



Extreme weersomstandigheden en de gezondheid van landbouwbodems

Literatuuronderzoek over de impact van weersextremen op de bodemgezondheid van landbouwgrond

Myrjam de Graaf, Jack Faber, Marius Heinen, Daan Verstand, Jantine van Middelkoop, Idse Hoving, William Bijker, Iris de Jonge, Eva van der Burgt



WAGENINGEN
UNIVERSITY & RESEARCH

Extreme weersomstandigheden en de gezondheid van landbouwbodems

Literatuuronderzoek over de impact van weersextremen op de bodemgezondheid van landbouwgrond

Myrjam de Graaf¹, Jack Faber¹, Marius Heinen¹, Daan Verstand¹, Jantine van Middelkoop², Idse Hoving², William Bijker³, Iris de Jonge², Eva van der Burgt³

1 Wageningen Environmental Research

2 Wageningen Livestock Research

3 Wageningen Plant Research

Dit onderzoek is uitgevoerd door Wageningen Research en gesubsidieerd door het Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, in het kader van het Beleidsondersteunend onderzoeksthema 'Duurzame voedselvoorziening en -productieketens & Natuur' (projectnummer BO-43-123-006).

Wageningen Environmental Research
Wageningen, augustus 2024

Gereviewd door:

Mirjam Hack-ten Broeke, teamleider Bodem, Water en Landgebruik (WENR)

Akkoord voor publicatie:

Mirjam Hack-ten Broeke, teamleider Bodem, Water en Landgebruik (WENR)

Rapport 3361

ISSN 1566-7197

Graaf de, M., J. Faber, M. Heinen, D. Verstand, J. van Middelkoop, I. Hoving, W. Bijker, I. de Jonge, E. van der Burgt, 2024. *Extreme weersomstandigheden en de gezondheid van landbouwbodems; Literatuuronderzoek over de impact van weersextremen op de bodemgezondheid van landbouwgrond*. Wageningen, Wageningen Environmental Research, Rapport 3361. ?? blz.; 5 fig.; 14 tab.; 188 ref.

Het lijkt erop dat met name piekbuien, hittegolven en lange perioden van droogte extreme weersgebeurtenissen zijn die een grote impact hebben op de functionele bodemkwaliteit. De belangrijkste sleutelindicatoren voor bodemgezondheid in relatie tot weersextremen en een duurzame agrarische productie zijn (1) aggregaat-grootte en -stabiliteit, (2) regenwormendichtheid en soortensamenstelling en (3) microbiële biomassa met expliciet mycorrhiza, schimmel-bacteriënratio. Voor het beperken van de negatieve gevolgen van extreme weerscondities hebben boeren in Nederland positieve ervaringen met het toedienen van organische stof als preventieve beheermaatregel. In het buitenland wordt het bedekt houden van de onbeteelde bodem met strooisel gezien als kansrijke preventieve maatregel, maar wordt in Nederland nog nauwelijks toegepast.

It appears that the extreme weather events (1) heavy rainfall, (2) heatwaves, and (3) prolonged periods of drought are significant drivers impacting functional soil quality. The key indicators for soil health concerning weather extremes and sustainable agricultural production are (1) aggregate size and stability, (2) earthworm density and species composition, and (3) microbial biomass, specifically mycorrhiza, fungi-to-bacteria ratio. To mitigate the adverse effects of extreme weather conditions, farmers in the Netherlands have positive experiences with the application of organic matter as a preventive management measure. Internationally, covering bare soil with mulch is seen as a promising preventive measure, yet it is scarcely implemented in the Netherlands.

Trefwoorden: Weersextremen, bodemkwaliteit, bodemgezondheid, bodemindicatoren, sleutelindicatoren, preventieve beheermaatregel

Dit rapport is gratis te downloaden van <https://doi.org/10.18174/671444> of op www.wur.nl/environmental-research (ga naar 'Wageningen Environmental Research' in de grijze balk onderaan). Wageningen Environmental Research verstrekt *geen* gedrukte exemplaren van rapporten.

© 2024 Wageningen Environmental Research (instituut binnen de rechtspersoon Stichting Wageningen Research), Postbus 47, 6700 AA Wageningen, T 0317 48 07 00, www.wur.nl/environmental-research. Wageningen Environmental Research is onderdeel van Wageningen University & Research.

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

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



Wageningen Environmental Research werkt sinds 2003 met een 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 3361 | ISSN 1566-7197

Foto omslag: met een gezonde bodem naar een klimaatrobuuste landbouw

Inhoud

Verantwoording	5
Woord vooraf	7
Samenvatting	9
1 Bodemkwaliteit in perspectief van beleid voor klimaat en biodiversiteit	15
2 Aanleiding, doel en aanpak	19
2.1 Aanleiding	19
2.2 Doelstellingen	20
2.3 Kanttekeningen vooraf	21
2.4 Aanpak en leeswijzer	23
3 Weersextremen en trends als gevolg van klimaatverandering	24
3.1 Keuze van extreme gebeurtenissen en herhalingstijden	24
3.2 Kwantificering van trends	25
3.2.1 Gebruikte bronnen	25
3.2.2 Weersextremen voor huidige klimaat	26
3.2.3 Trends ten gevolge van klimaatverandering	26
4 Kwetsbaarheid van de bodem voor weersextremen	28
4.1 Het begrip kwetsbaarheid nader gedefinieerd	28
4.2 Selectie van bodemindicatoren	29
4.2.1 Fysische bodemindicatoren	29
4.2.2 Chemische bodemindicatoren	30
4.2.3 Biologische bodemindicatoren	31
4.3 Weersextremen en effecten op bodemindicatoren in één samenvattend overzicht	32
4.4 Onderbouwing effecten fysische bodemindicatoren	34
4.4.1 Inleiding	34
4.4.2 Invloed van piekbuien	36
4.4.3 Invloed van bodemtemperatuur en hittegolf	39
4.4.4 Invloed van droogte	41
4.4.5 Invloed van (afwezigheid van) vorst	43
4.4.6 Invloed van een laag vochtgehalte start groeiseizoen	43
4.4.7 Invloed van verzilting	44
4.4.8 Herstelvermogen	45
4.4.9 Discussie	45
4.4.10 Algemene bevinding	46
4.5 Onderbouwing effecten chemische bodemindicatoren	47
4.5.1 Inleiding	47
4.5.2 Invloed van piekbuien	49
4.5.3 Invloed van hitte	50
4.5.4 Invloed van droogte	50
4.5.5 Invloed van afwezigheid vorst	51
4.5.6 Invloed van afwisselend vorst en dooi	51
4.5.7 Invloed van laag vochtgehalte bij start groeiseizoen	51
4.5.8 Herstelvermogen	51
4.5.9 Robuustheid voor weersextremen	52
4.6 Onderbouwing effecten biologische bodemindicatoren	52
4.6.2 Invloed van piekbuien	52
4.6.3 Invloed van een hittegolf	55

4.6.4	Invloed van droogte	56
4.6.5	Invloed van afwezigheid vorst	57
4.6.6	Invloed van afwisselend vorst en dooi	57
4.6.7	Invloed van laag vochtgehalte bij start groeiseizoen	59
4.6.8	Herstelvermogen	60
4.6.9	Robuustheid voor weersextremen	60
4.7	'Sleutelindicatoren' voor de gezondheid van de bodem	60
4.8	Aandachtspunten bij de monitoring	62
5	Beheermaatregelen bij weersextremen	64
5.1	Beheermaatregelen in de melkveehouderij	64
5.1.1	Inleiding	64
5.1.2	Watermanagement naar het boerenerf	64
5.1.3	Reactief management bij weersextremen	66
5.1.4	Preventieve Maatregelen voor vermindering kwetsbaarheid	68
5.2	Beheermaatregelen in de akkerbouw	71
5.2.1	Inleiding	71
5.2.2	Watermanagement naar het boerenbedrijf	71
5.2.3	Reactief management bij weersextremen	71
5.2.4	Preventieve Maatregelen voor vermindering kwetsbaarheid	73
6	Conclusie en aanbevelingen	76
6.1	Weersextremen en kwetsbaarheid van de bodem	76
6.1.1	Weersextremen met een groot effect op de bodemgezondheid	76
6.1.2	Kwetsbaarheid van de bodem	76
6.2	Bodemgezondheid en beheermaatregelen	78
6.3	Aanbevelingen voor vervolgonderzoek	80
6.3.1	Validatie van hypothesen middels veldonderzoek	80
6.3.2	Selectie weersextremen, beheermaatregelen en bodemindicatoren	81
Literatuur		83
Bijlage 1	Overzicht weersextremen	93

Verantwoording

Rapport: 3361

Projectnummer: BO-43-123-006

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: teamleider team Water, Bodem en Landgebruik

naam: Mirjam Hack-ten Broeke

datum: 24 november 2023

Akkoord teamleider voor de inhoud,

naam: Mirjam Hack-ten Broeke

datum: 25 april 2024

Woord vooraf

Er is nog veel onduidelijk hoe en in hoeverre weersextremen, zoals piekbuien en lange perioden van droogte of hitte, de bodemkwaliteit beïnvloeden en wat vervolgens de impact is op het producerend vermogen, de grondwaterkwaliteit en de bodembiodiversiteit. Hoe reageren bodemindicatoren op droogte, piekbuien en afwisseling van extremen? En hoe werkt dit door op de functies van de bodem? In voorliggende rapportage zijn de resultaten beschreven van een literatuurstudie, aangevuld met een aantal interviews. Met dit onderzoek is een beeld verkregen van hoe en in welke mate verschillende bodemindicatoren in theorie reageren op bepaalde weersextremen (droogte, piekbuien, hitte en vorst) en welke maatregelen agrariërs (akkerbouw en melkveehouderij) nemen in dergelijke situaties. Met deze kennis op zak kan de vertaalslag worden gemaakt naar passende en kansrijke (beheer- en beleids)maatregelen om de negatieve gevolgen van klimaatverandering te kunnen beperken. Op deze manier kunnen overheid en landbouwsector gezamenlijk stappen zetten richting een weerbaarder, gezonder en klimaatrobuust landbouwproductiesysteem.

Dit rapport is tot stand gekomen vanuit een project gefinancierd door het Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit. Wij bedanken onze opdrachtgevers, de heer A.J. (Albert) de Vries en S.Y. (Sabine) Pronk voor de prettige samenwerking. Verder bedanken wij de melkveehouders en akkerbouwers voor hun deelname aan de interviews en het delen van hun praktijkervaringen.

Samenvatting

Op een landbouwperceel zijn water/weer, bodem en gewas sterk met elkaar verbonden: veranderingen op een van deze aspecten, bijvoorbeeld door verkeerd beheer of door klimaatverandering, heeft effect op de andere twee. We krijgen steeds meer inzichtelijk hoe de drie aspecten elkaar beïnvloeden en welke beheermaatregelen hier positief dan wel negatief aan kunnen bijdragen, maar er is ook nog veel onduidelijk. Dit project heeft tot doel om een aantal kennishiaten op dit vlak in te vullen, waardoor we (agrariër en overheid) de juiste maatregelen kunnen treffen om stappen te zetten in een weerbaar, duurzaam en gezond landbouwproductiesysteem. De focus in dit project ligt op de functionele kwaliteit van landbouwgronden. Dit betekent dat de condities van de bodem voldoende moeten zijn voor het ondersteunen van de landbouwproductie met behoud van de veerkracht.

Het project heeft tot doel inzicht te verkrijgen in de achterliggende mechanismen in de relaties tussen weersextremen en de functionele bodemkwaliteit, specifiek voor klei- en zandgronden. Daarmee brengen we in beeld in hoeverre bodemindicatoren worden beïnvloed door weersextremen en bij welke frequentie van optreden van de weersextremen dit impact heeft op de bodemgezondheid en de gewasproductie. Tevens brengen we in kaart welke preventieve beheermaatregelen op agrarische bedrijven¹ in klei- en zandgebieden in de praktijk worden toegepast en in hoeverre deze van invloed zijn op de kwetsbaarheid van de bodem voor weersextremen. Hiermee vergroten we het inzicht in mogelijke kansrijke beheermaatregelen voor nu in en de toekomst, waardoor de negatieve effecten van weersextremen op bodemgezondheid worden beperkt. Tot slot levert dit project voorstellen voor vervolgonderzoek op, dat nodig is voor het vullen van nog openstaande kennishiaten en dat ons verder helpt in het bieden van een praktisch handelingsperspectief aan agrarisch ondernemers bij het treffen van beheermaatregelen voor het realiseren van een weerbaar, duurzaam en gezond landbouwproductiesysteem.

Weersextremen en effect op de functionele bodemkwaliteit

In het onderzoek zijn de volgende extreme weersomstandigheden onder de loep genomen:

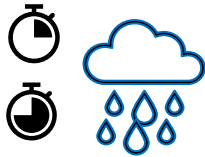
- Korte piekbuien gedurende het groeiseizoen (met plasvorming en inundaties vanuit sloten als gevolg);
- Lange piekbuien gedurende het groeiseizoen (met hoge grondwaterstanden en plasvorming als gevolg);
- Korte (heftige) hittegolf;
- Lange (minder heftige) hittegolf;
- Droogte gedurende het groeiseizoen;
- Aan-/afwezigheid van een vorstperiode;
- Kwakkelwinter (meerdere perioden van vorst, afgewisseld met perioden van dooi);
- Laag vochtgehalte in de bodem bij start van het groeiseizoen.

Op basis van dit literatuuronderzoek lijkt het erop dat met name de korte en lange piekbuien, de korte en lange hittegolven en lange perioden van droogte gebeurtenissen zijn die een grote impact hebben op de functionele bodemkwaliteit. In navolgende tabel zijn voor deze weersextremen de bodemindicatoren benoemd die het kwetsbaarst zijn voor deze gebeurtenis. Tevens is het te verwachten effect beschreven en – voor zover bekend – de snelheid van herstel.

¹ In deze studie richten we ons op de gemiddelde agrariër met conventionele bedrijfsvoering. De aanpassingen die zij doen, zijn vooral 'klimaat mitigerend', d.w.z. dat ze de schade beperken en tenietdoen met maatregelen die mogelijk zijn zonder direct het hele bedrijfssysteem om te gooien. Dergelijke maatregelen kunnen achteraf ('reactief') of vooraf ('preventief') worden genomen, en kunnen verschillen naargelang landgebruik en grondsoort.

Situatie extreem Bodemindicatoren met een relatief grote kwetsbaarheid voor betreffende weersxtreem

Piekbui in groeiseizoen
(1 april-1 oktober)



FYSISCH

- *Aggregaatstabiliteit*: mean weight diameter (MWD) neemt tijdelijk af
- *Droge bulkdichtheid*: in korstvormige en slempegevoelige gronden neemt deze in eerste paar mm/cm toe
- *Doorlatendheid bij verzadiging*: aan maaiveld kan deze verlaagd worden indien de bulkdichtheid door een piekbui toeneemt
- *Infiltratiesnelheid*: zal verlagen indien piekbui leidt tot toename bulkdichtheid aan maaiveld

CHEMISCH

- *Kali beschikbaarheid*: K-CaCl₂: door uitspoeling kan K permanent verdwijnen uit de bouwvoor

BIOLOGISCH

- *Micro-organismen*: biomassareductie zowel schimmels als bacteriën, maar snel herstel – mede afhankelijk van ontwikkelingsstadium van het gewas
- *Aaltjes*: soortspecifieke aantalsreducties (vooral van fungivore nematoden), maar snel herstel
- *Regenwormen*: aantalsreductie, waarschijnlijk specifiek per ecologische groep

Hittegolf
(jaarrond)



FYSISCH

- *Aggregaatstabiliteit*: neemt af
- *Doorlatendheid bij verzadiging*: wordt tijdelijk verhoogd bij hogere T

CHEMISCH

- *Stikstof totaal en pot. mineraliseerbare stikstof*: nemen af, zijn nauw verbonden aan het OS-gehalte
- *Organische stof*: gloeiverlies, Organisch C, Afbreekbaar C: Hot Water Carbon (HWC): nemen af. OS wordt sneller afgebroken bij hogere temperaturen

BIOLOGISCH

- *Micro-organismen*: effecten onduidelijk, maar verhouding schimmels:bacteriën kan toenemen, met potentiële gevolgen voor o.a. immobilisatie van nutriënten, aggregaatvorming en stabilisatie
- *Aaltjes*: aantalsreductie door sterfte en wegkruipen dieper van de warmte; gedeeltelijk snel herstel
- *Regenwormen*: effecten zijn afhankelijk van het bodemvochtgehalte. Als de bodem onverminderd vochtig blijft, doen de wormen het beter en verlopen processen sneller. Bij een hittegolf die gepaard gaat met droogte stoppen eetactiviteit, groei en reproductie. Bij aanhoudende droogte treedt sterfte op. Sommige soorten kunnen dieper wegkruipen en overleven in diapause. Gevoeligheid voor pesticiden zoals glyphosaat neemt toe. Herstel van droge hittegolf kan een groeiseizoen duren

Droogte in
groeiseizoen
(1 april – 1 oktober)



FYSISCH

- *Aggregaatstabiliteit*: kan iets toenemen door droogte, tenzij door door bijkomende verhoogde temperaturen veel OS afbreekt
- *Indringingsweerstand*: de feitelijk indringingsweerstand neemt (exponentieel) toe in een uitdrogende bodem
- *Doorlatendheid bij verzadiging en infiltratiesnelheid*: alleen indirect via invloed van droogte op bodemstructuur

CHEMISCH

- *Organische stof*: gloeiverlies, Organisch C, Afbreekbaar C: Hot Water Carbon: nemen af, verhoogde flux van CO₂ (= afbraak OS) wanneer neerslag valt na droge periode
- *Stikstof totaal en pot. mineraliseerbare stikstof*: verhoging van vrijkomen van N wanneer neerslag valt na droge periode, nemen daardoor af
- *Fosfaatvoorraad en -beschikbaarheid*: fosfaat beschikbaarheid neemt toe onder droge omstandigheden
- *Kalivoorraad en -beschikbaarheid*: K-beschikbaarheid neemt af onder droge omstandigheden, maar herstelt wanneer neerslag valt

BIOLOGISCH

- *Micro-organismen*: bacteriële biomassa en enzymactiviteit nemen af, schimmels zijn veel minder gevoelig
- *Aaltjes*: aantallen individuen en de diversiteit aan soorten nemen af; maturity index verandert nauwelijks, maar soortensamenstelling kan wel relatief veranderen en plant-parasitaire aaltjes kunnen gaan domineren
- *Regenwormen*: droogte leidt tot verminderde activiteit en lagere aantallen individuen en biomassa. Gevoeligheid voor bodemcontaminanten neemt toe. Herstel van vooral pendelaars is medeaafhankelijk van eventueel aanwezige 'onkruiden'

Aanbevolen wordt om het veldonderzoek te richten op de drie weersxtremen die een grote impact hebben op (een aantal van) de indicatoren en daarmee naar verwachting ook op het functioneren van de bodem:

- korte en lange piekbuien;
- korte en lange hittegolven;
- lange perioden van droogte.

Gegeven de natuurlijke variatie en de zeldzaamheid van weersxtremen is het allerm minst zeker dat alle beoogde weersxtremen zich voordoen gedurende de looptijd van het veldonderzoek. Om deze onzekerheid te ondervangen, wordt geadviseerd om een daarvan onder geconditioneerde omstandigheden in praktijk te brengen, te weten 'piekbuien'. Een piekbui kan worden nagebootst door een beregeningsinstallatie, die hiervoor opgebouwd en aangezet dient te worden gedurende een vooraf vastgestelde tijd en intensiteit.

Hittegolven en lange perioden van droogte zijn helaas niet na te bootsen op de schaal van proefvelden (op grotere schaal kan het nabootsen van droogte wel). Daarvoor zijn we afhankelijk van het weer. Om deze weersextremen tijdig te identificeren en de vooraf vastgestelde monsternamen en veldmetingen uit te voeren en daarmee de gevoeligheden en hersteltijd van sleutelindicatoren van bodemkwaliteit en de effectiviteit van beheermaatregelen te kunnen toetsen en kwantificeren, kan een signaleringssysteem worden ontwikkeld.

In dit onderzoek hebben we uit de lijst aan indicatoren die zijn genoemd in de lijst van 'Bodemindicatoren voor Landbouwgronden in Nederland' (BLN) de volgende fysische, chemische en biologische bodemindicatoren uitgelicht en onderzocht op de mate van kwetsbaarheid voor weersextremen:

Fysische bodemindicatoren:	Chemische bodemindicatoren:	Biologische bodemindicatoren:
<ul style="list-style-type: none"> • Aggregaatstabiliteit • Droge bulkdichtheid • Indringingsweerstand • Watervasthoudend vermogen • Doorlatendheid bij verzadiging en infiltratiesnelheid 	<ul style="list-style-type: none"> • Zuurgraad pH • Stikstof totaal • Potentieel mineraliseerbare N • P-voorraad en -beschikbaarheid • K-voorraad en -beschikbaarheid • Organische stof, organisch C en afbreekbaar C 	<ul style="list-style-type: none"> • Micro-organismen: bacterie- en schimmel biomassa (PLFA) • Aaltjes, taxonomische diversiteit en aantal exemplaren • Regenwormen, aantallen en soorten

Hoewel we in dit onderzoek de fysische, chemische en biologische bodemindicatoren en hun kwetsbaarheid voor weersextremen elk afzonderlijk beschouwen, zijn deze in werkelijkheid onderling verbonden en kunnen ze ook vergelijkbare reacties – positief of negatief – hebben op bepaalde stressoren (zoals een weersextrem). Ze reageren als het ware gebundeld, al naargelang het soort stressor. Door bij het meten van bodemgezondheid gebruik te maken van zogenaamde 'sleutelindicatoren' (i.e. indicatoren die relevant zijn voor zoveel mogelijk verschillende bodemfuncties en ecosysteemdiensten en die responsief zijn voor de drie relevante weersextremen), is het mogelijk om met beperkte meetinspanning een maximum aan informatie in te winnen. De volgende sleutelindicatoren voor bodemgezondheid in relatie tot weersextremen en een duurzame agrarische productie zijn benoemd:

- Aggregaat-grootte en -stabiliteit
- Regenwormen dichtheid en soortensamenstelling
- Microbiële biomassa met expliciet mycorrhiza, schimmel-bacteriënratio

Deze potentiële sleutelindicatoren voor effecten van weersextremen op bodemgezondheid zijn op dit moment echter nog hypothetisch. We adviseren dan ook om validerend onderzoek te doen om de bruikbaarheid en robuustheid te toetsen onder relevante Nederlandse omstandigheden van weersextremen en landbouwpraktijken.

Kansrijke preventieve beheermaatregelen

Om een goed overzicht te krijgen van de reactieve en preventieve beheermaatregelen die agrariërs uit de melkveehouderij en de akkerbouw in de praktijk toepassen en om een eerste beeld te krijgen van de mate waarin ze bijdragen aan een goede functionele bodemkwaliteit, hebben we – binnen het netwerk van WUR bekende – agrariërs uit beide sectoren geïnterviewd. Uit de inventarisatie kan samenvattend over de regio's worden geconcludeerd dat het toedienen van organische stof de meeste navolging krijgt in hoe boeren op dit moment reageren op extreme weerscondities. Deze maatregel werd vaak genoemd als preventieve maatregel voor verschillende weersextremen, maar óf en hóe precies een verhoging van het gehalte organisch stof moet worden bereikt, is onduidelijk. Het is in elk geval een doel dat, afhankelijk van grondsoort en landgebruik, pas na verloop van meerdere jaren kan worden bereikt. Naast het toevoeren van organische stof werden de volgende preventieve beheermaatregelen als kansrijk benoemd:

- Vanggewassen voor verbetering bodemstructuur
- Niet-kerende grondbewerking
- Gebruik drukverlagende machines
- Vaste rijpaden
- Grasklaver of kruidenrijk grasland
- Regelbare drainage en infiltratie (RDI), mits goed onderhouden, vlak terrein én voldoende (oppervlakte)water beschikbaar

Een mogelijk interessante preventieve maatregel die in Nederland nog nauwelijks wordt toegepast, is het bedekt houden van de onbeteelde bodem met strooisel, dat bijdraagt aan de organische stofvoorziening en de bodem weerbaarder zou kunnen maken voor piekbuien, droogte en hitte. De hypothese is dat de bodem niet dichtslaat door piekbuien, minder opwarmt door hitte en er minder vocht verdampt (evaporatie). De oppervlakkige organische stofvoorziening en de demping van de weersextremen zouden ten goede kunnen komen aan de biologische bodemprocessen en daarmee aan de algehele bodemgezondheid.

Kanttekening bij de inventarisatie is dat de maatregelen zich richten op controle van de externe omstandigheden voor de teelt (productie) en minder op het versterken van de natuurlijke weerstand van de bodem en het verminderen van haar kwetsbaarheid voor weersextremen. De genoemde oplossingen volstaan niet om te voorkomen dat er schade optreedt aan de bodem bij extreem weer, zowel voor de gewasproductie als andere bodemfuncties. De omvang van schade hebben wij niet onderzocht en we gaan hier verder ook niet op in.

Voorstellen voor vervolgonderzoek

Onze literatuurstudie, aangevuld met interviews met melkveehouders en akkerbouwers, heeft een aantal hypothesen opgeleverd over de invloed van weersextremen op het functioneren van de bodem en over de effectiviteit van kansrijke preventieve beheermaatregelen voor het veerkrachtiger maken van de bodem voor een duurzame agrarische productie en deze bodem weerbaarder te maken voor weersextremen. Om beter inzicht te krijgen in het handelingsperspectief voor de agrarische sector (beheer), het rijk en de regionale overheden (beleid), zouden we deze hypothesen moeten toetsen in een validerend onderzoek.

Gelet op de praktijkrelevantie van onderzoeksresultaten wordt in dit stadium van het onderzoek de voorkeur gegeven aan een onderzoek in het open veld boven kas- of labcondities. Bovendien doet een onderzoek in het open veld – op agrarische percelen – meer recht aan het doel van dit onderzoek, namelijk het bieden van handelingsperspectief voor agrariërs bij het treffen van preventieve beheermaatregelen voor het realiseren van een weerbaar, duurzaam en gezond landbouwproductiesysteem. Door direct in het veld aan de slag te gaan, gaat de wetenschappelijke onderbouwing van de effectiviteit hand in hand met de praktische toepassing van de maatregel. Waardevolle ervaringen in het toepassen van preventieve maatregelen kunnen zo direct worden meegenomen. Na het opdoen van ervaringen en het verkrijgen van eerste inzichten, kan een aanvullend kas- en labonderzoek interessant zijn. Kanttekening bij veldonderzoek is echter dat slechts beperkt controle mogelijk is over de te toetsen experimentele weersomstandigheden. Alleen een piekbui kan worden nagebootst door een beregeningsinstallatie, die hiervoor speciaal opgebouwd en aangezet dient te worden gedurende een vooraf vastgestelde tijd en intensiteit.

Vanuit de inventarisatie van beheermaatregelen lijkt een paar preventieve maatregelen aantrekkelijk om in gericht veldonderzoek te worden gevalideerd op daadwerkelijke effectiviteit voor het bevorderen van functionele bodemkwaliteit (i.e., grotere weerstand tegen of groter herstelvermogen op) tegen schadelijke effecten van weersextremen. Gelet op deze inventarisatie én de positieve ervaringen buiten Nederland (VS), stellen we daarom voor om validerend veldonderzoek te richten op de volgende combinatie van preventieve maatregelen:

- het opbouwen van organische stof door niet-kerende grondbewerking, in combinatie met het bedekt houden van de onbeteelde bodem met strooisel.

Er dient rekening te worden gehouden met het feit dat de effectiviteit van een nieuw toegepaste beheermaatregel pas na meerdere jaren zichtbaar zal worden. Het heeft de voorkeur proeflocaties te selecteren waar zo'n specifieke beheermaatregel al meerdere jaren is toegepast.

Voorgesteld wordt om in een eerste veldonderzoek de volgende indicatoren te meten:

- aggregaatstabiliteit en -grootteverdeling;
- schimmels (saprotrofen en mycorrhiza) en bacteriën, hoeveelheden en schimmel-bacteriënratio;
- regenwormen dichtheid en soortensamenstelling;
- mineraliseerbare stikstof.

Aangezien deze shortlist is gebaseerd op literatuur en expert judgement, wordt het wenselijk geacht om middels validerend onderzoek de bruikbaarheid en robuustheid van deze drie sleutelindicatoren te toetsen onder relevante Nederlandse omstandigheden van weersextremen en landbouwpraktijken.

Om de hydrologische en meteorologische condities vast te stellen aan de start van het veldonderzoek (nulsituatie) en gedurende het onderzoek (seizoenstrend), adviseren we om naast voornoemde bodemindicatoren de volgende parameters continu, dan wel maandelijks te meten:

- bodemvocht op 2 à 3 dieptes (continu);
- neerslag, luchttemperatuur en bodemtemperatuur van de toplaag (continu);
- grondwaterstanden van het freatische pakket (continu);
- de verticale verzadigde doorlatendheid van de bodem, vochtspanning toplaag (maandelijks);
- gewasgroei/bepaling hoeveelheid droge stof (maandelijks).

Tot slot is het raadzaam om – ter voorbereiding van het onderzoek en voor het bepalen van de mate van geschiktheid van een locatie – naast voornoemde parameters de volgende contextuele achtergrondgegevens vast te stellen:

- textuur van de bodem;
- de beheerhistorie.

1 Bodemkwaliteit in perspectief van beleid voor klimaat en biodiversiteit

"Het grotere verhaal rond bodemkwaliteit en hoe deze studie daarin past."

Nationaal, en zeker ook op Europees niveau, is de beleidsmatige belangstelling voor de bodem de laatste jaren enorm toegenomen. Met de implementatie van de EU *Biodiversity Strategy* en *Climate Strategy* als pijlers onder de EU Green Deal is een vergaande basis gelegd voor een duurzame samenleving waarin bodembeleid een centrale plek inneemt. Met de vaststelling van de *New Soil Strategy* (2021) werden hoge ambities door de Europese Commissie bestendigd: per 2030 dient 70% van de bodems in Europa in een goede conditie te verkeren en per 2050 moeten alle bodems gezond zijn. De Nederlandse bodemstrategie die LNV in 2018 presenteerde, beoogt duurzaam beheer van alle landbouwbodems te bereiken in 2030 in een samenwerking tussen overheid en publieke en private partijen (het Nationaal Programma Landbouwbodems). Dit moet de kwaliteit van de bijna 2 miljoen hectare Nederlandse landbouwgrond garanderen voor de toekomst. Toenmalig minister Schouten motiveerde destijds dat duurzaam bodembeheer leidt tot een betere bodemvruchtbaarheid voor de landbouw en de samenleving duurzaam voedsel oplevert, evenals een betere waterkwaliteit en grotere waterbuffering, een grotere biodiversiteit en bijdraagt aan de klimaatopgave.

Gedreven door deze hoge beleidsambities maakt het concept bodemkwaliteit een versnelde ontwikkeling door. Was het begrip een decennium geleden nog voornamelijk synoniem aan bodemvruchtbaarheid (nutriënten) en afwezigheid van bodemverontreiniging (met normstelling uitgewerkt in de beleidsvelden landbouw en milieu), tegenwoordig is er in Europa duidelijk sprake van een bredere invulling die zich dan ook begint te onderscheiden van de benadering in USA en Australië/Azië waar bodemkwaliteit nog vooral op de landbouwproductie gefocust is gebleven (Moebius-Clune et al., 2016; DAFF, 2023). De Europese *Soil Mission* heeft met twee recente rapporten de nadruk gelegd op weerbaarheid tegen en herstel van de verschillende 'soil threats' (destijds al basaal uitgangspunt van de EU Bodemstrategie, EC 2006) en op continuïteit in het vermogen van de bodem om ecosysteemdiensten te leveren zonder afwenteling (Veerman et al., 2020²; 2021). Dit is een duidelijke verbreding die nodig was om de status van een duurzaam gebruikte bodem te kunnen beoordelen. Wordt met de *soil threats* (zie bijvoorbeeld Stolte et al., 2016) andermaal focus gelegd op bescherming en herstel, met de vernieuwing in de vorm van sturen op ecosysteemdiensten is er nu ook oog voor ontwikkeling van bodemgezondheid in het belang van stakeholders binnen en buiten de landbouwsector. Als volgende stap richting implementatie heeft de EC een 'Soil Monitoring Law' (EC 2023a) voorgesteld, waarin bodemgezondheid centraal staat. Onder de European Joint Programming 'Towards climate-smart sustainable management of agricultural soils' (EJP SOIL) werd al een voorzet gedaan voor definities en een conceptueel raamwerk voor bodemkwaliteit in het licht van *soil threats* en ecosysteemdiensten, gebaseerd op wetenschappelijke inzichten en de visie van 21 EU-lidstaten, participierend in het EJP SOIL 'SIREN'-project (Faber et al., 2022). SIREN heeft direct bijgedragen aan de uitwerking van de EU Richtlijn (EC 2023b), onder meer met een consistent begrippenkader en raamwerk, waarin bodemkwaliteit en ecosysteemdiensten aan elkaar worden gerelateerd. Volgens de nieuwe EU Richtlijn staat bodemgezondheid voor de *actuele* conditie en het functioneren van de bodem (i.e. levering van ecosysteemdiensten) zoals dat op een bepaald moment gemeten kan worden. Bodemkwaliteit betreft dan het *potentiële* functioneren van de bodem, gegeven het bodemtype en landgebruik. Dat kan meer zijn dan de huidige conditie, welke dan met gerichte maatregelen verder kan worden ontwikkeld zolang er maar geen sprake is van toenemende *trade-offs* in ecosysteemdiensten. Ook in het recentelijk afgesloten EU-project SoilCare (<https://www.soilcare-project.eu/>) stond de aandacht voor bodemverbeterende landbouwpraktijken ofwel 'Soil-improving cropping systems' centraal (Hessel et al., 2022; Rietra et al., 2022).

Per 2030 zal de gezondheid van de bodem nationaal en in Europees verband geëvalueerd moeten gaan worden. Daartoe is informatie nodig over status en trends van de relevantste aspecten van bodemkwaliteit, op basis van data verkregen uit modellering en vooral veldmetingen uit structurele (i.e. herhaalde) monitoring. Voor de beoordeling van bodemgezondheid van landbouwgronden heeft LNV de 'Bodemindicatoren voor Landbouwgronden in Nederland' (BLN) laten ontwikkelen (Tabel 1.1, Hanegraaf

Voetnoot 2 staat niets????

et al., 2019; De Haan et al., 2021a, gebaseerd op Van den Elsen et al., 2019). In een ander verband heeft het ministerie ook bijgedragen aan ontwikkeling van de Open Bodemindex (OBI, Ros & Fujita 2020). Momenteel worden de BLN-indicatoren in de praktijk getoetst binnen in het Bedrijvennetwerk Bodemmetingen en in het programma 'Slim Landgebruik', waar nadruk is gelegd op validatie van praktijkmaatregelen gericht op de vastlegging van koolstof en opbouw van organische stof in de bodem. Ook lopen er onderzoeksprogramma's onder publiek-private samenwerking, zoals de PPS 'Beter Bodembeheer' die beogen bij te dragen aan de doelstelling om alle landbouwbodems in 2030 duurzaam te beheren. De PPS 'Carbon Farming' is meer specifiek gericht op het bevorderen van koolstofvastlegging in de bodem. De belangrijkste koolstofmaatregelen voor de akkerbouw zijn grassen of granen in het bouwplan en de aanvoer van extra organische mest zoals vaste mest of compost.

Een andere invalshoek tot ontwikkeling van indicatoren voor bodemkwaliteit wordt uitgewerkt binnen het project 'BiodiversiteitsMonitor', een gezamenlijk initiatief van Friesland Campina, Rabobank en het Wereld Natuur Fonds. Hier is een systematiek uitgewerkt die het mogelijk maakt om het effect en de prestaties van individuele agrarische bedrijven op het herstel van de biodiversiteit meetbaar te maken en te monitoren over meerdere jaren. Het principe achter de BiodiversiteitsMonitor is dat er integraal wordt gestuurd op deze doelen, in plaats van op maatregelen of het verbeteren van het bestaande. Er zijn *key performance indicators* (KPI's) ontwikkeld voor de melkveehouderij en akkerbouw op basis waarvan financiële vergoedingen kunnen worden uitgekeerd aan boeren ter ondersteuning van maatregelen om de maatschappelijke doelen te helpen realiseren (Zijlstra et al., 2019; Van Doorn et al., 2021). Inmiddels vormen ook klimaat en omgevingskwaliteit onderdeel van doelstellingen en worden KPI's ontwikkeld voor de bodem (Tabel 1.1).

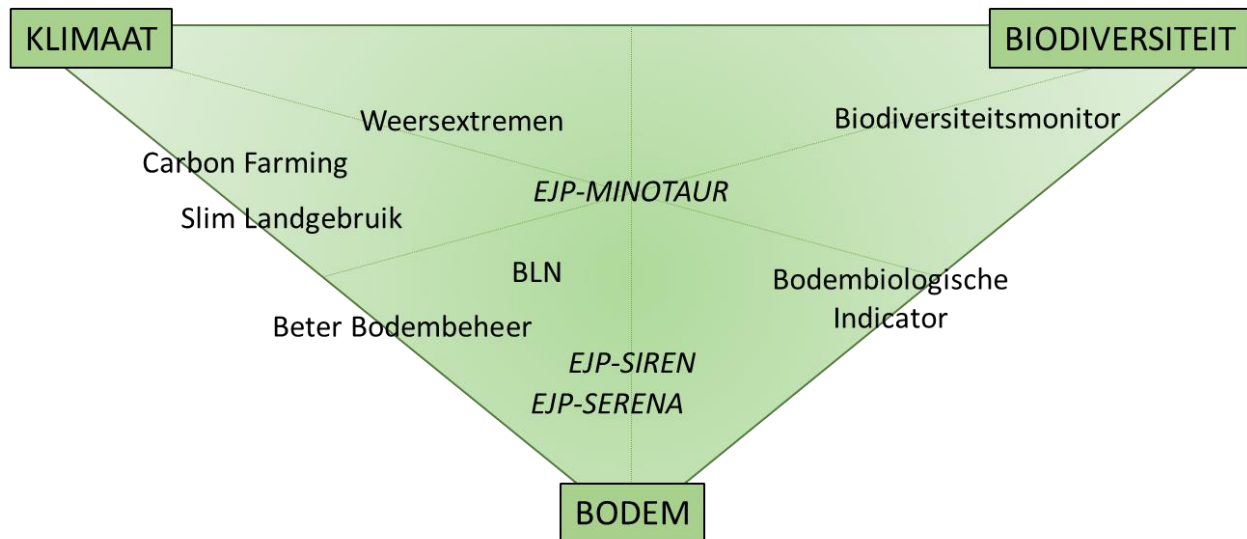
Met de selectie van indicatoren kan men zich op uiteenlopende aspecten van bodemkwaliteit richten, maar de keuze zou in elk geval verband moeten houden met de plaatselijk vigerende gebruiksfuncties en beoogde ecosysteemdiensten, en moet de mogelijkheid bieden om beleidsdoelen dienaangaande te kunnen evalueren. Afhankelijk van de precieze vraagstelling achter de evaluatie zullen ook indicatoren nodig zijn die informatie geven over de bodemgezondheid in relatie tot klimaatverandering en in relatie tot biodiversiteit.

Dit mag allemaal als heel vanzelfsprekend klinken, maar zo eenvoudig ligt het niet altijd. Met betrekking tot het thema klimaat kan de vastlegging van koolstof in de bodem direct gemeten worden (in het Nederlandse Klimaatakkoord is voor landbouwbodems al een doelstelling van 0,4-0,6 Mton per jaar extra CO₂-vastlegging voor 2030 vastgesteld) en ook voor waterinfiltratiecapaciteit bestaan directe meetmethoden. Veel lastiger is het om het vermogen te bepalen van de bodem om zich aan te passen aan het veranderende klimaat en blijvend – of zelfs beter – te functioneren om bijvoorbeeld neerslagpieken en droogteperiodes te kunnen blijven bufferen. Als we kijken naar het mogelijke effect van bodemleven, dan is het bijvoorbeeld wel bekend dat sommige soorten regenwormen de infiltratiecapaciteit verbeteren (Spurgeon et al., 2013) en ook via vorming van aggregaten de nalevering van bodemvocht aan het gewas tijdens droogte bevorderen (Banwart et al., 2019), maar dergelijke kwantitatieve relaties moeten nog verder worden uitgewerkt naar de specifieke context van bodemtype en landgebruik teneinde lokale bodemgezondheid in dat opzicht te beoordelen. Wel is het zo dat de keuze van aanwezigheid van regenwormen als indicator in BLN in principe al is genomen. Beoordeling van het aanpassingsvermogen van de bodem op dit biologische aspect ligt daarmee binnen bereik.

Rond het thema klimaat lopen in Nederland onderzoeksprogramma's, zoals 'PPS Beter Bodembeheer' en 'PPS Carbon Farming', waarin maatregelen voor koolstofvastlegging en klimaatadaptatie worden ontwikkeld. De effecten daarvan op de waterhuishouding van de bodem worden (nog) niet in het onderzoek betrokken, maar wel is bekend dat extra organische stof in de bodem slechts weinig bijdraagt aan het vochtleverend vermogen (Belang van bodemorganische stof voor het waterbeheer | STOWA). Ook met betrekking tot bodemstructuur als bepalende factor voor de waterhuishouding wordt nog momenteel weinig onderzoek verricht. Er is echter al wel veel literatuur over de relatie tussen bodemleven en bodemstructuur en hoe dit doorwerkt als regulatie van de waterhuishouding. Met name schimmels (mycorrhiza) en regenwormen zijn hierbij de belangrijke functionele biodiversiteit. In de literatuur wordt ook aandacht besteed aan het management van de bodem, bijv. in de vorm van gereduceerde grondbewerking en graslandrotatie. Ook hier kan dus naar verwachting veel kwantitatief en contextueel inzicht worden verkregen uit literatuurstudie.

Binnen het Europese EJP SOIL-programma zijn recentelijk nieuwe projecten gestart waarin gewerkt wordt aan indicatoren voor bodemkwaliteit in relatie tot ecosysteemdiensten: 'SERENA' (bodemkwaliteit en ecosysteemdiensten in relatie tot bodembedreigingen) en 'MINOTAUR' (bodembiodiversiteit en bodemkwaliteit in relatie tot klimaatverandering). Hieraan voorafgaand werd door het SIREN-project al een overzicht gegeven van indicatoren, zoals die momenteel in gebruik zijn in de diverse aangesloten lidstaten. Tevens werd een 'minimum dataset' voorgesteld op basis van de meest geïmplementeerde en door de wetenschap veelvuldig gebruikte indicatoren die relevant zijn voor evaluatie van de Europese Green Deal doelstellingen (Faber et al., 2022).

Fout! Verwijzingsbron niet gevonden..1 toont de genoemde projecten en hun locatie ten opzichte van de inhoudelijke focus op de thema's Klimaat, Biodiversiteit en Bodem.



Figuur 1.1 Relevantste projecten rond thema's bodem-klimaat-biodiversiteit, geplaatst op basis van grootste verwantschap.

Tabel 1.1 Samenvatting van indicatoren voor klimaatgerelateerde bodemkwaliteit zoals toegepast of in ontwikkeling in lopende projecten rond bodemkwaliteit. Toelichting op de klimaat-relevantie in hoofdstuk 4.

