, 12(7), Article 1669. <https://doi.org/10.3390/agronomy12071669>
- Van Tol-Leenders, D., Knotters, M., de Groot, W., Gerritsen, P., Reijneveld, A., van Egmond, F., Wösten, H., & Kuikman, P., 2019. Koolstofvoorraad in de bodem van Nederland (1998-2018): CC-NL. (Wageningen Environmental Research rapport; No. 2974). Wageningen Environmental Research. <https://doi.org/10.18174/509781>
- Walvoort, D.J.J., Brus, D.J., en de Gruijter, J.J. (2010). "An R package for spatial coverage sampling and random sampling from compact geographical strata by k-means." Computers & Geosciences, 36, 1261-1267. Beschikbaar via: <https://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2010.04.005>.
- Walvoort D, Brus D, de Gruijter J., 2021. Spatial Coverage Sampling and Random Sampling from Compact Geographical Strata. R package version 0.4-0, <https://CRAN.R-project.org/package=spcosa>.
- Webster, R., M.A. Oliver, 2007. Geostatistics for Environmental Scientists 2nd Edition. John Wiley & Sons Ltd. ISBN: 978-0-470-02858-2
- Wösten, H., F. de Vries, T. Hoogland, H. Massop, A. Veldhuizen, H. Vroon, J. Wesseling, J. Heijckers en A. Bolman, 2012. BOFEK2012, de nieuwe, bodemfysische schematisatie van Nederland. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 2387.

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

Wageningen Environmental Research
Rapport 3382
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 3382
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.
