



# Maatregelen voor het herstel van verdichte bodems

Guido Bakema, Emmanuel Arthur, Derk van Balen



# Maatregelen voor het herstel van verdichte bodems

Guido Bakema<sup>1</sup>, Emmanuel Arthur<sup>2</sup>, Derk van Balen<sup>3</sup>

1 Wageningen Environmental Research, Nederland

2 Universiteit van Aarhus Departement Agro-ecologie, Denemarken

3 Wageningen Plant Research, Nederland

Dit onderzoek is gefinancierd door het Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit en door het Horizon 2020-programma voor onderzoek en innovatie van de Europese Unie als onderdeel van het EJPSoil-project, subsidieovereenkomst nr. 862695.

Wageningen Environmental Research  
Wageningen, november 2023

---

Gereviewd door:  
Simone Verzandvoort (WENR)

Akkoord voor publicatie:  
Mirjam Hack-ten Broeke, teamleider Bodem, water en landgebruik (WENR)

Rapport 3296  
ISSN 1566-7197

Bodemverdichting door landbouwmachines is een van de grootste bedreigingen voor de productiviteit van de bodem en voor het ecologisch en hydrologisch functioneren van de bodem. In dit onderzoek is een literatuuronderzoek naar herstelmaatregelen uitgevoerd. Daarnaast is een overzicht gemaakt van afgeronde en lopende experimenten met herstelmaatregelen in verschillende Europese landen. Het overzicht omvat mechanische (grondbewerking), biologische (diepwortelende gewassen) en natuurlijke maatregelen (bevriezen en zwellen). Het onderzoek is toegespitst op de verdichte ondergrond onder de ploegzool (25-50 cm m-mv). De herstelmaatregelen die in dit rapport besproken worden, zijn gericht op de akkerbouw, maar de meeste maatregelen kunnen ook worden toegepast op grasland. Het onderzoek is onderdeel van het EJP SOIL SoilCompaC-project.

In het verleden werd vaak gekozen voor het mechanisch openbreken van de verdichte ondergrond, zoals (diep)ploegen. Dit leverde op korte termijn verbetering op, maar binnen enkele jaren trad opnieuw verdichting op. Het belangrijkste nadeel van mechanische methoden is dat vaak de volledige bodemstructuur wordt verstoord, waardoor de mechanische sterkte en het vochtleverend vermogen sterk verminderen. Het veelbelovendst is het gebruik van diepwortelende gewassen, ook wel biowoelers genoemd.

In een korte video zijn de belangrijkste bevindingen van het rapport samengevat.

<https://youtu.be/jozRMKNCEjE>

Soil compaction due to agricultural vehicle traffic is recognized as one of the major threats to soil productivity, and soil ecological and hydrological functioning. In this research, which is part of the EJP SOIL SoilCompaC project, an extensive literature review on recovery techniques was conducted combined with data from current recovery field experiments. An overview was made of past and running experiments on recovery methods in different countries to characterize the rate of recovery by different processes and the relative importance of the recovery mechanisms across pedo-climatic zones. The review includes mechanical (tillage), biological ("biosubsoiling") and natural methods. The focus of this research was made on the compacted subsoil below the plough sole (25-50 cm b.s.). This means that the focus with this is on arable farming however most of the recovery techniques can also be applied to grassland.

In the past, the choice was often made to mechanically crack the compacted soil. This resulted in short-term improvement but recompaction occurred several years later. The main disadvantage of mechanical methods is that often the complete soil structure is disturbed, which strongly reduces the mechanical strength and moisture delivery capacity. Most promising for the long-term melioration of compacted arable land is the use of deep-rooting plants: biosubsoilers.

A short video summarizes the main conclusions.

<https://youtu.be/jozRMKNCEjE>

Trefwoorden: Bodemverdichting, herstel van verdichte bodems, woelen, vriezen/dooien, diepwortelende gewassen

Dit rapport is gratis te downloaden van <https://doi.org/10.18174/640890> of op [www.wur.nl/environmental-research](http://www.wur.nl/environmental-research) (ga naar 'Wageningen Environmental Research' in de grijze balk onderaan). Wageningen Environmental Research verstrekt *geen* gedrukte exemplaren van rapporten.

---

© 2023 Wageningen Environmental Research (instituut binnen de rechtspersoon Stichting Wageningen Research), Postbus 47, 6700 AA Wageningen, T 0317 48 07 00, [www.wur.nl/environmental-research](http://www.wur.nl/environmental-research).  
Wageningen Environmental Research is onderdeel van Wageningen University & Research.

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

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



Wageningen Environmental Research werkt sinds 2003 met een ISO 9001 gecertificeerd kwaliteitsmanagementsysteem. In 2006 heeft Wageningen Environmental Research een milieuzorgsysteem geïmplementeerd, gecertificeerd volgens de norm ISO 14001.

Wageningen Environmental Research geeft via ISO 26000 invulling aan haar maatschappelijke verantwoordelijkheid.

Wageningen Environmental Research Rapport 3296 | ISSN 1566-7197

Foto omslag: Sorghum als biowoeler (Guido Bakema, 2022)

---

---

# Inhoud

<b>Verantwoording</b>	<b>7</b>
<b>Woord vooraf</b>	<b>9</b>
<b>Samenvatting</b>	<b>11</b>
<b>1 Inleiding</b>	<b>13</b>
1.1 Bodemverdichting vormt een bedreiging voor landbouwgrond in de Europa	13
1.2 Het EJP SoilCompaC-onderzoek naar bodemverdichting	13
<b>2 Wat we al weten over het herstel van bodemverdichting</b>	<b>14</b>
2.1 Inleiding	14
2.2 Natuurlijk herstel	14
2.2.1 Zwellen en krimpen	15
2.2.2 Vriezen en dooien	19
2.3 Mechanisch herstel	21
2.3.1 Woelen	22
2.3.2 Boorgatmethode	24
2.4 Biomechanisch herstel (biowoelers)	26
<b>3 Experimenten met maatregelen voor het herstel van bodemverdichting</b>	<b>33</b>
3.1 Onderzoeksmethode	33
3.2 Effectiviteit van de herstelmaatregelen	35
3.2.1 Gemeten variabelen	35
3.2.2 Effectiviteit van herstelmaatregelen	35
3.3 Sociaaleconomische aspecten van herstelmaatregelen	36
<b>4 Toepasbaarheid bij verschillende bodem- en klimaatcondities</b>	<b>37</b>
4.1 Toepasbaarheid voor verschillende bodemtypes	37
4.2 Toepasbaarheid onder verschillende klimaatcondities	39
4.2.1 Vriezen en dooien	39
4.2.2 Diepwortelende gewassen en groenbemesters	40
<b>5 Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>42</b>
5.1 Conclusies	42
5.2 Aanbevelingen	44
<b>Referenties</b>	<b>46</b>
<b>Bijlage 1 Vragenlijst over herstelmethoden voor bodemverdichting</b>	<b>51</b>

---



---

# Verantwoording

Rapport: 3296

Projectnummer: 520044137

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

Akkoord referent die het rapport heeft beoordeeld,

functie: onderzoeker

naam: Simone Verzandvoort

datum: 10-08-2023

Akkoord teamleider voor de inhoud,

naam: Mirjam Hack-ten Broeke

datum: 30-10-2023



---

# Woord vooraf

Dit onderzoek naar het herstel van bodemverdichting maakt deel uit van het EJP SOIL-project SoilCompaC <https://ejpsoil.eu/soil-research/soilcompac>. Bij SoilCompaC zijn twaalf landen in heel Europa betrokken, wat het mogelijk maakt om een breed scala aan Europese bodems, klimaatzones en verschillende landbouw- en teeltsystemen in beschouwing te nemen. SoilCompaC bestaat uit drie werkpakketten die zich richten op het detecteren en herstellen van bodemverdichting (WP1), het risico op bodemverdichting (WP2) en kwantificering van de effecten van verdichting op bodemfuncties (WP3), onder het huidige en toekomstige klimaat. Dit rapport is onderdeel van WP1.

Dit onderzoek werd (deels) gesubsidieerd door het Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit en EJP SOIL. Dit rapport is eerder verschenen in het Engels (<https://edepot.wur.nl/629799>).



---

# Samenvatting

Bodemverdichting door landbouwvoertuigen wordt gezien als een van de grootste bedreigingen voor de bodemproductiviteit en voor het ecologisch en hydrologisch functioneren van de bodem. Landbouwmachines zijn in de afgelopen decennia aanzienlijk groter en zwaarder geworden. Daardoor is de verdichting waarschijnlijk sterk toegenomen. Van den Akker (2011) heeft op basis van metingen vastgesteld dat 50 procent van de vruchtbare bodems in Nederland verdicht is.

Bodemverdichting voorkomen is belangrijk omdat structuurbederf decennialang de opbrengst kan verlagen en de infiltratie- en berging van water verminderen. Als een bodem eenmaal verdicht raakt, zijn er verschillende maatregelen om dit op te lossen. De vraag is echter welke maatregelen toepasbaar zijn, hoe lang ze effectief zijn en onder welke omstandigheden ze het beste gebruikt kunnen worden.

In dit onderzoek is een literatuurstudie uitgevoerd naar het herstel van verdichte bodems. Ook is een overzicht gemaakt van veldexperimenten met herstelmaatregelen in verschillende landen om na te gaan hoe snel herstel mogelijk is en welke processen daarbij een rol spelen. Het overzicht omvat mechanische (grondbewerking), biologische ('biosubsoiling' of 'biowoelers') en natuurlijke (bodempysische processen) maatregelen. Het onderzoek is gericht op de verdichte ondergrond onder de ploegzool (25-50 cm m<sup>-1</sup>mv). Dit betekent dat de focus ligt op de akkerbouw, maar de meeste herstelmaatregelen kunnen ook worden toegepast op grasland. Het onderzoek is onderdeel van het EJP SOIL SoilCompaC-project <https://ejpsoil.eu/soil-research/soilcompac>.

De belangrijkste conclusies van dit onderzoek zijn hieronder gegeven.

## **Biologische herstelmaatregelen zijn gunstiger dan mechanische**

In het verleden werd vaak gekozen voor het mechanisch openbreken van de verdichte grond, bijvoorbeeld door diepploegen of diepmengen. Dit verbeterde de toestand van de grond op korte termijn, maar meestal trad binnen enkele jaren de verdichting op. Het grootste nadeel van de meeste mechanische methoden is dat vaak de volledige bodemstructuur wordt verstoord, wat de mechanische sterkte en het vochtleverend vermogen sterk vermindert. Woelen is nuttig voor bepaalde bodems als dit wordt uitgevoerd met de juiste apparatuur en onder goede (niet te natte) omstandigheden. Het losmakende effect blijft echter alleen behouden als de belasting daarna sterk wordt verminderd en er na losmaken gebruik wordt gemaakt van groenbemesters.

Om verstoring van natuurlijke structuren en snelle herverdichting te voorkomen, is het echter beter om meer natuurlijke herstelmethoden te kiezen. Vooral in sommige van de kleihoudende bodems kunnen ontwatering en bevriezing de bodemstructuur herstellen, maar het effect op de ondergrond (> 25 cm m<sup>-1</sup>mv) lijkt over het algemeen beperkt. De veelbelovendste techniek is het gebruik van diepwortelende gewassen: biowoelers. Deze hebben effect tot in de ondergrond en een beperkte negatieve invloed op de bovengrond. Er is echter meer onderzoek nodig naar de geschiktste diepwortelende gewassen, onder welke bodemomstandigheden deze het effectiefst zijn en hoe ze in het teeltsysteem kunnen worden ingepast.

## **Meer kans op herstel in kleiige bodems**

In het algemeen kan worden gesteld dat bodems met een hoog kleigehalte het grootste potentieel voor herstel hebben. Dit geldt zowel voor de meer natuurlijke maatregelen als voor de mechanische maatregelen. In het laatste geval moet het herstel plaatsvinden onder omstandigheden die niet te nat zijn. Voor bodems met een laag kleigehalte dragen zwellen/krimpen- en vriezen/dooien-processen weinig of niets toe aan het herstellen van bodemverdichting. Woelen is mogelijk voor deze bodems, maar het risico op herverdichting is groot, met name bij een hoog siltgehalte. Diepwortelende gewassen (biowoelers) lijken geschikt voor de meeste bodems, maar de effectiviteit zal sterk afhangen van de vochtcondities van de bodem.

---

### **Bodemverdichting kan niet helemaal worden hersteld**

Volledig herstel van de bodemeigenschappen tot het niveau van vóór de bodemverdichting is zelden waargenomen in de bestudeerde experimenten (n= 14). In 80% van de Europese experimenten werd niet meer dan 50% herstel gevonden. Slechts in een uitzonderlijke situatie werd een volledig herstel van de bodemfuncties gevonden.

### **Er is meer onderzoek nodig naar diepwortelende gewassen**

We weten nog te weinig over het gebruik van diepwortelende gewassen in combinatie met woelen.

Belangrijke vragen hierbij zijn: (a) Welke gewassen kunnen de bodem het best openbreken en de bodemstructuur in stand houden? (b) Onder welke bodemomstandigheden (fysisch en chemisch) kunnen ze het beste groeien en (c) Is het voldoende om het gewas één winterseizoen te telen of moet het gewas meerdere seizoenen groeien?

Een korte video vat de belangrijkste conclusies samen.

<https://youtu.be/jozRMKNCejE>

---

# 1 Inleiding

## 1.1 Bodemverdichting vormt een bedreiging voor landbouwgrond in de Europa

Bodemverdichting door landbouwverkeer wordt gezien als een van de grootste bedreigingen voor de bodemproductiviteit en het ecologisch en hydrologisch functioneren van de bodem (FAO en ITPS, 2015). Bodemverdichting vermijden en verminderen is een topprioriteit volgens de deelnemers aan het onderzoeksprogramma EJP SOIL (Munkholm en Zechmeister-Boltenstern, 2021). Veel studies tonen de negatieve gevolgen van bodemverdichting, waaronder nadelige effecten op landbouwproductie, waterinfiltratie en -berging, beluchting en nutriëntencyclus in de bodem (zie bijvoorbeeld de reviews van Hamza en Andersson, 2005; Hu et al., 2021). Bodemverdichting zal naar verwachting verder toenemen door het gebruik van grotere en zwaardere landbouwmachines (Schjønning et al., 2015; Keller et al., 2019). Daarnaast zullen extreme weersomstandigheden zoals droogte en overstromingen de negatieve gevolgen van bodemverdichting versterken.

## 1.2 Het EJP SoilCompaC-onderzoek naar bodemverdichting

EJP SoilCompaC bestaat uit drie werkpakketten die zich richten op het detecteren en herstellen van bodemverdichting (WP1), het bepalen van het risico op bodemverdichting (WP2) en de kwantificering van de effecten van verdichting op bodemfuncties (WP3), onder het huidige en toekomstige klimaat <https://ejpsoil.eu/soil-research/soilcompac>.

Dit onderzoek, dat onderdeel is van WP1, geeft een uitgebreid overzicht van maatregelen (hoofdstuk 2) over het herstel van gronden na verdichting. Het onderzoek omvat mechanische (grondbewerking), biologische (biowoelers) en natuurlijke maatregelen. Verder geeft het een overzicht van oude en lopende experimenten met herstelmaatregelen in verschillende Europese landen (hoofdstuk 3) (d.w.z. verschillende bodems en verschillende klimaatzones). De verschillende maatregelen zijn technisch geëvalueerd en ook de toepasbaarheid voor verschillende bodems en klimaatomstandigheden is beoordeeld (hoofdstuk 4). De focus van dit rapport ligt op de verdichte ondergrond in landbouwgrond onder de ploegzool (25-50 cm m-mv.) Dit betekent dat de focus ligt op akkerbouw, maar de meeste herstelmaatregelen kunnen ook worden toegepast op grasland.

## 2 Wat we al weten over het herstel van bodemverdichting

### 2.1 Inleiding

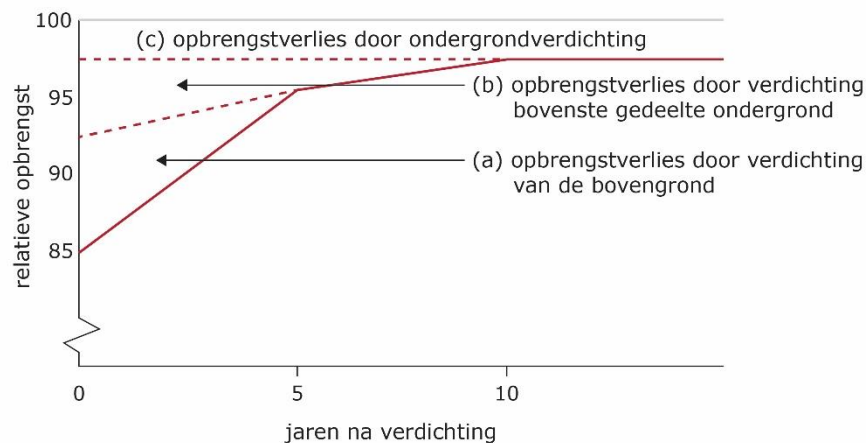
Er zijn drie soorten maatregelen waardoor de bodem kan herstellen van verdichting:

- Natuurlijke maatregelen (processen), zoals vorst en dooi en het zwellen en krimpen;
- Mechanische maatregelen, zoals diepploegen, woelen en het prikken van gaten;
- Biomechanische maatregelen, zoals diepwortelende gewassen en wormen.

Dit hoofdstuk beschrijft de maatregelen, de onderliggende werkingsprincipes, de experimenten waarin de diverse maatregelen zijn onderzocht en de manieren om in de praktijk gebruik te maken van de maatregelen.

### 2.2 Natuurlijk herstel

Natuurlijke processen in de bodem, zoals zwellen en krimpen en vriezen en dooien, kunnen ondergrondverdichting gedeeltelijk oplossen. Er is veel onderzoek gedaan naar deze processen voor de bovengrond, maar het aantal studies voor de ondergrond (> 25 cm -mv) is beperkt. Wel is bekend dat het natuurlijke herstel van de ondergrond jarenlang duurt. Dit is deels gebaseerd op langetermijnproeven uit het begin van de jaren tachtig van de vorige eeuw, waarin werd gekeken naar de opbrengstvermindering na een eenmalige verdichting. Håkansson en Reeder (1994) concludeerden dat ondergrondverdichting na vier tot vijf jaar een teruggang in de gewasopbrengst oplevert van ongeveer 5% en dat dit na tien jaar nog steeds 2,5% was (Figuur 2.1). Hierbij moet worden opgemerkt dat in de experimenten al deze jaren de wiellasten onder de 25 kN zijn gebleven. Ook Alakukku (1996) vond na zeventien jaar nog steeds lagere opbrengsten in vergelijking met niet verdichte percelen.



**Figuur 2.1** Effect van bovengrond- en ondergrondverdichting op gewasopbrengst. Geschematiseerd resultaat van een uitgebreide internationale serie veldproeven waarbij één perceel vier keer wiel aan wiel werd bereiden met een wiellast van 5 ton. In de daaropvolgende jaren werd alleen met lichte wiellasten gereden om het herstel van de bodem te bestuderen. Er werd onderscheid gemaakt tussen het herstel van de bovengrond of ploeglaag (a), de bovenste ondergrond (b) en de diepere ondergrond (c). (Naar Håkansson en Reeder (1994)).

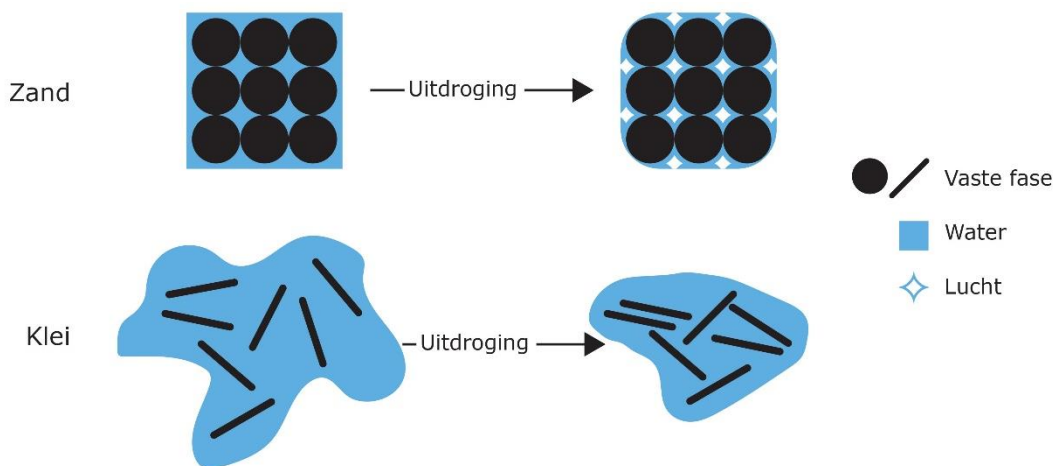


### 2.2.1 Zwellen en krimpen

#### Het proces

Kleigronden onderscheiden zich van andere gronden door de aanwezigheid van bepaalde hoeveelheden kleimineralen zoals kaolinit, illiet en montmorilloniet. Kleimineralen komen voor in plaatvormige kristallen. Deze kristallen zijn opgebouwd uit kleine plaatjes, bestaande uit siliciumoxiden en aluminiumhydroxiden. De dikte van elk plaatje is ongeveer 5-10 Å. Het aantal plaatjes binnen een kleikristal hangt af van de configuratie van de siliciumoxiden en de aluminiumhydroxiden in het plaatje, maar kan variëren van 1 (Na-montmorilloniet) tot bijna oneindig (kaolinit) (Bronswijk, 1991). Door de speciale structuur van kleimineralen worden plaatjes of pakketjes plaatjes omgeven door waterlagen. Bij het drogen naderen de plaatjes elkaar (Bronswijk, 1991) (Figuur 2.2).