Project bodemkwaliteit	Biologische indicatoren	Fysische indicatoren	Chemische indicatoren
Bodemindicatoren voor Landbouwgronden in Nederland, BLN (Hanegraaf et al., 2019)	Aaltjes (taxonomische diversiteit en aantal exemplaren) Bacteriën en schimmels (biomassa) (PLFA) Regenwormen (aantallen, soorten)	Watervasthoudend vermogen Aggregaatstabiliteit (Textuur) Indringingsweerstand Droge bulkdichtheid Doorlatendheid bij verzadiging ²	SOM Organische stofgehalte en koolstofgehalte (Gloeiverlies en Dumas, NIRS) Stabiele fractie organische stof (POXC) Heet water extraheerbare koolstof (HWC) Zuurgraad (pH-CaCl ₂) N-totaal (Kjeldahl) Pot. mineraliseerbaar N Fosfaatstatus Kalistatus
Open Bodemindex, OBI ¹	Microbiële activiteit	Fosfaatbeschikbaarheid Kaliumbeschikbaarheid Kationenbuffering Koperbeschikbaarheid Magnesiumbeschikbaarheid N-buffering voor oppervlaktewater Stikstoflevering Zinkbeschikbaarheid Zuurgraad Zwavellevering	Aggregaatstabiliteit Bodemstructuur Ondergrondverdichting Stuifgevoeligheid Verkruimelbaarheid Verslempingsgevoeligheid Waterbeschikbaarheid
BiodiversiteitsMonitor (akkerbouw, veehouderij)	(Nog) geen biologische indicatoren voor bodem	p.m.	Stikstof bodemoverschot, OS balans (bedrijfsniveau)
PPS 'PPS Beter Bodembeheer' (De Haan et al., 2021b)	Potentieel mineraliseerbare stikstof Aaltjes Bacteriebiomassa Schimmelbiomassa Ergosterol PLFA Bodemrespiratie potentieel Potentiële N-mineralisatie Regenwormen aantallen en diversiteit Ziektewering Pythium Ziektewering Rhizoctonia Organisch stof Organische stof Organische koolstof CINOS N-gehalte C/N-ratio HWC POXC I-index R-index Afbreekbare pool Stabiele pool Afbraaksnelheid Microrespiratie N-mineralisatie	Watervasthoudend vermogen Aggregaatstabiliteit Textuur Indringingsweerstand Bulkdichtheid Porositeit/poriënvolume Bodemtemperatuur Bodemvochtgehalte Visuele beoordeling	Zuurgraad N-totaal Potentieel mineraliseerbare stikstof Pw P-CaCl ₂ P-Al K-voorraad K-CaCl ₂ CEC
EJP SIREN "minimum dataset"	Biologische indicatoren worden weinig en beperkt toegepast door EU lidstaten. "soil biodiversity indicators urgently needed"	Texture, Porosity, Bulk density, Erosion (model calculation), Electric conductivity "Water regulation indicators urgently needed"	C concentration, Total N, P, K, pH, heavy metal trace elements; "indicators for other contaminants, esp. organic, urgently needed"
EJP MINOTAUR	Indicatoren in ontwikkeling voor: (1) structurele en functionele bodembiodiversiteit, (2) grote kwetsbaarheid voor klimaatsverandering, en (3) biologische indicatoren voor effectiviteit van klimaat mitigatiemaatregelen	n.v.t.	n.v.t.
EJP SERENA	In ontwikkeling: biologische indicatoren voor bodemkwaliteit i.r.t. ecosysteemdiensten	In ontwikkeling: fysische indicatoren bodemkwaliteit i.r.t. ecosysteemdiensten	In ontwikkeling: chemische indicatoren bodemkwaliteit i.r.t. ecosysteemdiensten

¹ Naast biologische, chemische en fysische indicatoren kent OBI nog de volgende factsheets: bodembeheer, bodemconditiescore, bodemweerbaarheid, droogte- en natschade, evaluatie bedrijven, maatregelen, OBI-inputgegevens, OBI-integratie, OBI-score (<https://openbodemindex.nl/documentatie/>).

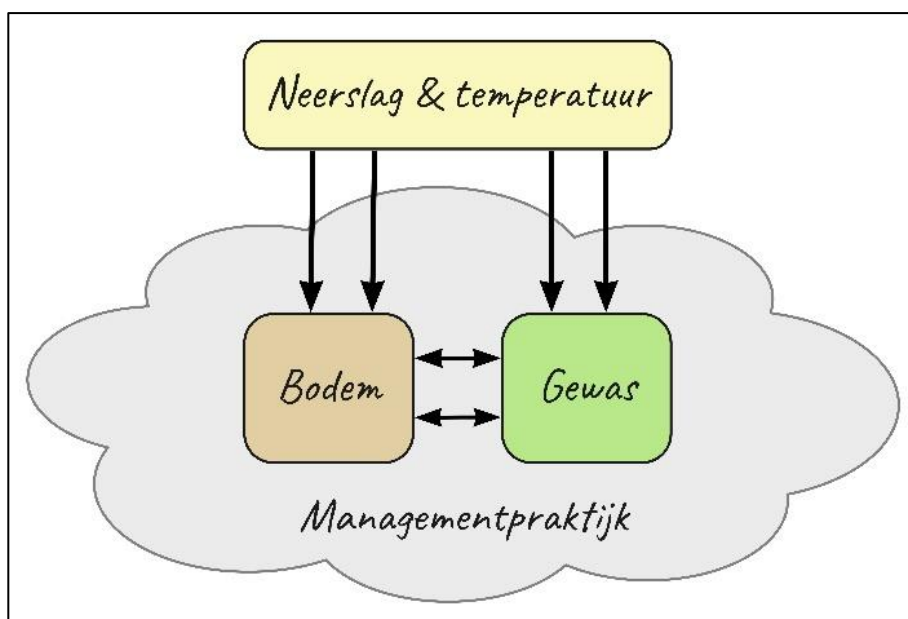
² Doorlatendheid bij verzadiging is geen BLN-indicator, maar is wel genoemd in de voorloper van BLN: rapport Van den Elsen et al. (2019; en referenties daarin).

2 Aanleiding, doel en aanpak

2.1 Aanleiding

Door het KNMI is vastgesteld dat Nederland steeds vaker te maken heeft met extremer weer (<https://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/achtergrond/waarnemingen-klimaatveranderingen>). Piekbuien komen steeds frequenter en in heviger mate voor, afgewisseld met langere perioden van droogte. Ook de gemiddelde en de maximumtemperatuur zijn toegenomen: winters worden zachter en zomers heter.

Op een landbouwperceel zijn water/weer, bodem en gewas sterk met elkaar verbonden (zie Figuur 2.1). Veranderingen op een van deze aspecten, bijvoorbeeld door verkeerd beheer of door klimaatverandering, hebben effect op de andere twee. We krijgen steeds meer inzichtelijk hoe de drie aspecten elkaar beïnvloeden en welke beheermaatregelen hier positief dan wel negatief aan kunnen bijdragen, maar er is ook nog veel onduidelijk. Dit project heeft tot doel om een aantal kennishiaten op dit vlak in te vullen, waardoor we (agrariër en overheid) de juiste maatregelen kunnen treffen om stappen te zetten in een weerbaar, duurzaam en gezond landbouwproductiesysteem. De focus in dit project ligt op de functionele kwaliteit van landbouwgronden. Dit betekent dat de condities van de bodem (i.e. de bodemgezondheid) voldoende moeten zijn voor het ondersteunen van de landbouwproductie met behoud van de veerkracht (i.e. er is geen sprake van uitputting).



Figuur 2.1 Schematische weergave van interactie bodem, gewas en weersextremen en de rol van management.

Relatie Water/weer en Gewas

Weersextremen hebben een direct effect op de agrarische sector: een verminderde oogst of belemmeringen in de werkzaamheden (grondbewerking/oogst). Er wordt inmiddels veel onderzoek gedaan naar deze problematiek en naar mogelijke maatregelen om de kwetsbaarheid voor klimaatverandering in de agrarische sector te verminderen en veerkracht en herstelvermogen te vergroten, zoals:

- Programma Lumbricus (<https://www.programmalumbricus.nl/>)
- KLIMAP (<https://www.klimap.nl/>)
- Aquaconnect (<https://www.aquaconnect.nu/>)
- Droogteonderzoek zandgronden (<https://droogteportaal.nl/droogteportaal/web/>)

-
- Waterwijzer Landbouw (<https://www.stowa.nl/publicaties/waterwijzer-landbouw-instrumentarium-voor-kwantificeren-van-effecten-van-waterbeheer-en>)
 - Waterwijzer Natuur (<https://www.stowa.nl/publicaties/de-waterwijzer-natuur-instrumentarium-voor-kwantificeren-van-effecten-van-waterbeheer>)

Relatie Bodem en Gewas

Ook wordt het belang van een goede bodem voor een gezonde, duurzame landbouw steeds meer ingezien. In een gezondere bodem zijn meer voedingsstoffen beschikbaar, kunnen wortelstelsels zich beter ontwikkelen en is mogelijk zelfs het waterbergend vermogen groter. Er is onderzoek gedaan naar het directe effect van bodemkwaliteit op landbouw en gewasproductie (<https://edepot.wur.nl/536510>). Grenswaarden voor bodemindicatoren in relatie tot producerend vermogen zijn tot nu toe nog maar beperkt in beeld. Recent is veel aandacht uitgegaan naar koolstofvastlegging en organische stof-opbouw (Van Tol-Leenders et al. (2019)). In het verleden is ook onderzoek uitgevoerd naar de bodemkwaliteit in termen van waterregulatie en de betekenis voor gewasproductie. De resultaten ervan zijn inmiddels minder toepasselijk voor de huidige situatie (Ten Cate et al., 1995).

Relatie Water/weer en Bodem

Het is nog niet duidelijk hoe en in hoeverre weersextremen, piekbuien en lange perioden van droogte of hitte de bodemkwaliteit beïnvloeden en wat vervolgens de impact is op het producerend vermogen, de grondwaterkwaliteit en de bodembiodiversiteit. Hoe reageren de indicatoren op deze afwisseling van extremen? En hoe werkt dit door op de functies van de bodem? Pas als we deze kennis op zak hebben, kunnen we onderzoeken welke (beheer- en beleids)maatregelen getroffen zouden kunnen worden om de negatieve gevolgen van klimaatverandering te kunnen beperken. Op deze manier kunnen overheid en landbouwsector gezamenlijk stappen zetten richting een weerbaarder, gezonder en klimaatrobuust landbouwproductiesysteem.

Rol van managementkeuzes

Belangrijk aandachtspunt in het onderzoek naar de relaties tussen weersextremen, bodemkwaliteit en gewasproductie is de rol van het management op agrarische bedrijven. Boeren passen hun management aan de actuele of te verwachten omstandigheden aan. We onderscheiden hierin het reactieve management (tijdelijke aanpassingen als reactie op veranderende omstandigheden) en het preventieve management (structurele aanpassing van het management aan veranderende omstandigheden, zoals aanpassing van gewaskeuzes of andere grondbewerking). Om de mechanismen in de relaties tussen weersextremen en bodemgezondheid goed te kunnen toetsen, is het dan ook essentieel om inzicht te hebben in de managementpraktijk (en eventuele trends) van agrarische bedrijven. In hoeverre is de relatie tussen managementpraktijk en bodemgezondheid te evalueren met indicatoren en welke zijn hiertoe het geschiktst in het licht van relevantste weersextremen?

Met dit onderzoek is een eerste stap gezet richting het vullen van de kennishiaten. We verwijzen hiervoor alvast naar hoofdstuk 6, waarin we een aantal aanbevelingen doen voor vervolgonderzoek.

2.2 Doelstellingen

In overleg met het Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, zijn voor het project de volgende doelstellingen vastgesteld:

- Het verkrijgen van inzicht in de achterliggende mechanismen in de relaties tussen weersextremen en de functionele bodemkwaliteit voor klei- en zandgronden. Vanwege beperkte middelen (tijd en geld) zijn de veen- en lössgronden buiten beschouwing gelaten in deze studie.
- Het benoemen van de geschiktste bodemindicatoren, uitgewerkt naar specifieke teeltsituaties en bodemsoorten, voor het kwantificeren van de kwetsbaarheid van de bodem voor weersextremen en de invloed ervan op de gewasproductie. In dit onderzoek onderscheiden we chemische, fysische en biologische bodemindicatoren, waarbij we ons beperken tot de lijst aan indicatoren die zijn genoemd in de BLN (zie Tabel 1.1). Dit is (vooralsnog) een beperkt palet aan indicatoren die niet zijn geselecteerd op klimaatgevoeligheid, maar op kostprijs, standaardisatie en aanwezige achtergrondinformatie; aanvulling

vanuit EJP SOIL (waar specifiek aan klimaatgevoelige biologische indicatoren zal worden gewerkt) is daarom wenselijk.

- Het verkrijgen van inzicht in de mate³ waarin geselecteerde bodemindicatoren worden beïnvloed door weersextremen en bij welke frequentie van optreden van de weersextremen dit impact heeft op de bodemgezondheid en de gewasproductie.
- Het inzichtelijk maken en verkleinen van kennisleemten over de relatie tussen weersextremen en bodemgezondheid, met name de interactie tussen de individuele bodemindicatoren en het herstelvermogen van de indicatoren na een extreme gebeurtenis.
- Het verkrijgen van inzicht in de reactieve beheermaatregelen die in de praktijk worden toegepast vóór, tijdens of na weersextremen op agrarische bedrijven in klei- en zandgebieden en in de mate van invloed van deze maatregelen op voornoemde bodemindicatoren.
- In kaart brengen van de in de praktijk toegepaste preventieve beheermaatregelen op agrarische bedrijven in klei- en zandgebieden en de mate van invloed van deze maatregelen op de kwetsbaarheid van de bodem voor weersextremen. Hiermee vergroten we het inzicht in mogelijke kansrijke maatregelen voor nu in en de toekomst, waardoor de negatieve effecten van weersextremen op bodemgezondheid worden beperkt.
- Het definiëren van nieuwe kennisvragen en voorstellen voor vervolgonderzoek, nodig voor het vullen van openstaande kennishiaten en dat ons verder helpt in het bieden van handelingsperspectief aan agrarische ondernemers bij het treffen van beheermaatregelen voor het realiseren van een weerbaar, duurzaam en gezond landbouwproductiesysteem. Dit vervolgonderzoek zou kunnen zijn: het uitvoeren van veldexperimenten (gerelateerd aan de toetsing van impact van kansrijke maatregelen, zoals gewaskeuze of beheermaatregelen), het uitvoeren van modelstudies of een verdiepende literatuurstudie.

2.3 Kanttekeningen vooraf

In dit onderzoek sluiten wij ons bij het selecteren van indicatoren voor bodemkwaliteit aan bij bestaande ontwikkelingen richting een structurele landelijke monitoring van de toestand van landbouwgronden: de BLN. De indicatoren die vooralsnog in dat project werden ontwikkeld, hebben we hier nader in beschouwing genomen met betrekking tot hun gevoeligheid, responsiviteit en herstelvermogen voor extreme weersomstandigheden (i.e. kwetsbaarheid). Het is goed om vooraf enkele kanttekeningen te plaatsen bij de komende analyse van bodemindicatoren voor weersextremen.

In de eerste plaats werden de BLN-indicatoren niet geselecteerd om hun gevoeligheid of juist ongevoeligheid voor weersomstandigheden. De argumenten voor selectie werden gebaseerd op 'wetenschappelijke robuustheid', interpreteerbaarheid, kostprijs van een meting en draagvlak bij stakeholders (Hanegraaf et al., 2019; De Haan et al., 2021a). Daarnaast doen we – overigens zonder gericht vergelijkend onderzoek te hebben gepleegd – een suggestie voor een indicator waarmee naar onze verwachting goed de kwetsbaarheid van een bodem voor veranderend klimaat en extreme weersomstandigheden kan worden vastgesteld en deze is in de analyse meegenomen naast de BLN-indicatoren.

In de tweede plaats is een monitoringsprogramma bedoeld om ontwikkelingen in de tijd (trends) te volgen, en is een analyse van metingen dus gebaat bij het verrichten van waarnemingen onder steeds dezelfde omstandigheden. Men wil hierbij weersextremen *an sich* buiten beschouwing houden; de cumulatieve invloed van structureel toenemende klimaatverandering dient zichtbaar gemaakt te worden, maar niet de toestand van de dag van bemonstering. Er bestaan bemonsteringsprotocollen voor elk van de BLN-indicatoren (ISO, NEN of laboratorium-specifiek), waarin aanbevelingen of richtlijnen zijn opgenomen voor monsternamen in het veld onder gecontroleerde omstandigheden ten opzichte van weer en seizoen. Hiermee wordt juist voorkomen dat variabiliteit in heersende omstandigheden in vocht en temperatuur de metingen beïnvloeden en 'ruis' veroorzaken. De beschikbare data die wij in onze literatuurstudie hebben gebruikt, zeggen dan ook slechts beperkt iets over de effecten van weersextremen op de specifieke bodemindicatoren en op de bodemgezondheid als geheel.

³ Vooralsnog is de mate van impact kwalitatief vastgesteld, aangezien geschikte meetwaarden ontbreken.

Ten derde een opmerking over onze werkwijze. De analyse van bodemindicatoren m.b.t. gevoeligheid en herstelbaarheid van effecten door weersextremen is uitgevoerd door experts op gebied van bodemfysica, bodemchemie en bodembioïologie, elk met focus op de indicatoren die onder hun respectievelijke vakgebied worden gerubriceerd. Deze 'schoenmaker-blijf-bij-je-leest'-aanpak heeft als blinde vlek dat de processen in de bodem niet puur fysisch, chemisch of biologisch zijn, maar vaker juist biofysisch, biochemisch, fysisch-chemisch, of zelfs bio-fysisch-chemisch. Een 'fysische' indicator zoals aggregaatstabiliteit is in werkelijkheid een afspiegeling van *allerlei* biofysische, biochemische en fysisch-chemische processen en is dus een soort multidisciplinaire cumulatieve parameter. Evenzo is opbouw en afbraak van organische stof, en ook de chemische samenstelling en fysieke compartimentering in bodemstructuren, een afspiegeling van vele bio-fysisch-chemische eigenschappen van een bodem. Sterker nog: bodemkwaliteit als geheel is een resultante van interacties tussen fysische, chemische en biologische structuren en processen en elke indicator geeft uiteindelijk een uitvergroting van één aspect in het grote complex van interacties van het bodemecosysteem (zie ook Box 1).⁴ In paragraaf 4.7 komen we terug op deze interacties.

Box 1. De bodem als onderdeel van een groter systeem

Weersextremen zijn van directe invloed op de groei en vruchtzetting van het gewas (Lesk et al., 2022; Van Oort et al., 2022): het is groeizaam weer als het warm is en er voldoende vocht aanwezig is. De bodem moet onder die omstandigheden voldoende water, zuurstof en nutriënten kunnen leveren om optimale plantengroei mogelijk te maken. Weersextremen beïnvloeden eveneens de gezondheid van de bodem en zo wordt de gewasproductie ook op indirecte wijze door het weer beïnvloed. Planten op hun beurt beïnvloeden de bodem via levering van organisch materiaal en interactie met het bodemleven, dat op zijn beurt weer de bodemprocessen reguleert en tal van andere bodemfuncties mogelijk maakt. Zo staat alles met elkaar in verband en zijn er schijnbaar ontelbare interacties en terugkoppelingen die een gezonde bodem definiëren: *the physical, chemical and biological condition of the soil determining its capacity to function as a vital living system and to provide ecosystem services* (Veerman et al., 2020; EC 2023a). Het ecologische begrip van hoe bodems functioneren en de functiegerichte wijze van definiëren in het vernieuwde Europese bodembeleid maken het wenselijk om de bodem ook als onderdeel van een groter systeem te benaderen, zowel in systeemgericht beleid voor de leefomgeving als in de praktijk van het beheer van bodem, water, lucht en landschap.

Ten vierde: de analyse van effecten van weersextremen hebben we op een basaal en algemeen niveau uitgevoerd. Precieze effecten, en ook het herstel daarvan, hangen sterk samen met een lokale context van grondsoort en landgebruik en de bodemkwaliteit die daardoor wordt bepaald. We hebben geen vergaande uitsplitsing gemaakt naar type bodem of agrarisch bedrijf. Om effecten van weersextremen nader te specificeren voor verschillende bedrijfstakken of fysisch-geografische regio's in het land, zou een specifieke analyse binnen context nodig zijn, omdat bodemkwaliteit sterk afhankelijk is van landgebruik en intensiteit van bodembewerking en andere bedrijfsmaatregelen.

Tot slot: In onze studie richten we ons op de gemiddelde agrariër met conventionele bedrijfsvoering. De aanpassingen die zij doen, zijn vooral 'klimaatmitigerend', d.w.z. dat ze de schade beperken en tenietdoen met maatregelen die mogelijk zijn zonder direct het hele bedrijfssysteem om te gooien. Dergelijke maatregelen kunnen achteraf ('reactief') of vooraf ('preventief') worden genomen en kunnen verschillen naargelang landgebruik en grondsoort. Om een goed overzicht te krijgen van deze reactieve en preventieve beheermaatregelen en om een eerste beeld te krijgen van de mate waarin ze bijdragen aan een goede functionele bodemkwaliteit, hebben we – binnen het netwerk van WUR bekende – met agrariërs uit de melkveehouderij en de akkerbouw interviews gehouden. Deze werkwijze leidt tot een resultaat dat dicht bij de dagelijkse praktijk ('de gemiddelde agrariër') staat. Het nadeel is echter dat ervaringen uit de praktijk niet altijd stroken met resultaten uit wetenschappelijk (veld)onderzoek.

⁴ "Ecosystems are not more complex than we think, but more complex than we *can* think." – Frank Egler (1977).

2.4 Aanpak en leeswijzer

De rapportage is als volgt opgebouwd:

- Het in beeld brengen van de overkoepelende problematiek/thematiek en plaatsing van dit onderzoek hierin, met daarbij een toelichting op gemaakte keuzes (hoofdstuk 1).
- Het definiëren van de relevante weersextremen die van invloed zijn op de functionele fysische, chemische en biologische bodemkwaliteit door het analyseren van de historische neerslag- en temperatuurdata van de diverse relevante KNMI-maatstations en het vertalen van de data naar de kans van voorkomen (herhalingstijden) voor piekbuien, droogteperioden, hittegolven en perioden van vorst. Uit deze analyse rollen de extreme gebeurtenissen (periodes) voor de betreffende locaties die relevant zijn voor verdere analyses (hoofdstuk 3).
- Het benoemen van relevante bodemindicatoren die gevoelig zijn voor weersextremen en die iets zeggen over de veerkracht van de bodem en het opstellen van hypothesen over de invloed van weersextremen op de betreffende bodemindicatoren (mate van impact en hersteltijd). De hypothesen worden opgesteld aan de hand van beschikbare wetenschappelijke literatuur (hoofdstuk 4).
- Het in beeld brengen van veel gebruikte beheermaatregelen als gevolg van weersextremen en ontwikkeling ervan in de tijd. Hierbij is onderscheid gemaakt in reactieve en preventieve beheermaatregelen. Tevens is een inschatting gemaakt van het effect van het toepassen van deze beheermaatregelen op de kwetsbaarheid van de bodem voor weersextremen (hoofdstuk 5).
- We sluiten het rapport af met de belangrijkste conclusies en met aanbevelingen voor validerend onderzoek (hoofdstuk 6).

3 Weersextremen en trends als gevolg van klimaatverandering

3.1 Keuze van extreme gebeurtenissen en herhalingstijden

De in deze studie onder de loep genomen extreme weersgebeurtenissen zijn geselecteerd aan de hand van het te verwachten effect op de functionele fysische, chemische en/of biologische aspecten van bodemkwaliteit. Deze selectie vond plaats in een werksessie met meerdere experts op het gebied van bodemkwaliteit, water en klimaat. Situaties van te veel of te weinig vocht in de bodem én extreem hoge temperaturen werden genoemd als extremen die een grote impact kunnen hebben op de bodem. Voor met name het bodemleven is ook de aan- of afwezigheid van vorst een belangrijke gebeurtenis. In Tabel 3.1 is in de eerste kolom een opsomming gegeven van de weersextremen die we in de werksessie hebben gedefinieerd en die we in de studie naar de gevoeligheid van bodemindicatoren op weersextremen zullen meenemen. Het gaat om:

- korte piekbuien gedurende het groeiseizoen (met plasvorming op percelen en inundaties vanuit oppervlaktewater als gevolg);
- lange piekbuien gedurende het groeiseizoen (met hoge grondwaterstanden, langdurige plasvorming op percelen als gevolg);
- korte (heftige) hittegolf;
- lange (minder heftige) hittegolf;
- langdurige droogte gedurende het groeiseizoen;
- aan-/afwezigheid van een vorstperiode;
- kwakkelwinter (meerdere perioden van vorst, afgewisseld met perioden van dooi);
- droogte bij de start van het groeiseizoen.

Naast het type weersextreem hebben we ons ook gebogen over de frequentie waarin de betreffende gebeurtenis voorkomt. Een extreem is dusdanig zeldzaam, dat deze niet jaarlijks voorkomt, maar moet ook niet té zeldzaam zijn. We hebben ervoor gekozen om voor de meeste extremen een bandbreedte te gebruiken. Dit maakt het namelijk mogelijk om de impact van hersteltijd van een bodemindicator in beeld te brengen. Stel dat een bodemindicator beperkt gevoelig is voor een weersextreem dat eens per vijf jaar voorkomt, maar waarvoor de hersteltijd langer is dan tien jaar, dan zal gemiddeld vanwege onvoldoende hersteltijd de bodemkwaliteit mettertijd achteruitgaan. Andere indicatoren zullen wellicht pas bij zeer extreme gebeurtenissen gevoelig zijn en niet of nauwelijks veranderen bij vaker voorkomende situaties. In deze studie hebben we gekozen voor de volgende herhalingstijden van voornoemde weersextremen:

- eens in de vijf jaar;
- eens in de dertig jaar;
- anders:
 - bij de hittegolf is tevens de definitie van het KNMI toegepast;
 - bij de kwakkelwinter is een eigen invulling gegeven aan de definitie (aan de hand van beschikbare meteorologische data): tussen twee perioden van vorst (i.e. ten minste twee dagen een maximumtemperatuur van 0 graden Celsius) zitten ten minste drie dagen waarin de minimumtemperatuur hoger is dan -4 graden Celsius.

3.2 Kwantificering van trends

3.2.1 Gebruikte bronnen

Om de frequenties van de historische en toekomstige weersextremen te bepalen, is gebruikgemaakt van historische tijdreeksen van het KNMI (2014) van weerstation De Bilt. Deze historische tijdreeksen bevatten o.a. de neerslaghoeveelheid per dag, de temperatuur (gemiddeld, maximum en minimum) en de referentiegewasverdamping. Naast de historische tijdreeksen bevat deze dataset ook de KNMI'14-scenario's, die een beeld geven van de toekomstige weersomstandigheden in Nederland. Deze scenario's zijn tot stand gekomen door de historische tijdsreeksen te transformeren naar toekomstige tijdreeksen door middel van het KNMI'14 Klimaatscenario's – Transformatieprogramma. Recentelijk heeft KNMI nieuwe klimaatscenario's gepubliceerd (KNMI, 2023). Deze informatie was tijdens uitvoering van dit onderzoek nog niet voorhanden.









De klimaatscenario's beschreven door Klein Tank e.a. (2014) worden gevormd door twee factoren: de verwachte temperatuurstijging en een mogelijke verandering in luchtstromingspatronen. Voor het klimaat rond 2050 (2036-2065) wordt uitgegaan van een gematigd (G) (+1 °C) en warm (W) (+2 °C) scenario en rond 2085 wordt uitgegaan van een verhoogd gematigd (G) (+2 °C) en warm (W) (+3,5 °C) scenario. Vervolgens kunnen deze waarden worden gecombineerd met een lage (L) of hoge (H) verandering in luchtstromingspatronen. Dit resulteert in een viertal combinaties voor 2050 en 2085:

- G_L: +1 °C (2050) en +2 °C (2085) temperatuurstijging en een lage invloed van verandering in luchtstromingspatronen
- G_H: +1 °C (2050) en +2 °C (2085) temperatuurstijging en een hoge invloed van verandering in luchtstromingspatronen
- W_L: +2 °C (2050) en +3,5 °C (2085) temperatuurstijging en een lage invloed van verandering in luchtstromingspatronen
- W_H: +2 °C (2050) en +3,5 °C (2085) temperatuurstijging en een hoge invloed van verandering in luchtstromingspatronen

Volgens Klein et al. (2014) is de stijging van temperatuur in de scenario's door het jaar heen niet gelijkmatig, maar verschilt deze per seizoen, zo neemt de temperatuur in de winter het sterkst toe en in de lente is deze stijging het geringst. 'Er wordt daarnaast verwacht dat de onderlinge temperatuurverschillen in de winter afnemen en in de zomer toenemen, waardoor koudere winters minder koud worden en warmere zomers warmer. Op het gebied van neerslag gaan de klimaatscenario's uit van een stijging van de hoeveelheid neerslag en de verwachting is dat de neerslag-extremen extremer worden. De hoeveelheid neerslag op jaarbasis mag weliswaar toenemen, maar zorgt onder de H-scenario's tot grote verschillen tussen de seizoenen. Door frequentere westenwind in de winter zal de neerslag sterk toenemen, maar in de zomer zal de neerslag sterk afnemen doordat wind vaker uit het oosten komt.

3.2.2 Weersextremen voor huidige klimaat

Tabel 3.1 Overzicht van de in dit onderzoek gehanteerde definities en kwantificering van de specifieke gebeurtenissen voor het huidige klimaat.

Situatie weersextrem	Ondergrens huidig klimaat (herhaaltijd de Bilt 1:5 ²⁾)	Bovengrens huidig klimaat (herhaaltijd de Bilt 1:30 ²⁾)	Anders
Korte piekbui groeiseizoen ¹⁾ 	30.7 mm/2uur	49 mm/2uur	
Lange piekbui groeiseizoen ¹⁾ 	54.2 mm/24 uur	79 mm/24 uur	
Korte hittegolf 	2 dg. achtereen Tmax>=31,9C	2 dg. achtereen Tmax>=33,6C	Definitie KNMI: minstens 5 zomerse dagen (Tmax>25C), waarvan er zeker 3 (Tmax>30C) tropisch zijn
Lange hittegolf 	10dg. achtereen Tmax>=24,9C	10dg. achtereen Tmax>=26,9C	
Droogte in groeiseizoen ¹⁾ 	neerslagtekort van >= 203,4 mm	neerslagtekort van >= 243,6 mm	
Aanwezigheid vorstperiode 	7 dagen achtereen met Tmax<=0C	12 dagen achtereen met Tmax<=0C	
Meerdere periodes van vorst in de winter (kwakkelwinter) 			>= 2 dagen Tmax < 0 en daartussen een periode van >= 3 dagen Tmin > -4
Droogte start groeiseizoen 	Neerslagsom 1 feb-31 mrt <=80,5 mm	Neerslagsom 1 feb-31 mrt <= 44,1 mm	

1. In dit onderzoek wordt het groeiseizoen gedefinieerd als de periode tussen 1 april en 1 oktober.

2. Een gebeurtenis met een herhalingsstijd van 1:5 wil zeggen dat de gebeurtenis eens in de 5 jaar voorkomt. Een gebeurtenis met een herhalingsstijd van 1:30 komt eens in de 30 jaar voor.

3.2.3 Trends ten gevolge van klimaatverandering









De resultaten van de kwantitatieve analyse zijn getoond in Tabel 3.2. Hieruit komt naar voren dat als gevolg van klimaatverandering de herhalingsstijden van de volgende weersextremen het meest gaan veranderen (de mate van verandering is afhankelijk van het KNMI-scenario en van de herhalingsstijd):

- *Korte hittegolf*: deze gebeurtenis zal 3 tot 30 keer vaker voorkomen in 2050 dan nu;
- *Lange hittegolf*: deze gebeurtenis zal 2 tot 7 keer vaker voorkomen in 2050 dan nu;
- *Aanwezigheid vorstperiode*: het aantal vorstperiodes neemt in 2050 met een factor 2 tot >6 af;
- *Kwakkelwinter*: de kans op voorkomen van een zogenaamde kwakkelwinter (meerdere periodes van vorst in de winter) zal in 2050 met een factor 6 of meer zijn afgenomen.

Ook de mate waarin we in 2050 te maken krijgen met het weersextreem *Droogte in het groeiseizoen* zal als gevolg van klimaatverandering toenemen. Dit is echter sterk afhankelijk van het KNMI-scenario: in het GL- en WL-scenario blijft de toename beperkt tot een factor 1 à 2, terwijl in het GH- en WH-scenario de kans op voorkomen van het weersextreem *Droogte in het groeiseizoen* met een factor 2 tot 9 toeneemt.

Uit de KNMI-scenario's van 2014 blijkt dat de herhalingstijden van de weersextremen *Korte piekbui groeiseizoen* en *Lange piekbui groeiseizoen* niet of nauwelijks veranderen als gevolg van klimaatverandering. De kans op een laag vochtgehalte in de periode februari-maart neemt zelfs naar verwachting in geringe mate af. Dit betekent dat de hoeveelheid neerslag naar verwachting in de toekomst gaat stijgen in deze periode. De nieuwste klimaatscenario's (KNMI, 2023) laten wél een toename in korte piekbuien zien (2-16%, afhankelijk van het scenario) (KNMI, 2023).

Tabel 3.2 Verandering van de herhalingstijd weersextremen als gevolg van klimaatverandering.

Situatie weersextreem	Herhalingstijd (T) huidig klimaat	Gewijzigde herhalingstijd in toekomst (2050) bij veranderend klimaat ¹⁾			
		GL	GH	WL	WH
Korte piekbui groeiseizoen ¹⁾ 	1:5	1:5	1:5	1:5	1:5
	1:30	1:30	1:30	1:30	1:30
Lange piekbui groeiseizoen ¹⁾ 	1:5	1:4	1:4	1:4	1:4
	1:30	1:25	1:25	1:19	1:21
Korte hittegolf 	1:5	1:1,2	1,1 x per jaar	1,3 x per jaar	1,7 x per jaar
	1:30	1:6	1:3,8	1:2,1	1:1
Lange hittegolf 	1:5	1:2,1	1:1,6	1:1,3	1:1
	1:30	1:10	1:6	1:6	1:4,3
Droogte in groeiseizoen ¹⁾ 	1:5	1:4,3	1:3,3	1:6	1:2,7
	1:30	1:15	1:7,5	1:30	1:3,3
Aanwezigheid vorstperiode 	1:5	1:10	1:15	1:15	1:30
	1:15	1:30	Niet	Niet	Niet
Meerdere periodes van vorst in de winter (kwakkelwinter) 	1:5	1:30	1:30	Niet	Niet
Droogte start groeiseizoen 	1:5	1:7,5	1:7,5	1:7,5	1:7,5
	1:30	1:30	1:30	Niet	Niet

1. De kleur van de cel geeft de mate van verandering weer: voor de groene cellen geldt een wijziging in herhalingstijd van minder dan 2x de referentiewaarde. Voor de cellen met een gele kleur wijzigt de herhalingstijd met een factor 2-5 ten opzichte van de referentiewaarde. Als de herhalingstijd wijzigt met een factor 5 of meer, dan is de cel rood gekleurd.

4 Kwetsbaarheid van de bodem voor weersextremen

4.1 Het begrip kwetsbaarheid nader gedefinieerd

In omgangstaal gebruiken we eerder en vaker het woord 'gevoeligheid' dan de term 'kwetsbaarheid', maar deze begrippen zijn niet uitwisselbaar en in onze analyse bedoelen we verder te gaan dan het aspect gevoeligheid. Voor een goed begrip van wat de analyse van indicatoren voor bodemkwaliteit in relatie tot weersextremen in dit hoofdstuk behelst, volgt eerst een nadere begripsbepaling.

Kwetsbaarheid omvat zowel de mate van **gevoeligheid** (i.e. de laagdrempeligheid voor het ondervinden van een effect of de mate van weerstand tegen de oorzaak van het effect, 'weerbaarheid') als het **herstelvermogen** op een ondervonden effect (i.e. de snelheid en mate van herstel, ofwel de 'veerkracht'). Bij biologische bodemindicatoren kan de mate van kwetsbaarheid daarnaast ook nog bepaald worden door mogelijke aanpassingen in gedrag of fysiologie die blootstelling aan de stressfactor kunnen verminderen (*avoidance*-mechanismen) alsook het fenomeen dat op populatieniveau herstel kan optreden door immigratie van individuen van elders (Figuur 4.1) (De Lange et al., 2007; 2009). Herstel als zodanig is bij biologische indicatoren daarom op meer niveaus denkbaar dan in geval van fysische en chemische indicatoren, waarbij we genetische adaptatie aan een stressor op langere tijdschaal hier nog niet eens in beschouwing nemen. Een levende bodem heeft daarom aanmerkelijk meer incassingsvermogen dan een levenloze bodem en voor het evalueren van de klimaatrobuustheid van een bodem lijken biologische indicatoren dan ook onmisbaar.

Indicator bodemkwaliteit ecologisch aspect	Kwetsbaarheid Indicator			
	Vermijding v. blootstelling	Gevoeligheid (van individuen)	Herstel (populatie blootgestelde individuen)	Herstel (door immigratie van elders)
Fysisch	n.v.t.	Destructie, structuurvernietiging	Structuuropbouwende processen, evenwichtsreacties	n.v.t.
Chemisch	n.v.t.	Versnelde omzetting, uitspoeling, vervluchtiging	Evenwichtsreacties en – parameters, natuurlijke aan- en afvoer	n.v.t.
Biologisch	Vermijdingsgedrag, diapauze, resistente cocons, etc.	Individuele effectdrempel, adaptatie door selectie	Specifieke groeisnelheid, reproductie, beweeglijkheid	Afh. van landschap (groenblauwe dooradering) en mobiliteit van de soort

Figuur 4.1 Indicatoren voor kwetsbaarheid van de bodem, uitgesplitst naar verschillende ecologische aspecten.

Men kan ook spreken van kwetsbaarheid voor weersextremen in relatie tot de bodem als geheel. In termen van bodemkwaliteit zou dit de optelsom zijn (of beter: de integratie) van kwetsbaarheden van de afzonderlijke indicatoren, gegeven de lokale condities van grondsoort en klimaatzone. Een bodem is zo kwetsbaar of weerbaar als de som der delen dat is.

Ook het agrarische bedrijfssysteem als geheel kan worden beschouwd in termen van kwetsbaarheid. Hier gaat het niet meer over de bodemindicatoren, maar is 'het systeem' kwetsbaar als resultante van bodem, gewas, arbeid, gewasbescherming en andere kostenposten bij elkaar, die gezamenlijk het bedrijfsresultaat

van de boer aan de productiekant bepalen. De vraagkant (de 'markt') heeft ook zo z'n responsen op het veranderende klimaat en misschien zelfs hier en daar op extreme weersomstandigheden, maar daar gaan we in deze studie niet op in.

4.2 Selectie van bodemindicatoren

Hieronder wordt beargumenteerd welke bodemindicatoren geschikt zijn om de kwetsbaarheid van bodemkwaliteit voor weersextremen te analyseren.

4.2.1 Fysische bodemindicatoren

In Nederland zijn drie bronnen waarin fysische bodemindicatoren zijn benoemd:

- Noodzakelijke indicatoren voor de beoordeling van de gezondheid van Nederlandse landbouwbodems. Selectie van fysische, chemische en biologische indicatoren voor het meten van de bodemgezondheid (Van den Elsen et al., 2019);
- Evaluatie van de Bodemindicatoren voor Landbouwgronden in Nederland (BLN), versie 1.0 (De Haan et al., 2021);
- De open bodem index (OBI, 2021; <https://openbodemindex.nl/>).

In deze drie bronnen worden indicatoren (fysisch, chemisch, biologisch) benoemd voor bodemkwaliteit. Omdat deze niet onafhankelijk van elkaar zijn opgesteld, is er grote overlap. De benoemde fysische indicatoren zijn vermeld in Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Overzicht fysische indicatoren, benoemd in Van den Elsen et al. (2019), De Haan et al. (2021) en OBI (2021).

Fysische indicator	Van den Elsen et al. (2019)	BLN (De Haan et al. 2021a)	OBI (2021)
Aggregaatstabiliteit	x	x	x
Droge bulkdichtheid	x	x	
Indringingsweerstand	x	x	
Watervasthoudend vermogen	x	x	x
Doorlatendheid bij verzadiging	x		
Textuur	x		
Bodemstructuur (visueel)		x	
Bodemstructuur (CEC kationenbezetting)			x
Droogte- en natschade			x
Ondergrondverdichting (kans)			x
Stuifgevoeligheid			x
Verkruimelbaarheid			x
Versleppingsgevoeligheid/slempgevoeligheid			x

Wij leggen in dit onderzoek de focus op:

- Aggregaatstabiliteit (incl. grootteverdeling)
- Droge bulkdichtheid
- Indringingsweerstand
- Watervasthoudend vermogen
- Doorlatendheid bij verzadiging

In Van den Elsen et al. (2019) staat beschreven hoe deze indicatoren kunnen worden gemeten.

Textuur is een vaststaand gegeven voor een bodem, niet zozeer een indicator voor de gezondheid: de textuur van zand- en kleigronden reageert niet op landgebruik en beheer⁵ of op klimaat en weersgesteldheid. Eenmalig vaststellen van textuur kan daarom volstaan, tenzij natuurlijk kleimineralen worden opgebracht als 'bodemverbetering' (lees: bodemverandering). Textuur wordt vaak gebruikt als context om voor verschillende grondsoorten een eigen beoordeling te kunnen toekennen, net als landgebruik (en soms ook management). Textuur is bij uitzondering wel aan verandering onderhevig wanneer doelbewust beheermaatregelen teweeggebracht zijn, bijvoorbeeld het met klei verrijken van schrale zandgronden (zie bijv. Gollenbeek et al., 2022; Heinen et al., 2022), diepploegen of diepwoelen. Door oxidatie van veen zullen op termijn veengronden veranderen in moerige gronden en uiteindelijk in minerale gronden (Brouwer en Walvoort, 2019).

De volgende indicatoren, opgenomen in de Open Bodemindex, laten we buiten beschouwing, omdat het afgeleide indicatoren zijn:

- Ondergrondverdichting: bij ondergrondverdichting gaat het om de kans op ondergrondverdichting. Deze indicator is dus minder te interpreteren als een meetbare indicator. Tevens is deze sterk gelinkt aan droge bulkdichtheid.
- Stuifgevoeligheid, verkrumelbaarheid en slempegevoeligheid: deze indicatoren zijn gelinkt aan aggregaatstabiliteit.
- Droogte- en natschade: deze indicator is sterk verbonden met de indicator watervasthoudend vermogen.

4.2.2 Chemische bodemindicatoren

In Nederland worden chemische bodemindicatoren gebruikt voor de bemestingsadviezen, zie o.a. www.bemestingsadvies.nl voor grasland en voedergrassen en www.handboekbodemenbemesting.nl voor akkerbouwgewassen en vollegrondsgroenten. Van nutriënten die van belang zijn voor de opbrengst en/of de kwaliteit van gewassen geven de bemestingsadviezen op basis van chemische bodemindicatoren aan hoeveel bemesting een gewas nodig heeft om een optimale opbrengst en/of kwaliteit te bereiken. Voor een aantal van deze nutriënten wordt ook aangeduid in hoeverre het wenselijk is dat de bodemvoorraad en daarmee de indicator hoger of lager wordt.

Bij de vraag hoe extreme weersomstandigheden chemische bodemindicatoren beïnvloeden, is het ook de vraag of veranderingen in deze indicatoren alleen een (tijdelijke) verandering van de indicator zelf laten zien of dat er daadwerkelijk iets (semi)permanent verandert aan de bodemgezondheid (i.e. de actuele bodemfuncties). In een bodem zijn nutriënten in verschillende pools in het bodemcomplex aanwezig met verschillende gevoeligheid voor veranderingen door weersomstandigheden: van opgelost in het bodemvocht tot sterk gebonden aan bodemdeeltjes en daartussenin of als onderdeel van organische stof. Bij de verdeling van de aanwezige nutriënten over pools spelen chemische evenwichten een rol: wanneer nutriënten worden onttrokken uit de pool 'opgelost in het bodemvocht', kan deze pool geheel of gedeeltelijk aangevuld worden met nutriënten uit andere pools. En andersom: als er nutriënten toegevoegd worden aan de bodemoplossing, kan daarvan een deel weer naar minder oplosbare pools gaan. Bij een nat-chemische analyse van bodemindicatoren worden vaak de nutriënten uit een deel van aanwezige pools geanalyseerd. Een bepaling wordt uitgevoerd met een extractiemiddel dat de te bepalen elementen/nutriënten/mineralen losmaakt uit pools of delen van pools in het bodemmonster, waarna de concentratie van het nutriënt in het extract gemeten wordt. De chemische bodemindicatoren, waarvan veel bekend is, zijn de indicatoren die gebruikt worden in de bemestingsadviezen. De adviezen worden gekalibreerd door de bepalingen in extracties te relateren aan gewasresultaten in veldproeven of via een (meer) theoretische benadering.

De verdeling van nutriënten over de pools, en daarmee een indicator, kan gevoelig zijn voor actuele omstandigheden in het veld, zoals vochttoestand en temperatuur, hoewel zeer gevoelige indicatoren bij screening meestal wel worden uitgesloten. Het is mogelijk dat juist extreme weersomstandigheden ook extreme bodemomstandigheden veroorzaken die niet voorgekomen zijn in (veld)proeven en daardoor anders uitpakken bij een extractie van het nutriënt in een grondmonster na een extremitet. Een vraag is dan of de indicator in deze omstandigheden alleen tijdelijk verandert of permanent, en of er ook een daadwerkelijke verandering in bodemkwaliteit te verwachten is.

⁵ Bij diepploegen of woelen kunnen bodemlagen omgekeerd of gemengd worden waardoor de teeltlaag een andere textuur kan krijgen.

De volgende situaties zouden voor kunnen komen:

- Indicator en bodemkwaliteit veranderen beide op dezelfde manier (bijvoorbeeld gaan beide omlaag door uitspoeling, vervluchting, fixatie van nutriënten).
- Indicator verandert en herstelt als omstandigheden weer 'normaal' zijn, bodemkwaliteit blijft gelijk.
- Indicator blijft gelijk (bijvoorbeeld door buffering), maar bodemkwaliteit verandert.

De laatste jaren zijn er ontwikkelingen om de bepaling van chemische indicatoren te vervangen door Near Infra Red (NIR), omdat dat sneller en goedkoper is. Hierbij worden uitkomsten van NIR-metingen in eerste instantie gekalibreerd met uitkomsten uit nat-chemische bepalingen. Dat betekent dat ijklijnen die gebruikt worden om NIR-metingen om te rekenen naar chemische bodemindicatoren meestal gekalibreerd zijn in trajecten zoals ze in de praktijk voorkomen. Mogelijk is de relatie tussen metingen bij extreme omstandigheden anders dan onder de gemiddelde omstandigheden van afgelopen decennia.

Binnen dit project is afgebakend dat er alleen naar de indicatoren gekeken wordt die in Evaluatie van de Bodemindicatoren voor Landbouwgronden in Nederland (BLN), versie 1.0 (de Haan et al., 2021a) genoemd worden. Dat zijn:

- zuurgraad pH
- stikstof totaal
- potentieel mineraliseerbare stikstof
- fosfaatvoorraad en -beschikbaarheid
- kali-voorraad en -beschikbaarheid
- Organische stof, organisch C en afbreekbaar C

De bijbehorende extractiemethodes die BLN aangeeft, zijn:

- pH-KCl en pH-CaCl₂: extractie met KCl of met calciumchloride, uitkomsten verschillen weinig van elkaar, omrekening is beschikbaar
- Stikstof totaal: beschreven door Hassink (1995) = DUMAS, of geaccrediteerde bepaling met NIRS
- Potentieel mineraliseerbare stikstof: anaerobe incubatie
- Fosfaatvoorraad en -beschikbaarheid: P-AL en P-CaCl₂: P geëxtraheerd met ammoniumlactaat en acetaat, en met calciumchloride
- Kalivoorraad en -beschikbaarheid: K-CEC en K-CaCl₂: uitwisselbaar K aan het bodemcomplex en K geëxtraheerd met calciumchloride
- Organische stof: gloeiverlies: oxidatie van organische stof bij 550°C
- Afbreekbaar C: Hot Water Carbon (HWC) : extractie met heet water

Een hindernis bij het nagaan van de gevoeligheid of kwetsbaarheid van de bovengenoemde extractiemethoden voor weersextremen is dat de indicatoren die in de diverse landen gebruikt worden voor bemestingsadviezen van elkaar verschillen. In literatuur waarin invloeden van extreme weersomstandigheden worden besproken, noemt men vaak een invloed op andere bodemindicatoren dan die gebruikt worden in Nederland en genoemd worden in de BLN. Er is echter vanuit een theoretische benadering te beredeneren dat sommige 'Nederlandse' indicatoren zouden moeten lijken op die in de literatuur, omdat ze bedoeld zijn om eenzelfde pool te beschrijven. De 'Nederlandse' indicatoren zijn overigens meestal wel beschreven in internationale literatuur.

Een andere hindernis is dat voor bemesting(sonderzoek) maximaal één à twee keer in het jaar bodemmonsters worden genomen. Die zijn dan moeilijk te relateren aan één type weersextremem.

4.2.3 Biologische bodemindicatoren

Terugverwijzend naar de inleiding met probleemstelling en afbakening van het onderzoek: een vraag naar de effecten van weersextremen op bodembiodiversiteit is een andere vraag dan wat de effecten zijn op bodemgezondheid en het functioneren van de bodem, en het onderzoeken van beide vragen zou twee totaal verschillende benaderingen vereisen. De vraag naar effecten op de verscheidenheid van het leven in de bodem, de soortendiversiteit en de structuur van de bodemlevensgemeenschap laten we liggen voor een andere keer, en we hebben ons gefocust op de tweede vraag. Deze keuze ondersteunt een benadering van de aard en omvang van effecten van weersextremen op het functioneren van de bodem, en daarmee worden risico's voor landbouwkundig gebruik potentieel in beeld gebracht. Zoals in hoofdstuk 1 uiteengezet, wordt

hiermee geen inzicht verkregen in effecten op bodemleven in termen van structurele biodiversiteit en natuurwaarden, maar in principe wel met betrekking tot functionele diversiteit – voor zover de toegepaste indicatoren betrekking hebben op specifieke bodemfuncties. Op deze manier wordt bodemgezondheid dus gezien met betrekking tot de functionele aspecten ervan, veel meer dan de structurele aspecten – althans wat betreft de biologische kant (de chemische en fysische kanten kennen deze tweedeling niet).

De tweede keus die we hebben gemaakt, is om bij het selecteren van (functionele) biologische indicatoren voor bodemgezondheid aan te sluiten bij bestaande ontwikkeling van de BLN. De indicatoren die vooralsnog in dat project werden ontwikkeld, hebben we hier nader in beschouwing genomen met betrekking tot hun gevoeligheid, responsiviteit en herstelvermogen voor extreme weersomstandigheden.

De hieronder volgende evaluatie van biologische indicatoren (par. 4.6) is uitgevoerd onder de aanname van een toename in incidentie van het betreffende weersextreem en is gefocust op structurele effecten op de betreffende indicator (i.e. op een termijn die van betekenis is voor het potentiële vermogen van de bodem om bij te dragen aan de diensten van het ecosysteem. Dat is wat anders dan een voorbijgaand effect op korte termijn van weken of maanden waar we in dit onderzoek minder in zijn geïnteresseerd. Bodemkwaliteit is iets van de langere termijn, zoals het groeiseizoen of zelfs meerdere jaren en decennia, eerder dan die van dagen, weken of maanden. De indicatoren in een monitoringsprogramma voor bodem moeten de langere termijn laten zien en liefst juist niet responsief zijn op die dagelijkse en extreme fluctuaties in weersomstandigheden. (*Voetnoot:* Voor zover indicatoren seizoensgebonden fluctuatie kennen, dienen de bemonsteringsprotocollen te voorzien in een gestandaardiseerd moment voor monstername in het jaar voor optimale resultaten.)

De geselecteerde biologische indicatoren uit de BLN:

- Micro-organismen: bacterie- en schimmel biomassa (PLFA) (BLN indicator 15),
- Aaltjes, taxonomische diversiteit en aantal exemplaren (BLN indicator 14),
- Regenwormen, aantallen en soorten (BLN indicator 16).

4.3 Weersextremen en effecten op bodemindicatoren in één samenvattend overzicht

In deze en volgende paragrafen beschouwen we de invloed van weersextremen op fysische, chemische en biologische bodemindicatoren. De weersextremen die hierbij worden beschouwd, zijn:

- Piekbui in groeiseizoen
- Hittegolf
- Langdurige droogte in groeiseizoen
- Af-/aanwezigheid vorst
- Kwakkelwinter
- Laag vochtgehalte bij start groeiseizoen

In navolgende tabel zijn alvast de belangrijkste resultaten uit paragraaf 4.4 (fysisch), 4.5 (chemisch) en 4.6 (biologisch) opgesomd, waarbij verwijzingen naar de verdiepende teksten zijn opgenomen. Dit maakt het gemakkelijker om naar behoefte in- en uit te zoomen op specifieke onderdelen.

Tabel 4.2 Overzicht van de te verwachten effecten van weersextremen op fysische, chemische en biologische bodemindicatoren.

Situatie weersextrem	Effect weersextremen op relevante bodemindicatoren		
Piekbui in groeiseizoen (1 april-1 oktober) 	<p>FYSISCH</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Aggregaatstabiliteit</i>: mean weight diameter (MWD) neemt tijdelijk af (par. 4.4.2.1) • <i>Droge bulkdichtheid</i>: in korstvorming- en slempgevoelige gronden neemt deze in eerste paar mm/cm toe (par. 4.4.2.2) • <i>Indringingsweerstand</i>: geen meetbaar effect (par. 4.4.2.3) • <i>Watervasthoudend vermogen</i>: van de wortelzone wordt niet of nauwelijks beïnvloed (par. 4.4.2.4) • <i>Doorlatendheid bij verzadiging</i>: aan maaiveld kan deze verlaagd worden indien de bulkdichtheid door een piekbui toeneemt; de bovenst paar mm/cm worden vaak niet bemonsterd, zodat de indicatorwaarde niet verandert (par. 4.4.2.5) • <i>Infiltratiesnelheid</i>: zal verlagen indien piekbui leidt tot toename bulkdichtheid aan maaiveld (par. 4.4.2.5) <p>CHEMISCH</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Kali-beschikbaarheid</i>: K-CaCl₂: door uitspoeling kan K permanent verdwijnen uit de bouwvoor (par. 4.5.2.5) <p>BIOLOGISCH</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Micro-organismen</i>: biomassareductie zowel schimmels als bacteriën, snel herstel (par. 4.6.2.1) • <i>Aaltjes</i>: soortspecifieke aantalsreducties (vooral van fungivore nematoden), snel herstel (par. 4.6.2.2) • <i>Regenwormen</i>: aantalsreductie, waarschijnlijk specifiek per ecologische groep (par. 4.6.2.3) 		
Hittegolf (jaarrond) 	<p>FYSISCH</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Aggregaatstabiliteit</i>: neemt af (par. 4.4.3.1) • <i>Droge bulkdichtheid en indringingsweerstand</i>: wordt niet beïnvloed (par. 4.4.3.2, resp. 4.4.3.3) • <i>Watervasthoudend vermogen</i>: wordt nauwelijks of niet beïnvloed bij hogere T (par. 4.4.3.4) • <i>Doorlatendheid bij verzadiging</i>: wordt tijdelijk verhoogd bij hogere T (par. 4.4.3.5) <p>CHEMISCH</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Stikstof totaal en pot. mineraliseerbare stikstof</i>: nemen af, zijn nauw verbonden aan het OS-gehalte (par. 4.5.3.3) • <i>Organische stof</i>: gloeiverlies, Organisch C, Afbreekbaar C: Hot Water Carbon (HWC): nemen af. OS wordt sneller afgebroken bij hogere temperaturen (par. 4.5.3.1) <p>BIOLOGISCH</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Micro-organismen</i>: effecten onduidelijk, maar verhouding schimmels:bacteriën kan toenemen, met potentiële gevolgen voor immobilisatie van nutriënten, aggregaatvorming en -stabilisatie en tal van andere bodemprocessen, afhankelijk van de aanwezige levensgemeenschap (par.4.6.3.1) • <i>Aaltjes</i>: aantalsreductie door sterfte en weggroepen dieper van de warmte; gedeeltelijk snel herstel (par. 4.6.3.2) • <i>Regenwormen</i>: Effecten zijn afhankelijk van het bodemvochtgehalte. Als de bodem onverminderd vochtig blijft, doen de wormen het beter en verlopen processen sneller. Bij een hittegolf die gepaard gaat met droogte, stoppen eetactiviteit, groei en reproductie. Bij aanhoudende droogte treedt sterfte op. Sommige soorten kunnen dieper weggroepen en overleven in diapause. Gevoeligheid voor pesticiden zoals glyphosaat neemt toe. Als regenwormen in aantal structureel afnemen, vermindert de totale bodembiodiversiteit en kunnen fytofage nematoden en herbivore macrofauna juist toenemen. Bodemgezondheid neemt daarmee af. Herstel van droge hittegolf kan een groeiseizoen duren (par. 4.6.3.3). 	Droog: 	Vochtig: 
Droogte in groeiseizoen (1 april – 1 oktober) 	<p>FYSISCH</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Aggregaatstabiliteit</i>: kan iets toenemen door droogte, tenzij door verhoogde temperaturen veel OS afbreekt (par. 4.4.4.1) • <i>Droge bulkdichtheid</i>: wordt niet beïnvloed (par. 4.4.4.2) • <i>Indringingsweerstand</i>: de indicator dient bij een vaste bodemvochtsituatie gemeten te worden en is dus onafhankelijk van de droogtesituatie in de bodem; de feitelijk indringingsweerstand neemt toe in een uitdrogende bodem (par. 4.4.4.3) • <i>Watervasthoudend vermogen</i>: (waterbeschikbaarheid) wordt nauwelijks of niet beïnvloed (par. 4.4.4.4) • <i>Doorlatendheid bij verzadiging en infiltratiesnelheid</i>: alleen indirect via invloed van droogte op bodemstructuur (par. 4.4.4.5) <p>CHEMISCH</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Organische stof</i>: gloeiverlies, Organisch C, Afbreekbaar C: Hot Water Carbon: nemen af, verhoogde flux van CO₂ (= afbraak OS) wanneer neerslag valt na droge periode (4.5.4.1) • <i>Stikstof totaal en pot. mineraliseerbare stikstof</i>: verhoging van vrijkomen van N wanneer neerslag valt na droge periode, nemen daardoor af (4.5.4.3) • <i>Fosfaatvoorraad en -beschikbaarheid</i>: fosfaatbeschikbaarheid neemt toe onder droge omstandigheden (4.5.4.4) • <i>Kalivoorraad en -beschikbaarheid</i>: K-beschikbaarheid neemt af onder droge omstandigheden, maar herstelt zodra neerslag valt (par. 4.5.4.5) <p>BIOLOGISCH</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Micro-organismen</i>: bacteriële biomassa en enzymactiviteit nemen af, schimmels zijn veel minder gevoelig (4.6.4.1) • <i>Aaltjes</i>: aantallen individuen en de diversiteit aan soorten nemen af; maturity index verandert nauwelijks, maar soortensamenstelling kan wel relatief veranderen en plantparasitaire aaltjes (<i>Helicotylenchus</i>) kunnen gaan domineren (par. 4.6.4.2) • <i>Regenwormen</i>: droogte leidt tot verminderde activiteit en lagere aantallen individuen en biomassa. Gevoeligheid voor bodemcontaminanten neemt toe. Herstel van vooral pendelaars is medeaafhankelijk van eventueel aanwezige 'onkruiden' (par. 4.6.4.3). 	Zandgrond: 	Kleigrond: 
Af-/aanwezigheid vorst (jaarrond) 	<p>FYSISCH</p> <p>Vorst en vorst-dooi-cycli hebben invloed op de aggregaatverdeling en aggregaatstabiliteit. Wanneer dat gepaard gaat met veranderingen in bodemstructuur en eventueel droge bulkdichtheid, dan heeft dat ook effecten op de overige fysische indicatoren (par. 4.4.5).</p> <p>CHEMISCH</p> <p>Afwezigheid van vorst heeft geen invloed op onderzochte chemische indicatoren (par. 4.5.5).</p> <p>BIOLOGISCH</p> <p>Afwezigheid van vorst heeft geen negatieve effecten op aantallen of biomassa. Het seizoen kent als het ware geen einde en dit kan indirecte, maar onvoorspelbare gevolgen hebben voor onderlinge concurrentieverhoudingen en dominantie in de bodemlevensgemeenschap (par. 4.6.5).</p>		
Kwakkelwinter (1 september-30 april) 	<p>FYSISCH</p> <p>Vorst en vorst-dooi-cycli hebben invloed op de aggregaatverdeling en aggregaatstabiliteit. Wanneer dat gepaard gaat met veranderingen in bodemstructuur en eventueel droge bulkdichtheid, dan heeft dat ook effecten op de overige fysisch indicatoren (par. 4.4.5).</p> <p>CHEMISCH</p> <p>Geen invloed op onderzochte chemische indicatoren verwacht (par. 4.5.6)</p> <p>BIOLOGISCH</p> <p>Onvoorspelbare effecten, maar vooral negatieve effecten te verwachten naarmate er meer vries-dooi-cycli zijn en strengere vriestemperaturen optreden (par. 4.6.6)</p>		
Laag vochtgehalte bij start groeiseizoen 	<p>FYSISCH</p> <p>Het vochtgehalte bij start groeiseizoen heeft geen directe invloed op alle hier beschouwde fysische indicatoren (par. 4.4.6)</p> <p>CHEMISCH (vergelijkbaar met droogte in het seizoen)</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Organische stof</i>: gloeiverlies, Organisch C, Afbreekbaar C: Hot Water Carbon: nemen af, verhoogde flux van CO₂ (= afbraak OS) wanneer neerslag valt na droge periode (par. 4.5.7) • <i>Stikstof totaal en pot. mineraliseerbare stikstof</i>: verhoging van vrijkomen van N als neerslag valt na droge periode, nemen daardoor af (par. 4.5.7) • <i>Fosfaatvoorraad en -beschikbaarheid</i>: fosfaatbeschikbaarheid neemt toe onder droge omstandigheden (par. 4.5.7) • <i>Kalivoorraad en -beschikbaarheid</i>: K-beschikbaarheid neemt af onder droge omstandigheden, maar herstelt wanneer weer neerslag valt (par. 4.5.7) <p>BIOLOGISCH</p> <p>Vochtgebrek beperkt biologische activiteit in de bodem en droogte veroorzaakt sterfte (zie par. 4.5.4). Kort na de winter heeft dat mogelijk nadelige gevolgen voor herstelgroei van populaties en ontwikkeling van rhizosfeer. Hoe langduriger en hoe droger, des te groter de effecten op alle biologische indicatoren (par. 4.6.7).</p>		

4.4 Onderbouwing effecten fysische bodemindicatoren

4.4.1 Inleiding

In enkele gevallen zal aan maaiveld verslemping (zie Textbox 1) optreden onder invloed van weersextremen. Omdat fysische indicatoren van de bovengrond vaak bepaald worden bij grondmonsters die net onder maaiveld zijn gestoken, zal zo'n slempkorst meestal niet aanwezig zijn tijdens de bepaling van de indicatoren. Dit bemoeilijkt de vertaalslag naar de veldsituatie in de praktijk.

Een tweede fenomeen dat na langdurige droogte vaak wordt waargenomen, is het moeilijk weer nat worden van de bodem (herbevochtigen). Vaak wordt dit toegeschreven aan de term waterafstotendheid (zie Tekstbox 2). Waterafstotendheid wordt in de (inter)nationale literatuur niet als indicator benoemd. Toch besteden we hier kort aandacht aan beide aspecten.

Tekstbox 1: Verslemping

Slemp of korstvorming treedt op bij gronden waar van nature weinig binding is tussen de bodemdeeltjes of waar intensieve bodembewerking die binding voortdurend tenietdoet. Onder invloed van het mechanische effect van de inslag van regendruppels ontstaat een schifting van de bodemdeeltjes waarbij de lutum- ($< 2 \mu\text{m}$) en silt- ($2\text{-}50 \mu\text{m}$) fracties de poriën tussen de zanddeeltjes of bodemaggregaten verstoppen. Gronden met lutumfracties tussen 10 en 20% of met hoge ($> 50\%$) leemgehalten (leem = lutum + silt) zijn het slempgevoeligst; dit wordt minder naarmate het organische stofgehalte hoger is (Schneider & Huinink, 1991). Korsten zijn slecht voor de gas- en zuurstofuitwisseling tussen bodem en atmosfeer en verhinderen voldoende infiltratie van water. Iets vergelijkbaars kan ook onder maaiveld plaatsvinden: interne slemp (vooral in slecht ontwaterde, humusarme, lichte zavel bovengronden). (Interne) slemp kan ook optreden wanneer kleideeltjes dispergeren onder invloed van verzilting.

Bij voldoende bodembedekking door het gewas is er nauwelijks gevaar voor het optreden van oppervlakkige slemp. Zodoende geldt dat verslemping niet aan de orde is op grasland en bij akkerbouw het risico minder wordt naarmate het groeiseizoen vordert.

Op basis van de Nederlandse bodemkaart (1:50 000) hebben Hack et al. (2007) de slempgevoeligheid in kaart gebracht. Zij geven aan: *"Slempgevoeligheid is groot bij de leem- en lössgronden. In de Noordoostpolder komen slempgevoelige, zeer fijnzandige gronden voor met een lutumgehalte van 7 à 10%. De slempgevoeligheid is ook groot voor alle zavelgronden met een lutumgehalte van minder dan 17,5%, gecombineerd met een organische stofgehalte van minder dan 3% en een koolzure-kalkgehalte van minder dan 0,5%. Als het koolzure-kalkgehalte hoger is of het organische stofgehalte hoger is, dan is de slempgevoeligheid matig. Voor zavelgronden met een lutumgehalte dat groter of gelijk is aan 17,5% is de slempgevoeligheid alleen matig als het koolzure-kalkgehalte lager is dan 0,5%. In alle andere gevallen wordt de slempgevoeligheid gering genoemd."*

Tekstbox 2: Waterafstotendheid

Waterafstotendheid of hydrofobie (*hydrophobicity, soil water repellency*) wordt in de internationale overzichten over bodemindicatoren niet apart benoemd (zie Van den Elsen et al., 2019, Bijlage 1). Alleen in de eerste versie van de NCRS-lijst met bodemkwaliteitsindicatoren is een beschrijving gegeven van waterafstotendheid. Dat betrof echter heel specifiek de waterafstotendheid in bosbodems volgend op een bosbrand. In latere overzichten van NCRS wordt deze indicator echter niet meer genoemd (zie Van den Elsen et al., 2019, Tabel B1.3 in Bijlage 1).

Mao et al. (2019) geven een review over de mogelijke mechanismen aangaande het voorkomen en de persistentie van waterafstotendheid, variërend van de nanoschaal tot en met de schaal van een ecosysteem. De belangrijkste factoren zijn bodem-organische stof en bodemvochtgehalte. Het betreft dan de interactie tussen specifieke, organische componenten van de organische stof en watermoleculen. Door herhaalde veranderingen in uitdrogen en weer vernatten van de bodem wordt deze interactie aangepast, en daarmee wordt waterafstotendheid variabel en afhankelijk van de geschiedenis in uitdrogen en weer vernatten. De auteurs geven aan dat waterafstotendheid zal toenemen bij klimaatverandering als gevolg van toenemende droogte en opwarming. Wanneer waterafstotendheid van de bovengrond zeer groot is, neemt de kans op oppervlakkige afvoer tijdens zware buien toe.

Dekker et al. (2009) beschrijven hoe waterafstotendheid is te meten in veldvochtige bodemmonsters. In het veld kan dit door met een gutsboor een ongestoord monster in de guts te nemen en vervolgens op verschillende dieptes een waterdruppel aan te brengen en te meten hoelang het duurt voordat deze door de bodem (bij heersend vochtgehalte) is opgenomen (WDPT: *water droplet penetration test*). Wanneer echter een relatie tussen vochtgehalte en deze waterdruppel-test bepaald moet worden, kan dit alleen door een ongestoord monster in het laboratorium te gebruiken.

Doerr et al. (2006) hebben waterafstotendheid gemeten voor 41 verschillende bodem-landgebruik-situaties in Engeland. Waterafstotendheid werd vooral waargenomen in situaties met permanente begroeiing (voor allerlei textuurklassen), terwijl in plots waar grondbewerking werd toegepast vaak geen waterafstotendheid werd waargenomen. Onder natte uitgangssituaties werd geen waterafstotendheid gemeten. Textuur, organische stof en watergehalte zijn niet bruikbaar als voorspellende variabelen. Volgens de auteurs zijn landgebruik en vochtgehalte waaronder waterafstotendheid kan voorkomen, betere voorspellers. Infiltratie en waterberging van sterk waterafstotende profielen zijn duidelijk geringer dan voor goed vernatbare profielen.

In Nederland zijn vooral metingen uitgevoerd in (met gras begroeide) duinzandgronden (Dekker et al., 2001) en op golfterreinen (Dekker et al., 2009), maar ook op zware klei- en veengronden (Dekker and Ritsema, 2000). Onder natte omstandigheden treedt waterafstotendheid niet op, maar wel beneden het zogenaamde kritieke watergehalte (Ritsema et al., 2008; Doerr et al., 2006).

In sommige simulatiemodelstudies worden waterafstotendheid en bijbehorende stroming in zogenaamde 'natte vingers' gesimuleerd door extreme hysteresis in de waterretentiekaracteristiek te veronderstellen (Ritsema et al., 2005). De vorming van deze 'natte vingers' of preferente stroombanen is belangrijk bij onderzoek van stoffentransport, omdat via deze banen stoffen sneller kunnen uitspoelen naar het grondwater (Dekker en Ritsema, 1996).

Het tegengaan of (gedeeltelijk) opheffen van waterafstotendheid van een bodem(laag) kan gebeuren door het toedienen van middelen die de oppervlaktespanning van water verlagen (*surfactant*) of van waterabsorberende gels (Ritsema et al., 2005). Het toedienen van het kleimineraal kaoliniet aan veengronden bleek niet effectief (Lichner et al., 2002).

4.4.2 Invloed van piekbuien

4.4.2.1 Aggregaatstabiliteit

Tijdens een piekbui is de impact (kinetische energie) van waterdruppels op de bodem groot en kunnen aggregaten aan maaiveld door de mechanische krachten uiteenvallen. Dit gebeurt des te meer naarmate de stabiliteit van aggregaten lager is.

Shi et al. (2017; Zwitserland) voerden veldexperimenten uit met vijf opeenvolgende (verschillende tussenpozen) kunstmatige beregeningen met twee neerslagintensiteiten (26 en 49 mm h⁻¹). Na elke event werden bodemmonsters van de eerste cm genomen en geanalyseerd op *mean weight diameter* (MWD). De aggregaatstabiliteit nam na de eerste bui af, maar nam daarna (als gevolg van uitdroging van de bodem) weer licht toe, maar bleef lager dan in de uitgangssituatie. Dit duidt op de mogelijkheid dat beperkt re-aggregatie plaatsvindt tussen de buien door. De veranderingen in aggregaatgrootte-verdeling vertoonden een relatie met de neerslagintensiteit, waarbij het aandeel kleinere aggregaten toenam tussen de vijf opeenvolgende beregeningen.

Yao et al. (2020; China) onderzochten de invloed van piekbuien (120 mm h⁻¹ gedurende 1 h; regenvalsimulator) op onder meer de water-stabiele aggregaatverdeling in 15 grondsoorten met variërend kleigehalte van 13-38%; grond werd vanuit het veld in grote bakken onder de regensimulator geplaatst. De *mean weight diameter* (MWD) werd niet beïnvloed (geen significante verlaging) in drie opeenvolgende piekbuien (1 h tussen buien). De afname was iets groter bij gronden met een hoger organisch C-gehalte.

Anders dan Shi et al. (2017) en Yao et al. (2020) bestudeerden Legout et al. (2005; Frankrijk) de impact van neerslagintensiteit (30 mm h⁻¹) op individuele aggregaten (2 grondsoorten). In dat geval toonden zij aan dat de MWD per mm neerslag afnam bij toenemende hoeveelheid (mm) neerslag: de eerste afname verliep snel, gevolgd door een langzame verder daling. Omdat de aggregaten afzonderlijk aan neerslag werden onderworpen, was er ook geen weerstand van omliggende aggregaten die het verval zouden bemoeilijken.

Hypothese

Door de fysieke impact van hevige neerslag zullen aggregaten uiteenvallen. In het veld zal dit effect geringer zijn dan op basis van laboratoriumexperimenten verwacht kan worden. Tussen de buien door zal/kan re-aggregatie plaatsvinden, zodat de veranderingen van tijdelijke aard blijken.

NB Aggregaatstabiliteit zal vaak gedurende de seizoenen variëren, o.a. door variaties in bodemvocht, bevriezen en ontdooien, zwellen en krimpen, en variaties in organische componenten die voor de aggregaatbinding zorgen. Mycorrhiza en regenwormen zijn belangrijk voor de vorming en stabilisering van aggregaten (des te meer naarmate die groter worden) en de activiteit van deze bodemorganismen is sterk seizoensgebonden. Aggregaatgrootte en -stabiliteit zijn maximaal in het voorjaar en najaar (Jirku et al. 2013), waarbij de grootte overigens overschat kan worden door pseudo-aggregatie bij hoge vochtgehalten (Panettieri et al., 2015)).

NB(2) De bepaling van MWD is afhankelijk van de temperatuur van het gebruikte water (Blair, 2010). Dat betekent dat de fragmentatie in het veld ook afhankelijk zal zijn van de temperatuur van het regenwater. De temperatuur van het regenwater is ook van invloed op de impact die neerslagdruppels hebben op het bodemoppervlak en daarmee op het ontstaan van oppervlakkige afvoer en bodemerosie (Sachs and Sarah, 2018). Ook de voorgeschiedenis sinds de laatste regenbui is bepalend, in de zin dat aggregaten hebben kunnen groeien sindsdien en grotere aggregaten zijn gevoeliger dan kleinere bij eenzelfde fysieke impact van neerslag (Marshall & Quirk, 1950; Coughlan et al., 1973). De grootste effecten zijn daarom te verwachten in natte, warme perioden.

4.4.2.2 Droge bulkdichtheid

Tijdens een piekbui zal de aggregaatverdeling iets wijzigen en kleinere deeltjes zullen inspoelen in grotere poriën. Hierdoor kan de droge bulkdichtheid iets toenemen.

In een laboratoriumproefopstelling lieten Augeard et al. (2008; Frankrijk) zien dat de dichtheid (gemeten via *x-ray tomography*) aan het oppervlak in de eerste paar mm toeneemt als gevolg van de kunstmatige

neerslag die werd toegepast. Afhankelijk van de grondwaterspiegeldiepte (30 of 60 cm -mv) en de duur van de piekbui (15, 30, 40 min; intensiteit 0.5 mm h^{-1} , gevolgd door een bui van 3 h met intensiteit van 7.2 mm h^{-1}), nam de (gemodelleerde) droge bulkdichtheid aan maaiveld toe in de range 0.23 tot 0.42 g cm^{-3} . De veranderingen waren het grootst bij de ondiepe grondwaterspiegeldieptes, en nam iets toe bij toename van de duur van de piekbui. De veranderingen vonden vooral plaats in de eerste paar mm (exponentieel afnemend met de diepte). Gemiddeld voor de bovenste 5 cm van de bodem nam de dichtheid toe van 1.095 g cm^{-3} naar 1.199 g cm^{-3} (grote grondwaterspiegeldiepte) en 1.278 g cm^{-3} (kleine grondwaterspiegeldiepte); de toename bij kleine grondwaterspiegeldiepte was significant groter dan die bij grote grondwaterspiegeldiepte. Dit onderzoek was vooral gericht op korstvorming. Er wordt niets gezegd over hoe de droge bulkdichtheid na verloop van langere tijd verandert en of het effect tijdelijk is of niet.

Hypothese

In korstvorming en slempgevoelige gronden verwachten we dat de droge bulkdichtheid van de eerste paar cm -mv zal toenemen onder invloed van hevige neerslag. De mate waarin dit gebeurt, is medeafhankelijk van de vochttoestand bij aanvang van de bui. Er zijn geen aanwijzingen dat deze toename van tijdelijke aard is. Het is op voorhand ook niet duidelijk wat de betekenis van deze mogelijke toename zal zijn. De droge bulkdichtheid op andere dieptes (in de wortelzone) worden niet of nauwelijks beïnvloed door een piekbui.

NB Droge bulkdichtheid wordt meestal gemeten door een ongestoord monster (100 cm^3 ; hoogte 5 cm) te nemen. Omdat maaiveld vaak grillig van verloop is, zal de bovenkant van de feitelijke bemonsteringsdiepte dus vaak een paar cm beneden maaiveld liggen, waardoor een groot deel van de hierboven genoemde verdichting niet zal worden waargenomen.

4.4.2.3 Indringingsweerstand

De indringingsweerstand is positief gecorreleerd met droge bulkdichtheid. Als een piekbui leidt tot verhoging van de droge bulkdichtheid aan maaiveld (zie par. 4.4.2.2), dan is het dus aannemelijk dat ook de indringingsweerstand van de eerste paar mm/cm zal toenemen. Maar of dit merkbaar zal zijn in een praktijkmeting (penetrologger, relatief grote conus) is twijfelachtig. Je zou dan een micro-penetrometer moeten toepassen; Tang et al. (2022) gebruikten een conus van 2 mm diameter. Op grotere dieptes zal er geen effect van een piekbui te zien zijn.

Hypothese

Een piekbui heeft geen effect op de indringingsweerstand.

4.4.2.4 Watervasthoudend vermogen

Er zijn veel studies uitgevoerd waaruit blijkt dat de waterretentiekarakteristiek afhangt van de dichtheid van de bodem. Vaak wordt de waterretentiekarakteristiek beschreven door een analytische functie waarin enkele parameters voorkomen, met als meest bekende relaties die van Mualem (1976) en van Genuchten (1980). Er zijn verschillende publicaties waarin de beschrijvende parameters van dergelijke analytische functies kunnen worden omgerekend voor andere droge bulkdichtheid (bijv., Assouline et al., 2006a,b; Augéard et al., 2007; Tian et al., 2019; Kool et al., 2019; Ngo-Cong et al., 2021).

Watervasthoudend vermogen wordt vastgesteld voor de bewortelingsdiepte, wat meestal inhoudt de laag 0-30 cm. In paragraaf 4.4.2.2 is aangegeven dat een piekbui eventueel de dichtheid van de eerste paar mm kan verhogen. Op grotere diepte zal de dichtheid dus niet veranderen. Vaak zal bij het bemonsteren van de bovenste laag van de bodem om een waterretentiekarakteristiek te bepalen, de bovenkant van het monster net iets onder maaiveld liggen, zodat het meest verdichte laagje aan maaiveld niet bemonsterd wordt. Dat betekent dat bij dergelijke standaardbemonsteringsprotocollen het effect van een piekbui zich niet of nauwelijks zal vertalen in een wijziging in de indicator watervasthoudend vermogen.

Een piekbui kan ook leiden tot een aanpassing in de aggregaatgrootteverdeling (structuur; zie par. 4.4.2.1). Dat kan ook van invloed zijn op de waterretentiekarakteristiek aan maaiveld.

Regenwormen kunnen bodemwaterkarakteristieken wijzigen en doen dat op verschillende manieren, al naargelang de ecologische groep waartoe zij behoren. Pendelaars en dieplevende wormen kunnen de uitdroging van de boven- en ondergrond versterken. Hun intensieve en diepe gravende activiteit zou de

uitwisseling van waterdamp kunnen verbeteren door een betere beluchting in de bodem. Daarentegen kunnen oppervlakkig levende soorten de opslag van bodemvocht in de bovengrond juist verbeteren (Ernst et al., 2009).

Hypothese

Er is geen direct effect van een piekbui op de waterretentiekarakteristiek en daaruit berekende watervasthoudend vermogen. Alleen indirect, via verandering (toename) in droge bulkdichtheid en eventueel via verandering van de aggregaatgrootte-verdeling (structuur), zal de waterretentiekarakteristiek aan maaiveld beïnvloed worden. Wanneer volgens standaardprotocol de bodem wordt bemonsterd en de waterretentiekarakteristiek wordt gemeten, dan zal vrijwel altijd de bovenste paar mm tot cm niet zijn meegenomen en zal er dus geen invloed op de indicatorwaarde (watervasthoudend vermogen) zichtbaar worden.

4.4.2.5 Doorlatendheid bij verzadiging

Er zijn veel studies uitgevoerd waaruit blijkt dat de doorlatendheidskarakteristiek en de doorlatendheid bij verzadiging afhangen van de dichtheid van de bodem. Vaak wordt de doorlatendheidskarakteristiek beschreven door een analytische functie waarin enkele parameters voorkomen, met als bekendste relaties die van Mualem (1976) en van Genuchten (1980). Er zijn verschillende publicaties waarin de beschrijvende parameters van dergelijke analytische functies kunnen worden omgerekend voor andere droge bulkdichtheid (bijv., Assouline et al., 2006a,b; Augeard et al., 2007; Tian et al., 2019; Kool et al., 2019; Ngo-Cong et al., 2021).

De indicator doorlatendheid bij verzadiging wordt gemeten in een 10 cm hoog bodemmonster dat is gestoken in het veld. Omdat de bovenkant van het monster vlak moet zijn, zal de bovenkant het monster vaak enkele cm's onder maaiveld liggen. Dat betekent dat de verandering in droge bulkdichtheid als gevolg van een piekbui, die in de bovenste mm's plaatsvindt (zie par. 4.4.2.1), niet in het monster aanwezig zal zijn, zodat het effect van deze verdichting dus niet zal worden waargenomen.

Uiteraard zal het wel zo zijn dat de infiltratie van neerslag, volgend op het ontstaan van zo'n verdichte laag aan maaiveld, wel negatief worden beïnvloed. De maximale waterflux (infiltratiesnelheid) aan maaiveld wordt bepaald door de gemiddelde doorlatendheid van de bovenste paar mm, welke afhangt van de doorlatendheid bij verzadiging op $z = 0$ (maaiveld). Volgens Assouline (2006b) is de relatieve doorlatendheid bij verzadiging een functie van de relatieve verandering in porositeit en relatieve verandering in droge bulkdichtheid. De doorlatendheid bij verzadiging neemt kromlijng af met toenemende dichtheid, en is enigszins grondsoortafhankelijk.

Een piekbui kan ook leiden tot een aanpassing in de aggregaatgrootte-verdeling (structuur; zie par. 4.4.2.1). Dat heeft ook invloed zijn op de doorlatendheid bij verzadiging aan maaiveld.

Regenwormen kunnen bodemwaterkarakteristieken wijzigen en doen dat op verschillende manieren, al naargelang de ecologische groep waartoe zij behoren. Pendelaars en oppervlakkig levende soorten kunnen de infiltratiesnelheid van de bovengrond versterken (Spurgeon et al., 2013); zie ook paragraaf 4.5.2.3. Dit is onder Nederlandse omstandigheden ook vastgesteld op basis van plots zonder en met kunstmatig geboorde wormgangen (0, 50, 100 m²) door Kaandorp et al. (2021).

Hypothese

Er is vooral sprake van een indirect effect van een piekbui op de doorlatendheid bij verzadiging via verandering (toename) in droge bulkdichtheid en mogelijk via verandering in aggregaatgrootte-verdeling (structuur). Wanneer volgens standaardprotocol de bodem wordt bemonsterd en de doorlatendheid bij verzadiging wordt gemeten, dan zullen vrijwel altijd de bovenste paar mm tot cm niet zijn meegenomen, en zal er dus geen invloed op de indicatorwaarde zichtbaar worden. Het is daarom aan te bevelen om metingen in veldsituaties uit te voeren, maar dat is voorsnog geen onderdeel van de protocollen.

4.4.3 Invloed van bodemtemperatuur en hittegolf

4.4.3.1 Aggregaatstabiliteit

Bij toename van de (bodem)temperatuur (T) is de verwachting dat de afbraak van organische stof (OS) toeneemt (Bakema et al., 2022) en dat daardoor de aggregaatstabiliteit afneemt, omdat er mogelijk minder kittende werking van het OS overblijft. Hieronder volgen enkele waarnemingen zoals beschreven in de wetenschappelijke literatuur.

Wang et al. (2022) rapporteren over een mesocosm experiment waarin bodemkolommen uit een relatief koude streek deels in de koude streek werden gehandhaafd en deels werden verhuisd naar een streek met een gemiddeld hogere jaartemperatuur (circa 2 °C hoger). Op beide locaties werd een deel van de kolommen acht jaar lang intensief met soja geteeld (S) en een ander deel werd aan natuurlijk herstel (*natural restoration*; NR) blootgesteld (zonder grondbewerking; natuurlijke vegetatie). Na acht jaar werden de aggregaatverdeling (macro- en micro-aggregaten; silt- en lutumgehalte), de *mean weight diameter* (MWD) en de *geometric mean diameter* (GMD) gemeten. Voor de NR-behandeling werden geen significante verschillen waargenomen voor elk van de gemeten grootheden. Voor de S-behandeling werd een significante verandering aan macro- en micro-aggregaten waargenomen: in de kolommen bij de hogere gemiddelde jaartemperatuur nam het aandeel macro-aggregaten af en het aandeel microaggregaten nam toe. Ook de MWD nam voor de S-behandeling af, maar er werd geen verschil waargenomen in GMD. Omdat in de NR-behandeling geen effecten van de temperatuur werden waargenomen, kan het niet zo zijn dat dit het enige effect is dat optreedt. Wang et al. (2022) geven zelf, onder andere verwijzend naar andere studies, als verklaring voor de afname van aggregaatstabiliteit bij de S-behandeling dat bij de hogere temperatuurregime de kwantiteit en kwaliteit van de gewasresten die terugkeren in de bodem afnemen. Bij de NR-behandeling zullen daarentegen meer wortellexudaten en plantresten aan de bodem worden toegevoegd, waardoor de aggregaatstabiliteit in dit geval niet werd beïnvloed door T; ofwel er is sprake van een mitigerend effect van de T-invloed op OS-afbraak.

Guan et al. (2018) rapporteerden over een driejarige studie op grasland in China waarbij via *open-top chambers* behandelingen met winterverwarming en jaarrondverwarming werden vergeleken met een controle (geen additionele verwarming). Opwarming leidde tot een (niet-significante) afname in macro-aggregaten (2-0.25 mm) en micro-aggregaten (0.25-0.053 mm), terwijl de fracties silt en lutum significant toenamen. De MWD en de GMD namen in vrijwel alle gevallen significant af bij de behandelingen met hogere T. Als verklaring werd gekeken naar de samenstelling (kwaliteit) van de OS. De totale SOC werd niet significant beïnvloed, maar opwarming leidde wel tot een significante toename in wateroplosbare SOC en tot veranderingen in de fenol- en carboxyl-C groepen in de OS.

Rillig et al. (2002; USA) voerden een veldexperiment uit waarbij een deel van het veld kunstmatig werd verwarmd met infrarood verwarming, waarbij aan maaiveld een verhoging van circa 1 °C werd bereikt. Het aandeel aggregaten (0.5-1 mm en 1-2 mm) nam niet significant af in de verwarmde plots. Al na 1 jaar was er een duidelijke afname te zien in de opgewarmde plots (n = 8) in water-stabiliteit in meerdere aggregaat-grootteklassen, met uitzondering van de klasse met diameters 0.053-0.212 mm.

Ook onder laboratoriumcondities zijn dergelijke bevindingen gerapporteerd. Annabi et al. (2004; Frankrijk) vermeldden dat de MWD lager was na 43 dagen incubatie bij 28 °C in vergelijking tot incubatie bij 4 °C. Wang et al. (2016; China) hebben een incubatie-experiment uitgevoerd gedurende 180 d bij drie waarden voor T (10, 30, 50 °C) en bij een constant watergehalte. Bij de hoogste T nam het aandeel van de grote aggregaten (0.25-2 mm) significant af en het aandeel van de middelgrote aggregaten (0.053-0.25 mm) significant toe. Ook de afname van MWD bij de hoogste T-behandeling was significant ten opzichte van beide lagere T-behandelingen.

Niet alle studies laten (duidelijke) effecten zien. Cheng et al. (2011; USA) voerden een 9-jarig experiment uit in prairiegras waarbij delen van het veld werden verwarmd met infrarood verwarming. De veranderingen in de aggregaatklassen (en stabiliteit) was niet significant. De auteurs lieten wel zien dat de C- en N-pools en de dynamiek van de C- en N-omzettingen verschilden bij verschillende temperatuur door te kijken naar veranderingen in C- en N-isotopenverhoudingen. Dus T heeft wel invloed op OS, maar onder hun omstandigheden leidde dit niet tot significante veranderingen in aggregaatstabiliteit.