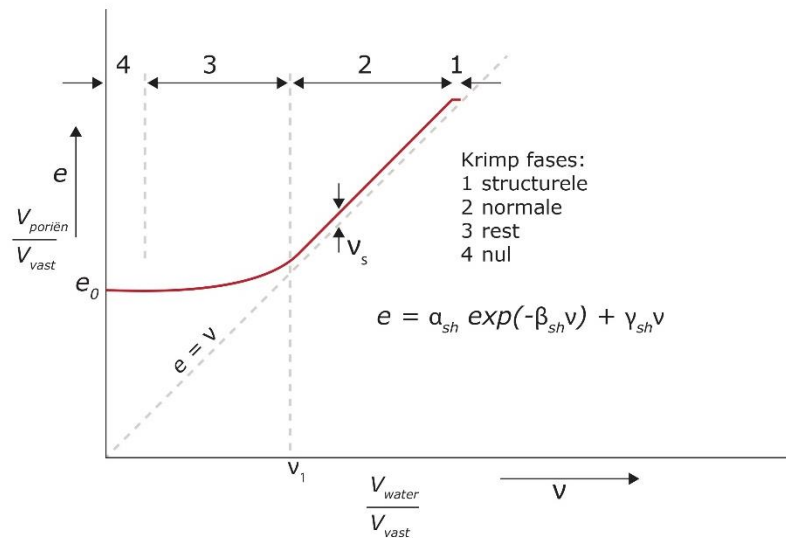
Het uitdrogen van de kleigrond leidt tot scheuren en bodemdaling. Wanneer kleigrond wordt gehydrateerd, zwellen de scheuren gedeeltelijk of volledig weer op en stijgt het maaiveld. Als de klei na uitdroging niet volledig opzwellt, kunnen de scheuren zich niet sluiten. Dit wordt onomkeerbare krimp genoemd.



**Figuur 2.2** Schematische weergave van het proces van drogen en luchtintreding van zand- en kleigronden.

De relatie tussen de verandering in vocht en volume van een kleigrond kan worden weergegeven door de bodemkrimpkarakteristiek (Soil Shrinkage Characteristic Curve, SSCC) (Figuur 2.3). Bij krimp worden vier fasen onderscheiden van nat naar droog: structurele krimp, normale krimp, restkrimp en nulrimp. Bij structurele krimp neemt het vochtgehalte af zonder dat het volume van de grond afneemt. In de fase van normale krimp nemen het volume water en het volume grond in gelijke mate af, waarbij de aggregaten volledig verzadigd blijven en alleen de krimp-scheuren (macroporiën) lucht bevatten. In de fasen daarna komt er ook lucht in de aggregaten.

De mate van normale krimp hangt sterk af van het kleigehalte. Hoe zwaarder de klei, hoe kleiner de poriën en hoe groter de krimp. In sommige zware kleigronden treedt alleen normale krimp op, wat betekent dat de bodemaggregaten het hele jaar door verzadigd zijn (Van den Akker et al., 2013).



**Figuur 2.3** Bodemkrimpkarakteristiek (SSCC) van een kleigrond  $V_{pore}$  = poriënvolume,  $V_{solid}$  = volume vaste stoffen,  $V_{water}$  = volume water (Naar Kim et al. 1992).

Naast de omvang van volumeveranderingen bij bevochtigen en drogen, die wordt beschreven door de SSCC, is de geometrie van het zwellen en krimpen van belang voor het modelleren van watertransport in zwellende en krimpende grond. De geometrie bepaalt namelijk de mate van volumevermindering die in de bodemmatrix zichtbaar wordt als bodemdaling of als scheurvorming. Aan de bovenkant van het bodemprofiel is de grond meestal droger en daardoor sterker en stijver dan op grotere diepte. Bovendien is aan de bovenkant van het bodemprofiel de belasting van erboven liggende grond niet of slechts in geringe mate aanwezig. Als gevolg daarvan zullen krimp-scheuren niet worden gedicht. De krimp is dus isotroop aan de bovenkant van het bodemprofiel (gelijk in alle drie dimensies) en veroorzaakt bodemdaling en scheurvorming in gelijke mate. Dieper in het bodemprofiel worden de scheuren samengedrukt door het bovenliggende gewicht van de bodem, zodat het volledige volume aan krimp op die diepte wordt omgezet in bodemdaling aan het oppervlak.

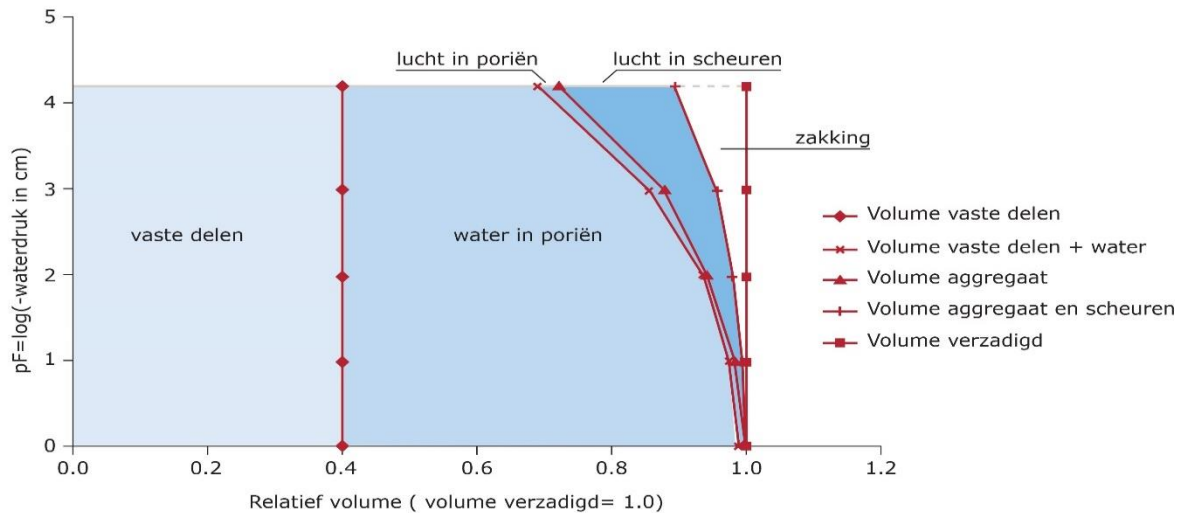
Of en hoeveel een grond of aggregaat krimpt (zwellt) door het onttrekken (of toevoegen) van water hangt af van:

- De hoeveelheid water die door de plant aan het aggregaat kan worden onttrokken. Een bodem kan in dit opzicht worden gekarakteriseerd door zijn waterretentiekarakteristiek, die de relatie aangeeft tussen de zuigspanning en het vochtgehalte.
- De hoeveelheid water die in het aggregaat kan worden opgenomen door neerslag of door capillair water uit diepere lagen.
- De krimpeigenschappen (zwellen) van de grond zoals weergegeven in de bodemkrimpkarakteristiek (SSCC).

De combinatie van waterretentiekarakteristiek en krimp-karakteristiek volgt de verdeling van het relatieve volume bij verschillende zuigspanningen (Figuur 2.4). De geometriefactor (1: voor anisotroop en 3: voor isotroop) bepaalt dan de verdeling van de krimp over scheuren of bodemdaling (Rijnierse, 1983).

### Verschillen tussen zwellen en krimpen

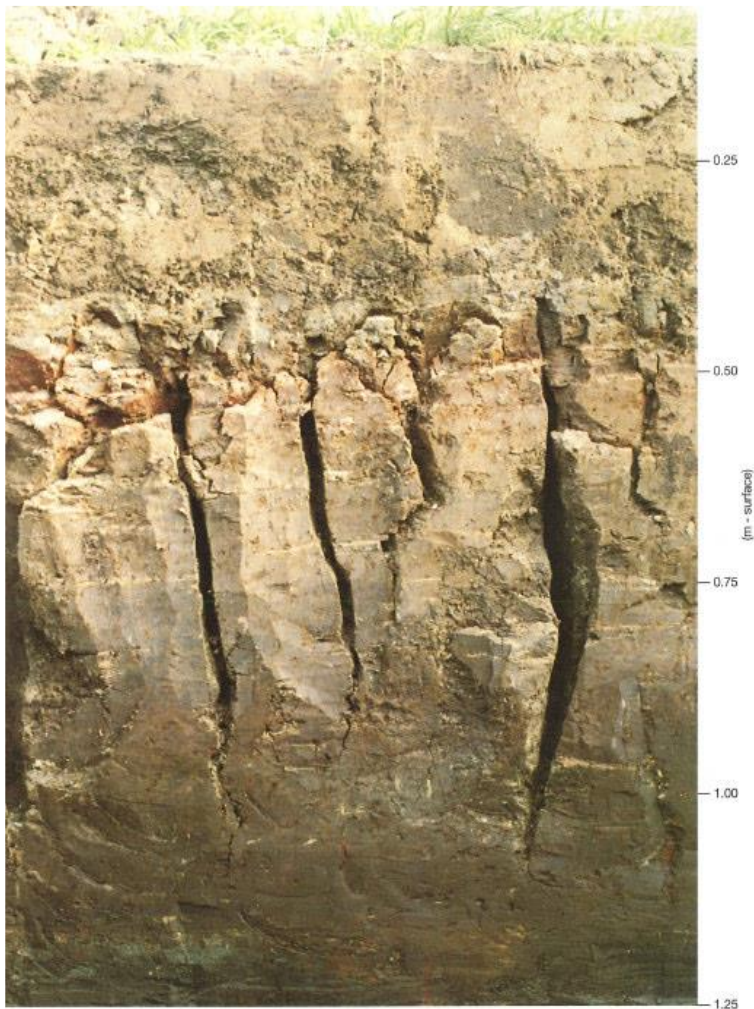
De meeste onderzoeken naar krimp- en zwelgedrag richten zich op het krimpproces. Dit betekent dat er relatief weinig bekend is over het zwelproces. Het is bekend dat met name veen en sommige kleigronden sterk hydrofoob (waterafstotend) kunnen zijn (Dekker en Ritsema, 1996; Hoekstra et al., 2021). Voordat neerslag het aggregaat binnendringt, kan dit zorgen voor een vertraagde opname van neerslagwater en dus voor een grotere afvoer van water via de krimpscheuren naar de ondergrond. Uitdroging van aggregaten kan dan van binnenuit plaatsvinden door wateropname door wortels, terwijl hydratatie van buitenaf zal plaatsvinden door neerslag. Dit verschil in processen tijdens drogen en bevochtigen zal leiden tot verschillende volumeverandering in krimp- en zwellingsomstandigheden.



**Figuur 2.4** Verdeling van het relatieve volume in vaste stof, water en lucht in relatie tot de zuigspanning van een zeer zware klei uit Bruchem (NL) (naar Van den Akker et al., 2013).

Dexter (1991) ziet ook een groot verschil in de snelheid waarmee krimpscheuren zich weer sluiten in verschillende bodems. In sommige bodems gebeurt dit vrijwel onmiddellijk na bevochtiging, terwijl er bodems zijn die er dagen of weken over doen om de scheuren te sluiten. Hij ziet ook een verschil tussen scheuren en bioporiën, zoals tunnels die door regenwormen worden gemaakt. Als door swelling de scheuren sluiten, kunnen de bioporiën openblijven en zo ruimte bieden aan plantenwortels.

Ook onderzoek op jonge Nederlandse kleigronden (Flevoland) laat zien dat krimpscheuren tot 1,2 m -mv voorkomen en dat ze pas in het vroege voorjaar weer sluiten (Figuur 2.5) (Van den Akker et al., 2011).



**Figuur 2.5** Bodemprofiel met diepe kripscheuren (Flevoland, Nederland). In de bovenste 40 cm zijn de scheuren verdwenen door grondbewerking (Van den Akker et al., 2011).

### Experimenten met zwellen en krimpen

Er is veel onderzoek gedaan naar het krimpgedrag van klei- en veenbodems. De invloed van kleigehalte, het aantal droog/nat-cycli, landgebruik en organischestofgehalte zijn onderzocht (Bronswijk, 1991; Cornelis et al., 2006; Dörner et al., 2009). Daarnaast is in die onderzoeken ook geëxperimenteerd met verschillende methoden om de SSCC-curve in het laboratorium te meten. Het aantal experimenten met zwellende bodems is beperkt.

De meeste onderzoeken naar de invloed van zwellen en krimpen op het verbeteren van de bodemstructuur hebben betrekking op bewerkte bovengrond, waarbij droog-natbehandelingen het volume en de doorlatendheid van macroporiën vergroten (Grant et al. (1995); Pillai-McGarry et al. (1990); Chinn et al. (2008)). Dit effect wordt vaak aangeduid als 'self-mulchen'. McKenzie et al. (2002) beschrijven dit als: "Het natuurlijke vermogen van kleigronden om fijne aggregaten (< 5 mm) te genereren na slechts een paar cycli van bevochtigen en drogen."

Studies naar de structuur van de onder- en bovengrond in ongestoorde (niet-verdichte) omstandigheden zijn schaars (Schjonning et al., 2017). Een aantal studies heeft in-situmetingen van de ondergrond uitgevoerd. Dörner et al. (2009) vonden een significant verschil in het volume van macroporiën in vulkanische bodems bedekt met inheems bos of grasland. Ze concludeerden dat zwel/krimp verantwoordelijk was voor de significante toename van het volume van grove poriën. Liu et al. (2016) vonden een afname van de bulkdichtheid van de bovengrond in een lichte leemgrond in Noord-China als gevolg van drogen en vernatten. Schjonning et al. (2017) onderzochten zowel vriezen en dooien als zwellen en krimpen. Ze ontdekten dat een droog-natbehandeling significant effectiever was dan een vries-dooibehandeling voor het verbeteren van de bodemstructuur. De verbetering werd vooral gevonden in het vergroten van het volume

van de grote poriën en minder in het verminderen van de bulkdichtheid. De Leeuw (2009) voerde verschillende veld- en laboratoriumexperimenten uit op verdichte Nederlandse klei- en zandgronden. Voor de kleigronden werd, hoewel niet in alle gevallen, een toename van de verzadigde doorlatendheid na krimpen en zwellen gevonden; voor de slibrijke gronden werd dit effect niet aangetoond.

### Het effect van zwellen en krimpen optimaliseren

Vooraf onderzoek naar kleiige bovengrond laat zien dat zwellen en krimpen de structuur van de bodem kunnen verbeteren. Dit effect wordt ook waargenomen voor de ondergrond, hoewel het niet altijd eenduidig is, omdat meerdere processen verantwoordelijk kunnen zijn voor de verbetering. Onderzoek geeft ook aan dat zwellen en krimpen dynamische processen zijn. Dat maakt het moeilijk om een verbetering van de bodemstructuur te verklaren door zwellen en krimpen.

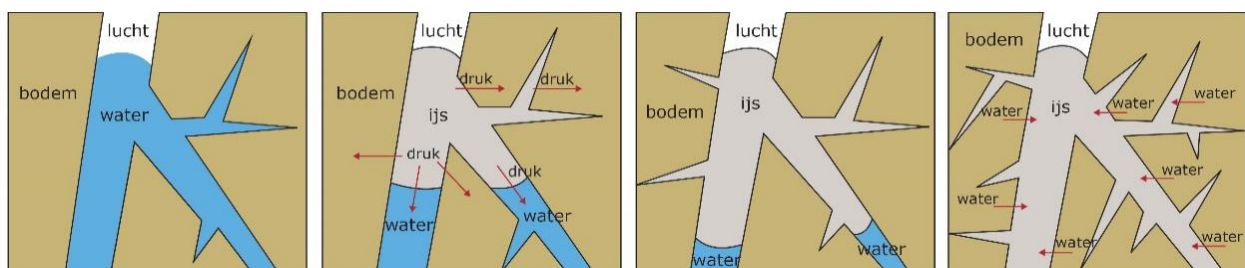
Het type klei, het kleigehalte en de mate waarin de klei voldoende kan uitdrogen om scheuren te vormen, bepalen de omvang van zwellen en krimpen (Bronswijk, 1991). Een deel van de structuurverbetering wordt verminderd door grondbewerking en verdichting door zware machines. In Nederland wordt de grens waarboven structuurherstel door krimp kan optreden over het algemeen gesteld op een kleigehalte van 17,5%. Dit betekent dat het natuurlijke herstelvermogen van zand- en siltrijke gronden via dit mechanisme zeer beperkt is. Vergelijken met andere Europese kleigronden hebben Nederlandse kleigronden door de samenstelling en mate van rijping (het zijn relatief jonge gronden) een sterk zwel- en krimpvermogen (Bronswijk, 1991).

Het krimp- en zwel proces wordt extra geactiveerd als de bodem voldoende uitdroogt. Dit kan door goede drainage zoals aangetoond in onderzoek van Bronswijk (1991), waarbij krimpscheuren gevonden werden op grotere diepte (30-70 cm -mv) en in grotere aantallen (tot 50% toename). Ook een diepe en goede beworteling is essentieel voor structuurherstel door bodemfysische en -biologische processen; omgekeerd is een goede structuur essentieel voor het bereiken van een diepe beworteling.

## 2.2.2 Vriezen en dooien

### Het proces

De jaarlijkse vries-dooicyclus is een van de processen die de bodemstructuur beïnvloedt. Het vries-dooiproces heeft een sterke invloed op het watertransport en het vochtgehalte in de bodem. Als de bodemtemperatuur onder 0°C daalt, gaat water over van de vloeibare naar de vaste fase. Hierdoor neemt het watervolume met ongeveer 9% toe (Zhao et al., 2004). De ijskristallen in de poriën drukken de bodemdeeltjes dichter op elkaar en verstoren zo de bestaande bodemstructuur. Daarnaast zorgt het bevriezen van het water ervoor dat er water naar de ijskristallen toestroomt en er uitdroging van de bodem plaatsvindt (Sun et al., 2021) (Figuur 2.6). Deze uitdroging zorgt ervoor dat met name kleigronden in volume afnemen. Het bevroersingsproces kan dus zowel volumetoename als volumevermindering veroorzaken.



**Figuur 2.6** Faseverandering en stroming van bodemvocht tijdens het vries-dooiproces (Sun et al. 2021 naar Gao et. 2016).

---

Volgens onderzoek van Dagesse (2010) en Hamilton (1966) is het vochtgehalte aan het begin van het vriesproces sterk bepalend voor de grootte en de richting van de volumeverandering. De volumeverandering door bevriezing kent drie verschillende fasen, afhankelijk van het vochtgehalte op het moment van bevriezing (Figuur 2.7):

1. Onder droge omstandigheden (ongeveer 20-40% vochtgehalte) is er weinig water beschikbaar om te bevriezen of naar de groeiende ijskristallen te stromen. De volumeverandering is dan heel klein.
2. Als het initiële vochtgehalte toeneemt (tot ongeveer 40-60%), is er bij vorst een volumevermindering. In deze situatie zijn de met lucht gevulde poriën groot genoeg om de volumeverandering op te vangen die gepaard gaat met de faseovergang van water naar ijs. Tegelijkertijd stroomt water toe naar de ijskristallen, waardoor de grond uitdroogt en krimpt.
3. Vanaf een vochtgehalte van ongeveer 65% bij het begin van bevriezing is het uitzetten van water door de vorming van ijs dominant. De volumevermindering gaat dan over in een volumetoename.

Uit het onderzoek van Dagesse (2010) blijkt dat bij een vochtgehalte van ongeveer 65% de grootste volumereductie optreedt (Figuur 2.7). Hoeveel het volume kleiner wordt, hangt af van het kleigehalte. Dit is tussen 1 en 10% (bij een kleigehalte tussen 10 en 75%). De volumetoename door de uitzetting van water bij bevriezing is minder afhankelijk van het kleigehalte en ligt tussen 2 en 4%. De bodemtextuur en het initiële vochtgehalte zijn dus belangrijke factoren voor de volumeverandering door bevriezing.

De volumeverandering tijdens het bevriezen zorgt niet noodzakelijkerwijs voor een blijvende verbetering van de bodemstructuur na het ontdooien; dit hangt af van de fase van bevriezing (Dagesse, 2010). Kay et al. (1985) vonden dat de uitzetting van ijskristallen onstabiele poriën vormt, die weer verdwijnen nadat het water is gesmolten en afgevoerd. Dit in tegenstelling tot de stabiele poriën, die gevormd worden tijdens grondbewerking of krimp (zie ook paragraaf 2.2.1).

### **Experimenten met bevriezen en ontdooien: verschillende uitkomsten**

In de afgelopen tien jaar zijn er verschillende onderzoeken uitgevoerd naar effecten van het bevriezen en ontdooien van bodems. Deze studies geven zeer uiteenlopende resultaten, met soms positieve en soms ook negatieve effecten op de bodemstructuur. Jabro (2014) en Sun et al. (2021) hebben enkele studies vergeleken en geconcludeerd dat de resultaten niet consistent zijn. Schjonning et al. (2017) vinden in een review zelfs dat met jaarlijkse bevriezing tot op grote diepte (> 1,0 m -mv) ondergrondverdichting niet blijvend wordt opgelost. Ze geven ook aan dat het mogelijk positieve effect van bevriezing op de bodemstructuur weer verdwijnt tijdens het ontdooien. Ook Voorhees (1983) en Alakukku (1996) laten zien dat ondanks herhaalde vries/dooicycli, bodemverdichting onder de ploegzool (ondergrond > 30 cm) niet verdwijnt.

Voor dit onderzoek zijn de verschillende (tientallen) studies globaal bekeken. Het is niet goed mogelijk om de genoemde onderzoeken te vergelijken en er conclusies uit te trekken over effecten van vriezen en dooien op de bodemstructuur. Dat komt allereerst omdat de onderzoeken verschillen met betrekking tot het bodemtype, het vochtgehalte bij aanvang van de proef, de diepte waarop vorst optreedt en het aantal vries-dooicycli tijdens een seizoen. Bovendien gebruiken de studies verschillende parameters om het effect van bevriezing en dooi aan te tonen. Dit zijn bijvoorbeeld poriënvolume, penetratieweerstand, waterdoorlatendheid of waterretentie. Tot slot richten sommige studies zich op ondiepe bodemverdichting (tot 30 cm), meestal in combinatie met niet-kerende grondbewerking, terwijl andere zich meer richten op de diepe ondergrond (30-90 cm -mv). Al deze factoren maken het vergelijken van de verschillende studies en het trekken van conclusies over de effectiviteit complex.

### **Positieve effecten op de bodemstructuur**

Toch zijn er ook onderzoeken die duidelijk positieve effecten van bevriezen en dooien op de bodemstructuur aantonen. Jabro et al. (2014) vonden bijvoorbeeld voor een kleigrond in Montana dat de vries-dooicyclus de bodemverdichting met 60% vermindert tot een diepte van 30 cm. Een deel van deze verbetering werd echter veroorzaakt door het opzwellen en krimpen van de klei, niet door vriezen en dooien. Ook Henry (2007) en Unger (1991) vonden een afname van de penetratieweerstand en bulkdichtheid van de bodem tijdens de winter als gevolg van meerdere vries-dooicycli. Dan zijn er nog de studies van Edwards (2013), Fouli et al. (2013), Sahin et al. (2008) en Siarajan et al. (2018), waaruit blijkt dat herhaalde vries-dooicycli de

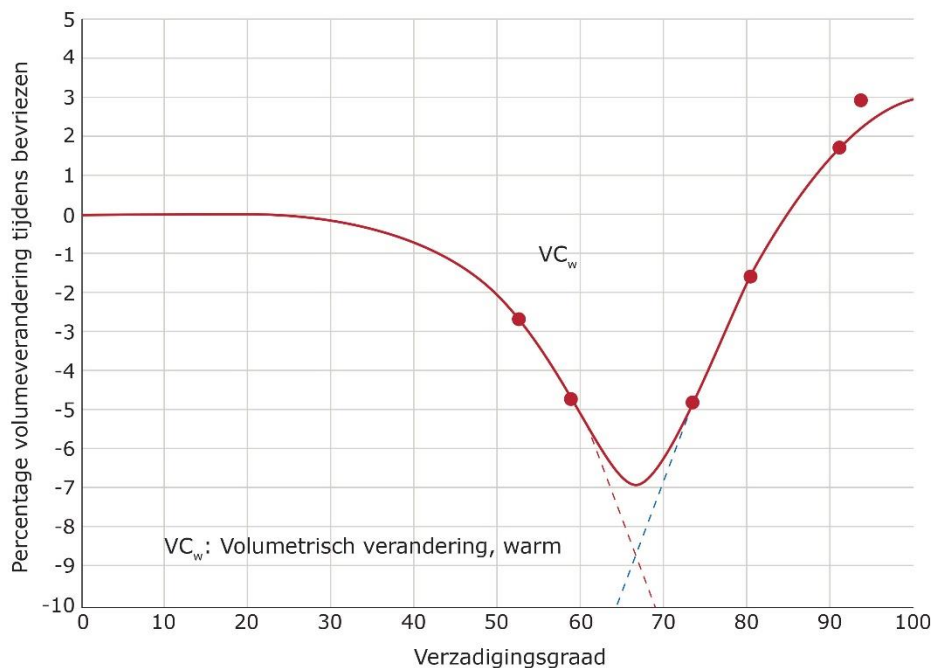


bodemstructuur losmaken, de bodemverdichting verminderen en de fysische en hydraulische eigenschappen van de bodem verbeteren. Al deze studies hebben gekeken naar de bovengrond (< 30 cm -mv).

### De effecten van bevriezen en ontdooien verbeteren

Verscheidende studies tonen aan dat bevriezen en ontdooien kunnen helpen om ondergrondverdichting op te heffen. De resultaten geven echter aan dat voor de diepere ondergrond (> 30 cm) het effect beperkt kan zijn. Ook blijkt het mogelijke positieve effect deels te verdwijnen als de grond weer ontdooit.

Gebruikmaken van bevriezen en ontdooien van de bodem voor het opheffen van ondergrondverdichting is niet in alle gebieden mogelijk. Ten eerste moet de vorst gedurende meerdere jaren tot op grote diepte in de grond doordringen. In Nederland is dit over het algemeen beperkt (zie ook paragraaf 4.2). Grondbewerking en de aanwezigheid van groenbemesters beïnvloeden de diepte tot waarop vorst kan doordringen. Bovendien verbeteren kleigronden meer door bevriezing en dooi dan zandgronden. Dit komt omdat kleigronden (> 20% kleigehalte; Dagesse, 2010) door bevriezing sterk kunnen uitdrogen en dus krimpen.



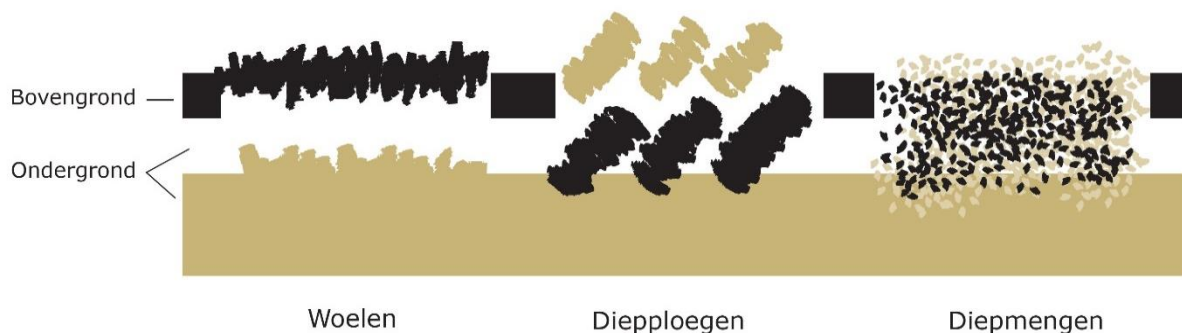
**Figuur 2.7** Gecombineerde volumetrische verandering versus procentuele verzadiging curve voor Hamilton's - 6,7 °C (=warm) gegevens (Naar Dagesse, 2010).

## 2.3 Mechanisch herstel

Diepe grondbewerking wordt gebruikt om dichte lagen te doorbreken die van nature voorkomen in de bodem of die door belasting met machines ontstaan zijn. Grondbewerking dient ook om de structuur te verbeteren. De technieken die hiervoor worden gebruikt zijn woelen, diepploegen (keren) en diepmengen. Figuur 2.8 en Figuur 2.9 geven de verschillende technieken weer (Schneider et al., 2017). Woelen maakt de bodem los en verlaagt de bulkdichtheid van de ondergrond zonder de bodem te keren of te mengen. Diepploegen daarentegen draait bodemhorizonten om. Het bodemprofiel wordt volledig of voor de helft omgekeerd, waarbij de horizonten van de ondergrond aan het bodemoppervlak terechtkomen en de horizonten van de bovengrond dieper in de grond begraven worden. Bij diepmengen (ook wel diepspitten genoemd) worden de ondergrond en de bovengrond volledig gemengd.

Als diepe grondbewerking wordt gebruikt voor het herstellen van ondergrondverdichting, is het belangrijkste doel om scheuren of barsten te maken in alleen de verdichte zone. Hierdoor kunnen de beworteling en drainage worden hersteld, terwijl de verstoring van de rest van het bodemprofiel tot een minimum wordt beperkt. Daarom heeft woelen duidelijk de voorkeur voor herstel van ondergrondverdichting boven diepploegen en diepmengen (diepspitten). Praktijkproeven op zavel uit 1990 met verschillende diepe grondbewerkingstechnieken bevestigden deze conclusie: na diepploegen en diepmengen werd een snelle herverdichting gevonden (Kooistra en Boerma, 1997). Bij woelen werd minder herverdichting gevonden.

Naast de hierboven genoemde technieken kan de verdichting ook worden opgeheven door het boren van gaten. Door het vullen van de gaten met zand of compost worden de structuur en de waterdoorlatendheid verbeterd. De techniek is nu met name bekend vanuit het verbeteren van de structuur op golfterreinen en sportvelden. In dit rapport gaan we met name in op woelen en gaten boren, omdat dit technieken zijn die de bodem zo min mogelijk verstoren.



**Figuur 2.8** Schematische weergave van diepe grondbewerkingsmethoden (naar Schneider et al., 2017).

### 2.3.1 Woelen

#### Het proces

Losmaken van de bodem door woelen kan op twee manieren plaatsvinden: een volledige herschikking van de bodem of het maken van scheuren in de grond (Koolen, 1985). In het geval van een volledige herschikking wordt de grond gebroken en glijden de resulterende aggregaten omhoog. De grondmassa kan dan uitzetten en wordt losgemaakt. De aggregaten worden ten opzichte van elkaar herschikt, terwijl ze worden opgetild en weer naar beneden vallen (Figuur 2.11). Bij woelen om te scheuren, wordt de hele grondmassa omhooggetild en gescheurd, terwijl ze over de bovenkant van de woelpoot heen buigt voordat ze weer naar beneden valt (Figuur 2.10). Volgens Spoor et al. (2003) moet woelen vooral worden toegepast om scheuren te maken in het verdichte deel van de bodem. De grondmassa tussen de scheuren moet daarbij grotendeels intact blijven.



**Figuur 2.9** Afbeeldingen van verschillende diepe grondbewerkingsmethoden: woelen, diep mengen en diepploegen.

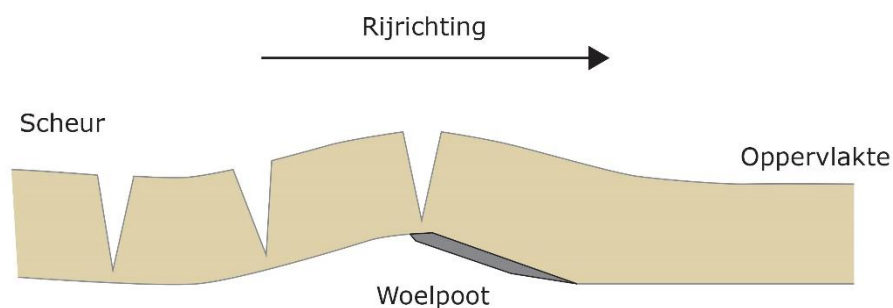


## Ervaringen met woelen

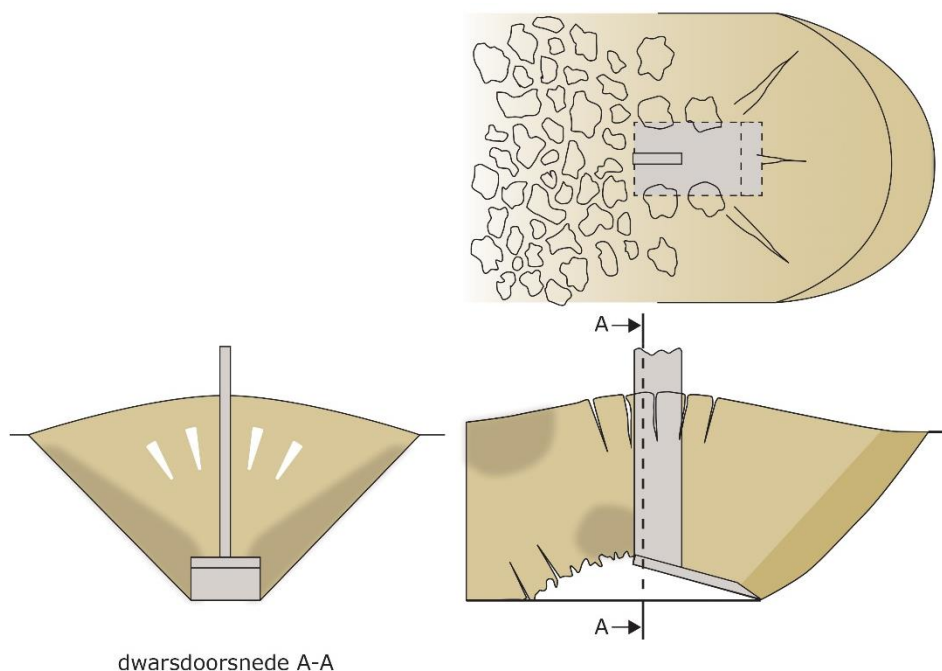
Ervaringen met woelen en de effecten daarvan op de gewasopbrengst zijn uitgebreid beschreven in twee metastudies van Schneider et al. (2017) en Yang et al. (2022a). Uit de studie van Schneider et al. (2017) komt een algemeen beeld naar voren dat woelen de bodemverdichting kan herstellen, maar dat het risico op herverdichting groot is. Herverdichting treedt vooral op in bodems met een hoog siltgehalte ( $> 70\%$ ) en een laag kleigehalte ( $< 20\%$ ), maar minder in kleigronden ( $> 20\%$ ).

Herverdichting is vooral een risico als het woelen wordt uitgevoerd onder te natte omstandigheden (Schulte-Karring et al., 1993). Maar woelen kan ook ineffectief zijn als de omstandigheden te droog zijn, vooral bij zware (kleirijke) bodems. In kleigronden is de herverdichting sterk afhankelijk van het type klei, waarbij kaoliniet het gevoeligst is.

De meta-analyse toont ook aan dat het telen van gewassen met een uitgebreid wortelstelsel gedurende meerdere jaren na het woelen een positief effect kan hebben op de bodemstructuur en deze op de lange termijn zelfs kan stabiliseren. Dit positieve effect wordt ook beschreven in verschillende andere studies (Kooistra en Boersma, 1994; Wanink et al., 1990; Olesen & Munkholm, 2007). De studie van Weill (2005) geeft aan dat woelen kan helpen om verdichting op te heffen, maar ook dat het ineffectief kan zijn en zelfs schadelijk voor de bodem, als de bewerking niet goed gepland is of onder slechte bodemomstandigheden wordt uitgevoerd. Zelfs als het woelen onder goede omstandigheden wordt uitgevoerd, kan het volume losgemaakte grond onvoldoende zijn voor een verbetering van de bodemstructuur. In sommige gevallen kan de grond op diepte juist worden verdicht in plaats van losgemaakt.



**Figuur 2.10** Scheurvorming door woelen (naar Spoor et al., 2003).



**Figuur 2.11** Schematische tekening van het ondergrondproces bij woelen. Donkere schaduw: volledige verstoring, strepen: lichte schaduw: scheuren. Bovenaanzicht en zijaanzicht (Naar Koolen, 1985).

---

Succesvol woelen hangt niet alleen af van de bodemgesteldheid. Andere factoren, zoals het vermogen van de trekker en de uitbalancerings- en de instellingen van de woeler, zijn belangrijk voor goede resultaten (Weill, 2015). Bij gebruik van ongeschikte (of ongeschikt ingestelde) werktuigen en grondbewerking op te grote diepte kan verdichting optreden tijdens het woelen (Weill, 2015; Spoor, 2006).

### **Woelen onder specifieke omstandigheden**

Er is veel onderzoek gedaan naar het effect van woelen om de bodemstructuur te verbeteren. Slechts een beperkte hoeveelheid onderzoek is gericht op het opheffen van ondergrondverdichting. Belangrijk voor herstel is dat er wordt gekozen voor technieken waarbij de bodem wordt gescheurd en waarbij de bodem slechts in zeer beperkte mate wordt losgemaakt. Hierdoor blijft de draagkracht behouden en is de kans op herverdichting kleiner.

De vochtomstandigheden en de textuur van de bodem zijn sterk bepalend voor het al dan niet succesvol herstellen van ondergrondverdichting op lange termijn of dat het herstel regelmatig moet worden herhaald. Over het algemeen is de kans op herverdichting op korte termijn (3-4 jaar) groot bij het woelen van relatief lichte gronden (klei < 20%). Deze herverdichting is echter sterk afhankelijk van de mechanische belasting na het onderploegen. In het algemeen zou het raadzaam zijn om de grond niet te bewerken en gedurende enkele seizoenen na het woelen met beperkte belasting te rijden (Schulte-Karring et al., 1993). Als dit niet haalbaar is, is het belangrijk om een groenbemester in te zaaien om de mechanisch losgemaakte bodemstructuur te behouden.

## **2.3.2 Boorgatmethode**

### **Het proces**

Het boren van kleinere of grotere gaten door verdichte bodemlagen kan helpen om poriën te maken waarin plantenwortels kunnen groeien en water kan infiltreren. Het voordeel van deze methode is dat bodemverstoring minimaal is en de sterkte (draagkracht) van de bodem behouden blijft. Hoe groter de sterkte (draagkracht) van de bodem, hoe kleiner het risico op herverdichting. De boorgatmethode is een alternatief voor de meest gebruikelijke grondbewerking zoals woelen.

### **Ervaringen met de boorgatmethode**

In Zwitserland zijn experimenten uitgevoerd waarbij gaten van 1,25 mm diameter (Ø) werden geboord in verdichte grond, tot een diepte van 20-30 cm -mv (Colombi et al., 2017). Plantenwortels maakten gebruik van deze kunstmatige macroporiën vanwege een verminderde weerstand en een verbeterde luchtdoorlatendheid.

Experimenten met geboorde gaten van Ø 1 cm tot Ø 10 cm en verschillende dieptes zijn in 2017 en 2018 uitgevoerd op een verdichte zandgrond in Nederland en op een zandige leemgrond in China (Yang, 2022b) (zie Tabel 2.1). Het experiment in Nederland bevatte drie boorgatbehandelingen, twee mestbehandelingen en twee gewassen (snijmaïs en sorghum). De meetplots waren 1 m<sup>2</sup> groot, met 9 planten/m<sup>2</sup>. Elk boorgat van Ø 6 of Ø 9 cm werd ingezaaid met een gewas. De bemesting bestond uit een mengsel van grond en organische mest dat in de boorgaten werd aangebracht of aan de oppervlakte en licht werd ingewerkt. Het experiment met kleine boorgaten werd in 2017 alleen in Nederland uitgevoerd.

In China werd het experiment in 2018 uitgevoerd op twee meetplots (Yang, 2022b). Dit experiment bestond uit vijf boorgatbehandelingen en twee mestbehandelingen. Er was een boorgat van Ø 7 cm of Ø 10 cm voor elke plant. De plantdichtheid was 9 planten/m<sup>2</sup>.

In het experiment in Nederland was de opbrengst niet elk jaar significant hoger met de boorgaten, maar in het experiment in China gaven de meetplots met de grootste gaten (Ø 10 cm) gaten de hoogste opbrengst. Het toedienen van mest gaf geen hogere graanopbrengst (winter tarwe, maïs) of totale biomassa op beide locaties. Hoewel wortels bij voorkeur groeien in boorgaten, werd er geen significant verschil gevonden in wortelgewicht tussen de behandelingen met en zonder gaten op de zandgrond in Nederland. In een van de experimenten in China was het totale wortelgewicht hoger in boorgaten in de bovenste laag (0-20 cm) dan in de ongestoorde grond. De aanwezige bodemverdichting op het proefperceel was geconcentreerd in de bovenste laag en plantenwortels hebben gebruikgemaakt van de lossere grond in de boorgaten.

**Tabel 2.1** Locatie, jaar, diameter en diepte van de boorgaten in het experiment van Yang, 2022b.

Site	Jaar	Gewas	Boordiameter	Diepte in cm
Odiliapeel	2017	Maïs en sorghum	1 cm	60 cm
			6 cm	60 cm
	2018	Maïs en sorghum	6 cm	60 cm
			9 cm	60 cm
Luancheng-Noord & Luancheng-Zuid	2018	Maïs	7 cm	30 cm
			7 cm	60 cm
			10 cm	30 cm
			10 cm	60 cm

Een combinatie van de boorgatmethode, organischestof-bemesting en diepwortelende gewassen werd toegepast op een zandgrond en een zandige leemgrond in Nederland in het kader van het PPS-project Klimaatadaptatie Open Teelten (Van Balen, 2023). Een machine is op een trekker gemonteerd met grondboren van Ø 2,5 cm op een afstand van 25 cm en boren van Ø 10 cm op een afstand van 75 cm. Deze machine kan boorgaten maken tot een diepte van 60 cm -mv (Figuur 2.12). Het voordeel van het boren van gaten is dat grond uit de verdichte laag wordt verwijderd, zodat er spanning wordt weggenomen uit de verdichte laag en de weerstand tegen indringing door wortels van de grond naast het gat kan worden verminderd. In plaats van boren van 2,5 cm doorsnede kunnen ook stangen van 2,5 cm worden gebruikt om een verdichte bodemlaag te doorboren.

De grote gaten (10 cm) worden in de onderste helft opgevuld met grof zand of compost, afhankelijk van het effect van bodemverdichting op de bodemeigenschappen en de plantengroei (Figuur 2.13). Grof zand heeft een beter drainage-effect en blijft in de bodem. Vulling van boorgaten met grof zand wordt toegepast op kleigrond. Compost of ander organisch materiaal wordt toegepast op zandgrond. Het stimuleert de wortelgroei, maar zal na verloop van tijd verdwijnen uit de bodem. De kleine gaten (Ø 2,5 cm) worden niet opgevuld. Wanneer in plaats van het boren van de kleine gaten een stang in de grond wordt gedrukt, is er veel kracht nodig. Deze methode heeft tevens als nadeel dat er een grote kans is op verdichting van de wanden van deze gaten.