Bronick and Lal (2005) gaven reeds een verklaring waarom soms wel en soms geen effecten zullen worden waargenomen. Aggregaatstabiliteit hangt van meerdere factoren af, zoals temperatuur, vochtgehalte, bodemeigenschappen en gewassoorten.

Hypothese

Verhoging van de bodemtemperatuur leidt tot snellere afbraak van organische stof waardoor er een verschuiving van de aggregaatgrootte-verdeling plaatsvindt, grotere aggregaten vervallen tot kleinere aggregaten. Organische stofafbraak wordt veelal gemodelleerd volgens een Q_{10} -achtige relatie, waarbij bij elke $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ verandering in temperatuur het proces met een factor 2-3 (Q_{10} -waarde) toeneemt. Dus wanneer in de zomer een korte periode voorkomt waarbij de (bodem)temperatuur $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ hoger ligt, vindt er in korte tijd veel afbraak van organische stof plaats. Omdat naast temperatuur ook andere factoren een rol spelen, is het totale effect niet te kwantificeren.

4.4.3.2 Bulkdichtheid

De droge bulkdichtheid van de bodem zal niet direct veranderen bij verandering van de temperatuur. Temperatuurveranderingen kunnen wel indirect effect vertonen. Bij toename van de temperatuur zal er iets meer organische stof afbreken. Hierdoor verandert de verhouding minerale delen ten opzichte van organische stof. Dat zal op termijn leiden tot een geringe toename in de droge bulkdichtheid. Volgens de continue vertaalfunctie voor droge bulkdichtheid van de Staringreeks versie 2001 (Wösten et al., 2001) is de droge bulkdichtheid bij benadering lineair afhankelijk van het organische stofgehalte, waarbij de dichtheid 0.032 g cm^{-3} toeneemt wanneer het organische stofgehalte 1 gewichtsprocent afneemt. Dergelijke grote veranderingen in OS-gehalte gedurende een korte hittegolf lijken onwaarschijnlijk, waardoor de verandering in droge bulkdichtheid tijdens een hittegolf verwaarloosbaar zal zijn.

Verhoogde temperaturen zullen ook vaak samengaan met drogere condities in de bodem. Bij krimpende klei- of veengronden zal dan de dichtheid van de matrix (dus exclusief de ontstane scheuren) iets toenemen, maar dat effect verdwijnt weer bij zwellen. Overigens wordt in het laboratorium de droge bulkdichtheid meestal vastgesteld op basis van een vooraf verzadigd monster, zodat het resultaat onafhankelijk is van de momentane krimp-zwel-toestand in de bodem.

Hypothese

Veranderingen van (bodem)temperatuur hebben geen of een verwaarloosbaar effect op de droge bulkdichtheid van de bodem, ook niet tijdens een kortdurende hittegolf.

NB Veranderingen van droge bulkdichtheid leiden tot een andere verdeling en dynamiek in bodemvocht in de bodem, wat van invloed is op de warmte-eigenschappen van de bodem en dus op de bodemtemperatuur.

4.4.3.3 Indringingsweerstand

De indringingsweerstand van de bodem zal niet direct veranderen bij veranderen van de temperatuur. Temperatuurveranderingen kunnen wel indirect effect vertonen, met name via de veranderingen in aggregaatstabiliteit. De indringingsweerstand is sterk afhankelijk van het vochtgehalte, of drukhoogte, in de bodem (zie bijv. Panayiotopoulos et al., 2003), vandaar dat wordt geadviseerd altijd bij een standaard vochtgehalte (drukhoogte) te meten. Hogere temperaturen in de zomer leiden vaak tot drogere situaties in de bodem, wat betekent dat in die periode meestal geen indringingsweerstand gemeten kan worden.

Hypothese

Veranderingen van (bodem)temperatuur hebben geen of een verwaarloosbaar effect op de indringingsweerstand van de bodem, ook niet tijdens een kortdurende hittegolf.

4.4.3.4 Watervasthoudend vermogen

Het watervasthoudend vermogen wordt bepaald uit de waterretentiekarakteristiek van de bodem. Normaliter wordt deze bij een constante, vaste temperatuur gemeten. Dat maakt de indicator dus in principe onafhankelijk van de temperatuur. De capillaire werking van de bodem op het bodemvocht bepaalt het watervasthoudend vermogen. Deze is lineair afhankelijk van de oppervlaktetension van water (neemt af bij toenemende T) en omgekeerd evenredig met de dichtheid van water (neemt af bij toenemende T). Het netto-effect is dat de hoogte van capillaire opstijging iets afneemt bij toenemende T . Volgens Hopmans & Dane (1986) en Joshi et al. (2019) verschuift de waterretentiekarakteristiek bij gelijke drukhoogtes bij een

toename in T inderdaad naar links, dus naar een verlaging van het watergehalte. Volgens hen (en anderen) is deze verschuiving vaak iets meer dan je theoretisch zou kunnen verwachten (mogelijk vanwege (in)direct T-effect op contacthoek watermeniscus – poriëwand). Omdat de waterretentiekarakteristiek voor alle drukhoogtes iets verschuift, zal het verschil in watergehalte bij drukhoogtes -100 cm en -16000 cm, het watervasthoudend vermogen, dus nauwelijks beïnvloed worden.

Hypothese

Verhoogde bodemtemperatuur tijdens een hittegolf zal de indicator waterbeschikbaarheid nauwelijks of niet beïnvloeden.

NB Wanneer tijdens een hittegolf de aggregaatstabiliteit, en daarmee de poriëngrootteverdeling, verandert, interfereert dit met de verandering in de waterretentiekarakteristiek. Het netto-effect is moeilijk voorspelbaar.

4.4.3.5 Doorlatendheid bij verzadiging

De intrinsieke doorlatendheid van een poreus medium is onafhankelijk van de vloeistof (lucht, water, olie, ...) die erdoorheen stroomt en wordt dus geheel bepaald door de poriënstructuur. De doorlatendheid voor water wordt verkregen uit de intrinsieke doorlatendheid en de vloeistofeigenschappen viscositeit en dichtheid. Wanneer de bodemstructuur niet verandert, zal een verandering in de temperatuur (T) leiden tot een verandering in doorlatendheid bij verzadiging via de T-effect op viscositeit en dichtheid van water. Constantz (1982) publiceerde gemeten doorlatendheden bij drie temperaturen (2, 25, 45 °C) in twee gronden (zand, zandige zavel): hoe hoger de T, des te groter de doorlatendheid bij gelijk watergehalte (dus niet alleen de doorlatendheid bij verzadiging, maar de doorlatendheid bij elk watergehalte). Theoretisch geldt dat ten opzichte van T = 20 °C de doorlatendheid bij T = 10 °C ongeveer 25% lager is en bij T = 30 °C ongeveer 25% hoger is; deze T-afhankelijkheid is bij benadering lineair (Bakema et al., 2022). Hopmans & Dane (1986) concludeerden dat deze theoretische T-afhankelijkheid goed opging voor hun metingen. Dus voor locaties waar regelmatig oppervlakkige afvoer optreedt, kan in dergelijke situaties iets meer regenwater infiltreren (verhoging watervoorraad voor gewas) en zal minder oppervlakkige afvoer optreden. Een verhoogde doorlatendheid verhoogt echter ook de kans op versneld afvoeren van water naar de diepere ondergrond en dat kan juist minder waterbeschikbaarheid voor gewassen betekenen.

Hypothese

Verhoogde bodemtemperatuur tijdens een hittegolf zal de indicator doorlatendheid bij verzadiging tijdelijk verhogen mits de structuur, poriëngrootteverdeling, niet wordt beïnvloed.

Enkele kanttekeningen zijn hierbij nog te plaatsen:

Wanneer tijdens de periode met verhoogde doorlatendheid een bui valt, dan zal initiële infiltratiesnelheid iets hoger kunnen zijn. Of en hoeveel hoger hangt ook weer af van de drukhoogteverdeling in de bovengrond.

Wanneer tijdens een hittegolf de aggregaatstabiliteit en daarmee de poriëngrootteverdeling verandert, dan interfereert dit met de verandering in de doorlatendheid. Het netto-effect is dan onbekend.

Bij toenemende T zal er ook iets meer water via de dampfase in de bodem getransporteerd worden (bijv. Hopmans & Dane, 1986; Peters et al., 2015); dit effect is hier buiten beschouwing gelaten.

De temperatuur van het regenwater kan afwijken van de temperatuur van het bodemvocht. Wanneer als gevolg van klimaatverandering de luchttemperatuur iets toeneemt, zal ook de temperatuur van het regenwater iets toenemen, maar meestal zal de temperatuur van het regenwater iets lager zijn dan de omgevingstemperatuur. Wanneer het regenwater koeler is dan het bodemvocht, dan wordt bovenstaande hypothese deels afgezwakt.

4.4.4 Invloed van droogte

4.4.4.1 Aggregaatstabiliteit

Zhang et al. (2018; China), verwijzend naar diverse niet-openbare studies (o.a. Chinese dissertaties), stellen in hun discussie dat i) droogte een negatieve impact heeft op de vorming van macro-aggregaten, ii) de fractie macroaggregaten negatief gerelateerd is aan de mate en intensiteit van de droogte, en

iii) aggregaatstabiliteits-indices (bijv. *mean weight diameter*, MWD) afnemen met afnemende fractie macroaggregaten. Wel dient hierbij opgemerkt te worden dat deze studie werd uitgevoerd in aangeplant bos, en dat de samenstelling van organische stof (OS) en de kittende werking daarvan bij de vorming van (stabiele) aggregaten kan afwijken van die in landbouwgronden. Bovendien is de opgelegde droogte bereikt door de neerslag af te vangen en is dus niet hetzelfde als een natuurlijke droogte.

Kohler et al. (2009; Spanje) daarentegen concludeerden op basis van metingen (en verwijzend naar literatuur) dat het percentage stabiele aggregaten toeneemt in een uitdrogende bodem. Als verklaring wordt gegeven dat bij afname van het vochtgehalte in de bodem het aantal contactpunten tussen bodemdeeltjes en OS toeneemt, resulterend in meer cohesie en sterkte van de verbindingen. Ten tweede wordt gesteld dat in een uitdrogende bodem de binding tussen wortellexudaten en kleideeltjes toeneemt, wat leidt tot een toename in aggregaatstabiliteit. In aanvulling: dit kan versterkt worden bij aanwezigheid van schimmels.

Hypothese

Droogte kan leiden tot een geringe toename in aggregaatstabiliteit in landbouwgronden; in systemen met veel snel afbreekbare OS (bijv. bosgronden) kan het omgekeerde het geval zijn.

4.4.4.2 Droge bulkdichtheid

Periodes zonder aanvoer van water in de bodem hebben geen directe invloed op de droge bulkdichtheid. De droge bulkdichtheid is gedefinieerd als het gewicht van droge grond in een vast volume. Alleen als de bodemstructuur wordt beïnvloed, zal dit kunnen leiden tot een kleine wijziging in de droge bulkdichtheid. Bij krimpemde klei- of veengronden zal de dichtheid van de matrix (dus exclusief de ontstane scheuren) iets toenemen, maar dat effect verdwijnt weer bij zwellen. Overigens wordt in het laboratorium de droge bulkdichtheid meestal vastgesteld op basis van een vooraf verzadigd monster, zodat het resultaat onafhankelijk is van de momentane krimp-zwel-toestand in de bodem.

Hypothese

Periodes van droogte hebben geen directe invloed op de droge bulkdichtheid.

4.4.4.3 Indringingsweerstand

De indringingsweerstand is positief gecorreleerd met droge bulkdichtheid. De indringingsweerstand is zeer sterk afhankelijk van de vochttoestand (drukhoogte) in de bodem. Daarom ook wordt gesteld om deze te meten bij een standaard drukhoogte, i.c. bij drukhoogte van -100 cm. Bij droogte zal de bodem uitdrogen en zal de drukhoogte negatiever worden. De indringingsweerstand zal (exponentieel) toenemen met afnemende drukhoogte (Panayiotopoulos et al., 2003). Dus in feite mag (en kan) de indringingsweerstand in een sterk verdroogde bodem niet gemeten worden.

De plantenwortels ondervinden wel de feitelijke weerstand. In situaties dat de plant nog steeds investeert in wortelontwikkeling zal het voor de wortels moeilijker worden om dieper de bodem in te dringen op zoek naar bodemvocht op grotere diepte. Wanneer dit niet lukt, zal de plant droogteschade ondervinden.

Hypothese

De werkelijke indringingsweerstand neemt sterk toe wanneer de bodem uitdroogt, en een zich ontwikkelend wortelsysteem zal hier op een gegeven moment hinder van ondervinden. De indicator indringingsweerstand hoort bij een standaard bodemvochttoestand gemeten te worden en is daarmee onafhankelijk van de droogte.

4.4.4.4 Watervasthoudend vermogen

Het watervasthoudend vermogen wordt bepaald uit de waterretentiekarakteristiek van de bodem. Deze is onafhankelijk van de weersomstandigheden. Alleen wanneer droogte leidt tot veranderingen in textuurverdeling (specifiek: organische stofgehalte), droge bulkdichtheid en bodemstructuur zal de waterretentiekarakteristiek kunnen veranderen en daarmee het watervasthoudend vermogen.

Hypothese

Droogte zal de indicator waterbeschikbaarheid nauwelijks of niet beïnvloeden.

4.4.4.5 Doorlatendheid bij verzadiging

Er is geen direct effect van droogte op de doorlatendheid bij verzadiging. De indicator wordt bepaald in een verzadigd bodemonmonster. Alleen wanneer droogte leidt tot veranderingen in textuurverdeling (specifiek: organische stofgehalte), droge bulkdichtheid en bodemstructuur zal de doorlatendheid bij verzadiging kunnen veranderen.

Hypothese

Er is geen direct effect van droogte op de doorlatendheid bij verzadiging.

4.4.5 Invloed van (afwezigheid van) vorst

Vorst kan de aggregaatverdeling beïnvloeden, onder de voorwaarde dat de bodem nat is (Bryan, 1971). Bryan (1971) beschrijft dat bij eenmalige afkoeling van een verzadigd monster tot $-11\text{ }^{\circ}\text{C}$ de aggregatie iets toenam. Herhaalde afkoelingen tot $-11\text{ }^{\circ}\text{C}$ of snelle afkoeling tot zeer lage temperaturen leidden echter tot een afname van de aggregatie.

Mostaghimi et al. (1988) vermeldden dat de invloed van bevroren en ontdooien (drie bodems) een geringe invloed heeft op de aggregaatverdeling en dus aggregaatstabiliteit en dat deze bijvoorbeeld geringer is dan de invloed van neerslagintensiteit. De invloed was wel afhankelijk van het vochtgehalte van de bodem (voor bepaalde ranges aan vochtgehalten was de invloed gering), maar was niet afhankelijk van de snelheid van bevroren.

Oztas and Fayetorbay (2003) rapporteerden dat de natte aggregaatstabiliteit afnam met 29-52% (grondsoortafhankelijk) onder invloed van vorst-dooi-cycli en was onder meer afhankelijk van het vochtgehalte in de bodem. Wanneer het aantal vorst-dooi-cycli toenam van 3 tot 6 was er een tijdelijke toename in natte aggregaatstabiliteit. De stabiliteit was geringer bij lagere vorsttemperaturen ($-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ versus $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Radke and Berry (1998) rapporteerden dat als gevolg van vorst-dooi-cycli de droge bulkdichtheid abrupt veranderde. De verandering was soms verdichting, omdat de vorming van ijslenzen de aggregaten comprimeerden en soms leidde de vorming van ijslenzen tot het uiteengaan van aggregaten. Vergeleken met situaties zonder vorst-dooi-cycli was de verandering achteraf nog steeds merkbaar.

Tijdens het ploegen van kleigronden ontstaan vaak grote brokken. Deze kunnen onder invloed van vorst weer uit elkaar vallen. Bij achterwege blijven van vorst zal dit niet meer gebeuren en zal de agrariër dus het ploegen moeten afstemmen met de bewerkbaarheid van de bodem.

De waterretentiekarakteristiek, en het daaruit afgeleide watervasthoudend vermogen, wordt per definitie gemeten bij een constante temperatuur ($T > 0\text{ }^{\circ}\text{C}$). Alleen daar waar vorst de bodemstructuur beïnvloedt, zal dit effect hebben op de waterretentiekarakteristiek.

De doorlatendheid bij verzadiging wordt per definitie gemeten bij een constante temperatuur ($T > 0\text{ }^{\circ}\text{C}$). Alleen daar waar vorst de bodemstructuur beïnvloedt, zal dit effect hebben op de doorlatendheid bij verzadiging. Uiteraard zullen in het veld – daar waar de bovengrond is bevroren – de doorlatendheid en infiltratie sterk gereduceerd zijn.

Daar waar vorst leidt tot veranderingen in de aggregaatverdeling en dus bodemstructuur zal dit van invloed kunnen zijn op de dichtheid, indringingsweerstand watervasthoudend vermogen, doorlatendheid bij verzadiging en infiltratiesnelheid (zie elders).

Enkele hierboven genoemde studies beschouwden cycli van afwisselende vorst-dooiperiodes; de beschreven uitkomsten kunnen dan gezien worden in het licht van onze definitie van een kwakkelwinter.

4.4.6 Invloed van een laag vochtgehalte start groeiseizoen

Het vochtgehalte in de bovengrond bij aanvang van het groeiseizoen is van belang voor een al dan niet goede start van de groei van een pas ingezaaid of gepoot gewas. Deze toestand is het gevolg van het

historische weer voorafgaand aan het groeiseizoen, dus van het neerslagoverschot van de voorafgaande periode. Wanneer in die voorafgaande periode sprake is van weersextremen, zoals hierboven beschouwd (piekbuien, hoge of lage bodemtemperaturen, droogte), dan leidt dat tot verschillen tussen de jaren in de waarde van het vochtgehalte in de bovengrond bij aanvang van het groeiseizoen. Alle hier beschouwde fysische indicatoren worden of dienen onder geconditioneerde omstandigheden gemeten te worden. De indicatorwaarde zal daardoor niet beïnvloed worden door de uitgangstoestand in de bodem waarbij het monster is genomen. Dus kan gesteld worden dat het vochtgehalte bij start groeiseizoen geen effect zal hebben op de meetwaarden van de fysische indicatoren. Het zal vooral de voorafgaande geschiedenis in weer(sextremen) zijn die van invloed kan (kunnen) zijn geweest (zie elders).

4.4.7 Invloed van verzilting

Verzilting kan optreden via zoute kwel vanuit de diepe ondergrond of via beregening met zout in grond- of oppervlaktewater. Bij verzilting moeten we naast de totale zoutconcentratie, vaak aangeduid met de elektrische geleidbaarheid (EC, dS m^{-1}), ook rekening houden met het aandeel natrium in het zoute water of in de bodem, vaak aangeduid met de fractie uitwisselbaar natrium (SAR, $\text{mmolc}^{0.5} \text{L}^{-0.5}$; of ESP, %; *sodicity*) (Cornelissen, 2022). SAR is de verhouding in concentraties natrium en calcium plus magnesium, voor SAR < 15 $\text{mmolc}^{0.5} \text{L}^{-0.5}$ geldt dat de waarde van ESP vrijwel gelijk is aan SAR, en SAR = 15 $\text{mmolc}^{0.5} \text{L}^{-0.5}$ wordt vaak aangeduid als een kritieke grenswaarde (Cornelissen, 2022; Hopmans et al., 2021).

In een recente review van Hopmans et al. (2021) worden kritieke kennishiaten en aanbevelingen voor verder onderzoek beschreven betreffende de invloed van verzilting van de bodem (voornamelijk in met zoutwater geïrrigeerde situaties). De tien besproken prioriteitsonderwerpen zijn: in kaart brengen van verzilting, toepassen *remote sensing* bij het in kaart brengen van verzilting, verbeteren managementpraktijken in verzilte gebieden, managementpraktijken in combinatie met precisie-irrigatie, herevaluatie van zouttolerantie van gewassen, verbeteren kennis van de gecombineerde (en interactie tussen) droogte- en zoutstress, verbeteren kennis van fysiologische mechanismen voor adaptatie van gewassen in verzilte bodems, verbeteren gewasvariëteiten die beter zouttolerant zijn waarbij dat niet ten koste gaat van gewasopbrengst, zout- en sodiciteitsinvloeden op bodemfysische eigenschappen en ook beperkingen en kansen van niet-conventionele waterbronnen voor gebruik als irrigatiewater. Met betrekking tot de invloeden op fysische parameters concluderen zij dat er nog te weinig kwantitatief onderzoek is gedaan naar de invloed van verzilting en *sodicity* op de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken (maar ook op stoftransport en gashuishouding). Er wordt aangegeven dat dit onderzoek moeilijk zal zijn, omdat de mate van structuurbederf complex is en deze ook gelijktijdig beïnvloed wordt door veel andere processen.

4.4.7.1 Aggregaatstabiliteit

Verhoogde natriumgehalten in het bodemvocht in kleigronden leiden tot het dispergeren (*uiteenvallen*) van de kleideeltjes. Hierdoor zal de aggregaatstabiliteit afnemen en zullen de kleideeltjes inspoelen in het poriënsysteem, waardoor interne verslemping ontstaat (en dus ook toename van droge bulkdichtheid). Emdad et al. (2006) rapporteerden dat de *mean weight diameter* (MWD) met 17% en 53% afnam bij matige en hoge EC-SAR (matig: EC = 2 dS m^{-1} , SAR = 10 $\text{mmolc}^{0.5} \text{L}^{-0.5}$; hoog: EC = 6 dS m^{-1} , SAR = 30 $\text{mmolc}^{0.5} \text{L}^{-0.5}$) in het gebruikte irrigatiewater.

4.4.7.2 Droge bulkdichtheid, indringingsweerstand

Verhoogde natriumgehalten in het bodemvocht in kleigronden leiden tot het dispergeren van de kleideeltjes. Hierdoor zal de aggregaatstabiliteit afnemen en zullen de kleideeltjes inspoelen in het poriënsysteem, waardoor interne verslemping ontstaat en waardoor de droge bulkdichtheid zal toenemen. Emdad et al. (2006) rapporteerden dat bij hun hoogste EC-SAR-behandeling (EC = 6 dS m^{-1} , SAR = 30 $\text{mmolc}^{0.5} \text{L}^{-0.5}$) de droge bulkdichtheid significant toenam: in de bovengrond van 1.38 naar 1.48 g cm^{-3} en in de ondergrond van 1.33 naar 1.39 g cm^{-3} .

Er is geen informatie gevonden over de invloed van verzilting op indringingsweerstand. Daar waar de droge bulkdichtheid wordt beïnvloed, zal dit ook van invloed kunnen zijn op de indringingsweerstand.

4.4.7.3 Watervasthoudend vermogen

Hopmans et al. (2021) geven aan dat het voorspellen van de invloed van verzilting en *sodicity* op de waterretentiekarakteristiek erg moeilijk is, omdat meerdere factoren tegelijkertijd een rol spelen. Het is dus onduidelijk in welke mate het watervasthoudend vermogen beïnvloed zal worden.

In kunstmatig gemaakte kwartsmonsters lieten Ma et al. (2013) zien dat de waterretentiekarakteristiek iets naar boven verschuift bij toenemend zoutgehalte in het bodemvocht. Omdat deze monsters vrij grof waren, was het watergehalte bij drukhoogte -70 cm al extreem laag, waardoor uit hun data geen effect op watervasthoudend vermogen afgeleid kan worden.

4.4.7.4 Doorlatendheid bij verzadiging

Adeyemo et al. (2022) geven aan dat het zwellen van klei(gronden) en het dispergeren van kleideeltjes de belangrijkste processen zijn die de doorlatendheid bij verzadiging beïnvloeden. Door te variëren in SAR en totale zoutconcentratie toonden zij aan dat voor sommige gronden, gegeven een constante waarde voor SAR, de degradatie soms leidt tot irreversibele veranderingen in doorlatendheid bij verzadiging. Echter, omdat ze ook concludeerden dat een grote gevoeligheid voor degradatie niet altijd correleert met een lage capaciteit voor rehabilitatie in doorlatendheid, is verder onderzoek op dit gebied gewenst.

Op basis van een theoretische analyse liet Cornelissen (2022, zijn Figuur 5.8) zien dat de doorlatendheid bij verzadiging afneemt bij toenemende ESP (of SAR). De afname is weer een functie van het totale zoutgehalte van de bodemoplossing: hoe groter de totale zoutconcentratie, des te geringer deze afname. De afname komt doordat macroporiën krimpen als gevolg van het zwellen van de microporiën.

Ook Hopmans et al. (2021) geven aan dat het voorspellen van wat de invloed is van verzilting en *sodicity* op de doorlatendheid bij verzadiging erg moeilijk is, omdat er meerdere factoren tegelijkertijd een rol spelen.

4.4.8 Herstelvermogen

Veel van de fysische indicatoren zijn afhankelijk van de droge bulkdichtheid en organische stofgehalte (OS-gehalte). Daar waar de (extreme) weersomstandigheden invloed hebben op de dichtheid en het OS-gehalte, zullen de fysische indicatoren (deels) weer kunnen herstellen wanneer de dichtheid en het OS-gehalte weer veranderen. Dit gebeurt normaal gesproken jaarlijks bij grondbewerking en aanwending van organische meststoffen. Hierbij wordt ervan uitgegaan dat de invloed van de (extreme) weersomstandigheden zich vooral laten gelden in het bovenste deel van de bovengrond.

In geval van verzilting (zie par. 4.4.7) is sprake van irreversibele degradatie, waardoor de verandering in bodemindicatoren ook irreversibel is. Het herstelvermogen is dus gering.

4.4.9 Discussie

Het is algemeen bekend dat veel fysische eigenschappen van de bodem, inclusief de hier beschouwde fysische indicatoren, sterk samenhangen met de droge bulkdichtheid en het organische stofgehalte. Dat betekent dat (extreme) weersomstandigheden die van invloed zijn op de dichtheid en het organische stofgehalte daarmee ook van invloed zijn op deze fysische eigenschappen.

Yang et al. (2022; China) lieten zien dat de doorlatendheid bij verzadiging primair werd bepaald door verschillen in droge bulkdichtheid, omdat de droge bulkdichtheid bepaalt hoe groot de porositeit is, daar waar water kan stromen. De doorlatendheid neemt af bij toenemende dichtheid. Een tweede bepalende factor was de natte aggregaatstabiliteit. Echter, dit betekende niet dat de combinatie dichtheid+aggregaatstabiliteit beter in staat was hun gemeten variatie in doorlatendheid bij verzadiging te verklaren.

Sekaran et al. (2021; USA) lieten zien dat er een lineaire relatie bestaat tussen *mean weight diameter* (MWD) en bodem-organische koolstof (SOC, range 10-25 g kg⁻¹): MWD neemt, locatie-afhankelijk, toe met toenemende SOC.

De textuurverdeling, inclusief het OS-gehalte, bepaalt in sterke mate de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken, inclusief de doorlatendheid bij verzadiging. Verandering in OS-gehalte leidt dus tot veranderingen in deze eigenschappen, zie bijv. De Jong et al. (1983). Zij lieten zien dat het gravimetrische watergehalte toenam bij hogere OS-gehalten (1% versus 4%) (bij gelijke drukhoogtes). Omdat bij hogere OS-gehalten de droge bulkdichtheid lager wordt, zal dit effect in termen van volumetrisch watergehalte minder groot zijn. En wanneer de invloed zowel bij $h = -100$ cm en bij $h = -16000$ cm ongeveer even groot is, zal het effect op watervasthoudend vermogen mogelijk heel klein zijn. In STOWA deltafact "*Belang van bodemorganische stof voor het waterbeheer*" (STOWA, 2021) wordt vermeld dat voor OS-gehalte >2% een verandering van het OS van 1% nauwelijks leidt tot verandering in beschikbaar vocht. In sommige studies worden deze karakteristieken geschat op basis van zogenaamde pedotransferfuncties waarbij beschrijvende parameters worden berekend uit de textuurverdeling, OS-gehalte en droge bulkdichtheid, zie bijv. Wösten et al. (1999; 2001).

4.4.10 Algemene bevinding

Van de fysische indicatoren is aggregaatstabiliteit de enige indicator die duidelijk beïnvloed kan worden door weersextremen. Veranderingen in aggregaatstabiliteit kunnen leiden tot veranderingen in bodemstructuur, maar niet in veranderingen in de minerale lutum-, leem- en zandfracties. De verkrumelbaarheid van de grond kan verminderen en daarmee onder meer de porositeit en het waterregulerend vermogen. Dergelijke veranderingen in bodemstructuur kunnen vervolgens van invloed zijn op de overige hier beschouwde fysische indicatoren (droge bulkdichtheid, indringingsweerstand, watervasthoudend vermogen, doorlatendheid bij verzadiging of infiltratiecapaciteit) en zijn ook van grote betekenis voor de organische stof die niet langer fysiek beschermd is tegen microbiële afbraak na het uiteenvallen van aggregaten. Directe invloeden van weersextremen op de overige fysische indicatoren zijn echter gering of afwezig. Aggregaatstabiliteit heeft een sterke link met organische stof en bodembioïologie. Van alle fysische indicatoren zal deze indicator het meest reageren op weersextremen. Het ligt dan ook voor de hand om deze indicator in vervolgonderzoek zeker mee te nemen. Aggregaatstabiliteit wordt niet standaard in Nederland gemeten: niet aan de monsters voor de Basisregistratie Ondergrond (BRO) waaraan de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken worden bepaald en ook niet in het standaard bemestingswijzeronderzoek van Eurofins (daarin worden alleen rapportcijfers gegeven voor verkrumelbaarheid, verslemping en stuifgevoeligheid). De meest gehanteerde bepalingmethode voor aggregaatstabiliteit is de natte zeefmethode (zie o.a. Van den Elsen et al., 2019). In een recent gepubliceerd onderzoek zijn vier methodes onderling vergeleken (Rieke et al., 2022): de natte zeefmethode, bepaling waterstabiele aggregaten met behulp van een (Cornell) regensimulator, vaststellen verslemping aan de hand van beeldverwerking van foto's en de *mean weight diameter* (MWD) van waterstabiele aggregaten. Deze auteurs concludeerden dat de vier methoden onderling een gematigde correlatie vertoonden, dat er niet één methode aan te wijzen was als superieur, en dat ze wel alle vier toepasbaar zijn om aggregaatstabiliteit vast te stellen.

De fysische indicatoren worden altijd onder geconditioneerde omstandigheden gemeten. Meten onder geconditioneerde omstandigheden heeft als voordeel dat de metingen goed interpreteerbaar en reproduceerbaar zijn. Op deze manier kunnen, bijvoorbeeld, verschillen tussen percelen of grondsoorten goed inzichtelijk gemaakt worden. De indicatorwaarden op zich zeggen echter niet veel over de toestand in de praktijk. Bijvoorbeeld, in een sterk uitdrogende bodem zal de indringingsweerstand die de plantenwortels ondervinden toenemen, maar dat valt dus niet te bepalen via de indicatorwaarde die is gemeten bij een standaard vochtgehalte.

Het feit dat de indicatorwaarden in geringe mate beïnvloed worden door weersextremen geeft enerzijds de kracht weer van de indicatoren, maar anderzijds geeft het ook aan dat op basis van deze indicatorwaarden er weinig handelingsperspectief is voor agrariërs. In het algemeen kan wel gesteld worden dat daar waar weersextremen (of andere factoren) een negatieve invloed hebben op droge bulkdichtheid (verhogen; verdichting) of aggregaatstabiliteit (verslechteren bodemstructuur; vorming slompkorst; daling organische stofgehalte), het bodembeheer gericht moet zijn op het verminderen dan wel verhelpen van deze problemen (en dus het creëren van omstandigheden waarbij deze grootheden zo goed mogelijk op peil blijven).

4.5 Onderbouwing effecten chemische bodemindicatoren

4.5.1 Inleiding

Invloed van extreme weersomstandigheden op chemische bodemindicatoren zijn voor een deel te vertalen naar invloed van vochtgehalte van een bodem, zowel het effect van natter dan normaal als droger dan normaal, het neerslagoverschot en het effect daarvan op af- en uitspoeling en temperatuur. In deze paragraaf zal eerst de invloed van deze twee factoren op de verschillende indicatoren beschreven worden. Waar nodig wordt hier in de volgende paragrafen naar verwezen.

Organische stof en afbreekbaar C

De massa aan organische stof (OS) in bodems is een relatief grote hoeveelheid, vergeleken met nutriënten in de bodem. Op blijvend grasland op zandgronden is het in de bovenste 10 cm gemiddeld zo'n 5%, dat is ongeveer 225.000 kg OS per ha. Op blijvend grasland op kleigronden kan het OS-percentage hoger zijn. Op bouwland is op minerale gronden het OS-gehalte over het algemeen 1-2% over een laag van 25 of 30 cm. De totale hoeveelheid OS komt daarmee op zo'n 135.000 tot 270.000 kg OS per ha. Hierbij is uitgegaan van een dichtheid van 1,5 g grond per cm³.

In de OS-balans voor percelen zoals die in Nederland gehanteerd wordt, wordt uitgegaan van een afbraak van 1 tot 5% per jaar van de aanwezige OS (www.handboekbodemenbemesting.nl) onder normale omstandigheden. De afbraak van OS in een bodem is het gevolg van microbiële activiteit. De afbraak van OS zal toenemen naarmate de temperatuur hoger wordt. Er is echter remming van afbraak als er te weinig vocht is. De ervaring is echter dat als er na een droge (warme) periode weer neerslag valt, de mineralisatie van N ineens een piek kan vertonen als gevolg van een hogere afbraak van OS. Dit blijkt ook uit onderzoek. Onder laboratoriumomstandigheden vonden Pezzolla et al. (2019) dat de CO₂-flux uit een bodem na drogen en weer vernatten een piek vertoonde. Ditzelfde werd ook gevonden door Fierer and Schimel (2002). Zij vonden ook dat bij herhaling van de cyclus droog-nat de piek in de CO₂-flux (en N) lager was dan bij een eerdere droog-nat-cyclus. De mineralisatiepiek bij vernatting na droogte lijkt uit te doven naarmate dit vaker gebeurt.

Het OS-percentage in de bodem is wel te beïnvloeden door management, maar alleen op lange termijn, het duurt jaren voordat een verandering meetbaar is. Om het organische stofgehalte te verhogen of te verlagen, moet er zeer veel OS toegevoegd of afgebroken worden. Dit zou betekenen dat extreme weersomstandigheden vooral op langere termijn invloed hebben: een verandering in OS na een droge zomer of een piek in neerslag zal niet direct meetbaar zijn; pas als gebeurtenissen vaker gaan voorkomen, zullen deze indicatoren na jaren meetbaar veranderen. Herstel zal dan lastig zijn en ook daar zal veel tijd overheen gaan. Voor de bodemkwaliteit zou het beter zijn om verlaging te voorkomen dan te moeten herstellen.

Zuurgraad

De indicatoren pH-CaCl₂ en pH-KCl zijn niet gevoelig voor vochtgehalte. Het is wel mogelijk dat door weinig of veel vocht een andere indicator verandert waardoor de pH mee verandert. Bijvoorbeeld: bemesting met ammonium-houdende meststoffen en de depositie van ammoniak is verzurend voor de bodem. Ammonium nitrificeert naar nitraat, dat vervolgens kan uitspoelen. Nitraat neemt magnesium en calcium mee, uiteindelijk blijven er H⁺-ionen achter die zorgen voor een verlaging van de pH. Als door extreme regenval (piekbui) de uitspoeling van nitraat toeneemt, zou de pH (extra) kunnen dalen.

Er zijn geen resultaten gevonden over invloed van bodemtemperatuur in het veld op gemeten pH voor bodemanalyse.

Stikstof: N-totaal en potentieel mineraliseerbare N

In het BLN-rapport (De Haan et al., 2021) zijn twee indicatoren voor N genoemd: totale hoeveelheid N (N-totaal) in de bodem en potentieel mineraliseerbare N met anaerobe incubatie. Het overgrote deel van N-totaal in de bodem is onderdeel van organische stof en is zeer stabiel (Mengel and Kirkby, 2001). Dit zijn deels resten van planten en mest en deels micro-organismen. Verandering in N-totaal zal vooral afhankelijk zijn van veranderingen in OS. In de BLN wordt aangegeven dat N-totaal beperkt te beïnvloeden is. De gevoeligheid van OS (paragraaf 4.4.1) is vooral gerelateerd aan extra afbraak wanneer het na een droge periode weer nat wordt. Hierdoor komt ook extra N vrij die door het gewas opgenomen wordt of verloren gaat, en dus uit de pool van organisch N verdwijnt. Net als voor OS zal het effect op korte termijn niet

meetbaar zijn aan N-totaal maar zal op langere termijn, wanneer de cyclus verdroogd-vernat vaker voorbij is gekomen, N-totaal doen dalen. Ook hiervoor lijkt voorkomen beter dan herstellen.

Potentieel mineraliseerbare N is volgens het BLN-rapport vooral te beïnvloeden door het al dan niet toedienen van dierlijke mest. Mineraliseerbaar N in de bodem komt voornamelijk voor als amino-N (Mengel and Kirkby, 2001). Amino-N zal niet makkelijk uitspoelen bij piekbuien, N is pas uitspoelingsgevoelig als het vrijgekomen is door mineralisatie. Deze pool is waarschijnlijk wel gevoelig voor droogte gevolgd door een vochtige periode. De extra mineralisatie zal naar verwachting vooral uit deze pool komen.

De indicator minerale N wordt niet genoemd in BLN als N indicator. Minerale N kan sterk veranderen onder invloed van piekbuien. De voorraad minerale N is echter een lastige indicator voor bodemkwaliteit omdat waardering van de hoogte van de voorraad door het jaar heen varieert. Als een gewas in het voorjaar in een fase is waarin het veel N nodig heeft, is het positief als er voldoende N in minerale vorm beschikbaar is. Aan het eind van het groeiseizoen is het voor de kwaliteit van sommige gewassen juist ongewenst dat er veel minerale N in de bodem aanwezig is. Ook zal na het groeiseizoen, als de gewasopname stopt en het neerslagoverschot positief is, aanwezige minerale N verloren gaan door uitspoeling naar grond- en oppervlaktewater. Dat is zowel vanuit oogpunt van nutriënten-efficiëntie als voor waterkwaliteit uiteraard niet gewenst. Wanneer de minerale N als indicator voor bodemkwaliteit wordt gebruikt, dan is het belangrijk om het beoordelingscriterium van deze indicator seizoen-specifiek te differentiëren.

Fosfaatvoorraad en -beschikbaarheid: P-AL^[1] en P-CaCl₂^[2]

Fosfaat is een nutriënt dat in verschillende pools met een verschillende beschikbaarheid voor het gewas in de bodem voorkomt. Voor de bepaling van de fosfaatvoorraad in de bodem zijn er diverse extractiemethoden beschikbaar. In Nederland wordt de combinatie van indicatoren P-AL (extractie met ammonium lactaat/acetaat) en P-CaCl₂ (extractie met calciumchloride) in de bemestingsadviezen en in de bepaling van de gebruiksnormen voor fosfaat gebruikt. P-AL is een parameter voor de capaciteit, namelijk fosfaat dat op langere termijn beschikbaar is, en P-CaCl₂ voor intensiteit, dat is fosfaat dat direct beschikbaar is voor het gewas (Bussink, 2011a; Bussink, 2011b). In het P-AL getal wordt een groter deel van de fosfaatvoorraad in de bodem geëxtraheerd dan in de P-CaCl₂. De vuistregel is dat P-AL zo'n 10% van het aanwezige fosfaat vertegenwoordigt, en P-CaCl₂ 1%.

Er zijn onderzoeken uitgevoerd naar de beschikbaarheid van P als gevolg van drogen en weer vernatten van bodems onder gecontroleerde (lab) omstandigheden. Blackwell et al. (2013) en Forber et al. (2017) vonden dat drogen en weer vernatten van een bodem het aandeel labiel P verhoogt. Dieter et al. (2015) vonden dat door drogen vooral organisch P omgezet wordt naar labiel P. Sun et al. (2018) vonden dat de invloed van drogen en vernatten een grotere invloed had dan temperatuur op de P-dynamiek in bodems, de invloed van temperatuur was echter niet verwaarloosbaar. Een hogere temperatuur (10°C vs. 25°C) verlaagde het aandeel mineraliseerbaar P in bodems. Tian et al. (2017) vonden dat hoe langer een bodem onder water staat, hoe lager de hoeveelheid opgelost reactief fosfor (DRP) werd. Reactief zou mogelijk vertaald kunnen worden naar plant-beschikbaar. Dit leek niet het gevolg van verlies van P te zijn, maar een verschuiving in de vorm waarin P voorkomt in de bodem.

In de genoemde onderzoeken zijn andere indicatoren dan P-AL en P-CaCl₂ gemeten. Vanuit de theorie dat met extractie met CaCl₂ vooral de direct beschikbare P wordt gemeten en dat met extractie met ammonium lactaat vooral P in stabielere pools plus direct beschikbare wordt gemeten, zou verwacht mogen worden dat drogen en vernatten van een bodem vooral invloed heeft op P-CaCl₂ en minder op P-AL. Maar dit is dus (nog) niet daadwerkelijk gemeten in deze indicatoren.

Het transport van P in de bodem naar plantenwortels vindt voor een groot deel plaats door diffusie en is temperatuur-afhankelijk, onder warmere omstandigheden gaat het transport sneller en kan de plant makkelijker P opnemen. Opname door planten van P onder koude en/of droge omstandigheden is lager dan onder warme en/of natte omstandigheden. Het is echter niet bekend of dit terug te zien is in de bodem-indicatoren voor P, met name P-CaCl₂, tijdens of na een warme of juist een koude periode.

Kali voorraad en beschikbaarheid: K-CEC en K-CaCl₂

Kali (K) is net als N en P in verschillende pools in de bodem aanwezig, waarbij de pools verschillen in beschikbaarheid voor planten. K-zouten zijn goed oplosbaar in water. K die direct opneembaar is en voor een groot deel opgelost wordt in de bodem, wordt in Nederland bepaald door extractie met calcium chloride, K-CaCl₂. K die niet direct opneembaar is, is aanwezig in pools die gebonden zijn aan kleimineralen. De binding betreft vooral een vorm waarin kalium tussen kleiplaatjes 'gevangen' wordt en in die positie niet in het bodemvocht kan komen (Zörib et al., 2014). Een deel van de K zit echter zo aan bodemdeeltjes vast dat

het als voorraad kan dienen voor plantopname, omdat het uitgewisseld kan worden met andere (kat)ionen. Deze pool wordt de Cation Exchange Capacity (CEC) genoemd en is een maat voor de beschikbaarheid van K op langere termijn. K-CEC is een indicator voor capaciteit (K die op langere termijn beschikbaar komt), K-CaCl₂ voor de intensiteit (K die direct voor het gewas beschikbaar is).

Grondsoort heeft een grote invloed op het effect van (veel) vocht op de K-voorraad in de bodem. In zandgrond is er weinig gebonden K en is de CEC kleiner dan op kleigronden, omdat er (veel) minder kleiplaatjes aanwezig zijn, hoewel OS ook helpt om de CEC te verhogen. In zandgrond is K zeer mobiel. Bij grote hoeveelheden neerslag zal K op zandgrond gemakkelijk uitspoelen, met name de fractie die gemeten wordt met K-CaCl₂. Op kleigrond is dat veel minder het geval, deels omdat de waterdoorlatendheid van kleigrond lager is dan van zandgrond, maar ook door de genoemde binding van K aan de kleimineralen. In onderzoek naar afwisselend droogte en weer vernatten in alpinegraslanden (Van Sundert et al., 2014) en in het gewas katoen (Sardans and Peñuelas, 2007) bleek de indicator voor plant-beschikbaar K bij droogte lager te zijn dan onder vochtige omstandigheden, maar piekte na her-bevochtiging van de bodem. Dit lijkt op het patroon dat gevonden wordt voor N. Er zit echter een ander mechanisme achter, omdat praktisch alle K in een bodem aan minerale delen zit of in opgeloste vorm aanwezig is en niet gebonden is aan OS, zoals bij N het geval is.