Een combinatie van het diep losmaken van de grond en het aanbrengen van voedingsstoffen kan de wortelgroei bevorderen (Schulte-Karring et al., 1993). Compost is niet alleen een bron van organisch materiaal en daarmee een structuurverbeteraar, maar ook van voedingsstoffen die de wortel- en plantengroei kunnen stimuleren. Met de toevoeging van 2,5 liter compost per boorgat wordt 36 ton compost per hectare toegevoegd. Uit deze compost zal ongeveer 18 kg N, 48 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> en 173 kg K<sub>2</sub>O per hectare voor de plant beschikbaar zijn in het eerste jaar na toepassing als de compost wordt aangebracht in de bovenste laag, waar de meeste wortels groeien. Compost wordt echter eenmalig toegepast en zit onder de bouwvoor. Het effect van de nutriënten op de groei is dan ook waarschijnlijk gering.

**Figuur 2.12** Op een trekker gemonteerde boormachine met boren met een diameter van 10 cm (Van Balen, 2023).



**Figuur 2.13** Recent gemaakte boorgaten Ø 10 cm op 75 cm afstand, gevuld met compost (Van Balen, 2023).

### De effecten van boorgaten verbeteren

Uit de experimenten van Yang blijkt dat plantenwortels de voorkeur geven aan de grotere boorgaten. Dit gaf een hogere opbrengst, met variaties tussen bodemtype en jaren. Er waren geen aanwijzingen dat wortels gebruikmaken van de kleinere, 1 cm grote boorgaten (Yang, 2022b).

Het effect van de losse grond in boorgaten kan worden vergroot door planten boven deze boorgaten te laten groeien. Dit is haalbaar met moderne, nauwkeurige gps-technieken, maar hangt wel af van de afstand tussen de gewassen die worden geteeld. De afstand tussen rijen met akkerbouwgewassen varieert in Nederland van 12,5 tot 75 cm. Een afstand van 25 cm zou het geschiktst zijn voor de meeste gewassen.

Het maken van boorgaten kost veel tijd, ook al is minder machinevermogen nodig om de gaten te boren dan bij gebruik van een woelpoot voor het openbreken van de ondergrond. Bovendien kan er tot grotere diepte gewerkt worden dan nu met de meeste woelpoten mogelijk is. De voor de proefaanleg ontwikkelde boormachine (Figuur 2.12) wordt door één persoon bediend, maar elke boorslag met grote of kleine boren duurt één minuut. Hiermee is 2,25 m<sup>2</sup> grond behandeld wanneer op 75 cm afstand wordt gewerkt en 0,75 m<sup>2</sup> als er op 25 cm wordt gewerkt. Het boren van gaten, in een verband van 75 x 75 cm, vraagt 74 uur per hectare (vullen van gaten niet meegerekend). Verdere analyse van de boorgatmethode is nodig om het juiste aantal gaten per m<sup>2</sup>, de diameter, de diepte en het toegevoegde materiaal in de gaten te bepalen. Een zelfrijdende trekker met werktuig kan helpen om deze techniek economisch haalbaar te maken. Maar zelfs dan is het boren tijdrovend en zou het alleen gebruikt moeten worden op sterk verdichte grond waar behoud van de draagkracht belangrijk is en waar de verdichting onder normale bewerkingsdiepte zit.

## 2.4 Biomechanisch herstel (biowoelers)

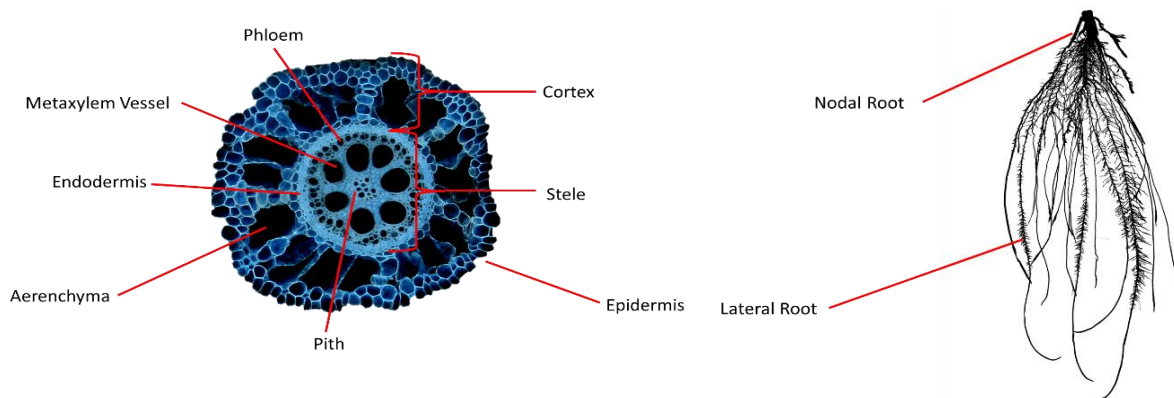
### Het proces

Plantenwortels kunnen worden gebruikt om de fysieke eigenschappen van de bodem te veranderen, omdat ze krachten op de bodem kunnen uitoefenen (Elkins, 1995). Peulvruchtgewassen en meerjarig grasland kunnen de bodemstructuur in de ploegzool verbeteren. Wortels van andere gewassen kunnen door verdichte bodemlagen heen groeien en worden om die reden ook wel 'biowoelers' genoemd. De macroporiën (bioporiën) die achterblijven na het afsterven van plantenwortels verbeteren de beweging van water en lucht door de bodem. Deze bioporiën kunnen ook gebruikt worden door gewassen die later geteeld worden.

Om wortels te laten groeien in verdichte grond moeten enkele fysieke beperkingen overwonnen worden. In verdichte grond is gebrek aan ruimte voor bodemdeeltjes die verplaatst worden door groeiende wortels. Beperkte wortelgroei in een verdichte bodem heeft ook een negatief effect op de infiltratie en retentie van water en de doorlatendheid voor gassen en gasuitwisseling. Dit onderdrukt de nutriëntencyclus en heeft een negatieve invloed op de habitat voor bodemorganismen (Bakema et al., 2023). Zo werd in een experiment in verdichte grond gevonden dat de wortellengte voor gerst (*Hordeum vulgare*) 50% minder was vergeleken met niet-verdichte grond, en 21% minder voor triticale (*Triticosecale*) (Lipiec et al., 2012).

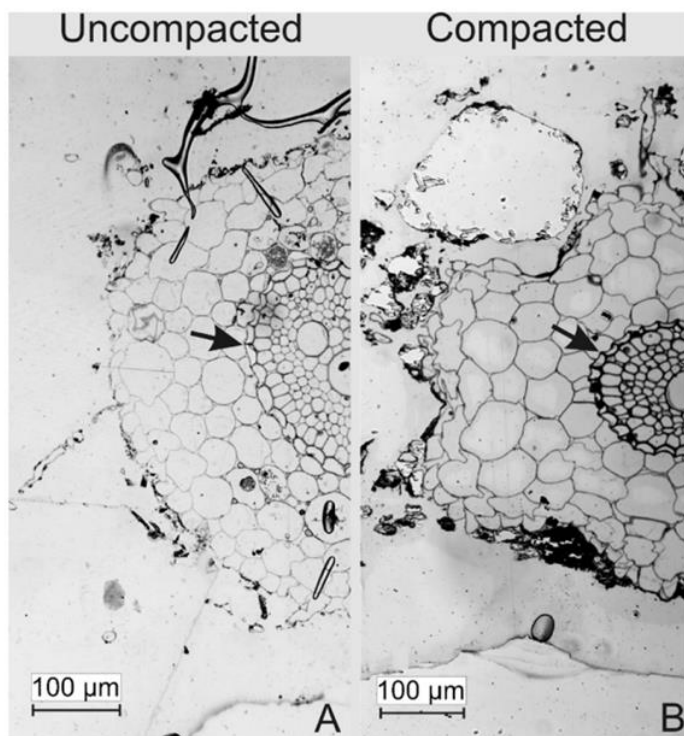
Wortelstelsels van verschillende plantensoorten reageren verschillend op bodemverdichting. Over het algemeen is een indringingsweerstand van de bodem van 0,8-2 MPa voldoende om de wortelgroei te beperken. Bij een indringingsweerstand van 5 MPa stopt de wortelgroei zelfs.

Planten kunnen hun wortelsysteem aanpassen aan de groeiomstandigheden. Figuur 2.14 geeft uitleg van termen over de wortelfysiologie die hierna wordt gebruikt.



**Figuur 2.14** Uitleg van enkele wortel-fysiologische termen in (links) dwarsdoorsnede en (rechts) typen wortel (Bakema et al., 2023).

Het oppervlak van de cortex en/of vaatbundels wordt aangepast in reactie op bodemverdichting (Figuur 2.14 en Figuur 2.15). De diameter van de vaatbundels en de dikte van de cortex van wortels die groeien in verdichte grond kunnen groter worden. In het geval van tarwe (Figuur 2.15) neemt het oppervlak van de cortex toe ten koste van het oppervlak van de vaatbundels. Van andere graansoorten als gerst en tritcale is juist een groot vaatbundeloppervlak gemeten in verdichte grond (Lipiec et al., 2012). Deze verschillende reacties van plantenwortels geven aan dat de variabiliteit in groeiomstandigheden groter is in verdichte grond en dat de wortels zich daarop aanpassen. Behalve door het aanpassen van de wortelsterkte kunnen planten ook het transport van zuurstof in de plant veranderen. Ze maken daarbij een verbinding tussen het onderste en bovenste deel van het wortelstelsel (Colombi en Keller, 2019). Het vermogen om wortels te laten groeien in verdichte grond wordt bepaald door de toename in dikte van celwanden en oppervlakte, maar ook in het aantal cortex(schors)cellen en diameter van de stengel.



**Figuur 2.15** Anatomie van een tarwewortel in niet-verdichte grond (A) en verdichte grond (B). De pijl geeft de grens aan tussen vaatbundels en cortex (primaire schors). Bron: Lipiec et al. (2012).

Plantenwortels hebben meer mechanismen om met een verdichte bodem om te gaan. Zo werken exudaten (vloeistoffen die plantenwortels afscheiden) als een smeermiddel voor de plantenwortels. En het vervellen van wortels (afwerpen van oppervlakkige plantencellen) vermindert de wrijving op de wortelpunt (Colombi en Keller, 2019). De plant beperkt het risico op buigen of breken van zijn wortels door de worteldiameter te vergroten als de indringingsweerstand toeneemt. Verder zijn planten in staat om hun wortels onder scherpe hoeken te laten groeien, waardoor ze kunnen groeien in sterk verdichte bodems.

### Ervaringen met diepwortelende gewassen

Diepwortelende gewassen kunnen een verdichte ondergrond doorbreken en hebben als bijkomend voordeel dat ze minder gevoelig zijn voor verdroging. Verschillende gewassen zijn in het verleden getest op deze eigenschappen, zoals groenbemesters met diepe penwortels (radijs en luzerne), koolzaad, vezelhennep en rogge (CLM, 2016). Daarnaast is sorghum onderzocht, dat kan worden gebruikt in combinatie of afwisseling met maïs.

#### *Sorghum: meer en diepere wortels dan maïs*

Duits onderzoek, waarin maïs wordt vergeleken met verschillende soorten sorghum op een sterk verdichte zavelgrond, laat positieve resultaten zien voor het verminderen van bodemverdichting. Sorghum heeft niet alleen een veel diepere beworteling dan maïs, maar laat ook veel meer wortelresten achter in de bodem (50-80% op een diepte tussen 20 en 100 cm -mv) (Schittenheim en Schroetter, 2014). In Nederland werd een vergelijking gemaakt tussen maïs en verschillende soorten sorghum op proefvelden in Lievelede (Iemig zand), waar naast opbrengst ook beworteling werd onderzocht. Vergeleken met maïs waren er bij de sorghum 40% meer wortels aanwezig op een diepte van 25-40 cm. Bovendien werd de beworteling van sorghum tot op grotere diepte gevonden dan van maïs (Deru et al., 2018).

Onderzoek naar sorghum is vooral gericht op selectie van variëteiten voor een betere opbrengst en droogteresistentie en minder voor het doorbreken van verdichte lagen. In een veldproef met sorghum in Nederland werd geen herstel van bodemverdichting waargenomen, terwijl sorghum een fijner en intensiever wortelstelsel bleek te hebben dan maïs en een hogere wortelmasse in diepere lagen (tot 50 cm) (Van den Akker et al., 2021). De beworteling van sorghum varieert tussen variëteiten: vooral die met een lage voedingswaarde hebben een diepe beworteling. Daarnaast blijkt sorghum gevoelig voor een lage



---

bodemtemperatuur en een droge bovengrond na het zaaien en tijdens de kiemfase, waardoor de plant zich niet optimaal ontwikkelt (Heinen et al., 2021).

#### *Maïs reageert verschillend op bodemverdichting*

Maïsvariëteiten blijken in veldexperimenten verschillend te reageren op bodemverdichting. Een variëteit presteerde beter ten opzichte van andere variëteiten in verdichte grond in een experiment van Xiong et al. (2020). Deze variëteit was ook beter bestand tegen droogte. Minder wortelgroei en een vertraagde ontwikkeling van zijwortels hebben gevolgen voor de hoeveelheid wortels in de bovengrond. Planten zullen het aantal wortels in de toplaag vergroten, waardoor water- en zuurstofopname toeneemt. Hierdoor neemt de indringingsweerstand in de rest van de bodem toe en het gehalte zuurstof in de bodem af (Colombi en Keller, 2019).

#### *Gewassen met penwortels in het bouwplan*

Aanpassingen in de gewaskeuze en vruchtwisseling kunnen helpen om de bodem beter bewortelbaar te maken. Penwortels kunnen diepere bodemlagen binnendringen en bioporiën maken. In deze bioporiën kunnen wortels van volggewassen groeien (Chen en Weil, 2010) (zie het rechterdeel van Figuur 2.16 (Zhang en Peng, 2021)). In vergelijking met een systeem zonder voorafgaand diepwortelend gewas zijn er minder mogelijkheden voor een gewas om te wortelen, zeker in een 'No-till'-systeem. Het is bekend dat de wortels van een gewas als Tillage radish of Daikon (*Raphanus raphanistrum* subsp. *sativus*) verdichte lagen beter binnendringen dan wortels van rogge (*Secale cereale*). Bij de groenbemesterkeuze kan hier rekening mee gehouden worden. Wortels van Tillage radish hebben een grotere diameter dan wortels van rogge. Dit bevestigt eerdere bevindingen dat wortels met een grote diameter gemakkelijker in verdichte grond kunnen doordringen dan wortels met een kleinere diameter.

#### *Groenbemester als wegbereider voor plantenwortels*

Wortels van groenbemesters kunnen door verdichte lagen dringen, maar daardoor wordt de bulkdichtheid of indringingsweerstand van de bodem niet altijd minder in het volgende jaar. Een verklaring hiervoor is dat het volgende gewas de bioporiën gebruikt die zijn gemaakt door de wortels van de groenbemester (Chen en Weil, 2010). In een veldexperiment met tarwe geteeld na koolzaad werden er geen veranderingen in de structuur van de ondergrond gevonden, hoewel de opbrengst van tarwe hoger was dan in een teelt zonder groenbemester en er wortels van koolzaad werden gevonden tot op 1,70 m diepte (Cresswell en Kirkegaard, 1995).

In een ander experiment op verdichte grond met verschillende groenbemesters in een teelt met maïs werd ook geen invloed gevonden op de droge bulkdichtheid (Zhang et al., 2022). Wel was de indringingsweerstand groter en daalde het vochtgehalte in de bodem door het gebruik van de groenbemesters. De wortelmasse en de wortellengte in de verdichte grond bleken significant groter door het gebruik van de groenbemesters en ook de opbrengst van de maïs was groter. Dit toont mogelijk het voordeel dat wortelkanalen van eerder geteelde groenbemesters bieden aan het volgende hoofdgewas.

#### *Diameter en vorm van het wortelstelsel zijn van belang*

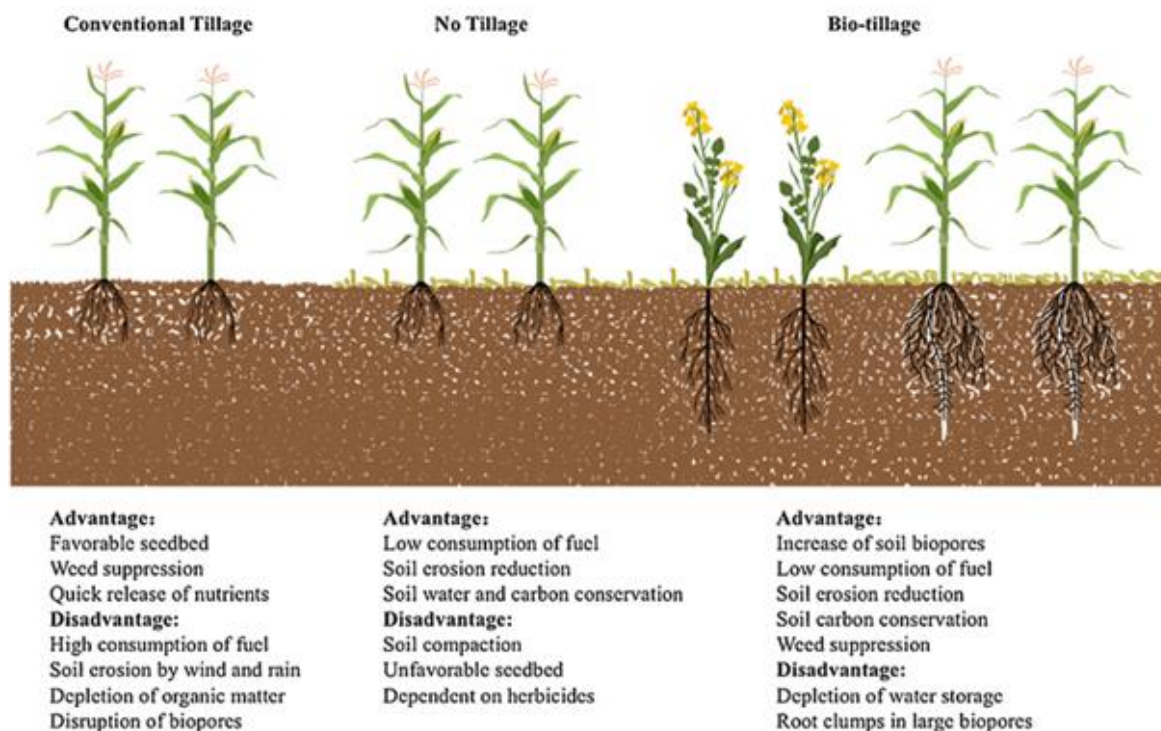
Voor het binnendringen van de bodem is niet alleen de diameter van de wortels van belang, maar ook het ontwerp van het wortelstelsel. Tillage radish en koolzaad (*Brassica napus* subsp. *napus*) hebben een penwortel, maar Tillage radish heeft één penwortel met dikke vertakkingen, terwijl koolzaad meerdere penwortels met dunne zijwortels heeft (Chen en Weil, 2010).

Tweezaadlobbige gewassen (dicotylen) kunnen beter in verdichte grond doordringen dan eenzaadlobbigen (monocotylen). Dit komt waarschijnlijk doordat tweezaadlobbige gewassen hun worteldiameter kunnen vergroten als de worteldruk toeneemt (Cresswell en Kirkegaard, 1995).

#### *Biomassa niet altijd minder in verdichte grond*

Planten vormen niet altijd minder biomassa in een grond met een hogere bulkdichtheid en indringingsweerstand. Zo werd in een veldexperiment geen verschil gevonden in de totale biomassa van wortels tot 62,5 cm diepte tussen een verdichte bewerkte grond en een niet-bewerkte en niet-verdichte grond (Colombi et al., 2018). Maar in de niet-bewerkte grond waren de wortels geconcentreerd in de bovenste laag. Door de verhoogde indringingsweerstand waren er minder zijwortels en bijwortels en was de

worteldiameter groter. Wel blijkt dat planten met een ondiep wortelstelsel in een verdichte grond minder goed gebruik kunnen maken van water en voedingsstoffen in de bodem.



**Figuur 2.16** Vergelijking van effecten van conventionele grondbewerking, geen grondbewerking en biotillage op bodem en gewas (Zhang en Peng, 2021).

## De effecten van biwoelers verbeteren

### Gewassen die bestand zijn tegen droogte en een hoge indringingsweerstand

Ook wanneer niet bekend is of een gewas in staat is in een verdichte bodem te groeien, zijn er planteigenschappen die een indicatie kunnen geven of een gewas deze eigenschap heeft. Plantensoorten kunnen zich aanpassen aan veranderingen in de bodemomstandigheden, zoals zuurstofconcentratie of droogte. De wortels van een erwtenplant kunnen bijvoorbeeld beter tegen lage zuurstofconcentraties of een hoge indringingsweerstand dan de wortels van tarwe (Bakema et al., 2023). Het vochtgehalte is van grote invloed op de indringingsweerstand en de zuurstofconcentratie in de bodem. In een droge bodem zal de indringingsweerstand hoger zijn en in een natte bodem de zuurstofconcentratie lager. Droge grond kan dezelfde fysieke eigenschappen (indringingsweerstand) hebben als verdichte grond. Eenjarige gewassen die zijn aangepast aan droge omstandigheden kunnen waarschijnlijk ook groeien in verdichte grond. Een voorbeeld is sorghum, dat eerst een hoofdwortel ontwikkelt (*seminal root*) en bijwortels in een later groeistadium. Dit wortelstelsel verschilt van dat van andere monocotyle (eenzaadlobbige) gewassen zoals maïs, die meerdere hoofdwortels heeft, gevolgd door bijwortels.

### Groeiperiode en wortelstelsel zijn bepalend

De lengte van de groeiperiode van een gewas (meerjarig, eenjarig) bepaalt het effect van plantenwortels op de bodemstructuur. Naast de groeiperiode zijn morfologische en fysiologische eigenschappen van het wortelstelsel belangrijk voor het vermogen van wortels om door verdichte bodemlagen te dringen, zoals de druk op de wortelpunt en de weerstand tegen wortelknikken (Cresswell en Kirkegaard, 1995). De lengte van de groeiperiode van een gewas is waarschijnlijk belangrijker voor het verminderen van bodemverdichting dan het vermogen van wortels om door verdichte lagen te dringen. Planten kunnen tijdens de groeiperiode namelijk te maken krijgen met verschillende groeiomstandigheden (door verschillende vochtgehaltes in de bodem), die de plant in staat stellen om het wortelstelsel uit te breiden. Hierdoor zijn meerjarige gewassen in staat om in de bodem door te dringen tot een diepte van 2-3 meter (Cresswell en Kirkegaard, 1995).



---

Hoe langer de groeiperiode van een gewas, hoe meer mogelijkheden wortels hebben om in diepere bodemlagen door te dringen. Verschillende vochtomstandigheden in de bodem veroorzaken swelling en krimp, waardoor scheuren ontstaan (zie paragraaf 2.1.1). Plantenwortels kunnen deze scheuren binnendringen. Als planten al voldoende ontwikkelde en actieve wortels in de bovengrond hebben, hebben ze meer gelegenheid om in scheuren in de ondergrond te groeien voordat deze zich weer sluiten.

#### *Plantenwortels activeren bodemorganismen*

Plantenwortels kunnen de bodemstructuur verbeteren door in verdichte bodemlagen door te dringen, maar er is nog een ander positief effect van plantenwortels op de bodemstructuur. Plantenwortels scheiden sappen uit en zorgen voor de aanvoer van organische koolstof in de bodem als ze afsterven. Dit kan de aanwezigheid en activiteit van regenwormen en micro-organismen vergroten en daardoor ook het aantal bioporiën en stabiele bodemaggregaten (Ning et al., 2022).

#### *Regenwormen zijn op verschillende manieren gunstig voor de bodemstructuur*

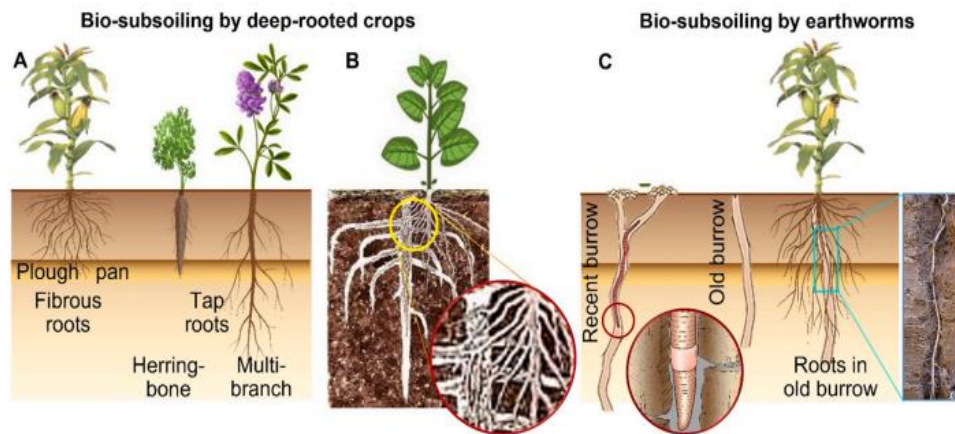
Er zijn regenwormen die verticale gangen maken. De gangen van deze regenwormen kunnen een tijdje blijven bestaan in de bodem en maken waterafvoer en gasuitwisseling mogelijk (Andriuzzi et al., 2015). Hierdoor wordt de infiltratiecapaciteit van de bodem groter en heeft intensieve regenval minder negatieve effecten. Dit werd aangetoond in experimenten met regenwormen die 'pendelaars' worden genoemd (*Lumbricus terrestris*) (Joschko et al., 1989).

Regenwormen kunnen plantenwortels helpen om diepere bodemlagen binnen te dringen. Gangen van regenwormen fungeren namelijk als bioporiën en kunnen worden gebruikt door plantenwortels, zelfs als er geen regenwormen meer aanwezig zijn (Figuur 2.17). De pendelaar regenworm (*Lumbricus terrestris*) is in staat om een ploegzool binnen te dringen. Deze regenwormen kunnen dus gangen maken in verdichte grond (maximaal 40% poriënvolume). Hoe compacter de grond, hoe meer wormen er aan het oppervlak worden gevonden, omdat ze in losse grond bodemdeeltjes opzij duwen, wat niet mogelijk is in verdichte grond (Joschko et al., 1989). Voor een gunstig effect van regenwormen op de groei van plantenwortels is het wel nodig dat de leefomstandigheden voor regenwormen en wortels in de bodem overeenkomen (beschikbaarheid van voedsel en bodemvocht, gereduceerde grondbewerking).

Regenwormen nemen bodemdeeltjes op en scheiden ze weer uit en veranderen daardoor de bulkdichtheid van de bodem. In de eerdergenoemde experimenten werd de bulkdichtheid van losse grond verhoogd door de regenwormenactiviteit, maar van kunstmatige samengeperste grond werd de bulkdichtheid verlaagd van 1300 naar 1200 kg/m<sup>3</sup>. Een hoeveelheid van 20 gram regenwormen per m<sup>2</sup> kan een bovengrond van 20 cm in 50 jaar volledig opnemen en uitscheiden (Barré et al., 2009).

Of biowoelers effectief kunnen zijn om bodemverdichting te verminderen, hangt af van de gewassen die in de vruchtwisseling worden gebruikt en van de teeltomstandigheden. Zo zijn gewassen met penwortels effectiever in het bewortelen van een verdichte bodem dan gewassen met sterk vertakte wortels. En in goed gedraineerde bodems is minder kans op natte bodemomstandigheden en op lage zuurstofconcentraties. De selectie van plantensoorten voor biowoelen kan ook worden gebaseerd op hun vermogen om in een droge bodem te groeien, omdat de fysieke kenmerken van droge grond vergelijkbaar zijn met die van verdichte grond.

De implementatie van diepwortelende gewassen in bestaande landbouwsystemen kan complex zijn. Niet alle landbouwsystemen zijn geschikt voor biowoelers. Veranderingen in grondbewerking en vruchtwisseling kunnen een grote invloed hebben op het economisch rendement.



**Figuur 2.17** Biowoelen door diepwortelende gewassen (links en midden) en regenwormen (rechts).

A: Diepwortelende gewassen zoals wortel, luzerne, cichorei enz. kunnen worden gebruikt als biowoelers.

Plantensoorten met een penwortel dringen beter door in verdichte lagen dan plantensoorten met sterk vertakte wortels. Gewassen met penwortels en meervoudige (bij)wortels vergroten het poriënsysteem met meer en grotere bioporiën dan gewassen met penwortels en zijwortels.

B: Later geteelde gewassen kunnen gebruikmaken van de overgebleven bioporiën (witte delen in de bodem) die gecreëerd werden door voorgaande diepwortelende gewassen.

C: Pendelaar regenwormen zijn verticale gravers, die verticale bioporiën tot 2,4 m diep kunnen maken. Oude en nieuwe gangen kunnen door groeiende gewassen worden gebruikt om water en voedingsstoffen op te nemen onder de ploegzool. De uitsneden (B en C) tonen de nieuwe wortels die in de diepte door de oude bioporiën groeien (B: wortelbioporie; C: regenwormbioporie) (Ning et al., 2022).

---

## 3 Experimenten met maatregelen voor het herstel van bodemverdichting

### 3.1 Onderzoeksmethode

In dit hoofdstuk wordt nagegaan hoe de genoemde maatregelen (hoofdstuk 2) voor het herstel van verdichte bodems zijn toegepast in veldexperimenten in Europa. Om dit vast te stellen, werd een vragenlijst verspreid onder onderzoekers binnen EJP SOIL die werkzaam zijn op het gebied van bodemverdichting.

De vragenlijst (Bijlage 1) is bedoeld om te beoordelen hoe effectief natuurlijke, biologische en mechanische maatregelen zijn voor het herstellen van de functies van een verdichte ondergrond. Er waren tien respondenten uit zeven landen (Denemarken, Zwitserland, Nederland, Spanje, Litouwen, Turkije en Duitsland), die gegevens verstrekten van veertien veldlocaties. De bodemtypes op deze locaties varieerden van zand tot zware klei, waarbij de meerderheid uit zavel bestond. De veldlocaties werden oorspronkelijk verdicht tussen 1993 en 2019 en de meeste verdichtingsstudies werden uitgevoerd in de laag van 20-70 cm onder maaiveld. De herstelperiode varieerde van 1 tot 12 jaar na verdichting. Details over de veldexperimenten worden gegeven in Tabel 3.1.

De herstelmethoden werden beoordeeld aan de hand van de volgende criteria:

- effectiviteit op korte (< 2 jaar) en lange termijn (> 2 jaar);
- mogelijke negatieve neveneffecten;
- kosten en baten;
- stand van de techniek;
- acceptatie door boeren en loonwerkers (sociaaleconomische aspecten).

**Tabel 3.1** Veldexperimenten met maatregelen voor het herstel van bodemverdichting.

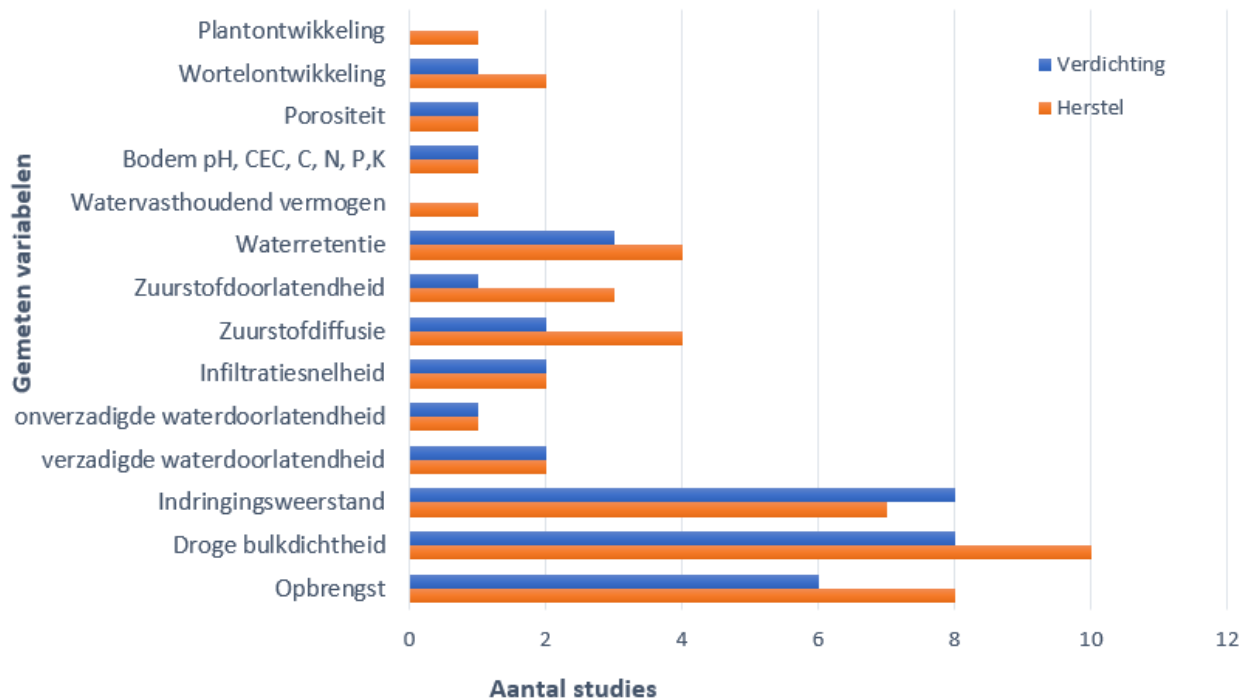
Land	Instelling	Project/ experimentele locatie	Bodemtextuur of -type	Klimaatzone	Jaar van eerste verdichting	Bodemdiepte (cm)	Wielbelasting (Mg)	Hersteltechnieken <sup>1</sup>	Referenties
Denemarken	Universiteit van Aarhus	3 locaties: Årslev, Tåstrup, Flakkebjerg	Zavel	Atlantic	2010	20-60	5-10	N, B, N+B	Schjønning et al. (2017); Obour et al. (2017); Pulido-Moncada (2021; 2022)
Zwitserland	Agroscoop	ROCSUB	Zavel	Continentaal	2019	0-70	N.V.T.	M, B, N+B,	Johannes et al., 2022
Litouwen	LAMMC	DOTN-1 (experiment met grondbewerking en bedekte gewassen)	Zavel	Boreaal	2003	0-20	1-5	N, B, N+B	<i>Niet beschikbaar</i>
Spanje	CSIC	Zuidwest Madrid	Calciumhoudend Luvisol	Mediterraan	2002	0-30	N.V.T.	M	López-Fando & Pardo (2009)
Duitsland	Göttingen	Reinshof	Zware zavel	Continentaal	1995	40	5-10	N	Mähner (1999)
Zwitserland	Agroscoop	Waarnemingspost bodemstructuur	Zavel (Cambisol)	Continentaal	2014	50	5-10	N, N+B	Keller et al. (2017; 2021)
Nederland	Louis Bolk Instituut	3 locaties	Zand, Lichte klei, Zware klei	Atlantic	?	?	?	N, M, N+M, N+M+B	De Boer et al. (2018); De Boer et al. (2020);
Litouwen	LAMMC	Lange termijn grondbewerking	Lichte klei (Retisol)	Boreaal	2010	0-45	?	N+M, N+B	<i>Niet beschikbaar</i>
Nederland	WUR Veldgewassen	Lelystad+Vredepeel	Zavel, Zand	Atlantic	2019	60 & 40	?	M+B & N+M+B	Van Balen et al. (2021);
Turkije	TAGEM, GAP Landbouwinstituut	Koruklu Exp Res Station	?	Anatolische	2011	0-15/0-30	?	B, N+M	Çıkman et al. (2017; 2020)

<sup>1</sup>N = natuurlijk (vries-dooi-, nat-droog- en krimp-zwel-cycli); B = biologisch (wortels en bodemorganismen), M = mechanisch (woelen).

## 3.2 Effectiviteit van de herstelmaatregelen

### 3.2.1 Gemeten variabelen

De meest gemeten variabelen in de veldexperimenten waren de gewasopbrengst, bulkdichtheid en indringingsweerstand. Bodemeigenschappen met betrekking tot water- en zuurstofdoorlatendheid kregen minder aandacht (Figuur 3.1). De drie mechanismen voor het herstel van bodemverdichting (natuurlijk, biologisch, mechanisch) kwamen voor op alle veldlocaties.



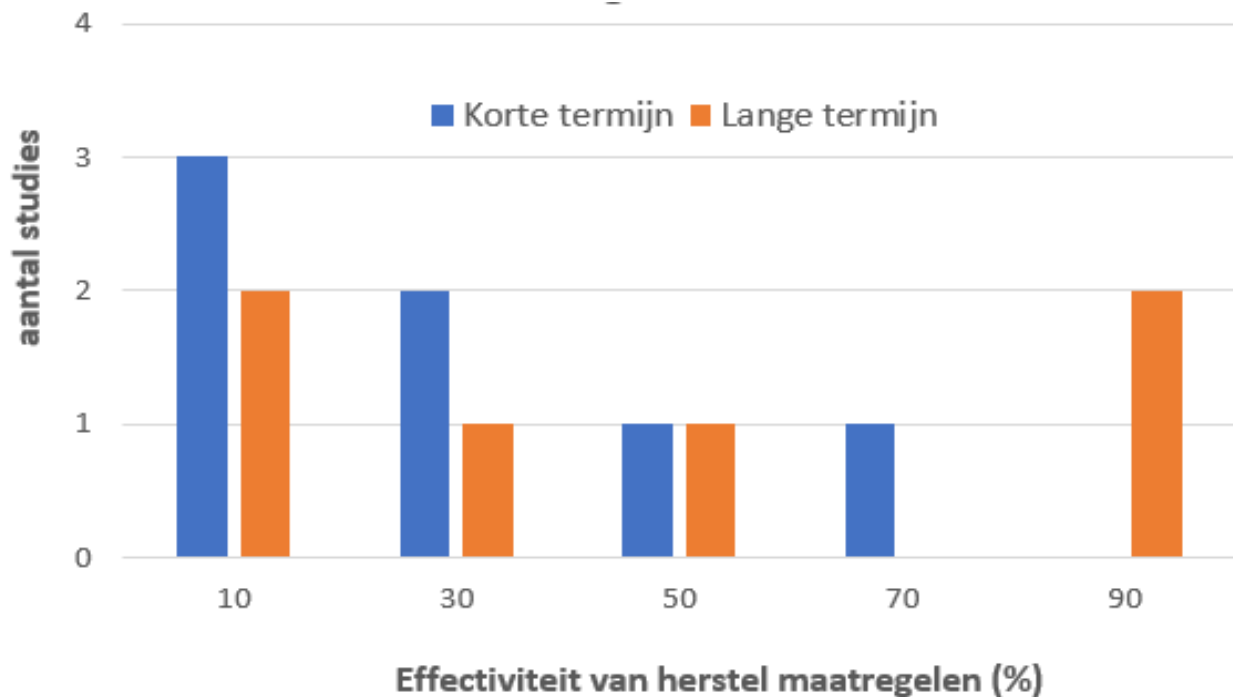
**Figuur 3.1** Bodem- en plantvariabelen gemeten vóór verdichting en tijdens de herstelfase.

### 3.2.2 Effectiviteit van herstelmaatregelen

De effectiviteit van de herstelmaatregel wordt uitgedrukt als de mate waarin de gewasopbrengst, de bulkdichtheid of de indringingsweerstand op een veldlocatie weer verbeterde tot het niveau voorafgaand aan de bodemverdichting. Door het ontwerp van de experimenten en de lange duur van de herstelmaatregelen is het moeilijk om conclusies te trekken over de effectiviteit van de maatregelen om bodemverdichting te herstellen. De reden hiervoor is dat in bijna alle experimenten een combinatie van hersteltechnieken werd gebruikt en het moeilijk was om de effecten van de verschillende technieken te isoleren. Een andere reden is dat het aantal bestudeerde experimenten klein is ( $n < 14$ ).

#### *Herstel op korte termijn*

De effectiviteit van de herstelmaatregelen op korte termijn ( $< 2$  jaar) was over het algemeen laag of zeer laag (0-30%) (Figuur 3.2) (Een gemiddelde effectiviteit van herstel (30-50%) werd gevonden in het experiment op zandige leemgronden in Duitsland, 12 jaar na verdichting. Dit herstel werd toegeschreven aan natuurlijke processen. In het experiment in Litouwen werd een combinatie van natuurlijke, mechanische en biologische technieken toegepast op een zandige kleileem. Hier was het herstel van de bulkdichtheid, beluchting en porositeit hoog (50-70%). In dit experiment was het moeilijk om de rol van de verschillende technieken te ontrafelen.



**Figuur 3.2** Effectiviteit van herstel op de korte termijn (< 2 jaar, links) en de lange termijn (> 2 jaar, rechts).

#### Herstel op lange termijn

Ook op de lange termijn (>2 jaar) was het herstel van bodemverdichting laag in de geanalyseerde experimenten (Figuur 3.2), behalve op twee veldlocaties (Duitsland, Reinshof en Turkije, Korukulu Experimental Station), waar het herstel na verdichting juist heel hoog was. Op de Duitse veldlocatie herstelden de bulkdichtheid, indringingsweerstand, gewasopbrengst en indicatoren van planten zich goed na de bodemverdichting door toedoen van natuurlijke processen. Op grond van de locatie waren dit vermoedelijk vries-dooi- en nat-droogcycli. Het duurt vaak lang voordat natuurlijke herstelprocessen zichtbaar worden in de gemeten variabelen, zoals is uitgelegd in hoofdstuk 2. De locatie had een hoog kleigehalte en het onderzoek werd 22 jaar na de eerste verdichting van de bodem uitgevoerd. Deze kenmerken kunnen de hoge mate van herstel verklaren.

### 3.3 Sociaaleconomische aspecten van herstelmaatregelen

Volgens 38% van de respondenten zijn mechanische methoden voor het herstellen van bodemverdichting niet rendabel voor gebruik in de akkerbouw vanwege de lange duur van herstel en de hoge kosten. 25% van de respondenten suggereert dat het rendabel is om natuurlijke methoden te gebruiken.

De meerderheid van de respondenten denkt dat de herstelmethoden op een niveau van ontwikkeling (TRL: 'technology readiness level') zijn van TRL3 (het technologisch concept is experimenteel aangetoond) of TRL4 (technologie werkt onder laboratoriumcondities). Dit komt waarschijnlijk omdat er maar weinig herstelmethoden zijn die duidelijk werken en winstgevend zijn voor boeren.

Voor een ruime toepassing van maatregelen om bodemverdichting te herstellen, is het belangrijk dat boeren deze accepteren. De respondenten schatten in dat belanghebbenden de hier besproken herstelbenaderingen zouden accepteren, ondanks de lage TRL-niveaus van de maatregelen. Wel zal rekening gehouden moeten worden met de mogelijk negatieve effecten van de herstelmaatregelen, zoals:

- plantenziekten afkomstig van groenbemesters;
- daling van de pH van de bodem op de korte en lange termijn;
- risico op herverdichting na woelen of diepploegen;
- vermindering van voedingsstoffen in de bodem en van de gewasopbrengst na woelen.