^[1] extractie ammoniumlactaat

^[2] extractie calciumchloride

4.5.2 Invloed van piekbuien

4.5.2.1 Organische stof

Op de bodemindicatoren voor OS wordt geen invloed van piekbuien verwacht.

4.5.2.2 Zuurgraad: pH

Op de bodemindicatoren voor pH-KCl of pH-CaCl₂ wordt geen direct effect verwacht. Mogelijk is er een indirect effect door andere veranderingen in de bodem, bijvoorbeeld verzuring door uitspoeling van NO₃.

4.5.2.3 Stikstof

Op de bodemindicatoren N-totaal en potentieel mineraliseerbaar N worden geen effecten van piekbuien verwacht. Er kan wel een groot effect op N-mineraal verwacht worden. Door piekbuien kan een groot deel van N-mineraal uitspoelen, met name op zandgrond. Op kleigrond kan een verlies van N-mineraal door denitrificatie verwacht worden. N-mineraal is echter een indicator die niet in de BLN geselecteerd is.

4.5.2.4 Fosfaat

Op de bodemindicator P-AL wordt geen invloed van piekbuien verwacht. Een klein deel van de voorraad P die met de indicator P-CaCl₂ wordt gemeten, zou door piekbuien voor een deel kunnen afspoelen of naar het bovenste grondwater kunnen uitspoelen en daardoor kunnen dalen. De indicator P-CaCl₂ vertoont in het veld echter een grote variatie over jaren (Van Middelkoop et al., 2016). Veranderingen zijn daardoor lastig te meten en zijn waarschijnlijk pas na verloop van jaren aan te tonen. Hiervoor zijn geen data of literatuur beschikbaar. In de indicator P-AL zal de verandering relatief minder zijn, omdat het om een kleiner aandeel van P-AL gaat.

Wanneer de bodem enige tijd onder water zou komen te staan, is de verwachting dat de P-CaCl₂ zal dalen en P-AL gelijk zal blijven.

4.5.2.5 Kalium

De bodemindicator K-CaCl₂ zal dalen door piekbuien. De mobiele K, in indicator K-CaCl₂, zal uitspoelen, met name op zandgrond. Op kleigrond zal een piekbui minder snel een neergaande stroom in de bodem veroorzaken en is uitspoeling beperkt. Wanneer er afspoeling plaatsvindt, kan aangenomen worden dat mobiel K wel uit het veld verdwijnt en daarmee de indicator K-CaCl₂ lager zal worden.

Op K-CEC wordt geen direct effect van piekbuien verwacht. Mogelijk dat er, als piekbuien frequent en meerdere jaren voorkomen, dat K uit de K-CEC fractie vrijkomt om het evenwicht met K-CaCl₂ weer te herstellen en daardoor de K-CEC daalt. Hierover is echter geen informatie gevonden.

4.5.3 Invloed van hitte

4.5.3.1 Organische stof

Bij een hogere temperatuur mag verwacht worden dat mineralisatie sneller zal gaan, als ervan uitgegaan wordt dat er wel voldoende vocht is. Er zal een verlagend effect zijn op de indicatoren OS. Dit zal echter pas op termijn van meerdere jaren waarneembaar zijn, omdat de hoeveelheid OS in de bodem groot is.

4.5.3.2 Zuurgraad: pH

Op de bodemindicatoren voor pH-KCl of pH-CaCl₂ wordt geen direct effect verwacht.

4.5.3.3 Stikstof

Vergelijkbaar met de indicator organische stof: mineralisatie van N uit organische stof zal hoger zijn bij een hogere temperatuur, waardoor N vrijkomt die door planten opgenomen wordt of in de winter verloren gaat. Dit zal echter pas na meerdere jaren waarneembaar zijn.

Potentieel mineraliseerbaar N kan sneller mineraliseren door de hogere temperatuur, waardoor N vrijkomt. Omdat de pool potentieel mineraliseerbaar N kleiner is dan N-totaal, volgens Mengel & Kirkby (2001) circa een derde van N-totaal, zou een daling sneller waarneembaar zijn dan N-totaal. Hier is echter geen informatie over bekend.

4.5.3.4 Fosfaat

Op de bodemindicatoren voor fosfaat wordt geen direct effect verwacht.

4.5.3.5 Kalium

Op de bodemindicatoren voor kalium wordt geen direct effect verwacht.

4.5.4 Invloed van droogte

4.5.4.1 Organische stof

De mineralisatie van OS in de bodem vertoont na een droge periode een piek wanneer er weer neerslag valt (zie par. 4.4.1). De indicatoren voor OS in de bodem zullen niet direct na een enkele droge periode lager worden, maar op de lange termijn, wanneer het vaker is voorgekomen en er geen extra OS wordt toegevoegd aan een bodem, bestaat er het risico dat de indicatoren dalen in waarde. Het is beter om die daling te voorkomen, als het verlies aan OS eenmaal vastgesteld kan worden, is er vaak al zoveel gemineraliseerd dat het veel toevoeging van organische materiaal vraagt om terug te komen op een eerder, hoger niveau.

4.5.4.2 Zuurgraad: pH

Op de bodemindicatoren voor pH-KCl of pH-CaCl₂ wordt geen direct effect verwacht.

4.5.4.3 Stikstof

Parallel aan OS is na een droge periode, wanneer er weer neerslag valt, een extra mineralisatie te verwachten van N, omdat die grotendeels in het organische materiaal zit. N-totaal en mineraliseerbaar N zullen sneller dalen dan bij het uitblijven van droge perioden. Het verdient de voorkeur om hier binnen management rekening mee te houden en voor een grotere jaarlijkse aanvoer van organische stof met daarin organische N te zorgen.

4.5.4.4 Fosfaat

Bij droogte komt er een groter deel van het totale fosfaat in de bodem voor als beschikbaar fosfaat. In onderzoek is wel gevonden dat een deel van organisch fosfaat omgezet wordt in beschikbaar fosfaat. Mogelijk is dit ook weer een gevolg van de versnelde afbraak van organische stof die gemeten wordt na een droge periode wanneer er weer neerslag valt. Het is waarschijnlijk dat de toename van beschikbaar fosfaat teruggevonden wordt in de indicator P-CaCl₂, en in de P-AL relatief minder omdat het een kleiner aandeel van P-AL is.

4.5.4.5 Kalium

Bij droogte is plant-beschikbaar K in de bodem lager dan onder vochtige omstandigheden. Net als voor N is het aandeel plant-beschikbaar K weer hoger wanneer er weer neerslag valt. Het mechanisme achter dit effect is echter anders dan bij N, omdat K (vrijwel) niet in organische vorm aanwezig is, zie paragraaf 4.5.1.

4.5.5 Invloed van afwezigheid vorst

Over afwezigheid van vorst is geen informatie gevonden over de invloed op chemische bodemindicatoren. Er wordt geen (directe) invloed op chemische bodemindicatoren verwacht.

4.5.6 Invloed van afwisselend vorst en dooi

Over afwisselend vorst en dooi is geen informatie gevonden over invloed op chemische bodemindicatoren. Mogelijk dat afwisselend vorst en dooi de vertering van moedermateriaal in de bodem vergroot, waardoor de hoeveelheid plant-beschikbaar P en K toeneemt. Dit geldt niet voor N, omdat N voornamelijk uit organische stof komt en niet uit het minerale moedermateriaal.

4.5.7 Invloed van laag vochtgehalte bij start groeiseizoen

De effecten van een laag vochtgehalte bij de start van een groeiseizoen op chemische bodemindicatoren worden verwacht niet anders te zijn dan bij droogte op een ander moment, zie paragraaf 4.5.4.

4.5.8 Herstelvermogen

Het vermogen tot herstel van chemische bodemindicatoren na extreme weersgebeurtenissen is afhankelijk van het onderliggende mechanisme. Voor veranderingen die veroorzaakt worden door verliezen of onomkeerbare omzettingen zal de bodem niet vanzelf herstellen. Wanneer nutriënten door uit- of afspoeling uit de bouwvoor verdwijnen, is dit eigenlijk alleen maar te herstellen met aanvulling van de verliezen, vooral via bemesting. In deze studie zou dat met name gaan om N, P en K.

Wanneer OS en organisch C in een bodem dalen door (tijdelijk) hogere mineralisatie hangt het van de frequentie van deze gebeurtenissen, van gewas en teeltwijze, en van eventueel aanvullende maatregelen af of deze bodemindicatoren zich herstellen.

In grasland is er voortdurend aanvoer van OS door de turnover van de graszode: het hele jaar door sterven wortels en bovengrondse delen af en worden vervangen door nieuwe wortels of plantmateriaal. Het afgestorven materiaal is aanvoer naar de voorraad OS in de bodem. Wanneer een evenwicht tussen aanvoer en afvoer van OS is ontstaan, neemt de waarde van de indicator OS niet verder toe. Wanneer er onder grasland geregeld een versnelde afbraak van OS door extreme weersgebeurtenissen, met droogte en/of hoge temperatuur, zou plaatsvinden, zou dit aangevuld kunnen worden tot het evenwicht door de eigen opbouw van OS. Als de frequentie relatief hoog is, bijvoorbeeld iedere twee jaar, is het ook mogelijk dat het evenwicht op een lager niveau komt te liggen waardoor deze chemische indicator permanent lager wordt.

Op bouwland (akkerbouwgewassen) is de aanvoer of opbouw van OS door de gewassen zelf beperkt. Het OS in de bodem wordt in de praktijk zo goed mogelijk behouden door toediening van organische mest en opname van graan en groenbemesters in de gewasrotatie. Net als onder grasland zal het OS-gehalte in de bodem zich instellen op een evenwicht. Het frequenter voorkomen van droge en/of warme perioden zal naar verwachting ook op bouwland tot een lager OS-niveau leiden.

Zowel op grasland als op bouwland kan dit mogelijk opgevangen worden door een hogere aanvoer van OS van buiten, zoals door bemesting of het onderploegen van een grotere deel van gewasresten, in plaats van afvoer van het land. Hoeveel OS daarvoor nodig zou zijn, is niet bekend, dat zal afhangen van hoeveel OS er extra mineraliseert per gebeurtenis.

De verandering van het aandeel plant-beschikbaar nutriënt zoals dat voor P en K kan voorkomen door verandering van temperatuur en vochttoestand is waarschijnlijk tijdelijk en herstelt zich mogelijk weer wanneer de omstandigheden weer zijn als eerder. Bij P en K lijkt dat na droogte het geval te zijn, maar er is geen informatie gevonden of dat daadwerkelijk gebeurt als de bodemindicatoren uit de BLN worden gemeten.

4.5.9 Robuustheid voor weersextremen

Over het algemeen zijn de chemische bodemindicatoren redelijk robuust voor verschillende bodemomstandigheden. Daar zijn ze ook op geselecteerd in het verleden, want een te gevoelige indicator is niet bruikbaar als basis voor bemestingsadviezen of om voor het hele groeiseizoen als maat voor gewasbeschikbaarheid van nutriënten te dienen. Die robuustheid is echter getoetst onder weersomstandigheden die afgelopen decennia voorkwamen. Als de extremiteiten in het weer frequenter voor gaan komen, zou het kunnen dat de geselecteerde indicatoren anders zullen reageren dan nu voorzien.

4.6 Onderbouwing effecten biologische bodemindicatoren

4.6.1.1 Inleiding

De biologische indicatoren voor bodemkwaliteit die in deze paragraaf over kwetsbaarheid voor weersextremen worden besproken, zijn die welke in het project BLN zijn geselecteerd voor de structurele monitoring van landbouwbodems: bacteriën en schimmels (micro-organismen), aaltjes (nematoden) en regenwormen (Hanegraaf et al., 2019). Klimaat is een sleutelfactor in de geografische verspreiding van deze bodemorganismen, waarbij vooral de jaarlijkse gemiddelde temperatuur en hoeveelheid neerslag drijvende elementen zijn (Song et al., 2017; Seifert, 1960; A'Bear et al., 2014; Lavelle, 1988). Ook het functioneren van bodemorganismen in processen als afbraak van organische stof is hieraan gerelateerd, hetgeen overigens in het geval van micro-organismen al lang bekend is (Waksman & Gerretsen, 1931). Een veranderend klimaat zal dus zeker effecten teweegbrengen op de levensgemeenschap in de bodem en daardoor het functioneren van die bodem beïnvloeden, met andere woorden: de bodemkwaliteit zal zeker veranderen bij een veranderend klimaat. Zo is recent droogte door klimaatverandering aangewezen als wereldwijd de schadelijkste factor met betrekking tot agrarische productie (Gornall et al., 2010; Lesk et al., 2016). De vraag van ons onderzoek is echter welke effecten specifiek worden kunnen verwacht als gevolg van het optreden van extreme weersomstandigheden en in tweede instantie welke maatregelen in het bodembeheer kunnen worden genomen om deze effecten te voorkomen of te verzachten. Hiermee gaan we in op de tijdelijke en kortdurende aspecten van het weer, méér dan op de langetermijnveranderingen van het klimaat. Met het veranderlijke van het weer zijn ook de effecten in principe van kortdurende aard (zolang althans de weersextremen niet het nieuwe normaal worden) en vooral in het geval van biologische indicatoren kunnen zowel structurele aspecten (populatieomvang, voedselweb relaties) als functionele aspecten (biochemische en biofysische processen in de bodem) een grote veerkracht in herstelbaarheid vertonen zodat dergelijke effecten in principe niet eens met reguliere monitoring van bodemkwaliteit te meten zijn (wat overigens ook niet de bedoeling van dergelijke monitoring is). Biologische indicatoren kunnen daarom een *early warning* geven en zijn cruciaal voor het beoordelen van het vermogen van de bodem tot natuurlijk herstel van stressoren (Van Dam et al., 1998; Ritz et al., 2009; Muscolo et al., 2015). Biologische indicatoren geven inzicht in de mate waarin de bodem in staat is zich te herstellen zonder ingrijpen van de boer. Bodembeheer dat is gericht op het vergroten van deze natuurlijke weerstand en het herstelvermogen van de bodem is daarmee principiële anders van karakter dan conventionele maatregelen die zijn gericht op het herstellen van bijvoorbeeld verslemping en ander structuurverlies, erosie, verschraling en andere verliezen van organische stof en nutriënten.

4.6.2 Invloed van piekbuien

Er is veel onderzoek verricht naar de response van tal van bodemorganismen op toenemende neerslag (of juist toenemende droogte), maar dergelijke studies waren vrijwel altijd gefocust op de middellange en langere termijn (>2 jaar), en de invloed van afzonderlijke piekbuien op bodemleven en het herstel wordt tot op heden nauwelijks in de literatuur beschreven. Wel is er een enkele studie gepubliceerd over klimaatpreventief management voor bescherming van het teeltgewas, waarin effecten worden beschreven op bodemorganismen.

4.6.2.1 Micro-organismen

De beschikbaarheid van water is een sleutelfactor voor de snelheid van microbiële gemedieerde biogeochemische processen in de bodem (Parton et al., 1987; Paul & Clark, 1996) en zowel de samenstelling van de microbiële levensgemeenschap als het functioneren daarvan zijn beide gevoelig voor veranderingen in

neerslag (Fierer et al., 2003; Clark et al., 2009). De response van micro-organismen op piekbuien is afhankelijk van de voorgeschiedenis: plotselinge veranderingen in bodemvocht na een periode van droogte kunnen een fysiologische stress op bacteriën veroorzaken als gevolg van de snelle verandering in het waterpotentieel (Harris 1981). Een piekbui zonder voorafgaande droogte geeft minder sterke effecten. Maar niet alle bacteriën zijn gelijk, en er zijn er die dergelijke stress beter verdragen omdat ze adaptieve eigenschappen bezitten, zoals een dikkere celwand om osmotische druk te weerstaan (Kieft et al., 1987; Schimel et al., 2007). Het tolereren van stress vereist echter ook een investering van *resources* (Schimel et al., 2007), zodat taxa die in deze stresstolerantie-strategie investeren een verminderde relatieve fitheid zouden moeten hebben (ook als gevolg van competitieve interacties) wanneer stressgebeurtenissen zeldzaam zijn.

Drie afzonderlijke ecologische strategieën kunnen hierin worden onderscheiden en de tolerantie voor cycli van uitdroging en herbevochtiging neemt toe met blootstelling aan intensievere regenvalpatronen (Evans & Wallenstein, 2014). Deze door het vochtregime geselecteerde ecologische strategieën kunnen voorspelbaar zijn uit de geschiedenis van verstoringen en zijn waarschijnlijk gekoppeld aan eigenschappen die het functionele potentieel van microbiële gemeenschappen beïnvloeden. Voor de lange termijn betekent dit dat met het toenemen van de frequentie van piekbuien, afgewisseld met droogteperioden, de geadapteerde soorten in het voordeel zijn en deze zouden in de toekomst relatief kunnen toenemen. Het is echter niet duidelijk wat dit zal betekenen voor het functioneren van de bodem. Het is daarentegen ook aangetoond dat microbiële gemeenschappen resistenter kunnen worden voor de stress van uitdrogen en herbevochtiging naarmate ze daar vaker aan zijn blootgesteld (Fierer et al., 2003; Evans & Wallenstein, 2012). Over hersteltijden van effecten na een piekbui is op het eerste gezicht minder bekend en lijken er minder gegevens voorhanden in de literatuur, omdat dit onderzoek vereist waarbij over langere tijden herhaalde metingen verricht worden. De hieronder beschreven studie heeft hier expliciet naar gekeken en konden we daarom makkelijk vinden; meer gegevens zouden met dieper gaande literatuurreview moeten worden verkregen.

In een intercropping systeem met bomen waar exploratief alfalfa of soja werd toegevoegd als stikstofbinder (Sichuan, China), werden micro-organismen sterk beïnvloed door experimenteel teweeggebrachte extreme regenval, resulterend in significante reducties in totale microbiële, bacteriële en schimmel-biomassa (Sun et al., 2018). Deze effecten waren van voorbijgaande aard, en de parameters keerden binnen 30 dagen terug tot controleniveaus. Bacteriële populaties vertoonden de sterkste herstelsnelheid, waarschijnlijk vanwege hun snelle groei. Het herstel werd mede bevorderd door DOC en DON in de bodem (Sun et al., 2018), wat suggereert dat effecten – of althans het herstel daarvan – mede afhankelijk zijn van het ontwikkelingsstadium van het gewas.

4.6.2.2 Aaltjes

In hetzelfde Chinese intercropping systeem als hierboven beschreven voor micro-organismen werden ook effecten op de nematoden-gemeenschap vastgesteld als gevolg van gemanipuleerde extreme regenval (Sun et al., 2018). Effect en herstel van nematoden correleerden sterk aan dat van micro-organismen, hetgeen op grond van de trofische relatie ook voor de meeste soorten verwacht mag worden. Deze bottom-up control is ook voor andere ecosystemen al eerder gerapporteerd (Thakur et al., 2014). Sun et al. (2018) zagen interessante trends in de trofische groepen nematoden, namelijk dat sommige *Thonus*- en *Aporcelaimellus*-soorten aanzienlijk in dichtheid konden toenemen, terwijl *Mesodorylaimus*-soorten afnamen. Dit kan te wijten zijn aan de interspecifieke concurrentie tussen deze geslachten die dezelfde colonizer-persisterwaarden hebben. Geslachten binnen dezelfde trofische groep reageerden dus specifiek verschillend op regenvalstress en deze wisselwerking resulteerde in kleine verschillen in trofische groepen als geheel. De extreme regenval veroorzaakte een significante afname in het aantal fungivore nematoden.

Opvallend was ook dat soorten binnen dezelfde geslachten verschillende mate van veerkracht vertoonden, hetgeen wellicht samenhangt met specifieke levensgeschiedenissenmerken en de samenstelling van de vegetatie (Shao et al., 2015). Sun et al. (2018) zagen een herstel van nematoden in het geslacht *Rhabditis*, terwijl *Odontolaimus*-soorten niet herstelden onder een gemengde teeltvorm. Beide geslachten werden echter wel teruggevonden in andere teelten in hetzelfde veldexperiment. Dit resultaat gaf aan dat de identiteit van het gewas doorslaggevend was voor de veerkracht van de gemeenschap bodemaaltjes. In het algemeen stimuleerden vlinderbloemige gewassen de veerkracht van nematoden.

Extreme regenval had echter negatieve effecten op de gewasopbrengst, die deels waren toe te schrijven aan de negatieve effecten op bodemorganismen en nutriënten. Deze bevinding is belangrijk bij duurzaam

landbouwbeheer, omdat het selecteren van geschikte bijbehorende planten de effecten van extreme regenval kan verminderen (Sun et al., 2018).

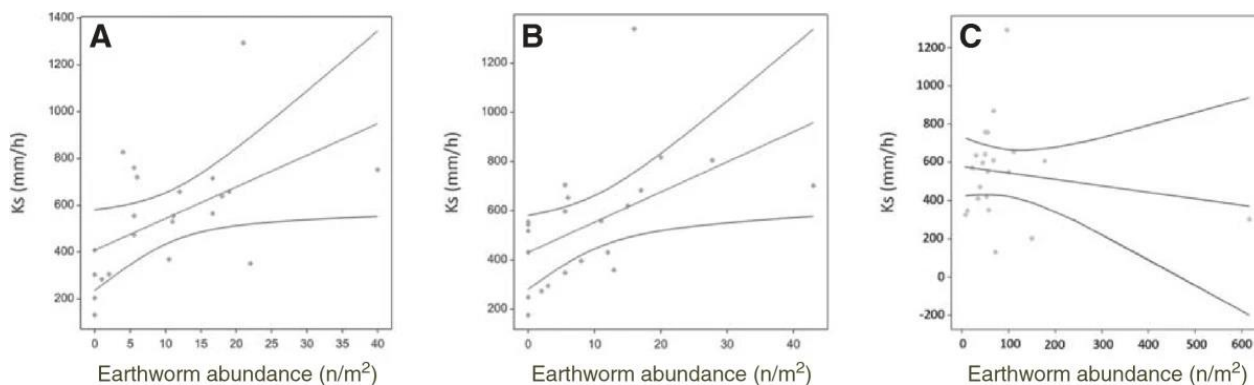
Vermeldenswaard is een recente publicatie van onderzoek uitgevoerd over twee jaar in drie typen grasland (*desert grassland*, *semi-aride shortgrass prairie*, en *mesic tallgrass prairie*) in Noord-Amerika, waar gedurende twee jaar de berekening volgens vijf regimes werd gemanipuleerd met inbegrip van een behandeling 'extreme verhoging' (Ankrom et al., 2022). Omdat deze grasland-ecosystemen elk hun eigen nematoden-levensgemeenschap kennen, elk aangepast aan het lokale klimaat, is het niet verwonderlijk dat de onderzoekers grote verschillen vonden tussen de typen graslanden in de response van verschillende nematoden-indicatoren (Ferris et al., 2001) gebaseerd op de 'colonizer-persister' schaal⁶ (Bongers, 1990) en 'functionele voedingsgroepen' (Yeates et al., 1993). Interessant van deze studie is dat de afzonderlijke soorten worden geëvalueerd op de mate waarin zij als specifieke indicator voor hun habitat konden worden gezien. Zo worden assemblages van soorten beschreven die karakteristiek zijn voor hun gevoeligheid van extreme neerslag. Het onderzoek laat zien dat een extreem verhoogd neerslagregime, althans op de langere termijn, de mesische nematodengemeenschap doet veranderen, zodat deze hoger scoort op de maturity-index ('volwassener' werd) en de soortensamenstelling verschoof in het voordeel van de fungivoren (Ankrom et al., 2022). Het is interessant om te bestuderen of deze soortspecifieke indicatorwaarden bruikbaar zijn bij het beoordelen van bodemkwaliteit in termen van kwetsbaarheid voor extreme regenval in de Nederlandse situatie.

4.6.2.3 Regenwormen

Regenwormen worden beïnvloed door het vochtgehalte en temperatuur van de bodem, wat kan resulteren in veranderingen in graafgedrag, groei, voortplanting en overleving (Wever et al., 2001; Perreault et al., 2006). Klimaatverandering kan daarom grote effecten hebben op deze diergroep, maar ondanks de sleutelrol die regenwormen vervullen in het functioneren van het bodemecosysteem, is er verbluffend weinig onderzoek verricht naar de mogelijke effecten. Er is niettemin wel een review over klimaateffecten beschikbaar (Singh et al., 2019). Tot dusverre is er in klimaatonderzoek veel meer werk verricht aan droogte (zie par. 4.5.4) dan aan intense regenval (Beier et al., 2012), maar beide kunnen majeure effecten veroorzaken.

Pendelaars kunnen de negatieve impact van piekbuien beperken, omdat hun verticale gangen een goede afwateringsroute voor overtollig water vormen en zij meer gangen graven onder herhaalde intense regenval (Andriuzzi et al., 2015). Evenredig met de dichtheid van deze groep (die overigens gevoelig is voor ploegen, en daarom in Nederland niet vaak in akkerland wordt aangetroffen, neemt de afvoercapaciteit toe (Spurgeon et al., 2013). Eenzelfde positief verband werd ook beschreven voor oppervlakkig levende soorten regenwormen (Fig. 4.5.2.3) (Spurgeon et al., 2013). Deze groepen hebben dus een grote indicatorwaarde voor bodemkwaliteit in termen van klimaatrobuustheid (overigens niet alleen met betrekking tot waterregulatie, maar ook voor structuurregulatie via opbouw en stabilisatie van aggregaten en de mitigatie van een ploegzool).

⁶ Levensstrategieën van nematoden worden vaak gecategoriseerd door een colonizers-persisters (cp) schaal van 1 tot 5, waarbij nematoden die als een '1' worden beschouwd opportunisten vertegenwoordigen die snel herstellen wanneer ze gestrest zijn en zich snel voortplanten (de 'colonizers'), terwijl de nematoden die worden aangeduid als een '5' in het algemeen K-strategen zijn die intolerant zijn voor stress en een langere generatietijd hebben, i.e. 'persisters' (Ferris et al., 2001). De aangetroffen levensgemeenschap van verschillende soorten nematoden, elk met een eigen cp-waarde, kan rekenkundig worden gekarakteriseerd door een zgn. 'maturity index' (MI) die de mate van verstoring in het leefmilieu weergeeft (Bongers, 1990).



Figuur 4.2 Waargenomen effect van regenwormen op infiltratiesnelheid voor populatiedichtheid van (A) pendelaars (anekische regenwormen), (B) oppervlakkig levende (epigeïsche) regenwormen, (C) dieplevende (endogeïsche) regenwormen. De rechte lijn toont een lineaire regressie met stippellijnen als 95% betrouwbaarheidsintervallen. Uit: Spurgeon et al. (2013).

4.6.3 Invloed van een hittegolf

4.6.3.1 Micro-organismen

Er is redelijk veel literatuur over de hittebestendigheid van micro-organismen in de bodem, maar deze is vooral gerelateerd aan studies naar effecten van bosbranden. Uit dergelijk onderzoek blijkt duidelijk dat thermische transmissie van de bodem, en de bereikte extreme temperaturen en de duur van de blootstelling, de sleutelfactoren zijn die de effecten op de microbiële gemeenschap bepalen (Barreiro et al., 2020). De temperatuurranges die in dergelijk onderzoek worden toegepast, zijn evenwel niet representatief om de resultaten een-op-een te extrapoleren naar effecten van een hittegolf in Nederland. 'Hitte' is dus maar relatief: bij de temperatuurranges die hier van toepassing zijn, is het biologisch gezien beter te spreken van een 'warmtegolf'. Verder is ook duidelijk dat het initiële vochtgehalte in de bodem sterk bepalend is voor het uiteindelijke effect. Temperatuur en vocht zijn interacterende factoren.

Een Amerikaanse studie in prairiegrasland heeft laten zien dat opwarming van de bodem de relatieve bijdrage van schimmels aan de microbiële gemeenschap kan doen toenemen (Zhang et al., 2005). Deze studie betrof echter een langjarig onderzoek met 2°C temperatuurverhoging, en is dus ook niet representatief om de effecten van een hittegolf te duiden. De studie is desalniettemin vermeldenswaard, omdat een tijdelijke of langdurige verandering in de verhouding bacteriën:schimmels veel invloed kan hebben op tal van microbiële processen in de bodem en zo op termijn de bodemkwaliteit kan beïnvloeden.

4.6.3.2 Aaltjes

Het is al sinds lang bekend dat temperatuur een grote invloed heeft op nematoden in de bodem. De optimale temperatuur voor overleving en vermeerdering is 20-25°C en beneden 5°C of boven 30°C worden ze in het laboratorium significant geremd (Norton, 1979). Bij toenemende temperaturen van een hittegolf in het veld zullen aaltjes al vroegtijdig weggelopen naar diepere bodemlagen, en terugkeren zodra de leefomstandigheden weer verbeteren. De ontwikkeling van nematodenpopulaties kan worden gerelateerd aan 'warmte units', uitgedrukt als het aantal graden Celsius vermenigvuldigd met het aantal uren blootstelling boven een temperatuurgrens waarbij ontwikkeling stagneert (Starr & Mai, 1976). Soorten kunnen nogal verschillen in hun temperatuurpreferentie voor reproductie, maar de drempel voor voortplanting ligt vaak bij 8-10°C. Dat komt overeen met de gemiddelde temperatuur van de bovengrond in Nederland. Het is daarom niet ondenkbaar dat bij een hittegolf de gemeenschap zich wat dieper in de bodem terugtrekt en dat de voortplanting daar gewoon doorgaat. Dit is echter ook afhankelijk van de vochtomstandigheden en het voedselaanbod (meestal micro-organismen of plantenwortels) in de nieuwe microhabitat, waarbij vrij poriewater essentieel is om te kunnen bewegen en foerageren (Griffiths & Caul, 1993).

De meeste plant-parasitische nematoden zijn het actiefst tussen 25 en 30°C. De pathogeniteit is echter meer aan de dichtheid gerelateerd dan aan de temperatuur, en lagere dichtheden kunnen meer schade aanrichten bij lagere temperatuur dan een hoge dichtheid bij hogere temperaturen (Ferris, 1970).

4.6.3.3 Regenwormen

Een flink aantal studies beschrijft effecten van temperatuur op regenwormenpopulaties en hun activiteit. Uit een review van 28 publicaties hierover lijken de effecten van hogere temperaturen nogal tegenstrijdig uiteen te vallen in positief, indifferent of juist negatief, maar bij nadere analyse van de omstandigheden blijkt het bodemvochtgehalte doorslaggevend voor welke kant het opgaat (Singh et al., 2019). Inderdaad werden in een veldstudie over drie jaren tijd negatieve effecten op populatieomvang en biomassa waargenomen daar waar hogere temperaturen gepaard gingen met lagere vochtgehalten van de grond; bij hogere vochtgehalten was het temperatuureffect juist tegengesteld (Eisenhauer et al., 2014).

Verhoogde temperaturen kunnen ook neveneffecten teweegbrengen. Zo kan bij hogere temperaturen de gevoeligheid voor glyphosaat toenemen, vooral bij grotere individuen (Pochron et al., 2019).

Interessant is dat regenwormen ook effecten van klimaatverandering op andere bodemorganismen kunnen mitigeren, doordat zij biotische en abiotische bodemcondities kunnen modereren. Amerikaans veldonderzoek in bouwland (gerst) heeft laten zien dat na één groeiseizoen de soortverscheidenheid aan bodemleven het laagst was bij experimenteel verhoogde bodemtemperaturen en verlaagde dichtheden van regenwormen (Siebert et al., 2019). Het onderzoek liet ook zien dat bij lagere dichtheden aan regenwormen er juist meer fytofage aaltjes en herbivore macrofauna tot ontwikkeling kwamen, hetgeen illustreert dat regenwormen ook een rol vervullen in de natuurlijke ziekte- en plaagwering van de bodem (Siebert et al., 2019). Dit was op zich al bekend van eerdere studies (Stephens et al., 1994; Elmer, 2009; Meghvansi et al., 2011; Plaas et al., 2019), maar is recentelijk dus ook beschreven in de context van klimaatverandering.

4.6.4 Invloed van droogte

4.6.4.1 Micro-organismen

Micro-organismen zijn afhankelijk van beschikbaar water in de bodem, maar bacteriën zijn gevoeliger voor droogte dan schimmels. Voor zowel bodemschimmels als rhizosfeerschimmels is het effect van droogte beperkt tot afwezig (Yuste et al., 2011; Bouasria et al., 2012; Barnard et al., 2013; Fuchslueger et al., 2016), maar bij bacteriën volgt in het algemeen een afname in de totale biomassa (Hueso et al., 2012) en enzymactiviteit (Alster et al., 2013).

Niettemin is er veel aandacht voor de bijdrage van sommige micro-organismen in de rhizosfeer aan het beperken van droogteschade voor het gewas. Dergelijke stressreducerende effecten bij planten zijn beschreven voor diverse droogtetolerante soorten bacteriën en mycorrhiza-vormende schimmels (Marulanda et al., 2009). De mechanismen erachter worden nu pas duidelijk (Ali & Khan, 2021; Kang et al., 2022). Hoewel toepassing in de praktijk eerder nog wisselend succesvol is geweest (Vidal et al., 2022), zouden met de nieuw verkregen inzichten betere managementpraktijken kunnen worden ontwikkeld (Hanaka et al., 2021).

4.6.4.2 Aaltjes

Nematoden leven in een waterfilm van poriewater tussen gronddeeltjes en een droogteperiode maakt ze het leven moeilijk. Bij aanhoudende droogte valt dan ook te constateren dat aantallen individuen en de diversiteit aan soorten geleidelijk afnemen (Yan et al., 2018). Niettemin wordt de *maturity index* nauwelijks beïnvloed, terwijl de soortensamenstelling relatief wel degelijk kan veranderen en geslachten als *Eucephalobus* (bacterievore aaltjes, cp2) en *Helicotylenchus* (plantparasitaire spiraalaaltjes, cp3) kunnen gaan domineren (Yan et al., 2018). Bij het degenereren van de nematoden-levensgemeenschap zwakt ook hun rol in het bodemvoedselweb af, evenals de invloed op C- en N-mineralisatiepatronen (Bouman en Zwart, 1994).

Bij droogte kan de resistentie tegen het anthelminticide benzimidazol toenemen (Papadopoulos et al., 2001).

4.6.4.3 Regenwormen

Extreme droogte heeft grote nadelige effecten op de activiteit, aantallen individuen en biomassa van regenwormen (Singh et al., 2019). Het is waarschijnlijk dat regenwormpopulaties zullen afnemen in de zomer wanneer de zomers warmer en vooral droger worden (Eggleton et al., 2009).

Veldonderzoek over zes jaar in New Forest (Zuid-Engeland) grasland heeft laten zien dat gedurende twee extreme droogteperioden de vijf algemeenste soorten sterk afnamen in aantallen (Eggleton et al., 2009).

Droogteresistentie van cocons is een manier van epigeïsche soorten om droge zomers te overleven. Laboratoriumonderzoek heeft aangetoond dat in het bijzonder de cocons van de oppervlakkig levende soort *Dendrobaena octaedra* resistent zijn voor uitdroging door droogte (en vorst) (Holmstrup en Loeschcke, 2003) en dit kan mede een verklaring zijn voor het snelle herstel van deze soort. Verder onderzoek liet zien dat de dehydratietolerantie van de cocons groter is wanneer de droogte geleidelijk aan optreedt, vergeleken met acuut optredende droogte (Petersen et al., 2008). Er lijkt echter een nogal grote geografisch variatie te bestaan in deze uitdrogingsweerstand, waarbij cocons uit gebieden met strenge, droge winters (zoals Finland) de uitdroging beter weerstaan dan die uit gebieden met warmere en nattere winters (zoals Denemarken) (Holmstrup en Loeschcke, 2003).

Bij toenemende droogte neemt ook de gevoeligheid voor contaminanten toe. Zo is aangetoond voor de in Nederlandse akkers meest algemene soort *Aporrectodea caliginosa* dat normaliter sublethale concentraties koper toch tot grotere mortaliteit leiden bij droogte (Friis et al., 2004; Owojori en Reinecke, 2010). Dit betrof Deens en Zuid-Afrikaans onderzoek, waarvan de resultaten ook voor ons land relevant zijn vanwege de trend in lichte verhoging van koperconcentraties die boven het natuurlijk achtergrondgehalte liggen als gevolg van toepassing van varkensmest (Groenenberg et al., 2006; Klein & Roskam, 2018).

Qua herstelmogelijkheden en hersteltijd is er niet veel gekwantificeerd, maar hersteltijd is naar alle waarschijnlijkheid evenredig met de omvang van de effecten. Vermeldenswaard is een Franse studie in grasland waarin ontwikkelingen na een droogte werden bekeken in relatie tot de aanwezigheid van 'subordinate plant species' (lees: andere planten dan het geteelde gras, bijv. bijgemengde kruiden en natuurlijke 'onkruiden'). De onderzoekers stellen dat verlies van plantendiversiteit als gevolg van droogte waarschijnlijk regenwormgemeenschappen méér zal aantasten en het functioneren van de bodem zal veranderen (Mariotte et al., 2016). Via een combinatie van verwijdering van akkeronkruiden en experimentele droogte (18% reductie van gemiddelde zomerse neerslag) lieten zij zien dat graslandkruiden, indien aanwezig, na droogte toenamen in biomassa en een toename veroorzaakten in de totale biomassa van regenwormen. Aangenomen werd dat deze effecten verband hielden met het behoud van de voedselkwantiteit en -kwaliteit (bijv. stikstofrijk strooisel) van die kruidensoorten. Anekische regenwormen ('pendelaars') profiteerden het meest van de aanwezigheid van graslandkruiden tijdens droogte, vooral *Lumbricus terrestris*, die significant gecorreleerd was met de biomassa van de stikstofrijke plant *Veronica chamaedrys* (Mariotte et al., 2016).

4.6.5 Invloed van afwezigheid vorst

Omgaan met en het overleven van vorst kost energie die ten koste gaat van groei en voortplanting. Het is waarschijnlijk dat populaties zullen toenemen als de wintermaanden natter worden en minder vorstdagen hebben. In veldstudies waarbij vorst achterwege is gebleven, zijn afnames in aantallen bij regenwormen inderdaad niet waargenomen, terwijl in normale wintermaanden met vorst populaties krimpen (Eggleton et al., 2009).

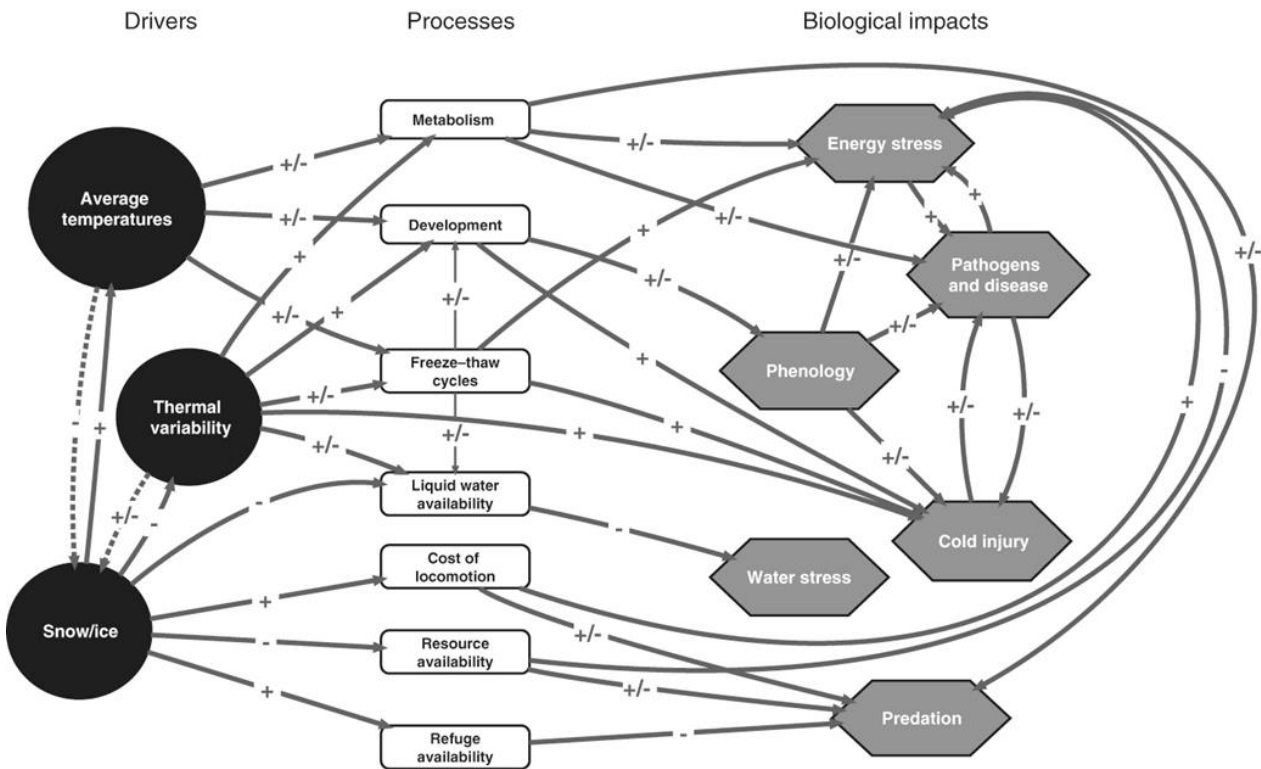
4.6.6 Invloed van afwisselend vorst en dooi

Voorkomen is beter dan bevroren. Een kwakkelwinter maakt het zwaar voor het bodemleven om zich steeds weer opnieuw aan te passen in voorbereiding op het passeren van kritische temperatuurgrenzen: die waarbij bodemwater kan bevriezen en die waarbij biologische weefsels bevriezen. De eerste grens is een fysisch gegeven en voornamelijk bepaald door de zoutconcentratie van het bodemvocht, de tweede grens is biologisch en wordt bepaald door het al dan niet aangemaakt hebben van stofwisselingsproducten die een antivrieswerking hebben. Het passeren van beide grenzen vraagt energie kostende aanpassingen van het organisme, van welke kant die passage ook maar komt.

Niettemin kunnen vries-dooi-cycli juist leiden tot een toename in populatieomvang van allerlei soorten bodemorganismen, terwijl dat niet gebeurt bij strenge vorst, zowel in microcosmos labonderzoek (Sulkava & Huhta, 2003) als in het veld (Dörsch et al., 2004). Micro-organismen en microfauna (protozoa) fluctueren sterker mee met de vries-dooi-cycli dan mesofauna (microarthropoden) (Dörsch et al., 2004).

Er is niet veel veldonderzoek gedaan naar de consequenties van vries-dooi-cycli en er bestaat de nodige kritiek op de onrealistische condities waaronder veel gepubliceerd laboratoriumonderzoek werd verricht, o.a. aangaande gehanteerde vochtcondities en het gebruik van grond die niet in de wintermaanden werd verzameld (Henry, 2007).

Een voorname clou zit in vrij water dat tijdens vorst toch niet bevroert vanwege hoge zoutconcentraties, die bij organismen die in de waterfase leven via osmose tot uitdroging kunnen leiden. Er zijn echter meerdere factoren die eveneens een rol spelen, zoals de aanwezigheid van een sneeuwdek, en de bereikte vorsttemperaturen. Een overzicht van de winterse *drivers* met hun effecten op biologische processen en de gevolgen voor organismen wordt gegeven in Figuur 4.5.6.



Figuur 4.3 Een blauwdruk voor het voorspellen van de biologische effecten van klimaatverandering in de winter op terrestrische organismen. Abiotische oorzaken van klimaatverandering in de winter (zwarte cirkels) veranderen abiotische en biotische processen (witte rechthoeken) die leiden tot biologische effecten (grijze zeshoeken). Tekens op pijlen geven de richting van de relatie aan. De stippellijn geeft aan dat sneeuw- en ijsafnames optreden als reactie op hogere macro-klimatologische temperaturen; alle andere relaties vinden plaats binnen de microhabitat van organismen. Uit: Williams et al. (2015).