---

## 4 Toepasbaarheid bij verschillende bodem- en klimaatcondities

### 4.1 Toepasbaarheid voor verschillende bodemtypes

De toepasbaarheid van een hersteltechniek voor bodemverdichting hangt sterk af van het bodemtype. In deze studie geven we aan of een techniek toepasbaar is op basis van een ruwe indeling naar bodemtextuur (Figuur 4.1) en het risico op herverdichting (Tabel 4.1).

#### **Zand**

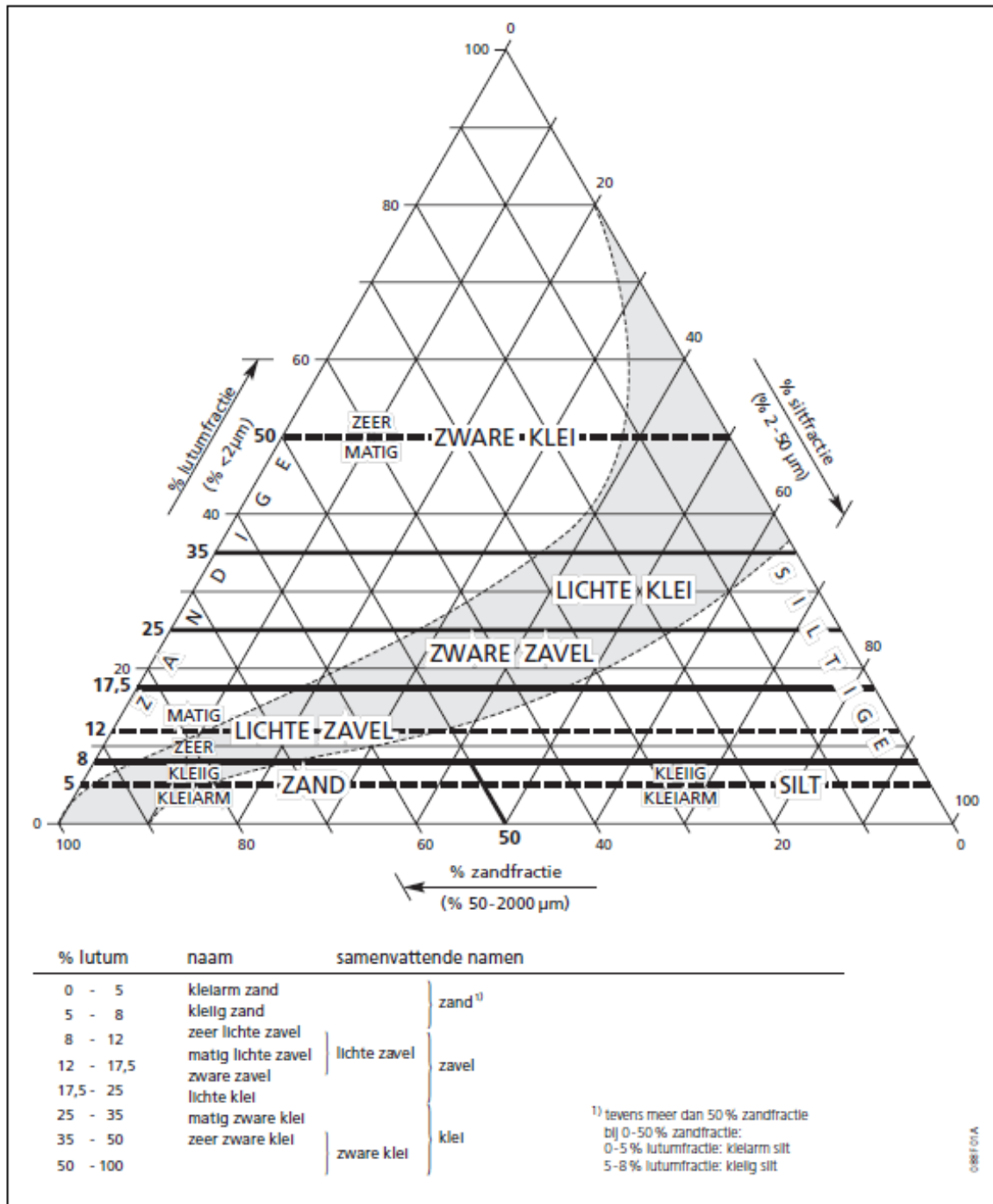
Gronden met een grove textuur worden bij weinig belasting al gauw te dicht voor de groei van gewassen en voor andere bodemfuncties. Dit is vooral het geval in zandige bodems en/of zeer lichte zavel. Bodemverdichting geeft in zulke bodems een dichte 'betonstructuur'. Bovendien hebben zandgronden weinig cohesie. Hierdoor veroorzaakt belasting van de bodem niet alleen verdichting, maar ook vervorming, waardoor grote, aaneengesloten bioporiën en oude wortelgangen verloren gaan. Natuurlijk herstel door zwellen en krimpen en bevriezing is zeer beperkt in zandgronden. Omdat zandgronden niet cohesief zijn, is het vochtgehalte tijdens het woelen niet zo belangrijk als bij kleigronden. Daarom kan in sommige van deze bodems de grond in de lente worden gewoeld (Weill, 2005).

#### **Zavel**

Zavels zijn het gevoeligst voor verdichting, omdat de poriën tussen de grovere korrels kunnen worden gevuld met fijnere korrels en kleideeltjes. Op basis van de metastudie van Schneider et al. (2017) blijkt ook dat herverdichting vooral optreedt in bodems met een hoog siltgehalte (> 70%) en een laag kleigehalte (< 20%) en minder wordt waargenomen in kleigronden (> 20%).

#### **Klei**

Klei heeft een grote cohesie wanneer het uitdroogt, terwijl het plastischer is onder natte omstandigheden. Hierdoor zijn goed gedraineerde kleigronden vele malen sterker dan zandgronden. Naarmate het kleigehalte toeneemt, neemt de sterkte toe. Het nadeel van kleigronden is dat ze langer nat blijven onder vochtige omstandigheden. Dit beperkt de tijd waarin deze gronden kunnen worden bewerkt zonder de ondergrond te verdichten. Het voordeel van kleigronden is dat ze aanzienlijk krimpen als ze uitdrogen en opzwellen als ze vochtig worden. Hierdoor kan een verdichte kleilaag zijn oorspronkelijke structuur gedeeltelijk terugkrijgen. Woelen in kleigrond moet altijd gebeuren als de grond droog is. Het voorjaar is geen goede periode voor woelen van kleigrond, omdat deze bodems dan altijd te nat zijn (Weill, 2005). Een andere reden om de grond in de late zomer/vroege herfst te bewerken, is dat de vries-dooicycli in de daaropvolgende winter ook helpen om de grote kluiten, die soms het gevolg zijn van het bewerken van de grond, op te breken. Zware bodems zijn, zelfs als ze compact zijn, vaak gescheurd, waardoor een deel van de wortels en het water de ondergrond kunnen bereiken. In zulke situaties kan het onderploegen overbodig zijn (Weill, 2005).



**Figuur 4.1** Textuurdriehoek. Indeling en benaming van niet-eolische afzettingen, zowel zand als zwaarder, Cate et al., 1995).

## Veen

Veengrond is elastisch en zal eerder plastisch vervormen voordat hij te compact wordt. Vervorming verslechtert de fysische eigenschappen van het veen. De ervaring leert dat graslanden op veengronden die onder natte omstandigheden worden gemaaid of begraaasd, soms last hebben van langdurige verdichting (Van den Akker et al., 2013a). De draagkracht van veen onder natte omstandigheden is erg laag. Vooral aan het oppervlak kan het veen worden vertrapt en verdicht, waardoor de structuur volledig wordt vernietigd en de infiltratiecapaciteit sterk afneemt.



**Tabel 4.1** Toepasbaarheid van herstelmaatregelen voor verschillende bodemtexturen.

Herstel techniek	Zand	Zavel	Klei	Veen
Zwellen/krimpen	--	-	++	+
Vriezen/dooien	--	-	+	-
Woelen	-	-	+	--
Biomechanisch	+	+	+	+

-- niet van toepassing.

- minder toepasbaar of groot risico op herverdichting.

+ toepasbaar, gemiddelde effectiviteit.

++ toepasbaar, grote effectiviteit.

## 4.2 Toepasbaarheid onder verschillende klimaatcondities

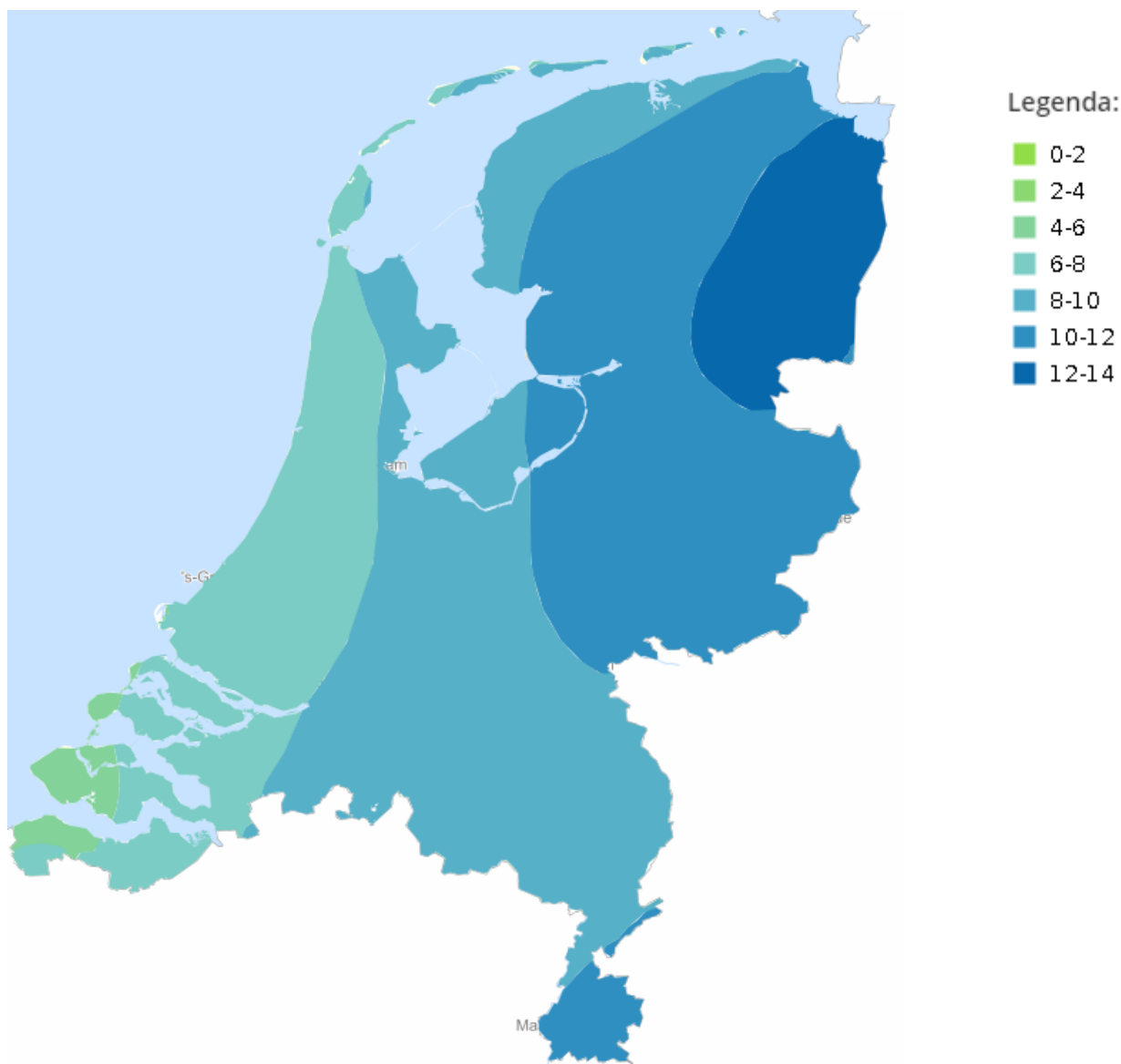
De beschrijvingen van de maatregelen voor herstel van bodemverdichting in de voorgaande hoofdstukken geven aan onder welke veldomstandigheden (bijv. droog/nat) ze het best toegepast kunnen worden. In dit hoofdstuk wordt geprobeerd vast te stellen welke veldomstandigheden gekoppeld kunnen worden aan specifieke klimaatomstandigheden. Klimatologische omstandigheden kunnen zijn: luchttemperatuur, groeiseizoen, seizoensvariatie regenval en vorstperioden.

In de metastudies over bodemverdichting van Schneider et al. (2017) en Yang et al. (2022a) en in de experimenten onderzocht voor deze studie (hoofdstuk 3) zijn weinig gegevens over de toepasbaarheid van herstelmaatregelen onder verschillende klimaatomstandigheden. Om toch enige richting te geven aan het mogelijke gebruik van herstelmaatregelen onder verschillende klimaatcondities, is voor twee maatregelen (vriezen/dooien en biomechanische technieken) een analyse gemaakt.

### 4.2.1 Vriezen en dooien

Om verdichting van de ondergrond door vriezen en dooien te laten herstellen, moet de vorst elke winter tot minstens 60 cm diepte in de grond doordringen (Schjønning, 2017). In klimaatzones D en E van de Köppen-Geiger-klimaatclassificatie<sup>1</sup> is de vorst voldoende diep in de bodem door gedrongen om enig effect te hebben op de diepere bodemstructuur. Nederland heeft een Cfb-klimaat met een relatief milde winter (Figuur 4.3). Het aantal ijsdagen (aantal dagen met temperatuur onder nul) (Figuur 4.2) in Nederland is vrijwel nul aan de kust tot ca. tien meer landinwaarts. Dit betekent dat gemiddeld in Nederland weinig herstelvermogen is voor bodemverdichting door bevriezen en dooien. In koude winters is er landinwaarts enig effect te verwachten.

<sup>1</sup> <https://education.nationalgeographic.org/resource/koppen-climate-classification-system/>.



**Figuur 4.2** Gemiddelde aantal ijsdagen in Nederland ([www.klimaatatlas.nl](http://www.klimaatatlas.nl)).

#### 4.2.2 Diepwortelende gewassen en groenbemesters

Klimaat- en weersomstandigheden hebben een effect op de doeltreffendheid van diepwortelende gewassen om bodemverdichting te herstellen. Niet alle diepwortelende gewassen zijn effectief in elke klimaatomstandigheid. Overmatige regenval heeft een positief effect op de indringingsweerstand, maar een negatief effect op de gasdiffusie (zuurstof). Een droge bodem verhoogt de indringingsweerstand en heeft een tekort aan water voor de plantengroei. In deze omstandigheden is woelen in de meeste gevallen een betere oplossing voor bodemverdichting dan biomechanisch herstel. Gezien de verwachting dat er meer extremen in droogte en neerslag gaan optreden, is het de vraag in hoeverre biomechanisch herstel effectief kan zijn.

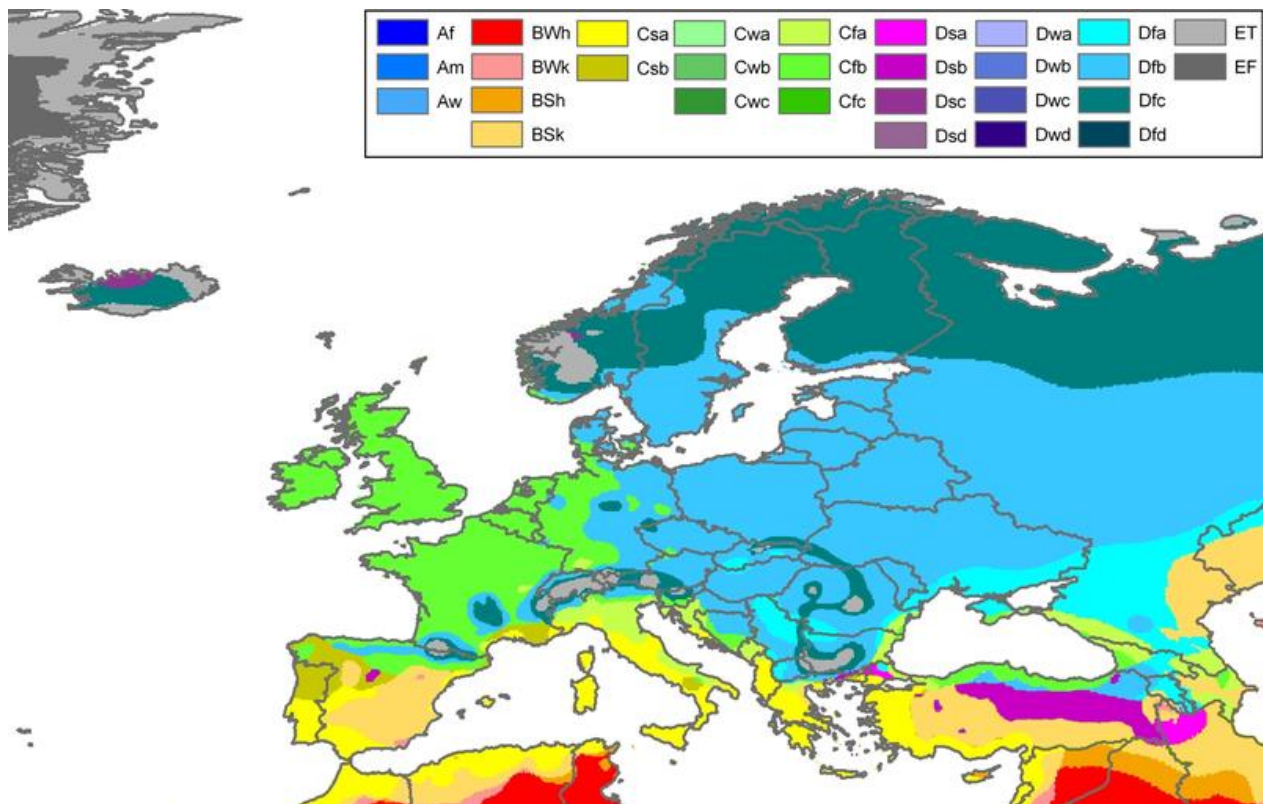
Meerjarige gewassen hebben ten opzichte van eenjarige gewassen het voordeel dat er voor de groei van planten meer tijd is voor het optreden van gunstige weersomstandigheden, waarin biomassa zich boven en onder de grond kan ontwikkelen. Klimaatverandering geeft nieuwe mogelijkheden voor het verbouwen van gewassen en groenbemesters in de winter. Een gebrek aan herstel door vorst en dooi van fysieke bodemeigenschappen kan worden gecompenseerd door plantenwortels van wintergewassen en groenbemesters.

Het gebied met warme gematigde klimaatomstandigheden (Cs-zones Figuur 4.3) zal zich de komende decennia uitbreiden naar het noordelijke deel van Europa (Unric, 2021). Dat betekent dat biowoelen door

plantenwortels belangrijker kan worden in Noord-Europa. De uitdaging is om nieuwe gewassen en groenbemesters in te bedden in de vruchtwisseling zonder problemen te creëren met plantenziekten en -plagen.

Continentale klimaatzones met het hele jaar door neerslag (Cf) (Figuur 4.3) zijn het gunstigst voor biowoelers met plantenwortels van groenbemesters. Ook Cw (winterdroog) en Cs (zomerdroog) kunnen gunstig zijn, afhankelijk van het groeiseizoen waarin plantengroei nodig is. Een droog (A) of koud klimaat (E) geeft te weinig mogelijkheden voor planten om zich te ontwikkelen.

Het Global Agro-Ecological Zones framework (<https://gaez.fao.org/>) van de FAO biedt informatie over de geschiktheid van bodem, terrein en agro-klimatologische omstandigheden voor de groei van gewassen. Onder de ongeveer twintig gewassen zijn gewassen die geschikt zijn voor biowoelen, zoals sorghum, koolzaad en alfalfa (GAEZ).



**Figuur 4.3** Herziene Köppen-Geiger-klimaattypekaart, uittreksel voor Europa (uit Peel et al., 2007).

---

## 5 Conclusies en aanbevelingen

### 5.1 Conclusies

In dit onderzoek is een literatuurstudie uitgevoerd naar maatregelen voor het herstel van mechanisch verdichte bodems. Ook is een overzicht gemaakt van veldexperimenten met herstelmaatregelen in verschillende Europese landen om na te gaan hoe snel herstel mogelijk is en welke processen daarbij een rol spelen. Het overzicht omvat mechanische (grondbewerking), biologische ('biosubsoiling' of 'biowoelers') en natuurlijke maatregelen (gebruikmaken van bodemfysische processen). Het onderzoek is gericht op de verdichte ondergrond onder de ploegzool (25-50 cm m -mv). Dit betekent dat de focus ligt op de akkerbouw, maar de meeste herstelmaatregelen kunnen ook worden toegepast op grasland. Op basis van het onderzoek kunnen de volgende conclusies worden getrokken.

#### **Biologische herstelmaatregelen zijn gunstiger dan mechanische**

In het verleden werd vaak gekozen voor het mechanisch openbreken van de verdichte grond, bijvoorbeeld door diepploegen of diepmengen. Dit verbeterde de toestand van de grond op korte termijn, maar meestal trad binnen enkele jaren opnieuw verdichting op. Het grootste nadeel van de meeste mechanische methoden is dat vaak de volledige bodemstructuur wordt verstoord, wat de mechanische sterkte en het vochtleverend vermogen sterk vermindert. Woelen is nuttig voor bepaalde bodems als het wordt uitgevoerd met de juiste apparatuur en onder goede (niet te natte) omstandigheden. Het losmakende effect blijft echter alleen behouden als de belasting daarna sterk wordt verminderd en er na het losmaken gebruik wordt gemaakt van groenbemesters.