4.6.6.1 Micro-organismen

Micro-organismen in bevroren grond hebben te maken met hoge zoutconcentraties in kleine hoeveelheden niet-bevroren water in de microhabitat. Om dan metabolisch actief te kunnen blijven, moeten ze op zijn minst halotolerant en psychrotolerant zijn. De osmotische potentiaal van niet-bevroren bodemwater leidt tot het onttrekken van celvocht (water), tenzij gecompenseerd door accumulatie van osmotisch actieve stoffen. Veel microben lijken deze uitdroging te overleven, aangezien de microbiële biomassa soms hoog is en kan toenemen in de winter. In de late winter echter, voordat de bodemtemperatuur boven nul stijgt, kan er een aanzienlijke afname van de microbiële biomassa in de bodem optreden, die kan worden veroorzaakt door veranderingen in de fysieke toestand van de microhabitat, met name door plotselinge stromingen van smeltwater door kanalen in bevroren grond, waardoor de chemische potentiaal snel verandert. De gedehydrateerde cellen zijn mogelijk niet in staat een snelle stijging in osmotische potentiaal op te vangen, zodat de celmembranen scheuren en de cel lyseert (Jefferies et al., 2010). De overgang vraagt snelle metabole aanpassingen die de nodige energie kosten. Een kwakkelwinter is een opeenstapeling van dergelijke overgangen kort op elkaar; het vereist een 'lange adem' en veel reserve-energie om dit te overleven.

4.6.6.2 Aaltjes

Binnen de grote groep van aaltjes worden diverse diapauze-achtige ruststadia aangetroffen die dienen om ongunstige omstandigheden te overleven. De meest beschreven variant is wel de dauerlarva, die bekend is als een obligaat ontwikkelingsstadium in parasitaire nematoden en ook wel onder vrij levende aaltjes wordt aangetroffen, maar dan getriggerd wordt door ongunstige milieuomstandigheden. Ook periodieke vernieuwing van de cuticula (de 'huid') kan onder ongunstige omstandigheden gepaard gaan met een tijdelijke stop in groei en ontwikkeling (Hand et al., 2016). Geen enkel ruststadium is echter specifiek geschikt als adaptatie aan een voortdurende wisseling van stressvolle omstandigheden zoals in herhaalde vries-dooi-cycli, omdat het intreden van ruststadia gepaard gaat met soms grote fysiologische en zelfs morfologische veranderingen die de energiereserves aanspreken en op den duur volledig kunnen uitputten.

4.6.6.3 Regenwormen

Over vorsttolerantie in regenwormen werd vroeger gedacht dat dit een zeldzaamheid was (Lee, 1985), maar het lijkt toch iets breder voor te komen (Holmstrup & Overgaard, 2007). De meeste regenwormen kunnen koude overleven tot aan de temperatuur waarbij hun lichaamsvloeistoffen bevriezen, maar enkele soorten zijn echt tolerant tegen bevriezing (interne ijsvorming) door het opbouwen van glycogeenreserves en het mobiliseren van glucose als cryoprotector. In Finse populaties van soorten die ook in Nederland voorkomen, is vorsttolerantie vastgesteld (*Aporrectodea caliginosa*, *Dendrobaena octaedra* en *Dendrodrilus rubidus*, maar niet in *Lumbricus rubellus*). Afhankelijk van de opgebouwde reserves konden temperaturen tot -20°C overleefd worden, al wisselde dat per soort (Holmstrup & Overgaard, 2007). Cocons kunnen soms zelfs nog wel veel lagere temperaturen aan. Het is onduidelijk of de Nederlandse populaties dezelfde capaciteit hebben, vooral omdat die vanwege de mildere winters hier minder genetisch op zijn geselecteerd. Zo is recentelijk gebleken dat er genotypische verschillen bestaan tussen potwormen (*Enchytraeus albidus*) van Groenland en Duitsland, die verondersteld worden samen te hangen met genetische adaptatie aan koude stress (De Boer et al., 2017). Het is ook een kwestie van inductie: bij geleidelijk kouder wordende omstandigheden is er meer gelegenheid tot opbouw van glycogeen reserves dan bij een plots invallende vorst. Hoe dan ook is juist het steeds afwisselen van vorst en dooi een extra risico voor het succesvol opbouwen van glycogeen en het mobiliseren van glucose, omdat dit interfereert met het basale energiemetabolisme (Calderon et al., 2009) en een kwakkelwinter kan daarom schadelijker zijn voor overleving dan één langdurige periode van milde vorst.

Een alternatieve overlevingsstrategie bij vorst is te zien bij endogeïsche en anekische soorten die bevriezing voorkomen door diep weg te kruipen (Tiunov et al., 2009). Bij een kwakkelwinter zal de vorst niet diep in de grond trekken en werkt deze strategie dus prima. Het functioneren van de wormen met betrekking tot het coaguleren van bodemaggregaten ligt dan wel stil en bij wisselende dooi en opvriezen vallen deze daardoor verder uiteen dan bij eenmalig bevriezen zoals in een strenge winter.

Er is onvoldoende fundamentele kennis voorhanden om de invloed van afwisselende vorst en dooi op de regenworm-indicator te voorspellen, anders dan dat deze alleen maar negatief kan zijn; herstel is daarbij ook weer afhankelijk van temperatuur en vocht en zal in de regel tot ver in het voorjaar duren. Bioturbatie door wormen en hun bijdrage aan aggregaatvorming en -stabilisatie kunnen in die periode achterblijven, hetgeen gepaard gaat met onderontwikkelde bodemstructuur en minder dragend vermogen. Wanneer echter de indicator pas in het volgende najaar wordt gemeten (zoals te doen gebruikelijk bij monitoring), zullen effecten en impact niet meer te achterhalen zijn, met uitzondering van extreme situaties waarin populaties meer dan gedecimeerd worden en niet volledig herstellen tijdens het groeiseizoen.

4.6.7 Invloed van laag vochtgehalte bij start groeiseizoen

Vochtgebrek beperkt de activiteit van bodemleven en droogte legt die zelfs helemaal stil (zie par. 4.5.4). Bij de start van het groeiseizoen heeft dat mogelijk nadelige gevolgen voor populatiegroei en voor de opbouw van bodemstructuur (aggregaatvorming en -stabilisatie) en ontwikkeling van de rhizosfeer. Aggregaten hebben door winterse kou en neerslag te lijden gehad van fysieke afbraak en de gemiddelde grootte is laag in het voorjaar. Het gewas moet ontkiemen en het wortelstelsel moet zich gaan vormen; kolonisatie van jonge haarwortels door micro-organismen is essentieel voor verdere gewasontwikkeling en fysiologische regulatie van de nutriënten en wateropname door de plant. Effectief wordt het groeiseizoen verkort.

4.6.8 Herstelvermogen

Veerkracht en herstel van bodemleven op weersextremen lijkt een relatief onontgonnen terrein van onderzoek.

Organismen hebben tal van mechanismen om stress het hoofd te bieden, maar elk mechanisme heeft zijn grenzen in belastbaarheid en het kost doorgaans een investering in energie of tijd die niet meer gebruikt kan worden voor de primaire processen als groei en voortplanting. Hoewel, inzetten op voortplanting ten koste van de eigen overlevering is ook een strategie. Maar weersextremen, i.e. stressoren die op een korte termijn optreden, laten weinig tijd voor adaptieve actie over. Strategieën die uitgaan van het principe 'je kunt er maar beter klaar voor zijn', werken beter om met acuut optredende stress om te gaan. Weersextremen vragen dus in principe een andere manier van 'dealen met' dan geleidelijke veranderingen zoals *global warming*, verzilting, verdroging, vernatting, etc. waarbij de milieuverandering op langere termijn speelt.

Als een stressor zich vaak herhaalt, zal er selectie op gaan treden, om te beginnen allereerst op individuen die zich er het beste doorheen slaan door zich aan te passen ('fenotypische adaptatie') en daarmee op termijn ook in genetische samenstelling van de populatie ('genetische adaptatie'). We hebben ons verder niet verdiept in een genetisch toekomstperspectief voor de Nederlandse bodem bij een veranderend klimaat, maar hier zou verdere literatuurstudie waarschijnlijk nog wel enig licht op kunnen werpen.

4.6.9 Robuustheid voor weersextremen

Robuustheid is niet in een enkele maat te vatten, maar moet worden gerelateerd aan specifieke stressoren waarvoor de weerstand verschillend is en waarvoor specifieke verschillen tussen organismen bestaan. Als er iets in algemene zin kan worden gezegd, dan is het dat droogte toch wel de meeste problemen veroorzaakt.

Het is wellicht makkelijker om in relatieve zin landbouwsystemen met elkaar te vergelijken in termen van robuustheid voor de verschillende weersextremen. Zo zouden we conventionele akkerbouw kunnen vergelijken met biologische, kringlooplandbouw en natuurinclusieve systemen. Deze systemen zullen onderling verschillen in bodemkwaliteit, zeker in termen van biologische indicatoren. De verwachting is dat schimmel-bacteriënratio, mycorrhiza's en regenwormen zullen toenemen in respectievelijke volgorde van de genoemde systemen, en dat daarmee betrekkelijk grote veranderingen zullen ontstaan in het functioneren van de bodem en daarmee de bijdrage van de bodem aan ecosysteemdiensten – inclusief de klimaatrobustheid voor levering van die diensten. Dit is evenwel voornamelijk vooral een verwachting, omdat de transitie van de landbouw richting kringlooplandbouw en natuurinclusieve landbouw merendeels nog moet worden gemaakt. Verder literatuuronderzoek kan deze verwachtingen waarschijnlijk wel meer kwantitatief inzichtelijk maken.

4.7 'Sleutelindicatoren' voor de gezondheid van de bodem

In voorgaande paragrafen hebben we de fysische, chemische en biologische bodemindicatoren en hun kwetsbaarheid voor weersextremen elk afzonderlijk beschouwd. Zoals in hoofdstuk 2 reeds gemeld, heeft deze aanpak als blinde vlek dat de processen in de bodem in werkelijkheid niet puur fysisch, chemisch of biologisch zijn, maar vaker juist biofysisch, biochemisch, fysisch-chemisch of zelfs bio-fysisch-chemisch. Bodemkwaliteit als geheel is een resultante van interacties tussen fysische, chemische en biologische structuren en processen en elke indicator geeft uiteindelijk een uitvergroting van één aspect in het grote complex van interacties van het bodemecosysteem. De indicatoren voor bodemgezondheid zijn dus onderling verbonden en ze kunnen ook vergelijkbare reacties – positief of negatief – hebben op bepaalde stressoren (zoals een weersextrem). Ze reageren als het ware gebundeld, al naargelang het soort stressor.

Bij het meten van bodemgezondheid ligt het dan ook voor de hand om gebruik te maken van indicatoren die relevant zijn voor zoveel mogelijk verschillende bodemfuncties en (gebundelde) ecosysteemdiensten, en responsief zijn voor zoveel mogelijk factoren (management zowel als stressoren, inclusief weersextremen) die het functioneren van de bodem kunnen beïnvloeden. Dergelijke 'sleutelindicatoren' zouden op basis van beperkte meetinspanning een maximum aan informatie kunnen geven. In het geval van weersextremen als

stressor en agrarische productie als primair te beoordelen ecosysteemdienst, kunnen voor die afgebakende vraagstelling enkele sleutelindicatoren worden onderscheiden (Tabel 4.3) als de best toegesneden selectie uit een grote verscheidenheid aan indicatoren voor de toestand van de bodem in het algemeen. We baseren deze analyse op de hiervoor beschreven effecten van chemische, fysische en biologische indicatoren op de verschillende weersextremen. Daarbij is het goed te bedenken dat de daar in beschouwing genomen indicatoren op zichzelf al een inperking vormden, namelijk zoals geselecteerd onder de BLN ten behoeve van monitoring van landbouwbodems en gefocust op ecosysteemdiensten die primair van agrarisch belang worden geacht. De BLN-indicatoren zijn op zich al sleutelindicatoren.

Indicatoren voor bodemgezondheid moeten voldoen aan meerdere criteria (1-3); sleutelindicatoren moeten bovendien voldoen aan extra criteria (4, 5):

1. Causaliteit: kwetsbaar voor, en onderscheidend vermogen voor specifieke weersextremen of praktijkmaatregelen
2. Responsetijd: snel reagerend op weersextremen en vermogen tot snel herstel, in afspiegeling van het functioneren van het bodemecosysteem
3. Robuustheid: meetbaar en reproduceerbaar, met voldoende achtergrondgegevens voor interpretatie
4. Ecologische productiefuncties: gekwantificeerde relaties met (zo veel mogelijk) bodemfuncties en ecosysteemdiensten
5. Sleutelrol: ecologische verbondenheid met andere indicatoren via gekende mechanismen

Wanneer weersextremen impact hebben op bodemgezondheid (het actueel functioneren van de bodem in het licht van beoogde bodemfuncties en ecosysteemdiensten), dan moeten indicatoren – en zeker de sleutelindicatoren – het effect op onderliggende processen in de bodem laten zien. Zoals in paragraaf 4.4 tot en met 4.6 uiteen is gezet, hebben de verschillende weersextremen een uiteenlopend scala aan mogelijke effecten op tal van indicatoren. Het is dus nogal veel gevraagd van een enkele sleutelindicator om dat allemaal te kunnen laten zien. Zoals al eerder betoogd, bestaat er geen enkele indicator voor bodemgezondheid die overal en altijd toepasbaar is. Het idee van een sleutelindicator vraagt daarom wel heel veel – misschien wel te veel. Het is niet de eerste keer dat er beleidsmatig wordt gevraagd om zo'n simpele, allesomvattende indicator en ook bij deze nieuwe toepassing met betrekking tot effecten van weersextremen zijn we terughoudend in onze verwachtingen van wat hier wetenschappelijk mogelijk is. Niettemin kunnen de effecten op indicatoren zoals beschreven in hoofdstuk 4 worden geëvalueerd in een poging om sleutelindicatoren te identificeren die inderdaad een brede gevoeligheid en herkenbare response op de verschillende weersextremen hebben. Bovengenoemde criteria spelen daarbij een cruciale rol: aan hoe meer criteria wordt voldaan, des te beter. Daarnaast speelt mee de afweging of de indicator snel reageert bij een veranderende conditie van de bodem en ook een snel herstel zou kunnen laten zien, zonder gevoelig te zijn voor kortetermijnfluctuaties (zoals dag-nachtritmië en normale weersveranderingen) in het veld. Volgens deze uitgangspunten werd de analyse van indicatoren (hoofdstuk 4) geëvalueerd en zijn we tot een synthese gekomen van indicatoren die mogelijk kunnen fungeren als sleutelindicator voor vervolgonderzoek in de praktijk. Tabel 4.3 geeft een overzicht van indicatoren die als relevantst uit deze evaluatie naar voren komen.

Uit deze synthese komen regenwormen als enige indicator naar voren die aan alle vijf criteria beantwoordt. Deze dieren zijn dan ook *keystone species*, in de klassieke betekenis van het woord: ze beïnvloeden het hele ecosysteem, en zonder hen zou het systeem er anders uitzien. Onder de micro-organismen bevinden zich ook keystone species (zoals nitrificeerders en ammonificeerders), maar die worden op zichzelf niet gemeten, omdat de indicator de gehele biomassa van schimmels en/of bacteriën omvat. Micro-organismen en regenwormen samen zijn de grote motor achter de vorming en stabilisatie van bodemaggregaten. Die abiotische indicator is daarom een goede maat voor de functionele activiteit van de biologische indicatoren (die op zich als biomassa worden gemeten en niet als activiteit).

De shortlist van potentiële sleutelindicatoren voor effecten van weersextremen op bodemgezondheid (Tabel 6.1) is op dit moment volledig hypothetisch, en het is dan ook wenselijk om validerend onderzoek te doen om de bruikbaarheid en robuustheid te toetsen onder relevante Nederlandse omstandigheden van weersextremen en landbouwpraktijken. Om sleutelindicatoren op hun waarde te toetsen en te bezien dat er ook daadwerkelijk ecologische verbondenheid met andere indicatoren is (criterium 5), zouden die andere indicatoren óók moeten worden gemeten. Dat vraagt veel budgettaire ruimte. Zo niet, dan blijft het concept

slutelindicator ongevalideerd en loopt het veldonderzoek het risico om met onvoldoende breedte aan indicatoren de effecten van weersextremen op de bodemgezondheid te bestuderen. Ook blijven daardoor mogelijk blinde vlekken bestaan die een goede beoordeling belemmeren. Inzoomen uit kostenoverwegingen heeft altijd het risico van informatieverlies en wordt pas zinvol wanneer bekend is welke informatie dan verloren gaat: bewuste of onbewuste onwetendheid.

Tabel 4.3 Sleutelindicatoren voor bodemgezondheid in relatie tot weersextremen en voor de landbouw belangrijke bodemfuncties.

Indicator	Bodemfunctie	Toelichting
Aggregaatgrootte en -stabiliteit	<ul style="list-style-type: none"> • Dragend vermogen • Doorwortelbaarheid • Waterinfiltratie • Nalevering bodemvocht • Temperatuurregulatie 	Criteria: 1,2 Resultante van biofysische, biochemische en fysisch-chemische processen. Snelle afbraakresponse, opbouw gerelateerd aan regenwormen en micro-organismen. Hersteltijd: weken tot maanden.
Regenwormendichtheid en soortensamenstelling	<ul style="list-style-type: none"> • Opbouw, afbraak organische stof • Doorwortelbaarheid • Tegengaan korstvorming • Waterinfiltratie • Aggregaatvorming en -stabilisatie • Bevordering microbiële activiteit • Ziektewering 	Criteria: 1,2,3,4,5 Regenwormen zijn in functioneel opzicht sleutelsoorten van het ecosysteem, reguleren abiotische processen en biologische activiteit – ook bovengronds. Kwetsbaar voor bodembewerking, bestrijdingsmiddelen en kunstmest. Hersteltijd: weken tot maanden.
Microbiële biomassa met expliciet mycorrhiza, schimmels:bacteriën-ratio.	<ul style="list-style-type: none"> • Vocht- en nutriëntenvoorziening van het gewas • Afbraak organische stof • Aggregaat vorming en -stabilisatie • Ziektewering 	Criteria: 2,3,4 De basis van het bodemvoedselweb, ratio schimmels:bacteriën bepaalt primaire energie- en nutriëntenstromen. Kwetsbaar voor bodembewerking, bestrijdingsmiddelen en kunstmest. Hersteltijd: weken.

4.8 Aandachtspunten bij de monitoring

Onderzoek naar effecten van weersextremen op bodemgezondheid kan zich richten op de directe gevolgen van extreem weer en op het herstel daarvan. Indicatoren zijn daarbij slechts een hulpmiddel: het gaat niet om het effect op een specifieke indicator en of en hoe deze zich herstelt, het gaat er meer om of de bodemfuncties in het geding komen en hoe snel die zich herstellen. Bodemgezondheid is per slot van rekening het actuele vermogen van de bodem om ecosysteemdiensten te leveren, meer dan alleen de hoeveelheid organische stof of het aantal regenwormen per vierkante meter. Diensten worden op de langere termijn genoten en ook over een langere termijn beoordeeld (niet zozeer per dag of per week, de tijdschaal waarop weersextremen zich doorgaans voltrekken), en daardoor bestaat de gerede mogelijkheid dat andere storende factoren eveneens hun weerslag hebben gehad op de levering van een bepaalde ecosysteemdienst. Oorzaak en gevolg zijn 'onder de streep' lastig vast te stellen, maar dat kan wel veel eenduidiger op het niveau van de indicatoren. Het is dan wel zaak dat de relatie van een indicator met de ecosysteemdienst goed bekend is. Dat is helaas lang niet altijd het geval. Dit is het wetenschappelijke spanningsveld waarin monitoring van bodemgezondheid zich momenteel bevindt: de beleidsmatige definitie van bodemgezondheid impliceert een enorme uitdaging voor de vertaling van concrete bodemgegevens naar het niveau van ecosysteemdiensten.

Als we op korte termijn de effecten van weersextremen in de praktijk willen gaan meten, moeten we roeien met de riemen die we nu hebben. De indicatoren van de BLN zijn ons basismateriaal, gegeven het uitgangspunt om aan te sluiten bij de bestaande praktijk van meten van bodemkwaliteit van landbouwgronden in Nederland. Toepassing daarvan stelt al direct beperkingen aan het type infrastructuur dat voor zulk onderzoek kan worden gebruikt, met name wanneer we het herstel van effecten ook willen kunnen beoordelen. Onderzoek zou zowel in het vrije veld, in kassen of in klimaatkamers kunnen worden uitgevoerd, waarbij vooral de ruimtelijke schaal en de mate van controle over experimentele

omstandigheden van elkaar verschillen. Het gebruik van *mesocosms*⁷ bijvoorbeeld in kas- of laboratoriumonderzoek heeft als beperking dat herstel alleen kan optreden door de nog aanwezige organismen in de afgesloten mesocosm en er geen rekolonisatie vanuit diepere bodemlagen of nabije akkerranden mogelijk is. Onderzoek in het open veld lijkt daarom het meest realistisch om sleutelindicatoren te toetsen teneinde ook herstel te kunnen beoordelen.

Anderzijds heeft veldonderzoek ook zijn beperkingen als het aankomt op het experimenteel manipuleren en nabootsen van extreme weersomstandigheden. Beregenen gaat nog wel, maar droogte en temperatuurbehandelingen worden lastig en kunnen gemakkelijker en goedkoper onder gecontroleerde laboratoriumomstandigheden uitgevoerd worden.

⁷ Een *mesocosm* is een experimenteel systeem in de open lucht waarbij de natuurlijke omgeving onder gecontroleerde omstandigheden wordt onderzocht. Op die manier vormen *mesocosm*-studies een schakel tussen veldonderzoeken en sterk gecontroleerde laboratoriumexperimenten.

5 Beheermaatregelen bij weersextremen

5.1 Beheermaatregelen in de melkveehouderij

5.1.1 Inleiding

De melkveehouderij is, in tegenstelling tot de meeste andere veehouderijsectoren, grondgebonden, met landgebruik voor ruwvoerproductie en weidegang. Hiermee is deze sector ook direct afhankelijk van de bodemkwaliteit. Een gezonde bodem versterkt de uitgangspositie voor een voldoende ruwvoerproductie van een goede kwaliteit en is daarmee een belangrijke basis voor het melkproductieniveau en bedrijfsrendement. Met het oog op de toekomst is een goede bodemkwaliteit niet alleen belangrijk voor de bedrijfsvoering, maar ook voor aspecten als waterberging, de kwaliteit van grond- en oppervlaktewater en koolstofvastlegging en biodiversiteit (habitat en landschap). In interviews met agrariërs uit voor WUR bekende praktijknetwerken is expliciet gevraagd naar maatregelen en waarnemingen ten aanzien van bodem en teelt. Maatregelen genomen in de stal, rondom de koe of in de algehele bedrijfsvoering zijn niet meegenomen.

Om een indruk te krijgen in hoeverre melkveehouders last hebben van de in hoofdstuk 3 gedefinieerde weersextremen en wat zij hiertegen doen, zijn vijf online-interviews gehouden. Deze interviews zijn gehouden met melkveehouders die boeren op zand-, klei- of lössgrond en in verschillende regio's in Nederland. De melkveehouders zijn geselecteerd vanuit de projecten Netwerk Praktijkbedrijven en Koeien & Kansen en waren bekend met het onderwerp. Een van de bedrijven betrof proefboerderij De Marke, dat ook heeft bijgedragen aan de opzet van de interviews.

Met deze groep melkveehouders werd verwacht een goed beeld van maatregelen te krijgen, maar had als beperking dat hun bekendheid met het onderwerp groter is dan dat van de gemiddelde melkveehouder. Daarom is tijdens de interviews ook aandacht besteed aan ervaringen van hun collega-boeren in de betreffende regio.

Uit de gesprekken zijn de maatregelen en ervaringen met weersextremen opgehaald en deze zijn verdeeld in preventieve en reactieve maatregelen. Een preventieve maatregel voorkomt het nadeel van een weersextreem, zoals het realiseren van een weerbare bodem. Een reactieve maatregel wordt ingezet nadat het extreem zich heeft voorgedaan, om de schade hiervan te beperken/te herstellen.

5.1.2 Watermanagement naar het boerenerf

Praktijkervaringen en -observaties bij extremen

Zoals in bovenstaande paragraaf reeds werd aangegeven, wordt in de melkveehouderij anders geacteerd en gedacht over weersextremen dan in de akkerbouw. In de melkveehouderij heeft het management rondom weersextremen vooral betrekking op waterbeheer (drainage, slootpeilbeheer en beregenen), graslandgebruik (bemesten, weiden en maaien) en ruwvoerwinning (gras, snijmaïs, overige ruwvoergewassen en aanvullend ruwvoeraankoop). Duurzaam bodembeheer gaat een steeds grotere rol spelen om voldoende ruwvoer te winnen van een goede kwaliteit, met zo min mogelijk verlies van nutriënten.

De geïnterviewde melkveehouders gaven aan minder direct geraakt te worden door de invloed van weersextremen op de bodem dan akkerbouwers, omdat grasland (grootste deel van het bedrijfsareaal), beter dan bouwland, bestand is tegen weersextremen en een ruwvoertekort te ondervangen is met het aankopen van extra voer. De grasgroei en het graslandgebruik worden weliswaar belemmerd, maar gras kan beter herstellen vergeleken met akkerbouwteelten.

Daarbij wordt niet elk geformuleerde weersextreem altijd gezien als een extreme situatie. Zo worden de kwakkelwinter en afwezigheid van vorst enkel op kleigronden als vervelend ervaren, maar niet als een belemmering. Er wordt niet bewust iets gedaan om de nadelen hiervan te voorkomen of te verhelpen. Melkveehouders in andere regio's vinden afwezigheid van vorst zelfs voordelig, omdat de grasgroei dan eerder op gang komt.

Een onderwerp dat veel genoemd werd, dat uitstijgt boven het eigen erf en bedrijfsvoering, is het regionale watermanagement. Een aantal melkveehouders noemde dat het waterschap vaker het boerenbedrijf benadert om water op te kunnen vangen, zowel om de vochtvoorziening voor gewasgroei te bevorderen als

het bergen van water om afvoerpieken en wateroverlast elders te beperken. Voorheen was het watermanagement in Nederland voornamelijk gericht op afvoer, maar door toenemende neerslagtekorten wordt wateropslag steeds belangrijker.

Deze verschuiving biedt kansen voor de melkveehouder, zowel ten aanzien van het beheersen van weersextremen alsmede het leveren van een maatschappelijk dienst.

In Tabel 5.1 staat een visueel overzicht van de mate waarin de geïnterviewde melkveehouders overlast van de weersextremen ervaren.

Tabel 5.1 *Mate van overlast die de geïnterviewde melkveehouders ervaren van de verschillende weersextremen ten aanzien van bodem en teelt. Wit betekent dat geen overlast wordt ondervonden, donkerrood betekent dat de melkveehouder veel overlast ondervindt.*

Teelt	Klei Groningen	Klei Zeeland		Zand Brabant		Zand Oost-Nederland		Löss Zuid-Limburg	
	Gras	Gras	Snijmais	Gras	Snijmais	Gras	Snijmais	Gras	Snijmais
Piekbui									
Droogte									
Hitte									
Droogte start groeiseizoen									
Afwezigheid van vorst/ kwakkelwinter									

Piekbuien

Vooraf op kleigrond wordt overlast van piekbuien ondervonden. Het water zakt minder snel de bodem in, doordat de bodem dichtslaat door grote hoeveelheden neerslag in een korte tijd. Wanneer piekbuien in het voorjaar vallen, kan door dit dichtslaan een korst ontstaan, waardoor de opkomst van een gewas wordt bemoeilijkt. Toch viel de schade van piekbuien op de betreffende melkveebedrijven mee door het grote aandeel gras. Gras kan meerdere dagen onder water staan zonder dat het afsterft.

Op zandgrond is het risico kleiner, maar bij hevige piekbuien kan ook hier de bodem dichtslaan en voor het verlies van meststoffen zorgen. Veel impact of gewasschade was hier nauwelijks aan de orde en gaf nooit blijvende schade.

Op lössgrond kunnen piekbuien vooral op onbedekte grond erosie veroorzaken. Zeker in de hellende gebieden wordt veel aandacht besteed aan wateropvang en erosiebestrijding.

Droogte

Op zandgrond is droogte het nadeligste weersextrem voor de melkveehouderij. Er wordt in toenemende mate berekend om de ruwvoerproductie op peil te houden. Door droogte op grasland is de productie lager, is het herstel vaak langzaam en neemt de onkruiddruk toe. Bij gras is droogte in het voorjaar tot juni het nadeligst vanwege de dan hoge groei- en voederwaardepotentie. Droogte in snijmais geeft ook opbrengstvermindering, maar droogte tijdens de kolfzetting en korrelvulling (half juli tot half augustus) kan de teelt doen mislukken door het lage kolfaandeel en de verminderde zetmeelopbrengst.

In de klei- en lössregio's zijn de problemen door droogte minder groot dan in de zandregio, vanwege de doorgaans hogere capillaire opstijging vanuit de ondergrond en het grondwater. In uitgesproken droge jaren, zoals in 2018 en 2019, ontstaat ook op deze gronden droogte. Op kleigrond treedt scheurvorming op, waardoor als het weer gaat regenen, neerslag versneld wordt afgevoerd en het relatief lang duurt voordat de bodem weer bevochtigd raakt. Het herstel na droogte duurt dan langer dan op zandgrond. Als positief aspect van droogte werd genoemd dat scheurvorming, vergelijkbaar met vorst, de structuur kan herstellen. Op de noordelijke klei luidt een boerenwijsheid: "Een droge zomer doet meer voor je bodemstructuur dan een strenge winter." Op löss wordt de bodem door droogte hard, maar scheurt niet.

Hitte

Bij hitte ontstaat geen specifieke overlast ten aanzien van de bodem en worden geen specifieke maatregelen genomen. Veelal gaat hitte gepaard met droogte en wordt door hitte het vochttekort vergroot. Daarbij stopt de groei van gras bij temperaturen boven de 25°C. Snijmais blijft als tropisch gewas wel productief, doordat

het metabolisme voornamelijk aangepast is aan droogte en hitte (C4-plant), omdat het fotorespiratie vermijdt (Furbank and William, 1995; Wang et al., 2012). C4-planten zijn hierdoor beter aangepast aan een warm klimaat dan C3-planten (grassen en reguliere akkerbouwgewassen) die vooral in gematigde streken voorkomen. Zowel het gebruik van water als stikstof is efficiënter bij C4-gewassen.

Laag vochtgehalte bij start groeiseizoen

Droogte bij de start van het groeiseizoen wordt vooral op zandgrond als een probleem ervaren door de veelal diepere grondwaterstanden en de geringere vochtlevering. Een voldoende vochtbeschikbaarheid is vooral belangrijk voor een kiemend gewas en wordt bij bestaand grasland als minder beperkend ervaren.

Op kleigronden is de beschikbaarheid van vocht op bouwgrond medeafhankelijk van de bodemstructuur en of die al of niet is verbeterd door vorst in de winter. Droogte bij de start van het groeiseizoen kan zodoende worden versterkt door afwezigheid van vorst of een kwakkelwinter (zie volgende paragraaf). Door een vochttekort in het voorjaar wordt de toplaag op bouwland hard en droog. Dit geeft een slecht zaaibed (veel kluiten), wat nadelig is voor de kieming van een gewas. Overigens is op kleigrond een te nat voorjaar een groter probleem dan droogte vanwege structuurbederf.

Afwezigheid vorst en kwakkelwinter

De afwezigheid van vorst is een weersextreem waar beperkt over is gesproken tijdens de interviews. De melkveehouders op zand- en lössgrond zagen afwezigheid van vorst niet als een probleem, of zelfs als positief, omdat het gras dan een snelle start heeft in het voorjaar. Op kleigrond is de afwezigheid van vorst wel een probleem, zeker op bouwland. Door onvoldoende structuurherstel vertraagt de infiltratie van neerslag in de bodem en duurt het relatief lang voordat het land berijdbaar is. Het uitrijden van drijfmest op grasland en bodembewerkingen op bouwland worden hierdoor vertraagd. Doordat structuurherstel achterblijft, wordt de bodem zowel gevoeliger voor droogte als vernatting in het voorjaar.

5.1.3 Reactief management bij weersextremen

Een overzicht van de uit de gesprekken opgehaalde reactieve maatregelen op weersextremen staat in Tabel 5.2. Daarbij is aangegeven of de geïnterviewde melkveehouders de maatregelen wel of niet toepassen en als maatregelen niet besproken zijn, is dit ook aangegeven.

Tabel 5.2 Overzicht van de reactieve maatregelen die in de interviews met melkveehouders naar voren kwamen. 0=niet besproken, 1=wordt niet toegepast, 2=wordt toegepast, 3=wordt vaak toegepast.

	Klei Noord		Klei Zuid-West		Zand Zuid		Oost, Zand		Zuid, löss	
	gras	gras	snijmais	gras	snijmais	grasland	snijmais/ teelten	gras	snijmais/ teelten	
Uitstellen bewerkingen	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
Droogte										
'Van de bodem afblijven'	0	0	0	2	2	2	2	2	2	
Beregenen	1	1	2	3	3	2	2	1	1	
Stuwtjes bedienen	1	2	2	1	1	1	1	1	1	
Mestgift uitstellen	0	2	2	0	0	0	0	0	0	
Hittegolf										
'Van de bodem afblijven'	0	0	0	0	0	3	3	0	0	
Koeien naar binnen	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
Geen drijfmest uitrijden	2	0	0	0	0	0	0	0	0	
Bodem bedekt houden	0	0	0	0	0	3	1	0	0	
Vochttekort start groeiseizoen										
Beregenen	1	1	2	1	1	1	1	1	1	
Mestgift uitstellen	0	2	1			2	2	0	0	
Piekbui										
'Van de bodem afblijven'	3	3	3	2	2	2	2	3	3	
Stuwtjes bedienen	1	2	2	1	1	0	0	1	1	
Geultjes of greppel	2	1	1	1	2	1	0	1	1	
Uitstellen bemesting	3	3	3	2	2	2	2	3	3	

'Van de bodem afblijven'

Door iedere melkveehouder werd het uitstellen van bewerkingen bij het voordoen van een weersextreem genoemd. Deze reactieve maatregel is op alle weersextremen van toepassing. Als een bodem te nat, te droog of waarvan de structuur niet goed hersteld is, moet worden opgepast met het berijden met machines, bodembewerking en het weiden van vee. Het weide-, bemestings- en maaibeleid wordt dan ook uitgesteld en aangepast. Bij aanhoudende droogte wordt weiden, bemesten en maaien uitgesteld om schade aan de graszode te voorkomen. Bij vernatting moet het vochtgehalte van de bodem voldoende zijn gedaald voordat de bodem 'bekwaam' is voor werkzaamheden. Op klei- en lössgronden is vooral vernatting en op zandgronden is vooral droogte een risico. Tijdens hitte worden melkkoeien bij voorkeur binnengehouden om hittestress te vermijden of te verminderen.

De geïnterviewden observeren in het veld de staat van de bodem en bepalen mede aan de hand van weersvoorspellingen hoe hierop te anticiperen. Bij droogte is op grasland bijvoorbeeld het uitgangspunt dat wanneer het gras onder de voeten begint te kraken het niet meer betreden of bereden moet worden. Het gewas is hierbij leidend en niet de bodem. Bij vernatting daarentegen is de bodem leidend in de uitvoering van bewerkingen om structuurbederf te voorkomen en niet het gewas.

Beregemen

Beregemen wordt ingezet bij droogte en hitte. Met beregenen wordt het vochtgehalte in de wortelzone aangevuld. Het bepalen van waar, wanneer en hoeveel beregend moet worden, gebeurt nog vaak intuïtief. Beregeningsadviezen en bodemvochtsensoren kunnen helpen om de effectiviteit van beregening te vergroten. Of beregend wordt, hangt niet alleen af van de locatie, maar ook van vergunningen en restricties rondom het onttrekken van grond- en oppervlaktewater.

Beregemen kan naast reactief ook meer preventief worden ingezet. In dat geval wordt al gestart met beregenen voordat het gewas droogtestress laat zien. Meer beregenen aan de start van het groeiseizoen wordt door de geïnterviewde melkveehouders als mogelijk effectief gezien tegen vroegtijdige droogteschade. Aandachtspunt bij maïs is wel dat te veel vocht aan de start een negatief effect kan hebben op de ontwikkeling van het wortelstelsel. Veelal gebeurt het preventief beregenen om de beschikbare capaciteit van de beregeningsinstallatie zo goed mogelijk te benutten.

Vooraf op de oostelijke en zuidelijke zandgronden wordt beregening ingezet, maar door de recente droge jaren (2018, 2019 en 2020) wordt ook op kleigrond vaker beregend of wordt overwogen dit in de toekomst in te gaan zetten. De beregeningsbehoefte kan verminderd worden door in het winterhalfjaar zo veel mogelijk water vast te houden met stuwtjes in watervoerende sloten, waardoor de voorjaarsgrondwaterstand langer op een hoger peil gehouden kan worden en het gewas hiervan profiteert door middel van capillaire opstijging. Dit zou gepaard moeten of kunnen gaan met het accepteren van relatief hoge waterstanden in het voorjaar, die wellicht betekenen dat bodembewerking of mesttoediening wat vertraagd kan plaatsvinden.

Wateroverlast verminderen

Een te geringe infiltratiecapaciteit van de bodem wordt zichtbaar door plassen op het land. Het graven van greppels naar een naburige sloot is een noodmaatregel om water versneld via het maaiveld af te voeren. Dit heeft overigens als belangrijk negatieve consequentie dat hiermee ook nutriënten worden afgevoerd, wat het risico op eutrofiëring van het oppervlaktewater sterk vergroot. Stuwtjes in secundaire watergangen (in eigen beheer) die bedoeld zijn om water vast te houden, kunnen tijdelijk omlaag gezet worden om wateroverlast te verminderen.

Bodem bedekt houden

Op grasland wordt bij droogte en/of hitte de bestaande biomassa bij voorkeur niet gemaaid om de bodem bedekt te houden en daarmee de directe bodemverdamping en sterke opwarming zo veel mogelijk te remmen. Bediscussieerd is of het bedekt houden van de bodem bij snijmaïs en eventueel andere ruwvoerteelten ook de invloed van hitte verder kan beperken en of dit nog andere voordelen kan hebben op het gebied van voorkomen van wateroverlast, het verbeteren van de bodemstructuur en organische stofvoorziening. Zie verder paragraaf 5.1.4 (preventieve maatregelen).

5.1.4 Preventieve Maatregelen voor vermindering kwetsbaarheid

Een overzicht van preventieve maatregelen op weersextremen staat in Tabel 5.2. Daarbij is aangegeven of de geïnterviewde melkveehouders de maatregelen wel of niet toepassen. Tevens is aangegeven als maatregelen niet besproken zijn (score 0).

Tabel 5.3 Overzicht van preventieve maatregelen, in gevallen van bepaalde weersextremen, die in de interviews met melkveehouders naar voren kwamen. 0=niet besproken, 1=wordt niet toegepast, 2=wordt toegepast, 3=wordt vaak toegepast.

	Klei Noord		Klei Zuid-West		Zand Zuid		Oost, Zand		Zuid, löss	
	gras	gras	snijmais	gras	snijmais	gras	snijmais	gras	snijmais	
Droogte										
Minder diep zoden bemesten	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Water vasthouden met stuw/waterberging	1	1	1	3	3	0	0	1	1	1
Drainage	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1
Vroeg inzaaien	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
Droogte start groeiseizoen										
Water vasthouden door stuw/in gebieden	1	1	1	3	3	0	0	2	2	2
Na het zaaien aanrollen	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Groenbemester vroeg onderwerken	1	0	0	0	3	0	0	0	0	0
Dieper zaaien bij goed verkruid bed	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0
Piekbuien										
Vlakleggen maaiveld	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Groter aandeel grasland telen	3	2	2	1	1	1	1	2	2	2
Sloot schoonhouden bevordering afvoer	0	0	0	0	0	2	2	0	0	0
Ruitzaai in maïs	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3
Inrichten waterbuffers	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2
Drainage	3	2	2	1	1	0	0	1	1	1

Tabel 5.4 Overzicht van genoemde preventieve maatregelen ter bevordering van weerbaarheid tegen weersextremen in het algemeen (0=niet besproken, 1=wordt niet toegepast, 2=wordt toegepast, 3=wordt vaak toegepast).

	Klei Noord	Klei Zuid-West	Zand Zuid	Zand Oost	Löss Zuid
Organische stof verhogen (vaste mest/bokashi/meststoffen)	2	2	2	2	3
Groenbemester/vangewas	1	2	2	2	2
Gewaskeuze: gras-klaver of kruidenrijk	2	1	3	2	3
Gewaskeuze: luzerne	1	1	1	0	3
Gewaskeuze: oud grasland	1	0	0	0	3
Gewaskeuze: jong grasland	2	0	0	0	1
Inrichten bouwplan op basis van karakteristieken perceel	1	0	2	2	2
Niet-kerende groundbewerking	0	0	2	3	3
Drukverlagende machines	0	0	0	0	3
Bodem bedekt houden	0	0	0	2	0

Zaaidiepte aanpassen

Op kleigrond kan bij een goede bodemstructuur dieper worden gezaaid om de kwetsbaarheid voor een vochttekort in het voorjaar te verminderen. Wanneer de grond niet goed verkruid is, is dit bij afwezigheid van vorst geen optie en moet oppervlakkiger worden ingezaaid.

Minder diep zoden bemesten

Op kleigrond kan het minder diep zoden bemesten ervoor zorgen dat de bodem meer intact blijft en hierdoor minder oppervlakkig uitdroogt. Wanneer na bemesten de sneden van de snijkouters in de bodem blijven staan, droogt de toplaag van de bodem namelijk sneller uit en blijven de sneden lang bestaan.

Niet-kerende grondbewerking en minder zware machines

Bij niet-kerende grondbewerking wordt niet gespit of geploegd, waardoor de bodem meer intact blijft. Dit komt ten goede aan het bodemleven en de bodemstructuur (althans wanneer deze bewerkingen niet vervangen worden door rotorcultivatie). Door gebruik van minder zware machines worden spoorvorming en bodemverdichting verminderd, wat de sponswerking van de bodem minder belemmert.

De maatregel niet-kerende grondbewerking, in combinatie met het bedekken van de onbeteelde bodem door bijv. strooisel, wordt sinds 2013⁸ in Zuid-Limburg verplicht toegepast onder de erosieverordening van Provincie en LLTB en maakt daar sinds 2019 ook onderdeel uit van het GLB. Er is al ervaring opgedaan met de praktische haalbaarheid onder kritische omstandigheden en voor kritische gewassen (Productschap Akkerbouw, 2013). Het betreft hier steeds een vorm van bodembedekking tussen de teelten in, die telkens wordt ondergewerkt voor het inzaaien van het volgende gewas. In de VS wordt daarentegen vanwege de enorme perceelsomvang veel minder vaak grondbewerking toegepast, maar wordt het nieuwe gewas direct ingezaaid (*direct seeding*). Hier heeft de strooisellaag dan ook een meer permanent karakter, met langdurige positieve invloed op het bodemleven als voedselbron en habitat. Het gaat te ver om hier nu deze systemen diepgaand te vergelijken met betrekking tot perspectief voor toepassing in Nederland ten noorden van Sittard, maar zowel de seizoensgebonden versie als de permanente versie van bodembedekking wordt als kansrijke preventieve maatregel gezien in combinatie met de maatregel niet-kerende grondbewerking.

Stuwen en water vasthouden

Het water in watervoerende sloten vasthouden met 'boeren' stuwijtjes (in eigen beheer) om de beschikbaarheid van vocht te vergroten. De stuwhoogte wordt alleen verlaagd wanneer er een teveel aan water is.

Naast het water vasthouden in sloten kunnen ook grotere gebieden ingericht worden voor waterberging, zoals de waterbuffers op lössgrond in hellende gebieden van Zuid-Limburg.

(Peilgestuurde) drainage

Vooraf in de kleigebieden helpen drainagebuizen bij het afvoeren van een teveel aan water in de bodem, waardoor wateroverlast door piekbuien wordt voorkomen. Op de geïnterviewde bedrijven werd een duidelijk verschil waargenomen tussen wel en niet-gedraineerde percelen.

Bij peilgestuurde drainage kan de drainagebasis worden ingesteld, zodat een wateroverschot gedoseerd afgevoerd kan worden. Wanneer oppervlaktewater beschikbaar is, kan peilgestuurde drainage ook benut worden voor infiltratie van water (subirrigatie).

Afwatering bevordering

Door het maaiveld van gehele percelen of alleen perceelranden op afschot naar belendende sloten te leggen, sloten te dimensioneren op een voldoende afvoer en sloten schoon te houden, wordt de waterafvoer bevorderd. Een holle ligging of laagtes in een perceel dienen voorkomen te worden om ervoor te zorgen dat er geen water op het perceel blijft staan. Natte omstandigheden benadelen vooral op kleigrond de bodemstructuur. Overigens kan het bevorderen van waterafvoer wel de gevoeligheid voor droogte bevorderen.

Ruitzaai in maisland

Door snijmaïs in een ruitvorm in te zaaien, wordt oppervlakkige afstroming van neerslag tijdens piekbuien in het heuvelachtige Limburg geremd. Dit draagt bij aan het verminderen van erosie, gewasschade en nutriëntenverlies. Daarbij is de perceelbezetting van het gewas beter, waardoor minder water verdampt en het risico op droogte kan verminderen.

⁸ De eerste beleidsmatige richtlijnen dateren al van 1990 in de vorm van een door het Landbouwschap uitgevaardigde Erosieverordening met teeltvoorschriften.

Groenbemester en vanggewas

De inzet van een groenbemester vergroot de organische stofaanvoer en draagt zodoende bij aan het verbeteren van de bodem. Ook houdt het de bodem na een teelt bedekt, waardoor minder snel korstvorming optreedt door neerslag en water beter in de bodem infiltreert. Het vroeg in het voorjaar onderwerken van een groenbemester voorkomt te veel wateronttrekking en het te laat mineraliseren van het gewas aan het begin van het groeiseizoen.

Gewaskeuzes en vruchtwisseling

De gewaskeuze kan ook preventief werken ten aanzien van weersextremen. Ook het uitbreiden van het aantal gewassen met variatie in gevoeligheid voor weersextremen kan de kwetsbaarheid van een landbouwsysteem verminderen.

Genoemde gewaskeuzemaatregelen zijn:

- Het telen van gras-klaver en kruidenrijk grasland in plaats van alleen Engels Raaigras vermindert het risico op droogte door een grotere worteldiepte van klaver en kruiden. Door de sterkere en diepere wortels verbetert de bodemstructuur, waardoor in het algemeen de weerbaarheid van de bodem vergroot.
- De keuze om het areaal grasland te vergroten ten opzichte van dat van voedergewassen, bijvoorbeeld op lössgrond in Zuid-Limburg, om wateroverlast te voorkomen.
- Grasland in een korte vruchtwisseling (1 jaar bouwland en 3 jaar gras) vergroot de worteldiepte (jong grasland van 1-2 jaar oud wortelt dieper dan ouder grasland) en vermindert de droogtegevoeligheid. De graszode minder frequent scheuren (ouder laten worden) zou organische stof verder opbouwen en geeft nog betere waterregulatie, maar wordt zonder externe financiële vergoeding niet ingezet door veehouders, omdat oudere zoden minder produceren. Hier wint opbrengstzekerheid het van schaderisico.
- Het telen van snijmais op droogtegevoelige percelen om water efficiënter te benutten. Bij voorkeur kan dan wel berekening toegepast worden.
- Luzerneteelt op klei- en lössgrond met goede opbrengsten onder relatief droge omstandigheden en een sneller herstel na droogte dan gras. Op zandgrond valt het resultaat veelal tegen vanwege de veelal beperktere worteldiepte.
- Een vroege zaai (wanneer de bodem dat toelaat) kan ervoor zorgen dat een gewas relatief vroeg in het jaar volledig gesloten is, beperkt de directe bodemverdamping en voorkomt een sterke opwarming van de bodem bij een hoge luchttemperatuur. Hierdoor wordt de beschikbare hoeveelheid bodemvocht beter benut.

Organische stof toedienen

De inzet van extra organische stof op bouwlandpercelen werd door de geïnterviewden niet direct in verband gebracht met het effect van weersextremen op de bodem. Twee melkveehouders (klei en lössgrond) zagen op percelen waar zij bokashi, compost of ruige mest hadden uitgereden een duidelijk betere bodemstructuur en verminderde droogtegevoeligheid ten opzichte van percelen waar dit niet gebeurde. De betreffende geïnterviewde op kleigrond ondervond bij grondruil met akkerbouwers het gemis van een voldoende organische stofvoorziening op bouwlandpercelen. Het op peil houden van organische stof bij grondruil werd zodoende als een uitdaging beschouwd.

Bodem bedekt houden met strooisel

Een goede bodemstructuur en een met gewas of strooisel bedekte bodem beperken het dichtslaan van de bodem door hevige neerslag, zodat de afvoer van water via de bodem minder belemmerd wordt.

Bediscussieerd is of in de teelt van snijmais of andere ruwvoergewassen het bedekt houden van de bodem het effect van hitte en droogte kan remmen. Ook zou het bedekt houden van de bodem bij kunnen dragen aan de organische stofvoorziening van de bodem. Gedacht wordt aan het platwalsen in plaats van het onderwerken van het vanggewas en hier direct onder het hoofdgewas in te zaaien.

Hoewel deze preventieve maatregel nog nauwelijks wordt toegepast in Nederland, wordt in het buitenland veel ervaring opgedaan met het bedekken van de onbeteelde bodem middels strooisel (El-Beltagi et al., 2022). Dit strooisel kan bijdragen aan de organische stofvoorziening en de bodem weerbaarder maken voor piekbuien, droogte en hitte. De strooisellaag wordt gevormd door organische stof op de bodem te brengen of een voorgewas af te laten afsterven door het chemisch en/of mechanisch te vernietigen. De grond wordt hierbij niet bewerkt en het hoofdgewas wordt onder de strooisellaag ingezaaid. De hypothese is dat de bodem niet dichtslaat door piekbuien, minder opwarmt door hitte en er minder vocht verdampt (evaporatie). De oppervlakkige organische stofvoorziening en de demping van de weersextremen zouden ten goede

kunnen komen aan de biologische bodemprocessen en daarmee aan de algehele bodemgezondheid. Vanwege de onbekendheid met deze maatregel in Nederland zijn er nog veel vragen te beantwoorden, zoals welk type voorgewas zich hier het beste voor leent, op welke wijze de vernietiging van het voorgewas het beste uitgevoerd kan worden, wat de slagingskans is van de kieming, opkomst en doorontwikkeling van de hoofdteelt en, heel belangrijk, wat dit doet met de bodemindicatoren.

5.2 Beheermaatregelen in de akkerbouw

5.2.1 Inleiding

Duurzame bedrijfsvoering in de akkerbouw is intrinsiek verbonden met de zorg om de bodem. Een gezonde bodem verhoogt opbrengsten en de bedrijfsmatige weerbaarheid onder suboptimale omstandigheden zoals in het geval van weersextremen. Omgaan met weersextremen vereist een actieve houding van de akkerbouwer om maatregelen in te zetten die het bedrijf levensvatbaar houden. Een kennisverbinding tussen praktijk en onderzoek is cruciaal, omdat de afwegingen die een akkerbouwer maakt in zijn duurzame bedrijfsvoering afhankelijk zijn van praktische haalbaarheid. Om te leren van de kennis uit de praktijk is er voor het schrijven van dit hoofdstuk gesproken met verschillende praktijkdeskundigen: vier akkerbouwers uit verschillende regio's en twee experts die dicht bij de praktijk staan (een regio-expert en een algemeen expert).

5.2.2 Watermanagement naar het boerenbedrijf

De vraag naar praktijkkennis is afgebakend aan de hand van de vraag welke maatregelen de akkerbouwer kan treffen, zowel preventief als reactief. In Tabel 5.5 en 5.6 staan de maatregelen die naar voren zijn gekomen uit interviews met praktijkdeskundigen van de WUR en met agrariërs uit voor WUR bekende praktijknetwerken. In de figuren worden de maatregelen per regio geschaald van 0 tot en met 3 in mate van toepassing. De mate van toepassing in onderstaande tabellen geeft weer in hoeverre de maatregel in de regio daadwerkelijk wordt toegepast. Of de maatregel wel of niet wordt toegepast, hangt er met name van af of er mogelijkheid voor bestaat in de regio; daarnaast hangt het af van de kosten/baten van de maatregel en de al dan niet bewezen effectiviteit van de maatregel.

5.2.3 Reactief management bij weersextremen

Tabel 5.5 *Overzicht van reactieve maatregelen per regio in mate van toepassing.*

Maatregel	Klei (centraal)	Klei (zuidwest)	Klei (noordelijk)	Zand (zuidoost)	Zand (löss)	Zand (dalgrond)
Droogte						
Beregenen	3	3	3	3	2	3
Peilgestuurde drainage	3	3	3	3	1	3
Hitte						
Beregenen	2	2	2	2	1	2
Piekbui						
Bekalken met gipskorrels	3	3	3	0	0	0
Afpompen	2	2	2	2	2	2
Greppels graven	3	3	3	3	3	3
Kwakkelwinter						
Extra grondbewerkingen	3	3	3	2	2	2
Voorjaarsploegen	2	2	2	2	2	2
Laag vochtgehalte						
Beregenen	3	3	3	2	2	2

Beregenen

Beregenen wordt toegepast in alle regio's in tijden van droogte, zowel preventief als reactief. Reactief betekent dat beregend wordt omdat is geconstateerd dat de wortelzone te droog is geworden. Preventief

houdt in dat de weersverwachting aanleiding geeft te verwachten dat de wortelzone de komende dagen te veel zal uitdrogen. Op lössgrond in Zuid-Limburg is beregening erg duur en kan het vaak niet uit. Een agrariër op de zuidoostelijke zandgronden noemt de beregeningsinstallatie een verzekering: zij gaan er van uit deze maatregel niet te hoeven inzetten, omdat zij op andere manieren preventief de bodem zo weerbaar mogelijk maken. In geval van nood hebben ze genoeg beregeningscapaciteit beschikbaar.

(Peilgestuurde) drainage

Drainage wordt door alle praktijkdeskundigen aangehaald als maatregel bij zowel piekbuien als droogte in alle regio's (op de lössgrond na). Vanwege het heuvelachtige landschap in Zuid-Limburg is het lastig het water op de plek te houden. Verder wordt benadrukt dat het goed onderhouden van het drainagesysteem cruciaal is voor de werking. Peilgestuurde drainage hangt samen met het openzetten of juist dichtzetten van stuwtjes in de sloot van de akkerbouwer. Op deze manier kan water naar wens geconserveerd worden in de bodem.

Bekalken met gipskorrels

Kalk in de bodem wordt genoemd als reactieve maatregel bij piekbuien op klei. De mate van toepassing op zand is onbekend.

Afpompen

De maatregel afpompen is een reactieve maatregel om het water na een piekbui van het land af te krijgen. In de interviews werd genoemd dat op dalgrond het overtollige water in giertanks werd gepompt om het kwijt te raken.

Greppels of sleuven aanbrengen

De maatregel greppels graven of sleuven is een reactieve maatregel om het water na een piekbui van het land af te krijgen. De maatregel wordt zowel handmatig als mechanisch uitgevoerd in alle regio's.

Extra grondbewerking

De maatregel extra grondbewerking wordt toegepast op de kleigronden bij een vorstvrije winter. Door de afwezigheid van vorst ontstaat er kluitvorming op kleigrond. Om dat te verhelpen, kunnen er extra grondbewerkingen worden gedaan zoals de grond een aantal keer bewerken met de kop-eg of in het voorjaar frezen. Op zand speelt kluitvorming geen rol, maar worden extra grondbewerkingen wel ingezet als reactieve maatregel bij een vorstvrije winter. Door de vorst vriezen namelijk onkruiden en schimmels dood. Om te zorgen dat na een kwakkelwinter de onkruiden geen kans krijgen, wordt de grond nogmaals bewerkt (valt eigenlijk onder onkruidbestrijding).

5.2.4 Preventieve Maatregelen voor vermindering kwetsbaarheid

Tabel 5.6 Overzicht van genoemde preventieve maatregelen ter bevordering van weerbaarheid tegen weersextremen in het algemeen (0=niet besproken, 1=wordt niet toegepast, 2=wordt toegepast, 3=wordt vaak toegepast).

Maatregel	Klei (centraal)	Klei (zuidwest)	Klei (noordelijk)	Zand (zuidoost)	Zand (löss)	Zand (dalgrond)
Droogte						
Beregenen	1	1	1	2	1	2
Peilgestuurde drainage	3	3	3	3	1	3
Organische stoftoevoer	3	3	3	3	3	3
Gewaskeuze	2	2	2	2	2	2
Raskeuze	1	1	1	1	1	1
Mulching	2	2	2	2	2	2
Minder planten zaaien	1	1	1	2	1	2
Vochtsensoren	2	2	2	2	2	2
Vanggewassen	2	2	2	2	2	2
Waterconservatie met stuwtjes	3	3	3	3	1	3
Waterputten	2	2	2	2	2	3
Hitte						
Mulching	1	1	1	1	1	1
Beregenen	1	1	1	3	1	3
Gewaskeuze	2	2	2	2	2	2
Waterconservatie met stuwtjes	3	3	3	3	1	3
Agroforestry	0	0	0	0	0	0
Piekbui						
Organische stoftoevoer	3	3	3	3	3	3
Rooiplanning, weerbericht	3	3	3	3	3	3
Raskeuze	1	1	1	1	1	1
Drainage	3	3	3	3	3	3
Kilveren	3	3	3	2	1	1
Gebruik van lichte machines	3	3	3	3	3	3
Mulchen	2	2	2	2	2	2
Greppels aanleggen	2	2	2	2	2	2
Dammetjes op ruggen	2	2	2	2	3	2
Kwakkelwinter						
Groenbemester in winter	2	2	2	2	2	2
Extra grondbewerking	3	3	3	2	2	2
Bodemverdichting tegengaan	3	3	3	3	3	3
Laag vochtgehalte						
Organische stoftoevoer	3	3	3	3	3	3
Peilgestuurde drainage	3	3	3	3	1	3
Beregenen	2	2	2	2	1	2

Beregenen

Beregenen wordt niet alleen als reactieve maatregel ingezet, maar ook als preventieve. Zie verder pagina 71.

(Peilgestuurde) drainage

Drainage wordt niet alleen als reactieve maatregel ingezet, maar ook als preventieve. Voor een nadere toelichting wordt verwezen naar pagina 72.

Organische stoftoevoer

Organische stoftoevoer in deze context wordt door de praktijkdeskundigen gedaan in de vorm van vaste mest en compostaanvoer, telen van groenbemesters en het achterlaten van gewasresten. Organische stoftoevoer wordt genoemd als preventieve maatregel tegen droogte, een laag vochtgehalte en piekbuien. In alle regio's wordt deze maatregel uitgevoerd om bodemkwaliteit te verbeteren.

Gewaskeuze

De keuze van gewassen wordt genoemd als preventieve maatregel om om te gaan met hitte, droogte en piekbuien. Diepwortelende gewassen kunnen beter tegen piekbuien en droogte en dragen bij aan een goede bodemstructuur. Gewassen die beter tegen hitte kunnen, zijn bijvoorbeeld boerenkool, pompoen, mais (kan echter niet tegen droogte) en zoete aardappel. De mate van toepassing van deze maatregel is echter minimaal, omdat de meeste akkerbouwbedrijven gespecialiseerd zijn in een bouwplan met andere gewassen waar de hele bedrijfsvoering op is aangepast, van productiemethoden tot verkoop.

Raskeuze

Raskeuze wordt genoemd als preventieve maatregel tegen droogte. Er zijn namelijk gewasrassen die beter tegen droogte kunnen dan andere. De mate van toepassing is echter laag. Verder speelt raskeuze een rol als preventieve maatregel tegen piekbuien, omdat je vroege rassen eerder het land af kunt hebben om op deze manier schade door piekbuien in het najaar te voorkomen. Het uitgangspunt dat piekbuien vooral in het najaar optreden, houdt geen rekening met klimaatverandering waarbij piekbuien juist meer in de zomer optreden.

Mulching

Mulching is het bedekken van de bodem met compost of gewasresten waardoor minder directe verdamping of evapotranspiratie optreedt. Mulching wordt zo ook genoemd als preventieve maatregel tegen droogte en tegen hitte. De maatregel wordt met name toegepast om droogteschade te beperken. Het positieve effect van de maatregel op hitteschade werd aangedragen als expertinschatting.

Minder planten zaaien

Het zaaien van minder planten werd geopperd als preventieve maatregel tegen droogte. De waterbeschikbaarheid per plant zou op deze manier toenemen, waardoor de akkerbouwer een kleinere opbrengstreductie per hectare verwacht dan zonder deze maatregel. Op dit moment wordt deze maatregel in Nederland nog niet toegepast. Het is ook niet zeker of deze veronderstelling klopt.

Vochtsensoren

Het op tijd beginnen met beregenen is belangrijk, omdat het kan zijn dat bij een beperkt aantal haspels de akkerbouwer in tijden van droogte niet op tijd alles beregend krijgt. Het plaatsen van vochtsensoren kan helpen uitdroging van de bodem op tijd te signaleren. Op basis van dergelijke metingen gecombineerd met weersvoorspellingen de beslissing nemen of beregening nodig is, kan bijdragen aan effectief watergebruik.

Vanggewassen

Het zaaien van vanggewassen werd aangedragen als preventieve maatregel tegen droogte. De vanggewassen staan in dienst van een goede bodemstructuur en houden vocht vast in de bodem in vergelijking tot braakligging. Dit staat echter op gespannen voet met het watergebruik van het vanggewas: juist door het vanggewas tijdig onder te werken, blijft meer water over voor het hoofdgewas.

Waterputten

Vanwege gebrek aan oppervlaktewater worden waterputten geslagen als preventieve maatregel tegen droogte. De maatregel wordt met name op de dal- en zandgronden toegepast, op kleigrond is voldoende oppervlaktewater voorhanden.

Agroforestry

Agroforestry wordt genoemd als preventieve maatregel tegen hitte. Het positieve effect op hittestress vanwege voldoende schaduw is een expertinschatting.

Rooi-/oogstplanning

Op tijd van het land om piekbuien voor te zijn. Aangedragen als open deur te belangrijk om niet te noemen: Iedere akkerbouwer checkt het weerbericht als preventieve maatregel om schade van piekbuien aan de bodem te beperken.

Kilveren

Kilveren is een bewerking waarmee het land geëgaliseerd wordt. Het voorkomt dat overtollig water uit een piekbui blijft staan op een lagergelegen stuk. De maatregel wordt met name toegepast op kleigronden, omdat de ondergronden van klei minder variabel zijn dan van zandgrond. De glooiing van zuidoostelijk zand en op dalgronden maakt dat kilveren juist verschillende bodemlagen aan het oppervlak kan brengen. Het door grondbewerking naar boven halen (openleggen) van verschillende ondergronden kan ertoe leiden dat er meer hangwater blijft staan op bijvoorbeeld een leemlaag en dat de percelen kwetsbaar worden voor afspoeling.

Bodemverdichting tegengaan

Bodemverdichting tegengaan door zo min mogelijk en alleen met lichte machines het land op gaan, wordt door alle akkerbouwers aangedragen als maatregel bij alle weersextremen. Lichte machines in combinatie met bredere banden, rupsbanden of meerdere banden, bij voorkeur met verlaagde bandenspanning zodat de uitgeoefende druk van de banden over een groter oppervlak wordt verdeeld.

Extra grondbewerking

De maatregel extra grondbewerking wordt toegepast op klei na een vorstvrije winter. Door de afwezigheid van vorst ontstaat er kluitvorming op kleigrond. Om dat te verhelpen, kunnen er extra grondbewerkingen worden gedaan, zoals de grond een aantal keer bewerken met de kop-eg of in het voorjaar frezen. Op zand speelt kluitvorming geen rol, maar worden extra grondbewerkingen wel ingezet als reactieve maatregel bij een vorstvrije winter. Door de vorst vriezen namelijk onkruiden kapot en schimmels dood. Om te zorgen dat na een kwakkelwinter de onkruiden geen kans krijgen, wordt de grond nogmaals bewerkt (valt eigenlijk onder onkruidbestrijding).

Het bedekken van de bodem middels groenbemesters

Het zaaien van groenbemesters wordt door alle praktijkdeskundigen aangedragen als maatregel tegen piekbuien en droogte. Groenbemesters gaan verslemping tegen, waardoor de bodem weerbaarder is tegen overtollig water. Verder wordt het zaaien van groenbemesters aangedragen om te voorzien in het organische stofgehalte. Groenbemesters zijn ook genoemd als maatregel bij een hittegolf. Hitte heeft namelijk op onbedekte grond een grotere impact dan op bedekte grond (zie ook de toelichting bij maatregel *Vanggewassen* op pagina 74).

Het bedekken van de bodem met strooisel

Een mogelijk interessante preventieve maatregel die in Nederland nog nauwelijks wordt toegepast, is het bedekt houden van de onbeteelde bodem met strooisel, dat bijdraagt aan de organische stofvoorziening en de bodem weerbaarder zou kunnen maken voor piekbuien, droogte en hitte. In het buitenland wordt hier wel ervaring mee opgedaan (El-Beltagi et al., 2022). De strooisellaag wordt gevormd door organische stof op de bodem te brengen of een voorgewas af te laten afsterven door het chemisch en/of mechanisch te vernietigen. De grond wordt hierbij niet bewerkt en het hoofdgewas wordt onder de strooisellaag ingezaaid. De hypothese is dat de bodem niet dichtslaat door piekbuien, minder opwarmt door hitte en er minder vocht verdampt (evaporatie). De oppervlakkige organische stofvoorziening en de demping van de weersextremen zouden ten goede kunnen komen aan de biologische bodemprocessen en daarmee aan de algehele bodemgezondheid. Vanwege de onbekendheid met deze maatregel zijn er nog veel vragen te beantwoorden, zoals welk type voorgewas zich hier het beste voor leent, op welke wijze de vernietiging van het voorgewas het beste uitgevoerd kan worden, wat de slagingskans is van de kieming, opkomst en doorontwikkeling van de hoofdteelt en, heel belangrijk, wat dit doet met de bodemindicatoren.

6 Conclusie en aanbevelingen

6.1 Weersextremen en kwetsbaarheid van de bodem

6.1.1 Weersextremen met een groot effect op de bodemgezondheid

In onderhavig literatuuronderzoek zijn de volgende extreme weersomstandigheden onder de loep genomen:

- Korte piekbuien gedurende het groeiseizoen (met plasvorming en inundaties vanuit sloten als gevolg);
- Lange piekbuien gedurende het groeiseizoen (met hoge grondwaterstanden, langdurige plasvorming als gevolg);
- Korte (heftige) hittegolf;
- Lange (minder heftige) hittegolf;
- Droogte gedurende het groeiseizoen;
- Aan-/afwezigheid van een vorstperiode;
- Kwakkelwinter (meerdere perioden van vorst, afgewisseld met perioden van dooi);
- Laag vochtgehalte in de bodem bij start van het groeiseizoen.

Een beknopt overzicht van de te verwachten kwetsbaarheid van bodemindicatoren voor voornoemde weersextremen is in paragraaf 4.3 opgenomen. Op basis van dit literatuuronderzoek lijkt het erop dat met name de volgende gebeurtenissen een grote impact hebben op (een aantal van) de indicatoren, en daarmee naar verwachting ook op het functioneren van de bodem:

- Korte en lange piekbuien;
- Korte en lange hittegolven;
- Lange perioden van droogte.

In dit onderzoek zijn de specifieke weersextremen afzonderlijk van elkaar beschouwd. In de praktijk kunnen extremen echter samenvallen, waardoor het eindeffect op de bodemindicatoren netto anders kan uitpakken. Langdurige droogte bijvoorbeeld kan gepaard gaan met hoge temperaturen, zoals tijdens een hittegolf.

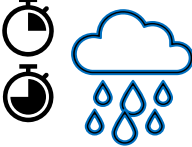


6.1.2 Kwetsbaarheid van de bodem

In dit onderzoek hebben we uit de lijst aan indicatoren die zijn genoemd in de lijst van 'Bodemindicatoren voor Landbouwgronden in Nederland' (BLN, zie ook Tabel 1.1) de volgende fysische, chemische en biologische bodemindicatoren uitgelicht en onderzocht op de mate van kwetsbaarheid voor weersextremen:

- Fysische bodemindicatoren:
 - Aggregaatstabiliteit (incl. grootteverdeling)
 - Droge bulkdichtheid
 - Indringingsweerstand
 - Watervasthoudend vermogen
 - Doorlatendheid bij verzadiging en infiltratiesnelheid
- Chemische bodemindicatoren:
 - Zuurgraad pH
 - Stikstof totaal
 - Potentieel mineraliseerbare stikstof
 - Fosfaatvoorraad en -beschikbaarheid
 - Kali-voorraad en -beschikbaarheid
 - Organische stof, organisch C en afbreekbaar C
- Biologische bodemindicatoren:
 - Micro-organismen: bacterie- en schimmel biomassa (PLFA)
 - Aaltjes, taxonomische diversiteit en aantal exemplaren
 - Regenwormen, aantallen en soorten

In Tabel 6.1 zijn voor de drie relevante weersextremen de bodemindicatoren benoemd die het kwetsbaarst zijn voor deze gebeurtenis. Ook is het te verwachten effect beschreven en de snelheid van herstel.

Tabel 6.1 Overzicht van de relatief kwetsbare bodemindicatoren voor de relevantste weersextremen.

Situatie extreem	Bodemindicatoren met een relatief grote kwetsbaarheid voor betreffende weersextreem
Piekbui in groeiseizoen (1 april-1 oktober) 	<p>FYSISCH</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Aggregaatstabiliteit</i>: mean weight diameter (MWD) neemt tijdelijk af • <i>Droge bulkdichtheid</i>: in korstvorming- en slompgevoelige gronden neemt deze in eerste paar mm/cm toe • <i>Doorlatendheid bij verzadiging</i>: aan maaiveld kan deze verlaagd worden indien de bulkdichtheid door een piekbui toeneemt • <i>Infiltratiesnelheid</i>: zal verlagen indien piekbui leidt tot toename bulkdichtheid aan maaiveld <p>CHEMISCH</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Kali beschikbaarheid</i>: K-CaCl₂: door uitspoeling kan K permanent verdwijnen uit de bouwvoor <p>BIOLOGISCH</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Micro-organismen</i>: biomassareductie zowel schimmels als bacteriën, maar snel herstel – mede afhankelijk van ontwikkelingsstadium van het gewas • <i>Aaltjes</i>: soortspecifieke aantalsreducties (vooral van fungivore nematoden), maar snel herstel • <i>Regenwormen</i>: aantalsreductie, waarschijnlijk specifiek per ecologische groep
Hittegolf (jaarrond) 	<p>FYSISCH</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Aggregaatstabiliteit</i>: neemt af • <i>Doorlatendheid bij verzadiging</i>: wordt tijdelijk verhoogd bij hogere T <p>CHEMISCH</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Stikstof totaal en pot. mineraliseerbare stikstof</i>: nemen af, zijn nauw verbonden aan het OS-gehalte • <i>Organische stof</i>: gloeiverlies, Organisch C, Afbreekbaar C: Hot Water Carbon (HWC): nemen af. OS wordt sneller afgebroken bij hogere temperaturen <p>BIOLOGISCH</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Micro-organismen</i>: effecten onduidelijk, maar verhouding schimmels:bacteriën kan toenemen, met potentiële gevolgen voor o.a. immobilisatie van nutriënten, aggregaatvorming en stabilisatie • <i>Aaltjes</i>: aantalsreductie door sterfte en dieper wegkruipen van de warmte; gedeeltelijk snel herstel • <i>Regenwormen</i>: effecten zijn afhankelijk van het bodemvochtgehalte. Als de bodem onverminderd vochtig blijft, doen de wormen het beter en verlopen processen sneller. Bij een hittegolf die gepaard gaat met droogte stoppen eetactiviteit, groei en reproductie. Bij aanhoudende droogte treedt sterfte op. Sommige soorten kunnen dieper wegkruipen en overleven in diapause. Gevoeligheid voor pesticiden zoals glyphosaat neemt toe. Herstel van droge hittegolf kan een groeiseizoen duren
Droogte in groeiseizoen (1 april – 1 oktober) 	<p>FYSISCH</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Aggregaatstabiliteit</i>: kan iets toenemen door droogte, tenzij door door bijkomende verhoogde temperaturen veel OS afbreekt • <i>Indringsweerstand</i>: de feitelijk indringingsweerstand neemt (exponentieel) toe in een uitdrogende bodem • <i>Doorlatendheid bij verzadiging en infiltratiesnelheid</i>: alleen indirect via invloed van droogte op bodemstructuur <p>CHEMISCH</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Organische stof</i>: gloeiverlies, Organisch C, Afbreekbaar C: Hot Water Carbon: nemen af, verhoogde flux van CO₂ (= afbraak OS) wanneer neerslag valt na droge periode • <i>Stikstof totaal en pot. mineraliseerbare stikstof</i>: verhoging van vrijkomen van N wanneer neerslag valt na droge periode, nemen daardoor af • <i>Fosfaatvoorraad en -beschikbaarheid</i>: fosfaatbeschikbaarheid neemt toe onder droge omstandigheden • <i>Kalivoorraad en -beschikbaarheid</i>: K-beschikbaarheid neemt af onder droge omstandigheden, maar herstelt wanneer neerslag valt <p>BIOLOGISCH</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Micro-organismen</i>: bacteriële biomassa en enzymactiviteit nemen af, schimmels zijn veel minder gevoelig • <i>Aaltjes</i>: aantallen individuen en de diversiteit aan soorten nemen af; maturity index verandert nauwelijks, maar soortensamenstelling kan wel relatief veranderen en plant-parasitaire aaltjes kunnen gaan domineren • <i>Regenwormen</i>: droogte leidt tot verminderde activiteit en lagere aantallen individuen en biomassa. Gevoeligheid voor bodemcontaminanten neemt toe. Herstel van vooral pendelaars is medeafhankelijk van eventueel aanwezige 'onkruiden'

Hoewel we in dit onderzoek de fysische, chemische en biologische bodemindicatoren en hun kwetsbaarheid voor weersextremen elk afzonderlijk hebben beschouwd, zijn deze in werkelijkheid onderling verbonden en kunnen ze ook vergelijkbare reacties – positief of negatief – hebben op bepaalde stressoren (zoals een weersextreem). Ze reageren als het ware gebundeld, al naargelang het soort stressor. Door bij het meten van bodemgezondheid gebruik te maken van zogenaamde 'sleutelindicatoren' (i.e. indicatoren die relevant zijn voor zo veel mogelijk verschillende bodemfuncties (in ons geval de bodemindicatoren uit Tabel 6.1) en ecosysteemdiensten (in ons geval duurzame agrarische productie) en die responsief zijn voor de drie

relevante weersextremen, is het mogelijk om met beperkte meetinspanning een maximum aan informatie in te winnen. De volgende sleutelindicatoren voor bodemgezondheid in relatie tot weersextremen en een duurzame agrarische productie zijn benoemd:

- Aggregaatgrootte en -stabiliteit
- Regenwormen dichtheid en soortensamenstelling
- Microbiële biomassa met expliciet mycorrhiza, schimmels:bacteriën-ratio

Deze lijst van potentiële sleutelindicatoren voor effecten van weersextremen op bodemgezondheid is op dit moment echter volledig hypothetisch. Het is dan ook raadzaam om validerend onderzoek te doen om de bruikbaarheid en robuustheid te toetsen onder relevante Nederlandse omstandigheden van weersextremen en landbouwpraktijken. Om sleutelindicatoren op hun waarde te toetsen en te bezien dat er ook daadwerkelijk ecologische verbondenheid met andere indicatoren is, zouden die andere indicatoren ook moeten worden gemeten. Dat vraagt veel budgettaire ruimte. Zo niet, dan blijft het concept van sleutelindicator ongevalideerd en loopt het veldonderzoek het risico om met onvoldoende breedte aan indicatoren de effecten van weersextremen op de bodemgezondheid te bestuderen.

6.2 Bodemgezondheid en beheermaatregelen

De verbinding tussen praktijk en onderzoek is cruciaal, omdat de afwegingen die een boer maakt bij het klimaatrobuust maken van de bedrijfsvoering praktisch en economisch haalbaar moeten zijn. Om dergelijke afwegingen te betrekken bij ons onderzoek, zijn de ervaringen van verschillende praktijkdeskundigen opgehaald. We hebben daarmee maatregelen geïdentificeerd die in de praktijk van conventionele bedrijfsvoering door de boeren en experts zelf genoemd werden als interessante opties om beter te kunnen inspelen op de knelpunten. Het valt op dat deze maatregelen zich richten op controle van de externe omstandigheden voor de teelt (productie) en minder op het versterken van de natuurlijke weerstand van de bodem en het verminderen van haar kwetsbaarheid voor weersextremen. De genoemde technologische oplossingen volstaan niet om te voorkomen dat er schade optreedt aan de bodem bij extreem weer, zowel voor de gewasproductie als andere bodemfuncties. De omvang van schade hebben wij echter niet onderzocht en we gaan hier dan verder ook niet op in.

De volgende beheermaatregelen werden gezien als kansrijk voor het verminderen van de kwetsbaarheid van bodems voor verschillende vormen van weersextremen (zie ook Tabel 6.2):

- Organische stoftoevoer door het aanbrengen vaste mest en compost, telen groenbemesters en achterlaten van gewasresten (*mulching*);
- Vanggewassen voor verbetering bodemstructuur;
- Niet-kerende grondbewerking (verbetering bodemstructuur);
- Gebruik drukverlagende machines (voorkomt spoorvorming en bodemverdichting en bevordert de sponswerking van de bodem);
- Vaste rijpaden (vermindering kans op bodemverdichting en bevordering van de sponswerking van de bodem op niet-bereden gedeelten);
- Grasklaver of kruidenrijk grasland (minder vatbaar voor droogte dankzij diepe wortels). Deze diepere wortels zorgen tevens voor verbetering van de bodemstructuur en voor het verhogen infiltratiecapaciteit;
- Regelbare drainage en infiltratie (RDI), mits goed onderhouden, vlak terrein én voldoende (oppervlakte)water beschikbaar. Door kunstmatig hoog (houden) van de grondwaterstand blijft vochtgehalte in bodem ook hoog en ondervindt het bodemleven tijdens hitte minder stress door uitdroging.

Tabel 6.2 In de praktijk toegepaste reactieve en preventieve praktijkmaatregelen ter beperking van nadelige gevolgen van weersextremen voor de bodem.

Weersextreem	Knelpunt bodem	Praktijkmaatregel	
		Preventief	Reactief
Piekbuien	Verslamping	Organische stofbeheer	Greppels graven
	Uitspoeling nutriënten	Rooiplanning o.b.v. weerbericht	Bekalken (met gipskorrels) Uitstellen bemesting
Hittegolf	Groeioptimum gewas	Stuwbeheer	Beregenen
	Indirect: watergebrek	Beregenen	
Droogte	Verminderde stabiliteit aggregaten, verminderde biomassa bodemleven		
	Nalevering water aan gewas	Stuwbeheer	Beregenen
	Doorwortelbaarheid		Peilgestuurde drainage
Afwezigheid vorstperiode	Biologische bodemprocessen stoppen, afname biomassa bodemleven		
	Structuurvermindering	Bodemverdichting tegengaan, o.a. niet-kerende grondbewerking of gebruik van lichte machines	Extra grondbewerking in voorjaar
	Zaailingvestiging en doorwortelbaarheid Toename plagen	Extra grondbewerking	
Kwakkelwinter	Structuurvermindering Zaailingvestiging en doorwortelbaarheid	Bodemverdichting tegengaan, o.a. niet-kerende grondbewerking of gebruik van lichte machines	Extra grondbewerking in voorjaar
		Extra grondbewerking	
Laag vocht bij seizoenstart	Zaailingvestiging	Stuwbeheer	Beregenen
	Opbouw bodemstructuur door bodemleven	Organische stofbeheer	

Een mogelijk interessante preventieve maatregel die in Nederland nog nauwelijks wordt toegepast, is het bedekt houden van de onbeteelde bodem met strooisel, dat bijdraagt aan de organische stofvoorziening en de bodem weerbaarder zou kunnen maken voor piekbuien, droogte en hitte. De hypothese is dat de bodem niet dichtslaat door piekbuien, minder opwarmt door hitte en er minder vocht verdampt (evaporatie). De oppervlakkige organische stofvoorziening en de demping van de weersextremen zouden ten goede kunnen komen aan de biologische bodemprocessen en daarmee aan de algehele bodemgezondheid.

Uit deze inventarisatie kan samenvattend over de regio's worden geconcludeerd dat het toedienen van organische stof de meeste navolging krijgt in hoe boeren op dit moment reageren op extreme weerscondities. Deze maatregel werd vaak genoemd als preventieve maatregel voor verschillende weersextremen, maar óf en hóe precies een verhoging van het gehalte organische stof moet worden bereikt, is onduidelijk. Het is in elk geval een doel dat afhankelijk van grondsoort en landgebruik pas na verloop van meerdere jaren kan worden bereikt (Ramesh et al., 2019; Yost & Hartemink, 2019; website Slim Landgebruik). Een effectieve manier om organische stof op te bouwen, is het verminderen van de intensiteit van grondbewerking (diepte en frequentie, of de wijze van bewerken) (Haddaway et al., 2017; Mehra et al., 2018). Dit vereist al snel een veelomvattende wijziging van het bedrijfssysteem (werktuigen, gewaskeuze) en werd door de geïnterviewde experts dan ook niet zozeer bedoeld. Eerder dachten de experts aan een verminderde afvoer van gewasresten en aan het opnemen van granen of gras in de vruchtwisseling.

6.3 Aanbevelingen voor vervolgonderzoek

6.3.1 Validatie van hypothesen middels veldonderzoek

Onze literatuurstudie, aangevuld met interviews met melkveehouders en akkerbouwers, heeft een aantal hypothesen opgeleverd over de invloed van weersextremen op het functioneren van de bodem en over de effectiviteit van kansrijke preventieve beheermaatregelen voor het veerkrachtiger maken van de bodem voor een duurzame agrarische productie en deze bodem weerbaarder te maken voor weersextremen. Om beter inzicht te krijgen in het handelingsperspectief voor de agrarische sector (beheer), het rijk en de regionale overheden (beleid) zouden we deze hypothesen moeten toetsen in een validerend onderzoek. Daarbij zijn drie insteken mogelijk:

- Onderzoek in een laboratorium (in kassen of in klimaatkamers);
- Onderzoek in het open veld;
- Een combinatie van de twee.

Voor een goede toetsing van de (biologische) sleutelindicatoren en een beoordeling van het herstel, lijkt een onderzoek in het open veld het meest realistisch. Het gebruik van *mesocosms*⁹ bijvoorbeeld in kas- of laboratoriumonderzoek heeft namelijk als beperking dat (biologisch) herstel alleen kan optreden door de nog aanwezige organismen in de afgesloten mesocosm en er geen rekolonisatie vanuit diepere bodemlagen of nabije akkerranden mogelijk is. Bovendien doet een onderzoek in het open veld – op agrarische percelen – meer recht aan het doel van dit onderzoek, namelijk het bieden van handelingsperspectief voor agrariërs bij het treffen van preventieve beheermaatregelen voor het realiseren van een weerbaar, duurzaam en gezond landbouwproductiesysteem. Door direct in het veld aan de slag te gaan, gaat de wetenschappelijke onderbouwing van de effectiviteit hand in hand met de praktische toepassing van de maatregel. Waardevolle ervaringen in het toepassen van preventieve maatregelen kunnen zo direct worden meegenomen.

Echter, onderzoek in het veld heeft als grote beperking dat slechts enkele weersextremen (piekbuien en in sommige gevallen droogte) kunnen worden nagebootst, terwijl in kassen of klimaatkamers veel meer controle mogelijk is over de te toetsen experimentele weersomstandigheden. Een veldonderzoek kent dus geen garantie voor het werkelijk optreden van extreme weersextremen waaronder de maatregelen dienen te worden getoetst, maar de veldomstandigheden zijn realistischer dan die in het lab of kas. In het ergste geval blijven weersextremen uit. Een toetsing van hypothesen onder deze weersextremen vindt dan niet plaats en mogelijke conclusies van het veldonderzoek beperken zich tot de mate van de inpasbaarheid van de maatregel (combinatie) in de bedrijfsvoering en tot de effectiviteit van de maatregel op de gezondheid (of kwetsbaarheid) van de bodem in het algemeen (seizoensfluctuatie) en eventueel op de gezondheid (of kwetsbaarheid) van de bodem bij de weersomstandigheden die zich wél hebben voorgedaan. Veldonderzoek in de praktijk geeft ook inzicht in de risico's en kosten van de maatregelen. Dat zouden op zichzelf ook allemaal waardevolle resultaten zijn.

Gelet op de praktijkrelevantie van onderzoeksresultaten wordt in deze fase van het onderzoek de voorkeur gegeven aan een onderzoek in het open veld boven kas- of labcondities. Na het opdoen van ervaringen en het verkrijgen van eerste inzichten, kan een aanvullend kas- en labonderzoek interessant zijn. In de navolgende paragraaf gaan we verder in op de wijze waarop een validerend veldonderzoek als vervolgstap plaats kan hebben. Er is nog relatief weinig veldervaring in het meten van de invloed van weersextremen op de gezondheid van de bodem. Wel is duidelijk dat dergelijk veldonderzoek kostbaar zal zijn en afhankelijk van het wisselvallig optreden van de te onderzoeken weersextremen. Het voorstel is dan ook om in eerste instantie te kiezen voor een beperkte insteek (een doorlooptijd van bijv. twee à drie jaar), waarin ervaringen worden opgedaan in de aanpak en waarin eerste inzichten worden verkregen in de invloed van weersextremen op de bodemgezondheid: een relatief korte doorlooptijd en een beperkt aantal locaties en beheermaatregelen. Om bij zo'n korte tijd van waarnemen (waarbij weersomstandigheden jaarlijks kunnen wisselen en er dan geen herhaling van waarneming zou zijn) toch relevante resultaten te kunnen genereren, is het verstandig om dit onderzoek te situeren in proefvelden waar de te valideren praktijkmaatregelen al geruime tijd worden toegepast. De verkregen ervaringen en inzichten zouden eventueel in een uitgebreider

⁹ Een *mesocosm* is een experimenteel systeem in de open lucht waarbij de natuurlijke omgeving onder gecontroleerde omstandigheden wordt onderzocht. Op die manier vormen *mesocosm* studies een schakel tussen veldonderzoeken en sterk gecontroleerde laboratoriumexperimenten.

vervolgonderzoek kunnen worden meegenomen, waarbij andere grondsoorten en teelten kunnen worden opgenomen.

6.3.2 Selectie weersextremen, beheermaatregelen en bodemindicatoren

Weersextremen

Aanbevolen wordt om het veldonderzoek te richten op de drie weersextremen die een grote impact hebben op (een aantal van) de indicatoren en daarmee naar verwachting ook op het functioneren van de bodem:

- Korte en lange piekbuien;
- Korte en lange hittegolven;
- Lange perioden van droogte.

Gegeven de natuurlijke variatie en de zeldzaamheid van weersextremen is het allerm minst zeker dat alle beoogde te beproeven weersextremen zich voordoen gedurende de looptijd van het veldonderzoek. Om deze onzekerheid te ondervangen, wordt geadviseerd om een daarvan onder geconditioneerde omstandigheden in praktijk te brengen, te weten 'piekbuien'. Een piekbui kan worden nagebootst door een beregeningsinstallatie, die hiervoor opgebouwd en aangezet dient te worden gedurende een vooraf vastgestelde tijd en intensiteit.

Hittegolven en lange perioden van droogte zijn helaas niet na te bootsen op de schaal van proefvelden (op grotere schaal kan het nabootsen van droogte wel). Daarvoor zijn we afhankelijk van het weer. Om deze weersextremen tijdig te identificeren en de vooraf vastgestelde monsternamen en veldmetingen uit te voeren en daarmee de gevoeligheden en hersteltijd van sleutelindicatoren van bodemkwaliteit en de effectiviteit van beheermaatregelen te kunnen toetsen en kwantificeren, kan een signaleringssysteem worden ontwikkeld. Op de betreffende locaties kunnen de meteorologische omstandigheden en de frequentie van voorkomen realtime worden geregistreerd en gesignaleerd door gebruik te maken van historische en actuele klimatologische gegevens afkomstig van KNMI-weerstations, aangevuld met weersvoorspellingen van een locatie in de buurt. Om de frequenties te bepalen, dienen de neerslaghoeveelheid, temperatuur en gewasverdamming op uur- en dagbasis te worden geregistreerd en gevalideerd. In een digitaal dashboard kan vervolgens een actueel (en historisch) en overzichtelijk beeld van de gemeten parameters worden verkregen.