Om versterking van natuurlijke structuren en snelle herverdichting te voorkomen, is het echter beter om voor meer natuurlijke herstelmethoden te kiezen. Vooral in sommige van de kleihoudende bodems kunnen ontwatering en bevriezing de bodemstructuur herstellen, maar het effect op de ondergrond (> 25 cm -mv) lijkt over het algemeen beperkt. De veelbelovendste techniek is het gebruik van diepwortelende gewassen: biowoelers. Deze hebben effect tot in de ondergrond en een beperkte negatieve invloed op de bovengrond.

#### **Het effect van afzonderlijke herstelmethoden op bodemverdichting is moeilijk te bepalen**

Herstel van bodemverdichting kan plaatsvinden via natuurlijke processen en technische ingrepen. Hoewel verschillende studies meestal een afzonderlijk proces of afzonderlijke activiteit bestuderen, is het niet eenvoudig om het specifieke effect van dit proces of deze activiteit te bepalen. Dit komt doordat natuurlijke processen zoals zwellen en krimpen en drogen en vernatten niet kunnen worden vermeden in experimenten voor het herstel van verdichting.

#### **Herstel van de ondergrond kan niet los worden gezien van activiteiten in de bovengrond**

In deze studie lag de focus op het herstel van de ondergrond (25-50 cm onder maaiveld) en minder op de bovengrond, die sterk beïnvloed wordt door grondbewerking. Verschillende studies tonen aan dat verschillende hersteltechnieken zowel de boven- als de ondergrond beïnvloeden. Zo kan het telen van een groenbemester de bodemstructuur openhouden die is ontstaan door het toepassen van grondbewerking.

#### **Zwellen en krimpen als herstelmethode zijn alleen effectief bij kleigehaltes > 20%**

Onderzoek naar gronden met een kleiige bovengrond laat zien dat zwellen en krimpen de structuur kunnen verbeteren. Hoeveel zwel en krimp optreedt, wordt bepaald door het type klei, het kleigehalte en de mate waarin de klei kan uitdrogen. Ook grondbewerking en verdichting door zware machines beïnvloeden het zwellen en krimpen van de bodem, waardoor een deel van de structuurverbetering wordt verminderd. Structureel herstel door zwellen en krimpen treedt vooral op bij een kleigehalte boven de 20%. Dit betekent dat het natuurlijke herstelvermogen van zand- en zavelgronden beperkt is.

---

### **Vriezen en dooien hebben weinig effect op de ondergrond**

Verschillende studies tonen aan dat het bevriezen en ontdooien van de bodem kunnen bijdragen aan het opheffen van ondergrondverdichting. De resultaten geven echter aan dat voor de diepere ondergrond (> 30 cm) het effect beperkt kan zijn en ook dat een deel van het mogelijk positieve effect verdwijnt als de grond weer ontdooit. Vriezen en dooien zijn niet overal effectief. De vorst moet gedurende meerdere jaren tot op grote diepte in de grond doordringen. Bodembewerking en groenbemesters beïnvloeden de diepte waarop vorst kan doordringen. Kleigronden verbeteren meer door bevrozing en dooi dan zandgronden. Dit komt doordat kleigronden door bevrozing sterk kunnen uitdrogen en dus krimpen.

### **Woelen heeft de voorkeur boven andere mechanische hersteltechnieken**

Diepe grondbewerking leidt tot herschikking van de bodemdeeltjes en verlies van draagkracht. Een dergelijke verstoring is niet gewenst en leidt tot snelle herverdichting. Het belangrijkste doel van diepe grondbewerking voor het herstel van ondergrondverdichting moet zijn om scheuren of barsten te maken in de verdichte zone. Hierdoor kunnen de beworteling en drainage worden hersteld, terwijl de verstoring van het resterende deel van het bodemprofiel tot een minimum wordt beperkt. Woelen verdient de voorkeur boven diepploegen en diepmengen, omdat het tot de minste verstoring van de bodemstructuur leidt.

De vochtomstandigheden en de textuur van de bodem bepalen of ondergrondverdichting op lange termijn succesvol hersteld kan worden of dat het herstel regelmatig moet worden herhaald. Over het algemeen is het risico op herverdichting op korte termijn (3-4 jaar) groot bij het woelen van relatief lichte bodems (klei < 20%). Deze herverdichting is echter sterk afhankelijk van de mechanische belasting na het woelen. In het algemeen is het raadzaam om de grond enkele seizoenen na het woelen niet te bewerken, met verminderde belasting te berijden en een groenbemester in te zaaien om een sterke, natuurlijke structuur te behouden.

### **Gaten boren: een interessante nieuwe technologie**

Het boren van kleinere of grotere gaten door verdichte bodemlagen kan helpen om poriën te maken waarin plantenwortels kunnen groeien en water kan infiltreren. Het voordeel van deze methode is dat bodemverstoring minimaal is en de draagkracht van de bodem behouden blijft. Hoe groter de draagkracht van de bodem, hoe kleiner het risico op herverdichting. De boorgatmethode is een alternatief voor de meest gebruikelijke grondbewerking zoals woelen. Het maken van boorgaten kost veel tijd, ook al is minder machinevermogen nodig om de gaten te boren dan bij gebruik van een woelpoot voor het openbreken van de ondergrond.

### **Voor diepwortelende gewassen zijn specifieke gewassen en bodemomstandigheden nodig**

Plantenwortels kunnen een rol spelen bij het herstellen van ondergrondverdichting. Hoe dikker de wortels, hoe beter ze door de verdichte grond kunnen dringen. Dit wordt 'biowoelen' genoemd. Of biowoelen effect heeft, hangt af van de gewassen in de vruchtwisseling en van de groeiomstandigheden. Gewassen met penwortels en meerjarige gewassen doen het beter dan eenjarige gewassen en gewassen met sterk vertakte en fijne wortels. Tweezaadlobbige gewassen (zoals o.a. radijs, peulvruchten, luzerne, klaver) zijn geschikter vanwege hun wortelstructuur door het aanpassingsvermogen van de worteldikte en soms aanwezigheid van penwortels. Sorghum, een monocotylgewas (eenzaadlobbige), is een uitzondering, want dit gewas kan ook diep wortelen in verdichte grond.

Een langere groeiperiode van gewassen betekent meer mogelijkheden om gunstige groeiomstandigheden te benutten. Gasuitwisseling in de ondergrond is noodzakelijk voor de wortelontwikkeling, maar wordt gehinderd door natte bodemomstandigheden, bijvoorbeeld door een gebrek aan drainage. Natte bodemomstandigheden moeten worden opgelost voordat er wordt overgegaan tot biowoelen. Aan de andere kant verhogen lange droge periodes de indringingsweerstand en maken het moeilijk voor plantenwortels om in de bodem te dringen. Regenwormen kunnen helpen om wortels te laten doordringen in verdichte bodemlagen, omdat gangen van regenwormen kunnen fungeren als bioporiën voor plantenwortels. Maar ook regenwormen gedijen het best in een relatief vochtige bodem; ze zijn minder actief in natte of droge grond.

---

### **Bodems met een hoog kleigehalte hebben het grootste potentieel voor herstel**

In het algemeen kan worden gesteld dat bodems met een hoog kleigehalte de meeste kans hebben op herstel van verdichting. Dit geldt zowel voor de meer natuurlijke als voor de mechanische herstelmaatregelen. Mechanische methoden moeten daarbij worden toegepast onder omstandigheden die niet te nat zijn. In bodems met een laag kleigehalte dragen zwellen/krimpen en vriezen/dooien weinig of niet bij aan het opheffen van bodemverdichting. Woelen is wel mogelijk in deze bodems, maar het risico op herverdichting is groot bij een hoge siltfractie. Biowoelen lijkt geschikt voor alle bodems, alleen zal de effectiviteit sterk afhangen van de vochtigheid van de bodem.

### **Geen enkele maatregel herstelt bodemfuncties volledig**

Volledig herstel van de bodemeigenschappen tot het niveau van vóór de bodemverdichting is zelden waargenomen in de bestudeerde experimenten. In 80% van de experimenten werd niet meer dan 50% herstel gevonden. Slechts in een uitzonderlijke situatie werd een volledig herstel van de bodemfuncties gevonden.

### **Herstel is afhankelijk van klimaatomstandigheden**

Hersteltechnieken werken niet onder alle klimaatomstandigheden. Om verdichting van de ondergrond door vriezen en dooien te herstellen, moet de vorst elke winter tot minstens 60 cm diepte in de grond doordringen. Het aantal ijsdagen (aantal dagen met temperatuur onder nul) is in Nederland vrijwel nul aan de kust tot ca. 10 dagen landinwaarts. Dit betekent dat gemiddeld in Nederland weinig herstelvermogen voor bodemverdichting door bevroren en dooien kan worden verwacht.

In het veranderende klimaat bieden gewassen en groenbemesters die een lange groeiperiode hebben, mogelijkheden om de bodem te herstellen. In gebieden waar groenbemesters in de winter niet afsterven door vorst, moet het ploegen van de groenbemester worden uitgesteld tot de lente om maximaal te profiteren van de wortelgroei. Neerslag gedurende het hele jaar is ideaal voor biowoelers in zand- en kleigrond.

## **5.2 Aanbevelingen**

Dit onderzoek geeft een overzicht van verschillende herstelmaatregelen voor verdichte bodems, maar geeft ook aan dat er nog grote kennisleemtes zijn. Hieronder enkele aanbevelingen voor aanvullend onderzoek.

### **Er is meer onderzoek nodig naar diepwortelende gewassen**

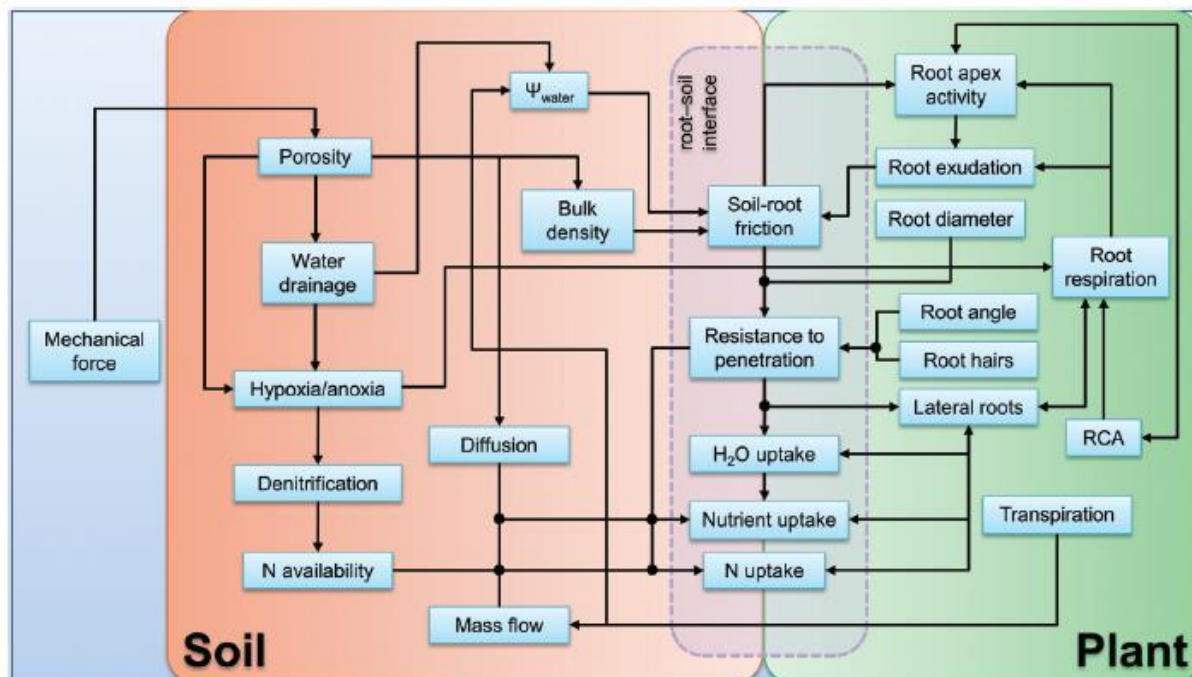
Er is meer onderzoek nodig naar het gebruik van diepwortelende gewassen in combinatie met woelen.

Belangrijke vragen hierbij zijn:

- i. Welke gewassen zijn het effectiefst in het openbreken van de bodem en het behouden van de bodemstructuur?
- ii. Wat zijn de bodemomstandigheden (fysisch en chemisch) waaronder diepwortelende gewassen het beste groeien? Hoe veranderen deze omstandigheden door klimaatverandering?
- iii. Is het voldoende om diepwortelende gewassen in één winterseizoen te telen of moeten de gewassen in meerdere seizoenen groeien?

### **Kijk naar omstandigheden voor belemmering van de wortelgroei**

De meeste onderzoeken leggen de nadruk op het meten van grondmechanische parameters om te bepalen hoe snel de bodem zich herstelt van verdichting. Droge bulkdichtheid en indringingsweerstand zijn de meest gemeten parameters voor dit doel. Het is echter bekend dat deze parameters sterk worden beïnvloed door de heersende vochtomstandigheden en de uitgevoerde groundbewerking. Het is beter om ook te kijken naar de omstandigheden die de wortelgroei beïnvloeden en die dus direct van invloed zijn op de gewasopbrengst. Dit betekent meer aandacht besteden aan de invloed die een verdichte laag heeft op lucht- en waterstroming en op waterretentie. Door meer vanuit de omstandigheden voor de plant te redeneren en minder vanuit de grondmechanica, ontstaat een nauwkeuriger beeld van de mate van bodemverdichting en de effectiviteit van een hersteltechniek. Om wortelgroei in verdichte grond goed te begrijpen, is het nodig om deze expliciet mee te nemen in onderzoek naar bodemverdichting (zie Schneider et al., 2021 en Correa et al., 2019, Figuur 5.1).



**Figuur 5.1** Relatieschema van de belangrijkste interacties tussen bodemfysisch-chemische eigenschappen en wortelfunctie en -structuur, waargenomen onder omstandigheden van bodemverdichting.  $\Psi_{\text{water}}$ , waterpotentiaal; RCA, wortelcorticaal aerenchym. De pijl (→) geeft de invloed aan van één eigenschap op een andere, waarvan de interactie van synergetische of antagonistische aard kan zijn; een pijl in twee richtingen (↔) geeft een wederzijdse invloed aan tussen twee eigenschappen; een zwart bolletje (•) geeft een convergerende invloed aan tussen twee of meer eigenschappen op de volgende eigenschap; als twee of meer pijlen een snijpunt zonder bolletje hebben, is er geen directe interactie tussen hen aangegeven. (Correa et al., 2019).

### Geef aandacht aan sociaaleconomische aspecten

In de praktijk worden vooral mechanische technieken gebruikt voor het herstel van een verdichte bodem. Dit komt omdat deze technieken snel kunnen worden uitgevoerd, de machines beschikbaar zijn en direct resultaat lijken te geven. Technieken die meer tijd kosten, die nieuwe machines vereisen of meer eisen stellen aan het teeltplan, worden minder geaccepteerd. Om boeren en loonwerkers zover te krijgen dat ze minder bodemstorende hersteltechnieken toepassen, moet er meer aandacht worden besteed aan sociaaleconomische factoren. Dat kan door onderzoek te richten op de kosteneffectiviteit van hersteltechnieken op de lange termijn en de investeringen die daarvoor nodig zijn. Andere sociaaleconomische aspecten zijn de integratie van technieken in het teeltplan en de acceptatie van nieuwe technieken door boeren en loonwerkers.

---

# Referenties

- Akker, van den, J.J.H., R Hendriks, J. Frissel, K. Oostindie en J. Wesseling, 2013. Gedrag van verdroogde kades; ontstaan en gevaar van krimpscheuren in klei- en veenkades. Alterra-rapport 2473. Wageningen.
- Akker, van den, J.J.H., T. Hoogland en F. Stoppelenberg, 2011 Berging in kleischeuren in de Flevopolders (in Dutch). STROMINGEN 16 (2011), nummer 3.
- Akker, van den, J.J.H., Dure, J., Siedrink, J en M. Heinen, 2021. Effecten van sorgum en mais op bodem en gewas op een verdichte bodem. Rapport 3081, <https://edepot.wur.nl/545414>. Wageningen University & Research.
- Akker, van den, J.J.H., Hoogland, T., 2011. Comparison of risk assessment methods to determine the subsoil compaction risk of agricultural soils in The Netherlands. *Soil & Tillage Res.* 114, pp 146-154. doi: 10.1016/j.still.2011.04.002.
- Alakukku, L., 1996. Persistence of soil compaction due to high axle load traffic. II. Long-term effects on the properties of fine-textured and organic soils. *Soil & Tillage* 37 (1996) 223-238.
- Andriuzzi, W. S., Pulleman, M. M.; Schmidt, O.; Faber, J. H.; Brussaard, L. Anecic. Earthworms (*lumbricus Terrestris*) Alleviate Negative Effects of Extreme Rainfall Events on Soil and Plants in Field Mesocosms. *Plant and Soil: An International Journal on Plant-Soil Relationships* 2015, 397 (1-2), 103-113 DOI: 10.1007/s11104-015-2604-4.
- Bakema, G., Bakker, G.; Cruijsen, J.; Egmond van, F.; Elsen van den, E.; Heinen, M.; Schneider, H., 2023. De invloed van bodemverdichting op de water- en luchthuishouding in de bodem en op de plantontwikkeling; Literatuuronderzoek. Wageningen. Wageningen Environmental Research. Rapport 3225. <https://edepot.wur.nl/583342>.
- Barré, P.; McKenzie, B. M.; Hallett, P. D. Earthworms Bring Compacted and Loose Soil to a Similar Mechanical State. *Soil Biology and Biochemistry* 2009, 41 (3), 656-658 DOI: 10.1016/j.soilbio.2008.12.015.
- Bronswijk, J.J.B, 1991. Magnitude, modeling significance of swelling and shrinking processes in clay soils. Doctoral thesis. Wageningen Agricultural University, Wageningen, The Netherlands.
- Cate, J.A.M. ten, A.F. van Holst, H. Kleijer en J. Stolp, 1995. Handleiding bodemgeografisch onderzoek; richtlijnen en voorschriften. Deel A: Bodem. Wageningen, DLO-Staring Centrum. Technisch Document 19A; 222 blz.; 20 fig.; 30 tab.
- Chen, G; Weil, R. Penetration of cover crop roots through compacted soils. *Plant and Soil*, June 2010, Vol. 331, No. 1/2 (June 2010), pp. 31-43.
- Chinn, C., Pillai-McGarry, U.P.P. 2008. Self-repair of compacted Vertisols from Central Queensland, Australia. *Geoderma* Volume 144, Pages 491-501.
- Colombi, T., Braun, S., Keller, T., & Walter, A., 2017. Artificial macropores attract crop roots and enhance plant productivity on compacted soils. *Science of the Total Environment*, 574, 1283-1293. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.194>.
- Colombi, T., Keller, T. Developing Strategies to Recover Crop Productivity After Soil Compaction—a Plant Eco-Physiological Perspective. *Soil & Tillage Research* 2019, 191, 156-161 DOI: 10.1016/j.still.2019.04.008.
- Correa, J., Postma, J.A., Watt, M. en Wojciechowski, T., 2019. Root system architectural plasticity and soil compaction: a review. *J. Exp. Bot.* 70, 6019-6034. doi:10.1093/jxb/erz383.
- Cornelis, W.M., Corluy, J., Medina, H., Diaz, J., Hartmann, R., VanMeirvenne, M., Ruiz, 2006. Measuring and modelling the soil shrinkage characteristic curve. *Geoderma* 137, 179-191.
- Cresswell, H. P., Kirkegaard, J. A. Subsoil Amelioration by Plant Roots - the Process and the Evidence. *Australian Journal of Soil Research* 1995, 33 (2), 221-221.
- Çıkman, A., Monis, T., Nacar, A. S. and Vurarak, Y., 2017. Şanlıurfa Koşullarında Buğday ve Mısır Münavebesinde Geleneksel Toprak İşleme ile Anıza Doğrudan Ekim Yöntemlerinin Verime Olan Etkileri. *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, 13 (2), 113-119. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/en/pub/tarmak/issue/34002/376577>.



- Çıkman, A., Monis, T., Nacar, A. S. & Vurarak, Y. (2020). Şanlıurfa Koşullarında Buğday ve Mısır Münavebesi İçin Geleneksel Toprak İşleme ve Anıza Doğrudan Ekim Yöntemlerinin Ekonomik Yönden İncelenmesi. *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, 15 (3), 91-96. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/en/pub/tarmak/issue/52231/683098>.
- Dagesse D.F., 2010. Freezing-induced bulk soil volume changes. *Canadian Journal of Soil Science*, 90: 389–401.
- De Boer H.C., Deru, J.G.C., Van Eekeren, N. (2020). Sward lifting in compacted grassland: Contrasting effects on two different soils. *Soil and Tillage Research* 201, 104564.
- Dekker, L. W., Ritsema, C. J. (1996). Variation in water content and wetting patterns in Dutch water repellent peaty clay and clayey peat soils. *Catena*, 28(1-2), 89-105.
- Development: ESW 80436, Alterra Wageningen, 54 p.
- Dörner J, Dec D, Peng X, Horn R (2009) Change of shrinkage behavior of an Andisol in southern Chile: effects of land use and wetting/drying cycles. *Soil & Tillage Research* 106, 45–53.
- Edwards, L.M., 2013. The effects of soil freeze–thaw on soil aggregate breakdown and concomitant sediment flow in Prince Edward Island: a review. *Can. J. Soil Sci.* 93 (4), 459–472.
- Elkins, C. Plant roots as tillage tools, *Journal of Terramechanics*, Volume 22, Issue 3, 1985, Pages 177-178, ISSN 0022-4898, [https://doi.org/10.1016/0022-4898\(85\)90094-1](https://doi.org/10.1016/0022-4898(85)90094-1).
- Fouli, Y., Cade-Menun, B.J., Cutforth, H.W., 2013. Freeze–thaw cycles and soil water content effects on infiltration rate of three Saskatchewan soils. *Can. J. Soil Sci.* 93 (4), 485–496.
- GAEZ, <https://gaez.fao.org/>.
- Geel van, C.A; Dekker, P.H.M; Groot de, W.J.M. 2009. Verbetering structuur ondergrond: verslag van veldonderzoek op een zavelgrond te Lelystad 2006-2009 Lelystad. *Praktijkonderzoek Plant & Omgeving, Sector AGV*.
- Grant, C.D., Watts, C.W., Dexter, A.R., Frahn, B.S. 1995. An analysis of the fragmentation of remoulded soils with regard to self-mulching behaviour. *Aust. J. Soil Res.* 33, pp. 569–583.
- Gregory AS, Watts CW, Griffiths BS, Hallett PD, Kuan HL, Whitmore AP (2009) The effect of long-term soil management on the physical and biological resilience of a range of arable and grassland soils in England.
- Håkansson, I. and Reeder, R.C. (1994) Subsoil compaction by vehicles with high axle load - extent, persistence and crop response. *Soil and Tillage Research* 29, 277-304.
- Hamilton, A. B. 1966. Freezing shrinkage in compacted clays. *Can. Geotech. J.* 3: 1\_17.
- Hamza, M. A. & Andersson, W. (2005). Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil & Tillage Research* 82, 121–145.
- Henry, H.A., 2007. Soil freeze–thaw cycle experiments: trends, methodological weaknesses and suggested improvements. *Soil Biol. Biochem.* 39 (5), 977–986.
- Hoekstra, N., Joost Sleiderink, Joachim Deru, Maaik van Agtmaal, Nick van Eekeren, 2021. Hydrofobie op veengrond: oorzaken en maatregelen Rapportage van lab-experimenten in Project Integrale Bodemverbetering Feangreide. Louis Bolk Instituut.
- Horn, R. & Schmucker, A. (2005). Structure formation and its consequences for gas and water transport in unsaturated arable and forest soils. *Soil & Tillage Research*, 82, 5-14.
- Hu W., Drewry, J., Beare, M., Eger, A., Müller K. (2021). Compaction induced soil structural degradation affects productivity and environmental outcomes: A review and New Zealand case study. *Geoderma*, 395, 115035.
- Jabro, J.D., Iversen, W.M., Evans, R.G., Allen, B.L., Stevens, W.B., 2014. Repeated freeze- thawcycle effects on soil compaction in a clay loam in northeastern Montana. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 78 (3), 737–744.
- Johannes A., Fontana M., Köstel J., Keller T., Weisskopf P., Bragazza L. (2022). Recovery of compacted subsoil: introducing the ROCSUB project. EGU General Assembly 2022, EGU22-5230, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-5230>.
- Joschko, M.; Diestel, H.; Larink, O. Assessment of Earthworm Burrowing Efficiency in Compacted Soil with a Combination of Morphological and Soil Physical Measurements. *Biology and Fertility of Soils* 1989, 8 (3), 191–196 DOI: 10.1007/BF00266478.
- Keller, T., Sandin, M., Colombi, T., Horn, R. & Or, D. (2019). Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. *Soil & Tillage Research*, 194, 104293.

- Keller, T., Colombi, T., Ruiz, S., Manalili, M.P., Rek, J., Stadelmann, V., Wunderli, H., Breitenstein, D., Reiser, R., Oberholzer, H., Schymanski, S., Romero-Ruiz, A., Linde, N., Weisskopf, P., Walter, A., Or, D., 2017. Long-Term Soil Structure Observatory for Monitoring Post-Compaction Evolution of Soil Structure. *Vadose Zone J* 16(4).
- Keller, T, Colombi, T, Ruiz, S, et al. Soil structure recovery following compaction: Short-term evolution of soil physical properties in a loamy soil. *Soil Sci Soc Am J.* 2021; 85: 1002– 1020.  
<https://doi.org/10.1002/saj2.20240>.
- Keller Y. and D. Or, 2022. Farm vehicles approaching weights of sauropods exceed safe mechanical limits for soil functioning Thomas. *PNAS* 2022 Vol. 119 No. 21.
- Koeppen, <http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/shifts.htm>.
- Koolen, 1985. Processen die in de grond optreden bij diepe grondbewerking. in: Themadag effecten van diepe grondbewerking in de akkerbouw en de vollegrondsgroeneteelt, 13 december 1984, Lelystad.
- Kooistra, M.J. and Boersma, O.H., 1994. Subsoil compaction in Dutch marine sandy loams: loosening practices and effects. *Soil Tillage Res.* 29: 237-247.
- Kim, D.J., 1992. Characterization of swelling and shrinkage behaviour, hydraulic properties and modelling of water movement in a physically ripening marine clay soil. PhD thesis, Catholic University Leuven.
- Leeuw B. de, 2009. Recovery potential of compacted subsoils: A case study on loamy and clayey soils in the Netherlands, MSc thesis Land Degradation. Wageningen University.
- Lipiec, J.; Horn, R.; Pietrusiewicz, J.; Siczek, A. Effects of Soil Compaction on Root Elongation and Anatomy of Different Cereal Plant Species. *Soil & Tillage Research* 2012, 121, 74–81 DOI: 10.1016/j.still.2012.01.013.
- Liu X, Feike T, Shao L, Sun H, Chen S, Zhang X (2016) Effects of different irrigation regimes on soil compaction in a winter wheat – summer maize cropping system in the North China Plain. *Catena* 137, 70–76.
- López-Fando C., Pardo M.T., (2009). Changes in soil chemical characteristics with different tillage practices in a semi-arid environment. *Soil and Tillage Research* 104: 278-284.
- Kooistra, M.J. and Boersma, O.H., 1994. Subsoil compaction in Dutch marine sandy loams: loosening practices and effects. *Soil Tillage Res.* 29: 237-247.
- Mähner, K.-T. (1999). Wachstum und Ertrag von Getreide nach mechanischer Bodenbelastung in unterschiedlichen Bearbeitungssystemen. Dissertation. Georg-August-Universität zu Göttingen.
- Munkholm L. J. & Zechmeister-Boltenstern S. (Eds.) (2021). Deliverable 2.2.1: EJP SOIL draft report on the state-of-the-art knowledge of soil research in Europe on 1. Soil carbon stocks 2. Soil degradation and soil fertility, and 3. Strategies for improved soil management.
- Munkholm, L.J; Schjønning, P.; Rüegg, K. Mitigation of subsoil recompaction by light traffic and on-land ploughing: Soil response, *Soil & Tillage Research*, v80 n1 (2005): 149-158.
- Ning, T.; Liu, Z.; Hu, H.; Li, G.; Kuzyakov, Y. Physical, chemical and biological subsoiling for sustainable agriculture, *Soil and Tillage Research*, Volume 223, 2022, 105490, ISSN 0167-1987,  
<https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105490>.
- Oldeman, L. R., Hakkeling, R. T. A. & Sombroek, W. G. (1991). World map of the status of human-induced soil degradation. International Soil Reference and Information Centre, Wageningen.
- Olesen, J.E. and Munkholm, L.J., 2007. Subsoil loosening in a crop rotation for organic farming eliminated plough pan with mixed effects on drop yield. *Soil Till. Res* 94. 376-385.
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., and McMahon, T. A. 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11, 1633–1644, <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>.
- Pillai-McGarry, U.P.P., Collis-George, N. 1990. Laboratory simulation of the surface morphology of self-mulching and non self-mulching Vertisols. 2. Quantification of visual features. *Australian Journal of Soil Research* 28, 142.
- Pulido-Moncada, M., Katuwal, S., Ren, L., Cornelis, W., Munkholm, L. J. (2020). Impact of potential bio-subsoilers on pore network of a severely compacted subsoil. *Geoderma* 363, 114154.
- Obour, P.B., Schjønning, P., Peng, Y., Munkholm, L.J., 2017. Subsoil compaction assessed by visual evaluation and laboratory methods. *Soil Till Res* 173, 4-14.
- Pulido-Moncada, M., Katuwal, S., Munkholm, L.J., 2022. Characterisation of soil pore structure anisotropy caused by the growth of bio-subsoilers. *Geoderma* 409.
- Pulido-Moncada, M., Monnereau, C., Munkholm, L.J., 2021. Root-dependent recovery of pore system functionality of compacted subsoil: A field case study with bio-subsoilers in Denmark. *Soil Sci Soc Am J* 85(5), 1566-1577.

- Rijniersce, K., 1983. A Simulation Model for Physical Soil Ripening in the IJsselmeerpolders. Rijksdienst voor de IJsselmeerpolders, Lelystad.
- Sivarajan, S., Maharlooei, M., Bajwa, S.G., and J. Nowatzki, 2018. Impact of soil compaction due to wheel traffic on corn and soybean growth, development and yield. *Soil & Tillage Research* 175 (2018) 234-243.
- Sahin, U., Angin, I., Kiziloglu, F.M., 2008. Effect of freezing and thawing processes on some physical properties of saline-sodic soils mixed with sewage sludge or fly ash. *Soil Tillage Res.* 99 (2), 254-260.
- Sarmah, A. K., Pillai-McGarry, U. & McGarry, D. (1996). Repair of the structure of a compacted Vertisol via wet/dry cycles. *Soil & Tillage Research*, 38, 17-33.
- Schjønning Per, Mathieu Lamandé, Valentin Crétin, and Janne Aalborg Nielsen, 2017. Upper subsoil pore characteristics and functions as affected by field traffic and freeze-thaw and dry-wet treatments. *Soil Research* 2017 55 2334-244.
- Schjønning, P., van den Akker, J. J., Keller, T., Greve, M. H., Lamandé, M. & Simojoki, A., et al. (2015). Driver-Pressure-State-Impact-Response (DPSIR) Analysis and Risk Assessment for Soil Compaction—A European Perspective. In *Advances in agronomy*. First edition (ed. D.L. Sparks), pp. 183-237. Academic Press, Amsterdam [Netherlands].
- Schneider, F., Don, A., Hennings, I., Schmittmann, O., Seidel, S. J. (2017). The effect of deep tillage on crop yield—what do we really know? *Soil & Tillage Research* 174, 193-204.
- Schneider, H.M., Strock, C.F., Hanlon, M.T., Vanhees, D.J., Perkins, A.C., Ajmera, I.B., et al. 2021. Multiseriate cortical sclerenchyma enhance root penetration in compacted soils. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 118. doi:10.1073/pnas.2012087118.
- H. Schulte-Karring & M. Haubold-Rosa, Subsoiling and Deep Fertilizing with New Technique as a Measure of Soil Conservation in Agriculture, Viniculture and Forestry r, *SOIL TECHNOLOGY* vol. 6, p. 225-237 Cremlingen 1993.
- Spoor, G., Tijnink, F.G.J., Weiskopf, P., 2003. Subsoil compaction: risk, avoidance, identification and alleviation. *Soil & Tillage*, 73 (2003) 175-182.
- Spoor 2006. Alleviation of soil compaction: requirements, equipment and techniques. *Soil use and management*, volume 22, issue 2 pg 113-122.
- Sun Baoyang, Feipeng Ren, Wenfeng Ding, Guanhua Zhang, Jinquan Huang, Jianming Li, Lei Zhang, 2021. Effects of freeze-thaw on soil properties and water erosion. *Soil and water research* 16, 2021 (4) 205-216.
- Unger, P.W., 1991. Overwinter changes in physical properties of no-tillage soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55 (3), 778-782.
- Unric, 2021, Climate Europe warming faster than rest of the world (IPCC), <https://unric.org/en/climate-europe-warming-faster-than-rest-of-world-ipcc/>.
- Van Balen, D.J.M, Verstegen H., Hogendoorn, A. Dekkers, M.S., Van den Berg, W, (2021). Duurzaam opheffen ondergrondverdichting; Werkpakket 3 PPS Klimaatadaptatie. Wageningen Research, Rapport WPR-875.
- Van Balen, D.J.M. New experiments with drilling boreholes to reduce soil compaction (in preparation). Wageningen Research.
- Van den Akker, J.J.H., T. Hoogland en F. Stoppelenberg, 2011 Berging in kleischeuren in de Flevopolders. (Dutch) *STROMINGEN* 16 (2011), nummer 3.
- Voorhees, W.B., 1983. Relative effectiveness of tillage and natural forces in alleviating wheel-induced soil compaction. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47 (1), 129-133.
- Wanink F.J, J. Alblas, H.M.G. van der Werf en J.J.H. van den Akker, 1990. Snijmaisopbrengst beïnvloed door berijding. *Landbouwmechanisatie* nr. 4, p 28-29.
- Weill, A. (2015). A Guide to Successful Subsoiling. Le Centre d'expertise et de transfert en agriculture biologique et de proximité (CETAB+), via [www.cetab.org](http://www.cetab.org).
- Xiong, P.; Zhang, Z.; Hallett, P. D.; Peng, X. Variable Responses of Maize Root Architecture in Elite Cultivars Due to Soil Compaction and Moisture. *Plant and Soil: An International Journal on Plant-Soil Relationships* 2020, 455 (1-2), 79-91 DOI: 10.1007/s11104-020-04673-3.
- Yang Y, Li M, Wu J, Pan X, Gao C and Tang DWS (2022) Impact of Combining Long-Term Subsoiling and Organic Fertilizer on Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen, Soil Enzyme Activity, and Water Use of Winter Wheat. *Front. Plant Sci.* 12:788651.
- Yang, P., W. Dong, M. Heinen, W. Qin and O. Oenema Soil Compaction Prevention, Amelioration and Alleviation. Measures Are Effective in Mechanized and Smallholder Agriculture: A Meta-Analysis. *Land* 2022a, 645.

- 
- Yang, P. Exploring relationships between soil compaction, amelioration and functioning, PhD thesis, Wageningen University, Wageningen, NL (2022b).
- Youtube (2021). <https://www.youtube.com/watch?v=Xk-RX33Nbvo>.
- Zhang, Z.; Peng, X. Biosubsoiling: A new perspective for sustainable agriculture, Soil and Tillage Research, Volume 206, 2021, 104844, ISSN 0167-1987, <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104844>.
- Zhang, Z., Yan, L., Wang, Y., Ruan, R., Xiong, P., & Peng, X. (2022). Biosubsoiling improves soil physical properties and maize growth in a compacted Vertisol by cover crops. Soil Science Society of America Journal, 86 324–337. <https://doi.org/10.1002/saj2.20368>.

---

# Bijlage 1      Vragenlijst over herstelmethoden voor bodemverdichting

De vragenlijst maakt deel uit van het EJP SoilCompaC project (<https://ejpsoil.eu/soil-research/soilcompac>). Doel van de vragenlijst is om gepubliceerde gegevens te verzamelen van studies naar het herstel van bodemverdichting voor landbouwgronden in Europa. We definiëren verdichtingsherstel in deze context als 'het duurzame herstel van bodemeigenschappen/functies/gewasopbrengsten/ecosysteemdiensten tot hun vorige niveau (of een aanvaardbaar niveau) na door het landbouwverkeer veroorzaakte verdichting'.

We zouden graag gegevens hebben over veldexperimenten (akkerbouw, grasland) die zich hebben gericht op: (i) herstel van ondergrondverdichting in conventionele grondbewerkingssystemen; (ii) herstel van de bovengrond in no till/conserverende grondbewerkingssystemen. De evaluatie van herstel kan een vergelijking inhouden tussen verdichte percelen versus controlepercelen of tussen metingen op hetzelfde perceel voorafgaand aan de bodemverdichting en na herstel.

1. Heeft u of hebben andere onderzoekers het herstel van verdichting gemonitord/geobserveerd op/in uw instituut/land? Zo ja, ga verder met vraag 2.
  - JA
  - GEEN
2. Land
3. Naam instelling
4. Naam van de proeflocatie
5. Bodemtextuur (bijv. USDA) en bodemklasse (WRB- of FAO-classificatie)
6. Klimatologische omstandigheden/biogeografische regio van proeflocatie zoals beschreven op <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/biogeographical-regions-in-europe-2>
  - Alpine
  - Anatolische
  - Noordpool
  - Atlantic
  - Zwarte Zee
  - Boreaal
  - Continentaal
  - Macronesië
  - Mediterraan
  - Pannonisch
  - Steppisch
7. Jaar van eerste verdichting of wanneer verdichting werd opgemerkt voordat het herstel begon
8. Wat was de bodemdiepte (cm) waarop verdichting werd waargenomen en teruggevonden?
9. Variabelen gemeten vóór de verdichting (gewas- of bodemvariabelen) –Kies alles wat van toepassing is:
  - Bulkdichtheid
  - Weerstand tegen penetratie
  - Verzadigd hydraulisch geleidingsvermogen
  - Onverzadigd hydraulisch geleidingsvermogen
  - Infiltratiesnelheid
  - Gas-luchtdiffusie
  - Gas/luchtdoorlaatbaarheid
  - Vasthouden van water
  - Waterretentie
  - Andere:
10. Wielbelasting van voertuig gebruikt voor verdichting
  - 1-5 Mg
  - 5-10 Mg
  - 11-15 Mg
  - 15-20 Mg

- 20 – 25 Mg
  - >25 Mg
11. Had het experiment niet-gecompacteerde controlepercelen?
  12. Variabelen gemeten direct na verdichting of vlak voordat herstel werd ingezet (gewas- of bodemvariabelen):
    - Bulkdichtheid
    - Weerstand tegen penetratie
    - Verzadigd hydraulisch geleidingsvermogen
    - Onverzadigd hydraulisch geleidingsvermogen
    - Infiltratiesnelheid
    - Gas-luchtdiffusie
    - Gas/luchtdoorlaatbaarheid
    - Vasthouden van water
    - Waterdraagvermogen
    - Andere:
  13. Type/mechanismen van verdichtingsherstel
    - Natuurlijk (nat/droog, vries/dooi en krimpen/zwellen cycli)
    - Mechanisch
    - Biologisch (wortels, organismen)
    - Natuurlijk + Mechanisch
    - Natuurlijk + Biologisch
    - Mechanisch + Biologisch
    - Alle drie tegelijk
    - Andere:
  14. Jaar van herstelmetingen van verdichting (gewas- of bodemvariabelen)
  15. Korte termijn (<2 jaar) effectiviteit van herstel in termen van gemeten variabelen in Q11
    - Zeer laag (<10% herstel van de variabele)
    - Laag (10-30%)
    - Gemiddeld (30-50%)
    - Hoog (50-70%)
    - Zeer hoog (70-100%)
  16. Effectiviteit op lange termijn (>2 jaar) van herstel in termen van gemeten variabelen in Q11
    - Zeer laag (<10% herstel van de variabele)
    - Laag (10-30%)
    - Gemiddeld (30-50%)
    - Hoog (50-70%)
    - Zeer hoog (70-100%)
  17. Mogelijke negatieve effecten van de herstelaanpak (bijv. drainageproblemen, grondbewerkingsproblemen, minder wortelgroei, verhoogd risico op herverdichting van de bodem, enz.)
  18. Kostenraming van terugwinningsmethode/-aanpak voor gebruik op landbouwvelden. Geef indien mogelijk een prijsraming onder "Overige", zo niet, kies een van de onderstaande opties.
    - Te duur voor bedrijfsniveau
    - Gebruikers zullen quitte spelen bij gebruik
    - Rendabel in gebruik
    - Andere:
  19. Wat is het technologische gereedheidsniveau (TRL) van de herstelbenadering zoals beschreven
 

[https://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2014\\_2015/annexes/h2020-wp1415-annex-g-trl\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2014_2015/annexes/h2020-wp1415-annex-g-trl_en.pdf)

    - TRL 1 – basisprincipes in acht genomen
    - TRL 2 – geformuleerd technologieconcept
    - TRL 3 – experimenteel bewijs van concept
    - TRL 4 – technologie gevalideerd in laboratorium
    - TRL 5 – technologie gevalideerd in relevante omgeving (industriële relevante omgeving in het geval van sleuteltechnologieën)
    - TRL 6 – technologie gedemonstreerd in relevante omgeving (industriële relevante omgeving in het geval van sleuteltechnologieën)
    - TRL 7 – demonstratie van systeemprototype in operationele omgeving
    - TRL 8 – systeem compleet en gekwalificeerd

- 
- TRL 9 – daadwerkelijk systeem bewezen in operationele omgeving (concurrerende productie in het geval van sleuteltechnologieën; of in de ruimte)
20. Wat is de waargenomen/gekwantificeerde gebruikersacceptatie van de aanpak voor boeren en andere belanghebbenden?
    - Aanvaardbaar
    - Niet acceptabel
  21. Hoe toepasbaar is de herstelaanpak voor andere bodemtypes?
    - Toepasselijk
    - Niet van toepassing
  22. Geef enkele links naar websites, collegiaal getoetste publicaties of lokaal gepubliceerde rapporten over het herstel van de verdichting?

---

Wageningen Environmental Research  
Postbus 47  
6700 AA Wageningen  
T 0317 48 07 00  
[wur.nl/environmental-research](http://wur.nl/environmental-research)

Wageningen Environmental Research  
Rapport 3296  
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, 7.600 medewerkers (6.700 fte) en 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](http://wur.nl/environmental-research)

Rapport 3296  
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, 7.600 medewerkers (6.700 fte) en 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.