Beheermaatregelen

Een duurzame bedrijfsvoering in de melkveehouderij en de akkerbouw is intrinsiek verbonden met de zorg voor de bodem. Een goede bodemkwaliteit heeft een positief effect op de opbrengst en verhoogt de weerbaarheid van het agrarisch bedrijf onder suboptimale omstandigheden zoals in het geval van weersextremen. Boeren passen hun management aan op de weersomstandigheden. We onderscheiden hierin het reactieve management (tijdelijke aanpassingen als reactie op opgetreden extreme weersomstandigheden) en het preventieve management (structurele aanpassing van het management binnen het huidige bedrijfssysteem aan extreem weer, zoals aanpassing gewaskeuze, ruimere rotatie, andere grondbewerking).

Vanuit de inventarisatie, beschreven in hoofdstuk 5, lijken een paar preventieve maatregelen aantrekkelijk om in gericht veldonderzoek te worden gevalideerd op daadwerkelijke effectiviteit voor het bevorderen van functionele bodemkwaliteit (i.e. grotere weerstand tegen of groter herstelvermogen op) tegen schadelijke effecten van weersextremen. Een validerend onderzoek in het open veld heeft hierbij de voorkeur, zodat daarmee wetenschappelijke onderbouwing van de effectiviteit hand in hand gaat met de praktische toepassing van de maatregel. Gelet op de kansrijke preventieve maatregelen genoemd in Tabel 6.2 én de positieve ervaringen buiten Nederland (VS), stellen we daarom voor om validerend veldonderzoek te richten op de volgende combinatie van preventieve maatregelen:

- het opbouwen van organische stof door niet-kerende grondbewerking, in combinatie met het bedekt houden van de onbeteelde bodem met strooisel.

Het is raadzaam deze (combinatie van) maatregelen in veldvalidatie onderzoek te toetsen op effectiviteit in het verminderen van de kwetsbaarheid van de bodem voor weersextremen. Daarbij moet rekening worden gehouden met het feit dat de effectiviteit van een nieuw toegepaste beheermaatregel pas na meerdere jaren

zichtbaar zal worden. Het heeft de voorkeur proeflocaties te selecteren waar zo'n specifieke beheermaatregel al meerdere jaren is toegepast.

Bodemindicatoren en andere relevante parameters

Het ligt voor de hand om bij het meten van de invloed van extreem weer op bodemkwaliteit gebruik te maken van de in paragraaf 4.7 beschreven sleutelindicatoren voor bodemkwaliteit; indicatoren die relevant zijn voor zo veel mogelijk verschillende bodemfuncties en ecosysteemdiensten en responsief zijn voor zoveel mogelijk factoren (management zowel als stressoren, inclusief weersextremen) die het functioneren van de bodem kunnen beïnvloeden. In het geval van weersextremen als stressor en agrarische productie als primair te beoordelen ecosysteemdienst, hebben we voor die afgebakende vraagstelling de volgende potentiële sleutelindicatoren onderscheiden. Om ook inzicht te krijgen in de mate van impact op de chemische bodemkwaliteit, adviseren we de indicator 'mineraliseerbare stikstof' aan de indicatorenlijst toe te voegen.

Voorgesteld wordt om in een eerste veldonderzoek de volgende indicatoren te meten:

- aggregaatstabiliteit en -grootteverdeling;
- schimmels (saprotrofen en mycorrhiza) en bacteriën, hoeveelheden en schimmel-bacteriënratio;
- regenwormen dichtheid en soortensamenstelling;
- mineraliseerbare stikstof.

Aangezien deze shortlist is gebaseerd op literatuur en expert judgement, wordt het wenselijk geacht om middels validerend onderzoek de bruikbaarheid en robuustheid van deze drie sleutelindicatoren te toetsen onder relevante Nederlandse omstandigheden van weersextremen en landbouwpraktijken.

Om de hydrologische en meteorologische condities vast te stellen aan de start van het veldonderzoek (nulsituatie) en gedurende het onderzoek (seizoenstrend), adviseren we om naast voornoemde bodemindicatoren de volgende parameters continu dan wel maandelijks te meten:

- bodemvocht op 2 à 3 dieptes (continu);
- neerslag, luchttemperatuur en bodemtemperatuur van de toplaag (continu);
- grondwaterstanden van het freatisch pakket (continu);
- de verticale verzadigde doorlatendheid van de bodem, vochtspanning toplaag (maandelijks);
- gewasgroei/bepaling hoeveelheid droge stof (maandelijks).

Tot slot is het raadzaam om – ter voorbereiding van het onderzoek en voor het bepalen van de mate van geschiktheid van een locatie – naast voornoemde parameters de volgende contextuele achtergrondgegevens vast te stellen:

- textuur van de bodem;
- de beheerhistorie.

Literatuur

- A'Bear, A. D., T. H. Jones, E. Kandeler and L. Boddy (2014). Interactive effects of temperature and soil moisture on fungal-mediated wood decomposition and extracellular enzyme activity. *Soil Biology and Biochemistry* 70: 151-158.
- Adeyemo, T., I. Kramer, G.J. Levy, Y. Mau. 2022. Salinity and sodicity can cause hysteresis in soil hydraulic conductivity. *Geoderma* 413, 115765. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115765>
- Ali, S., & Khan, N. (2021). Delineation of mechanistic approaches employed by plant growth promoting microorganisms for improving drought stress tolerance in plants. *Microbiological Research*, 249, 126771.
- Alster, C. J., German, D. P., Lu, Y., & Allison, S. D. (2013). Microbial enzymatic responses to drought and to nitrogen addition in a southern California grassland. *Soil Biology and Biochemistry* 64: 68-79.
- Andriuzzi, W. S., M. M. Puleman, O. Schmidt, J. H. Faber and L. Brussaard (2015). Anecic earthworms (*Lumbricus terrestris*) alleviate negative effects of extreme rainfall events on soil and plants in field mesocosms. *Plant and Soil* 397(1-2): 103-113.
- Annabi, M., Houot, S., Poitrenaud, M., Rampon, J.N., Gaillard, H., Le Bissonnais, Y., 2004. Effect of organic amendments on soil aggregate stability. In: Bernal, M.P., Moral, R., Clemente, R., Paredes, C. (Eds.), *Sustainable Organic Waste Management for Environmental Protection and Food Safety*, Vol. 1-Proceedings of the 11th International Conference of the FAO ESCORENA Network on Recycling of Agricultural, Municipal and Industrial Residues in Agriculture, pp. 51-54 Murcia, Spain.
- Assouline, S. 2006a. Modeling the Relationship between Soil Bulk Density and the Water Retention Curve. *Vadose Zone Journal* 5(2): 554-563. doi:10.2136/vzj2005.0083.
- Assouline, S. 2006b. Modeling the Relationship between Soil Bulk Density and the Hydraulic Conductivity Function. *Vadose Zone Journal* 5(2): 697-705. doi: 10.2136/vzj2005.0084.
- Augeard, B., L.M. Bresson, S. Assouline, C. Kao, M. Vauclin. 2008. Dynamics of Soil Surface Bulk Density: Role of Water Table Elevation and Rainfall Duration. *Soil Science Society of America Journal* 72: 412-423. doi:10.2136/sssaj2006.0429
- Augeard, B., S. Assouline, A. Fonty, C. Kao, M. Vauclin. 2007. Estimating hydraulic properties of rainfall-induced soil surface seals from infiltration experiments and X-ray bulk density measurements. *Journal of Hydrology* 341: 12- 26. doi: 10.1016/j.jhydrol.2007.04.018
- Bakema, G., J. Bloem, M. Heinen, M. Knotters en N. van Rooijen. 2022. De invloed van klimaatverandering op de bodemtemperatuur. Inventarisatie van de ontwikkeling van de bodemtemperatuur en de invloed op de biotische en abiotische processen in natuurgebieden. Rapport 3154, Wageningen Environmental Research, Wageningen. <https://edepot.wur.nl/566436>
- Banwart, S.A., N.P. Nikolaidis, Y.-G. Zhu, C.L. Peacock, and D.L. Sparks. 2019. Soil Functions: Connecting Earth's Critical Zone. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 47: 333-359. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-063016-020544>
- Barnard, R. L., Osborne, C. A., & Firestone, M. K. (2013). Responses of soil bacterial and fungal communities to extreme desiccation and rewetting. *The ISME journal*, 7(11), 2229-2241.
- Barreiro A, Lombao A, Martín A, Cancelo-González J, Carballas T, Díaz-Raviña M. (2020). Soil Heating at High Temperatures and Different Water Content: Effects on the Soil Microorganisms. *Geosciences* 10(9):355. <https://doi.org/10.3390/geosciences10090355>
- Beier, C., Beierkuhnlein, C., Wohlgemuth, T., Penuelas, J., Emmett, B., Körner, C., . . . Janssens, I. A. (2012). Precipitation manipulation experiments—challenges and recommendations for the future. *Ecology Letter* 15(8): 899-911.
- Blackwell, M.S.A., Carswell, A.M., Bol, R., 2013. Variations in concentrations of N and P forms in leachates from dried soils rewetted at different rates. *Biology and Fertility of Soils* 49, 79-87.
- Blair, N. 2010. The impact of soil water content and water temperature on wet aggregate stability. What answer do you want? 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World 1 – 6 August 2010, Brisbane, Australia. Available at: <https://www.iuss.org/19th%20WCSS/Symposium/pdf/2335.pdf>
- Bongers, T. (1990). The maturity index: an ecological measure of environmental disturbance based on nematode species composition. *Oecologia* 83(1): 14-19.

- Bouasria, A., Mustafa, T., De Bello, F., Zinger, L., Lemperiere, G., Geremia, R. A., & Choler, P. (2012). Changes in root-associated microbial communities are determined by species-specific plant growth responses to stress and disturbance. *European Journal of Soil Biology*, 52, 59-66.
- Bouwman, L. A., en K. B. Zwart (1994). The ecology of bacterivorous protozoans and nematodes in arable soil. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 51:145-160.
- Brouwer, F. en D.J.J. Walvoort. 2019. Basisregistratie Ondergrond (BRO) – Actualisatie bodemkaart., Herkartering van de veengebieden in Eemland. WOt-technical report 155, WOt Natuur en Milieu, Wageningen.
- Bryan, R.B. 1971. The Influence of Frost Action on Soil-Aggregate Stability. *Transactions of the Institute of British Geographers* 54: 71-88. Available at: <https://www.jstor.org/stable/pdf/621363.pdf>
- Bussink, D.W., Bakker, R.F., Van den Draai, H., Temminghoff, E.J.M., 2011a. Naar een advies voor fosfaatbemesting op nieuwe leest; deel 2 grasland. NMI report. Nutriënten Management Instituut (NMI), Wageningen, p. 54.
- Bussink, D.W., Bakker, R.F., Van der Draai, H., Temminghoff, E., 2011b. Naar een advies voor fosfaatbemesting op nieuwe leest; deel 1 snijmaïs. NMI rapport. NMI, Wageningen, p. 61.
- Calderon, S., Holmstrup, M., Westh, P., & Overgaard, J. (2009). Dual roles of glucose in the freeze-tolerant earthworm *Dendrobaena octaedra*: cryoprotection and fuel for metabolism. *Journal of Experimental Biology* 212(6): 859-866.
- Cheng, X., Y. Luo, X. Xu, R. Sherry, Q. Zhang. 2011. Soil organic matter dynamics in a North America tallgrass prairie after 9 yr of experimental warming. *Biogeosciences*, 8, 1487-1498. doi:10.5194/bg-8-1487-2011
- Clark, J., Campbell, J., Grizzle, H., Acosta-Martinez, V. & Zak, J. (2009). Soil microbial community response to drought and precipitation variability in the Chihuahuan Desert. *Microb. Ecol.*, 57, 248-260.
- Constantz, J. 1982. Temperature Dependence of Unsaturated Hydraulic Conductivity of Two Soils. *Soil Science Society of America Journal* 46: 466-470.
- Cornelissen, P. 2022. Wastewater re-use in agriculture: modelling contaminant transport and impact on soil structure. PhD thesis, Wageningen University, Wageningen. <https://library.wur.nl/WebQuery/edepot/556803>
- Coughlan KJ, WE Fox and JD Hughes (1973) Aggregation in swelling clay soils. *Australian Journal of Soil Research* 11(2):133 - 141
- DAFF (2023). National Soil Action Plan 2023 to 2028, Department of Agriculture, Fisheries and Forestry, Canberra CC BY 4.0.
- De Boer, T. E., Roelofs, D., Vooijs, R., Holmstrup, M., & Amorim, M. J. B. (2018). Population-specific transcriptional differences associated with freeze tolerance in a terrestrial worm. *Ecology and Evolution* 8(7): 3774-3786. doi: <https://doi.org/10.1002/ece3.3602>
- De Haan, J.J., E. van den Elsen & S.M. Visser. 2021a. Evaluatie van de Bodemindicatoren voor Landbouwgronden in Nederland (BLN), versie 1.0. BLN, versie 1.1 en de schets van een ontwikkelpad naar een BLN, versie 2.0. Rapport WPR-883, Wageningen Plant Research, Wageningen, <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/549973>
- De Haan, J.J., G.W. Korthals, M.C. Hanegraaf, J. Postma, F.M. van Egmond, A.J. Olijve, P. van Asperen, W. Vervuurt, S. Rombout, A. Zwijnenburg, J. Tolhoek, D. Simonse, R. Schierholz, K. Teuling, V. Kurm, P. Brinkman, G. Bongiorno, M. Zwetsloot, W. van Tintelen. J. Bloem, J. Visser, S. Jansen, A. Ramaker, S. Gaastra, M. Spoor en M.T. Schilder. 2021b. Bodemkwaliteitsmetingen 2019 in Bedrijvennetwerk Bodemmetingen. Eerste analyse van de meetresultaten 2019 van integrale bodemkwaliteit op 16 akkerbouwbedrijven. Rapport WPR-888, Wageningen Plant Research. <https://edepot.wur.nl/554216>
- De Jong, R., C.A. Campbell, W. Nicholaichuk. 1983. Water retention equations and their relationship to soil organic matter and particle size distribution for disturbed samples. *Canadian Journal of Soil Science* 63: 291-302.
- De Lange H. J., Lahr J., Van der Pol J. J. C., Wessels Y. & Faber J. H. (2009) Ecological vulnerability in wildlife. An expert judgment and multi-criteria analysis tool using ecological traits to assess relative impact of pollutants. *Environmental Toxicology and Chemistry* 28: 2233-2240.
- De Lange H.J., J.J.C. van der Pol, J. Lahr, & J.H. Faber (2007) Ecological vulnerability in wildlife; A conceptual approach to assess impact of environmental stressors, *Alterra-rapport* 1305, 112 pp.
- Dekker, L.W., C.J. Ritsema. 2000. Wetting patterns and moisture variability in water repellent Dutch soils. *Journal of Hydrology* 231-232: 148-164. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00191-8](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00191-8)

-
- Dekker, L.W., S.H. Doerr, K. Oostindie, A.K. Ziogas, C.J. Ritsema. 2001. Water Repellency and Critical Soil Water Content in a Dune Sand. *Soil Science Society of America Journal* 65(6): 1667-1674.
<https://doi.org/10.2136/sssaj2001.1667>
- Dekker, L.W., C.J. Ritsema, K. Oostindie, D. Moore, J.G. Wesseling. 2009. Methods for determining soil water repellency on field-moist samples. *Water Resources Research* 45, W00D33, doi:10.1029/2008WR007070
- Dieter, D., Herzog, C., Hupfer, M., 2015. Effects of drying on phosphorus uptake in re-flooded lake sediments. *Environmental Science and Pollution Research* 22, 17065-17081.
- Doerr, S.H., R.A. Shakesby, L.W. Dekker, C.J. Ritsema. 2006 Occurrence, prediction and hydrological effects of water repellency amongst major soil and land-use types in a humid temperate climate. *European Journal of Soil Science* 57: 741-754. doi: 10.1111/j.1365-2389.2006.00818.x
- Dörsch, P., Palojärvi, A., & Mommertz, S. (2004). Overwinter greenhouse gas fluxes in two contrasting agricultural habitats. *Nutrient cycling in agroecosystems* 70(2): 117-133.
- EC, Europese Commissie (2023a) Proposal for a Directive on Soil Monitoring and Resilience (Soil Monitoring Law). SEC(2023) 416 final. doi:10.2779/720139
- EC, Europese Commissie (2023b) Impact Assessment Report Accompanying the proposal for a Proposal for a Directive on Soil Monitoring and Resilience (Soil Monitoring Law). Report Annexes SWD 417 part3. https://environment.ec.europa.eu/system/files/2023-07/IMPACT%20ASSESSMENT%20REPORT_ANNEXES_SWD_2023_417_part3.pdf
- Eekeren, N. van, Philippen, B., Bokhorst, J., Berg, C. ter, (2019). *Bodemsignalen grasland: praktijkgids voor bodemmanagement op melkveebedrijven*. Roodbont.
- Eggleton, P., Inward, K., Smith, J., Jones, D. T., & Sherlock, E. (2009). A six year study of earthworm (Lumbricidae) populations in pasture woodland in southern England shows their responses to soil temperature and soil moisture. *Soil Biology and Biochemistry* 41(9): 1857-1865. doi: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.06.007>
- Eisenhauer, N., Stefanski, A., Fisichelli, N. A., Rice, K., Rich, R., & Reich, P. B. (2014). Warming shifts 'worming': effects of experimental warming on invasive earthworms in northern North America. *Scientific Reports*, 4(1), 1-7.
- El-Beltagi, H.S., Basit, A., Mohamed, H.I., Ali, I., Ullah, S., Kamel, E.A.R., Shalaby, T.A., Ramadan, K.M.A., Alkhateeb, A.A., Ghazzawy, H. S. (2022). Mulching as a sustainable water and soil saving practice in agriculture: A review. *Agronomy*, 12(8), 1881.
- Elmer, W. H. (2009). Influence of Earthworm Activity on Soil Microbes and Soilborne Diseases of Vegetables. *Plant Disease* 93(2): 175-179.
- Emdad, M.R., M. Shahabifar, H. Fardad. 2006. Effect of different water qualities on soil physical properties. *In: Proceedings Tenth International Water Technology Conference*, pp. 647-652, IWTC10 2006, Alexandria, Egypt.
- Ernst, G., Felten, D., Vohland, M., & Emmerling, C. (2009). Impact of ecologically different earthworm species on soil water characteristics. *European Journal of Soil Biology* 45(3): 207-213.
- Evans, S. & Wallenstein, M. (2012). Soil microbial community response to drying and rewetting stress: does historical precipitation regime matter? *Biogeochemistry*, 109, 101-116.
- Evans, S. E., & Wallenstein, M. D. (2014). Climate change alters ecological strategies of soil bacteria. *Ecology Letters*, 17(2), 155-164. doi: <https://doi.org/10.1111/ele.12206>
- Faber, J.H., I. Cousin, K.H.E. Meurer, C.M.J. Hendriks, A. Bispo, M. Viketoft, L. ten Damme, D. Montagne, M.C. Hanegraaf, A. Gillikin, P. Kuikman, G. Obiang-Ndong, J. Bengtsson, A.R. Taylor (2022). Stocktaking for Agricultural Soil Quality and Ecosystem Services Indicators and their Reference Values. EJP SOIL Internal Project SIREN Deliverable 2. Report, 153 pp.
- Ferris, H., T. Bongers and R. G. de Goede (2001). A framework for soil food web diagnostics: extension of the nematode faunal analysis concept. *Applied soil ecology* 18(1): 13-29.
- Ferris, J. M. (1970). Soil temperature effects on onion seedling injury by *Pratylenchus penetrans*. *J. Nematol.* 2:248-51.
- Fierer, N., Schimel, J.P. & Holden, P.A. (2003). Influence of drying-rewetting frequency on soil bacterial community structure. *Microb. Ecol.*, 45: 63-71.
- Forber, K.J., Ockenden, M.C., Wearing, C., Hollaway, M.J., Falloon, P.D., Kahana, R., Villamizar, M.L., Zhou, J.G., Withers, P.J.A., Beven, K.J., Collins, A.L., Evans, R., Hiscock, K.M., Macleod, C.J.A., Haygarth, P.M., 2017. Determining the Effect of Drying Time on Phosphorus Solubilization from Three Agricultural Soils under Climate Change Scenarios. *J. Environ. Qual.* 46, 1131-1136.

- Friis, K., Damgaard, C., & Holmstrup, M. (2004). Sublethal soil copper concentrations increase mortality in the earthworm *Aporrectodea caliginosa* during drought. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 57(1): 65-73.
- Fuchslueger, L., Bahn, M., Hasibeder, R., Kienzl, S., Fritz, K., Schmitt, M., . . . Richter, A. (2016). Drought history affects grassland plant and microbial carbon turnover during and after a subsequent drought event. *Journal of Ecology*, 104(5): 1453-1465.
- Giuffr , G., Ricci, A., Bisoffi, S., D nitz, E., Voglhuber-Slavinsky, A., Helming, K., . . . Robinson, D. A. (2021). Mission Area: Soil Health and Food. Foresight on Demand Brief in Support of the Horizon Europe Mission Board. Publications Office of the European Union 2021. DOI: 10.2777/038626
- Gollenbeek, L., G. Hilhorst. 2022. Effecten van verrijking zandbodem met klei op mais- en grasteelt op melkvee­proefbedrijf 'De Marke'. Openbaar Rapport 1371. Wageningen Livestock Research, Wageningen. <https://edepot.wur.nl/569406>
- Gornall, J., Betts, R., Burke, E., Clark, R., Camp, J., Willett, K., & Wiltshire, A. (2010). Implications of climate change for agricultural productivity in the early twenty-first century. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365(1554): 2973-2989.
- Griffiths, B. S., & Caul, S. (1993). Migration of bacterial-feeding nematodes, but not protozoa, to decomposing grass residues. *Biology and Fertility of Soils*, 15(3): 201-207
<https://doi.org/10.1007/BF00361612>
- Groenenberg, J.E., P.F.A.M. R mkens, W. de Vries (2006). Prediction of the long term accumulation and leaching of copper in Dutch agricultural soils: a risk assessment study. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 1278.
- Guan, S., N. An, N. Zong, Y. He, P. Shi, J. Zhang, N. He. 2018. Climate warming impacts on soil organic carbon fractions and aggregate stability in a Tibetan alpine meadow. *Soil Biology and Biochemistry* 116: 224-236. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.10.011>
- Hack-ten Broeke, M.J.D., C.L. van Beek, T. Hoogland, M. Knotters, J.P. Mol-Dijkstra, R.L.M. Schils, A. Smit., F. de Vries. 2009. Kaderrichtlijn Bodem; Basismateriaal voor eventuele prioritaire gebieden. Alterra-rapport 2007, Alterra, Wageningen. <https://edepot.wur.nl/137524>
- Haddaway, N. R., K. Hedlund, L. E. Jackson, T. K tterer, E. Lugato, I. K. Thomsen, H. B. J rgensen & P.-E. Isberg (2017). How does tillage intensity affect soil organic carbon? A systematic review. *Environmental Evidence* 6(1): 30.
- Haines-Young, R. and M. B. Potschin (2018). Common international classification of ecosystem services (CICES) V5. 1 and guidance on the application of the revised structure. European Environment Agency 53.
- Hanaka, A., Ozimek, E., Reszczyńska, E., Jaroszuk-Ścis l, J., & Stolarz, M. (2021). Plant tolerance to drought stress in the presence of supporting bacteria and fungi: An efficient strategy in horticulture. *Horticulturae* 7(10): 390.
- Hand, S. C., Denlinger, D. L., Podrabsky, J. E., & Roy, R. (2016). Mechanisms of animal diapause: recent developments from nematodes, crustaceans, insects, and fish. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology* 310(11): R1193-R1211.
doi:10.1152/ajpregu.00250.2015
- Hanegraaf, M., E. van den Elsen, J. de Haan and S. Visser (2019). Bodemkwaliteitsbeoordeling van landbouwgronden in Nederland - indicatorset en systematiek, versie 1.0. Rapport Wageningen Plant Research, nr. 795. Wageningen.
- Harris, R. (1981). Effect of water potential on microbial growth and activity. In: *Water Potential Relations in Soil Microbiology* (eds. Parr, J., Gardner, W. & Elliott, L.). Soil Science Society of America, Madison, WI, pp. 23-95.
- Heinen, M., G. Bakker, F. Gerritsen, W. de Groot. 2022. Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken in met klei verrijkte zandgrond. WENR-rapport 3145, Wageningen Environmental Research. <https://edepot.wur.nl/561450>
- Henry, H. A. L. (2007). Soil freeze-thaw cycle experiments: Trends, methodological weaknesses and suggested improvements. *Soil Biology and Biochemistry* 39(5): 977-986. doi:
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.11.017>
- Holmstrup, M., & Loeschcke, V. (2003). Genetic variation in desiccation tolerance of *Dendrobaena octaedra* cocoons originating from different climatic regions. *Soil Biology and Biochemistry* 35(1): 119-124.
- Holmstrup, M., & Overgaard, J. (2007). Freeze tolerance in *Aporrectodea caliginosa* and other earthworms from Finland. *Cryobiology*, 55(1): 80-86.

- Hopmans, J.W., A.S. Qureshi, I. Kisekka, R. Munns, S.R. Grattan, P. Rengasamy, A. Ben-Gal, S. Assouline, M. Javaux, P.S. Minhas, P.A.C. Raats, T.H. Skaggs, G. Wang, Q. De Jong van Lier, H. Jiao, R.S. Lavado, N. Lazarovitch, B. Li, E. Taleisnik. 2021. Critical knowledge gaps and research priorities in global soil salinity. *Advances in Agronomy* 169: 1-191. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2021.03.001>
- Hopmans, J.W., J. Dane. 1986. Temperature Dependence of Soil Hydraulic Properties. *Soil Science Society of America Journal* 50: 4-9. <https://doi.org/10.2136/sssaj1986.03615995005000010001x>
- Hueso, S., García, C., & Hernández, T. (2012). Severe drought conditions modify the microbial community structure, size and activity in amended and unamended soils. *Soil Biology and Biochemistry* 50: 167-173.
- Jefferies, R. L., Walker, N. A., Edwards, K. A., & Dainty, J. (2010). Is the decline of soil microbial biomass in late winter coupled to changes in the physical state of cold soils? *Soil Biology and Biochemistry* 42(2): 129-135. doi: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.10.008>
- Jirků, V., Kodešová, R., Nikodem, A., Mühlhanslová, M., & Žigová, A. (2013). Temporal variability of structure and hydraulic properties of topsoil of three soil types. *Geoderma*, 204-205, 43-58. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.03.024>
- Joshi, D.C., S.C. Iden, A. Peters, B.S. Das, W. Durner. 2019. Temperature Dependence of Soil Hydraulic Properties: Transient Measurements and Modeling. *Soil Science Society of America Journal* 83: 1628-1636. doi:10.2136/sssaj2019.04.0121
- Kaandorp, V., P. de Louw, N. van Eekeren, C. Versteeg. 2021. Demonstratie Maatregelen Maaiveldafvoer. Rapport 1220765-013-BGS-0002, Deltares, Delft/Utrecht.
- Kader, M. A., Singha, A., Begum, M. A., Jewel, A., Khan, F. H., & Khan, N. I. (2019). Mulching as water-saving technique in dryland agriculture. *Bulletin of the National Research Centre*, 43(1), 1-6.
- Kang, J., Peng, Y., & Xu, W. (2022). Crop Root Responses to Drought Stress: Molecular Mechanisms, Nutrient Regulations, and Interactions with Microorganisms in the Rhizosphere. *International Journal of Molecular Sciences* 23(16): 9310.
- Kieft, T.L., Soroker, E. & Firestone, M.K. (1987). Microbial biomass response to a rapid increase in water potential when dry soil is wetted. *Soil Biol. Biochem.*, 19, 119-126.
- Klein J, Roskom G (2018). Zware metalen in dierlijke mest in 2017. Deltares rapport, 11202236-002.
- KNMI, 2023. KNMI/23-klimaatscenario's voor Nederland, KNMI, De Bilt, KNMI-Publicatie 23-03.
- Kohler, J., F. Caravaca, A. Roldán. 2009. Effect of drought on the stability of rhizosphere soil aggregates of *Lactuca sativa* grown in a degraded soil inoculated with PGPR and AM fungi. *Applied Soil Ecology* 42: 160-165. doi:10.1016/j.apsoil.2009.03.007.
- Kool, D., Tong, B., Tian, Z., Heitman, J. L., Sauer, T. J., & Horton, R. (2019). Soil water retention and hydraulic conductivity dynamics following tillage. *Soil and Tillage Research*, 193, 95-100.
- Lavelle, P. (1988). Earthworm activities and the soil system. *Biology and fertility of soils* 6(3): 237-251.
- Lee, K. E. (1985). *Earthworms: their ecology and relationships with soils and land use*. Academic Press Inc.
- Legout, C., S. Leguédois, Y. Le Bissonnais (2005). Aggregate breakdown dynamics under rainfall compared with aggregate stability measurements. *European Journal of Soil Science* 56: 225-237. doi: 10.1111/j.1365-2389.2004.00663.x
- Lesk, C., W. Anderson, A. Rigden, O. Coast, J. Jägermeyr, S. McDermid, K.F. Davis and M. Konar. 2022. Compound heat and moisture extreme impacts on global crop yields under climate change. *Nature Reviews Earth & Environment* 3: 872-889. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00368-8>
- Lesk, C., Rowhani, P., & Ramankutty, N. (2016). Influence of extreme weather disasters on global crop production. *Nature*, 529(7584): 84-87.
- Lichner, L., N. Babejova, L.W. Dekker. 2002. Effects of kaolinite and drying temperature on the persistence of soil water repellency induced by humic acids. *Rostlinná Výroba* 48(5): 203-207.
- Ma, K.-C., Y.-J. Lin, Y.-C. Tan. 2013. The influence of salinity on hysteresis of soil water-retention curves. *Hydrological Processes* 27: 2524-2530. doi:10.1002/hyp.9393
- Mao, J., K.G.J. Nierop, S.C. Dekker, L.W. Dekker, B. Chen. 2019. Understanding the mechanisms of soil water repellency from nanoscale to ecosystem scale: a review. *Journal of Soils and Sediments* 19: 171-185. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2195-9>
- Mariotte, P., Le Bayon, R.-C., Eisenhauer, N., Guenat, C., & Buttler, A. (2016). Subordinate plant species moderate drought effects on earthworm communities in grasslands. *Soil Biology and Biochemistry* 96: 119-127.
- Marshall, T.J. & Quirk, J.P. (1950). Stability of structural aggregates of dry soil. *Australian Journal of Agricultural Science*, 1, 266-275. DOI: 10.1071/AR9500266

- Marulanda A, Barea J-M, Azcón R. (2009). Stimulation of plant growth and drought tolerance by native microorganisms (AM fungi and bacteria) from dry environments: mechanisms related to bacterial effectiveness. *Journal of Plant Growth Regulation* 28(2):115-24.
- Mehra, P., J. Baker, R. E. Sojka, N. Bolan, J. Desbiolles, M. B. Kirkham, C. Ross & R. Gupta (2018). Chapter Five - A Review of Tillage Practices and Their Potential to Impact the Soil Carbon Dynamics. *Advances in Agronomy*. D. L. Sparks, Academic Press. 150: 185-230.
- Meghvansi, M. K., L. Singh, R. B. Srivastava, and A. Varma. 2011. Assessing the Role of Earthworms in Biocontrol of Soil-Borne Plant Fungal Diseases. In A. Karaca (editor) *Biology of Earthworms*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. Pages 173-189.
- Mengel, K., Kirkby, E.A., 2001. *Principles of plant nutrition*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Moebius-Clune, B. N., D.J. Moebius-Clune, B.K. Gugino, O.J. Idowu, A. J. R. R.R. Schindelbeck, H.M. van Es, J.E. Thies, H.A. Shayler, and K. S. M. K. M.B. McBride, D.W. Wolfe, and G.S. Abawi (2016). *Comprehensive Assessment of Soil Health; The Cornell Framework, Edition 3.2, 2017*. Cornell University, Geneva, NY, USA.
- Mostaghimi, S., R. A. Young, A. R. Wilts, A. L. Kenimer. 1988. Effects of Frost Action on Soil Aggregate Stability. *Transactions of the ASAE* 31(2): 435-439. doi: 10.13031/2013.30727
- Mualem, Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12: 513-522.
- Muscolo, A., G. Settineri and E. Attinà (2015). Early warning indicators of changes in soil ecosystem functioning. *Ecological Indicators* 48: 542-549.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X14004257>
- Ngo-Cong, D., D. L. Antille, M. Th. van Genuchten, H. Q. Nguyen, M. Z. Tekeste, C. P. Baillie and R. J. Godwin (2021). A modeling framework to quantify the effects of compaction on soil water retention and infiltration. *Soil Science Society of America Journal* 85(6): 1931-1945.
- Norton D.C. (1979) Relationship of physical and chemical factors to populations of plant-parasitic nematodes. *Ann. Rev. Phytopathol.* 17:279-99
- OBI, 2021. Open bodemindex. <https://openbodemindex.nl/>
- Owojori, O. J., & Reinecke, A. J. (2010). Effects of natural (flooding and drought) and anthropogenic (copper and salinity) stressors on the earthworm *Aporrectodea caliginosa* under field conditions. *Applied Soil Ecology* 44(2): 156-163.
- Oztas, T., F. Fayetorbay. 2003. Effect of freezing and thawing processes on soil aggregate stability. *Catena* 52: 1-8. doi: 10.1016/S0341-8162(02)00177-7
- Panayiotopoulos, K.P., E. Salonikiou, K. Siaga, V. Germanopoulou, and S. Skaperda. 2003. Effect of uniaxial compression on water retention, hydraulic conductivity and the penetration resistance of six Greek soils. *International Agrophysics* 17: 191-197.
- Panettieri, M., Berns, A. E., Knicker, H., Murillo, J. M., & Madejón, E. (2015). Evaluation of seasonal variability of soil biogeochemical properties in aggregate-size fractionated soil under different tillages. *Soil and Tillage Research*, 151, 39-49. doi: <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.02.008>
- Papadopoulos, E., C. Himonas, and G. C. Coles (2001). Drought and flock isolation may enhance the development of anthelmintic resistance in nematodes. *Veterinary Parasitology* 97:253-259.
- Parton, W.J., Schimel, D.S., Ojima, D.S. & Cole, C.V. (1987). Analysis of factors controlling soil organic matter levels in great plains grasslands. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51: 1173-1179.
- Paul, C., K. Kuhn, B. Steinhoff-Knopp, P. Weißhuhn and K. Helming (2021). Towards a standardization of soil-related ecosystem service assessments. *European Journal of Soil Science* 72(4): 1543-1558.
- Paul, E.A. & Clark, F. (1996). *Soil Microbiology and Biochemistry*. Academic Press, San Diego, CA.
- Perreault, J. M., & Whalen, J. K. (2006). Earthworm burrowing in laboratory microcosms as influenced by soil temperature and moisture. *Pedobiologia*, 50(5), 397-403.
- Peters, A., S.C. Iden und W. Durner. 2015. Revisiting the simplified evaporation method: Identification of hydraulic functions considering vapor, film and corner flow, *Journal of Hydrology* 527: 531-542, <https://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.05.020>.
- Petersen, C. R., Holmstrup, M., Malmendal, A., Bayley, M., & Overgaard, J. (2008). Slow desiccation improves dehydration tolerance and accumulation of compatible osmolytes in earthworm cocoons (*Dendrobaena octaedra* Savigny). *Journal of Experimental Biology* 211(12): 1903-1910.
- Pezzolla, D., Cardenas, L.M., Mian, I.A., Carswell, A., Donovan, N., Dhanoa, M.S., Blackwell, M.S.A., 2019. Responses of carbon, nitrogen and phosphorus to two consecutive drying–rewetting cycles in soils. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 182, 217-228.

- Plaas, E., F. Meyer-Wolfarth, M. Banse, J. Bengtsson, H. Bergmann, J. Faber, M. Potthoff, T. Runge, S. Schrader, and A. Taylor. 2019. Towards valuation of biodiversity in agricultural soils: A case for earthworms. *Ecological Economics* 159:291-300.
- Pochron, S., M. Choudhury, R. Gomez, S. Hussaini, K. Illuzzi, M. Mann, M. Mezic, J. Nikakis, C. Tucker (2019). Temperature and body mass drive earthworm (*Eisenia fetida*) sensitivity to a popular glyphosate-based herbicide. *Applied Soil Ecology* 139: 32-39. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.03.015>.
- PA et al., Productschap Akkerbouw, Productschap Tuinbouw en Limburgse Land- en Tuinbouwbond (2013). Erosiebestrijding; De voorschriften vanaf 2009. Folder. <https://www.kwaad.net/Erosiebrochure2009ev19febr09.pdf>
- Radke, J.K., E.C. Berry. 1998. Soil water and solute movement and bulk density changes in repacked soil columns as a result of freezing and thawing under field conditions. *Soil Science* 163(8): 611-624.
- Ramesh, T., N. S. Bolan, M. B. Kirkham, H. Wijesekara, M. Kanchikerimath, C. Srinivasa Rao, S. Sandeep, J. Rinklebe, Y. S. Ok, B. U. Choudhury, H. Wang, C. Tang, X. Wang, Z. Song & O. W. Freeman II (2019). Chapter One - Soil organic carbon dynamics: Impact of land use changes and management practices: A review. *Advances in Agronomy*. D. L. Sparks, Academic Press. 156: 1-107.
- Rieke, E. L., D. K. Bagnall, C. L. S. Morgan, K. D. Flynn, J. A. Howe, K. L. H. Greub, G. Mac Bean, S. B Cappellazzi, M. Cope, D. Liptzin, C. E. Norris, P. W. Tracy, E. Aberle, A. Ashworth, O. Bañuelos Tavarez, A. I. Bary, R. L. Baumhardt, A. Borbón Gracia, D. C. Brainard, J. R. Brennan, D. Briones Reyes, D. Bruhjell, C. N. Carlyle, J. J. W. Crawford, C. F. Creech, S. W. Culman, B. Deen, C. J. Dell, J. D. Derner, T. F. Ducey, S. W. Duiker, M. F. Dyck, B. H. Ellert, M. H. Entz, A. Espinosa Solorio, S. J. Fonte, S. Fonteyne, A.-M. Fortuna, J. L. Foster, L. M. Fultz, A. V. Gamble, C. M. Geddes, D. Griffin-LaHue, J. H. Grove, S. K. Hamilton, X. Hao, Z. D. Hayden, N. Honsdorf, J. A. Ippolito, G. A. Johnson, M. A. Kautz, N. R. Kitchen, S. Kumar, K. S. M. Kurtz, F. J. Larney, K. L. Lewis, M. Liebman, A. Lopez Ramirez, S. Machado, B. Maharjan, M. A. Martinez Gamiño, W. E. May, M. P. McClaran, M. D. McDaniel, N. Millar, J. P. Mitchell, A. D. Moore, P. A. Moore, M. Mora Gutiérrez, K. A. Nelson, E. C. Omondi, S. L. Osborne, L. Osorio Alcalá, P. Owens, E. M. Pena-Yewtukhiw, H. J. Poffenbarger, B. Ponce Lira, J. R. Reeve, T. M. Reinbott, M. S. Reiter, E. L. Ritchey, K. L. Roozeboom, Y. Rui, A. Sadeghpour, U. M. Sainju, G. R. Sanford, W. F. Schillinger, R. R. Schindelbeck, M. E. Schipanski, A. J. Schlegel, K. M. Scow, L. A. Sherrod, A. L. Shober, S. S. Sidhu, E. Solís Moya, M. St. Luce, J. S. Strock, A. E. Suyker, V. R. Sykes, H. Tao, A. Trujillo Campos, L. L. Van Eerd, H. M. van Es, N. Verhulst, T. J. Vyn, Y. Wang, D. B. Watts, D. L. Wright, T. Zhang and C. W. Honeycutt (2022). Evaluation of aggregate stability methods for soil health. *Geoderma* 428: 116156. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116156>
- Rillig, M.C., S.F. Wright, M.R. Shaw, C.B. Field. 2002. Artificial climate warming positively affects arbuscular mycorrhizae but decreases soil aggregate water stability in an annual grassland. *OIKOS* 97: 52-58. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0706.2002.970105.x>
- Ritsema, C.J., J.C. van Dam, L.W. Dekker, K. Oostindie. 2005. A new modelling approach to simulate preferential flow and transport in water repellent porous media: Model structure and validation. *Australian Journal of Soil Research*, 43: 361-369. doi:10.1071/SR05054
- Ritsema, C.J. L.W. Dekker, K. Oostindie, D. Moore, B. Leinauer. 2008. Soil Water Repellency and Critical Soil Water Content. *Soil Science Step-by-Step Field Analysis*, <https://doi.org/10.2136/2008.soilsciencestepbystep.c8>
- Ritz, K., H. I. J. Black, C. D. Campbell, J. A. Harris and C. Wood (2009). Selecting biological indicators for monitoring soils: A framework for balancing scientific and technical opinion to assist policy development. *Ecological Indicators* 9(6): 1212-1221. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2009.02.009>
- Rutgers M., C. Mulder, A.J. Schouten, J. Bloem, J.J. Bogte, A.M. Breure, L. Brussaard, R.G.M. de Goede, J.H. Faber, G.A.J.M. Jagers op Akkerhuis, H. Keidel, G.W. Korthals, F.W. Smeding, C. ter Berg, & N. van Eekeren (2007) Typering van bodemecosystemen in Nederland met tien referenties voor biologische bodemkwaliteit. RIVM Rapport 607604008/2007, 96 pp. <http://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/607604007.pdf>
- Sachs, E., P. Sarah. 2018. Technical report of a rainfall temperature control system for rainfall simulators. *Catena* 165: 516-519. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.03.006>
- Sardans, J., Penuelas, J. 2007. Drought changes phosphorus and potassium accumulation patterns in an evergreen Mediterranean forest. *Functional Ecology* 21. 191-201.

- Schimel, J., Balser, T.C. & Wallenstein, M. (2007). Microbial stress-response physiology and its implications for ecosystem function. *Ecology*, 88, 1386–1394.
- Schneider, C.B.H. & J.T. Huinink. 1991. Bouwvoorbodemkunde en grondbewerking. *In: W.P. Locher & H. de Bakker, Bodemkunde van Nederland*, pp. 197-209. Malmberg, Den Bosch.
- Seifert, J. (1960). The influence of moisture and temperature on the number of microorganisms in the soil. *Folia Microbiologica* 5(3): 176-180.
- Selin Norén, I., Verstand, D., de Haan, J. 2021. Effecten van bodemmaatregelen op bodemfuncties en bodemkwaliteit; Integrale analyse van de resultaten uit de PPS Beter Bodembeheer en eerste vertaalslag naar praktische boodschappen. Rapport WPR 856, Wageningen Plant Research, Wageningen.
- Sekaran, U. K.L. Sagar, S. Kumar. 2021. Soil aggregates, aggregate-associated carbon and nitrogen, and water retention as influenced by short and long-term no-till systems. *Soil and Tillage Research* 208, 104885. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104885>
- Shao, Y., X. Wang, J. Zhao, J. Wu, W. Zhang, D.A. Neher, Y. Li, Y. Lou, S. Fu, P. Kardol (2015). Subordinate plants sustain the complexity and stability of soil micro-food webs in natural bamboo forest ecosystems. *J. Appl. Ecol.*, 53: 130-139.
- Shi, P., K. Van Oost, R. Schulin. 2017. Dynamics of soil fragment size distribution under successive rainfalls and its implication to size-selective sediment transport and deposition. *Geoderma* 308: 104-111. <https://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.08.038>
- Siebert, J., N. Eisenhauer, C. Poll, S. Marhan, M. Bonkowski, J. Hines, R. Koller, L. Ruess and M. P. Thakur (2019). Earthworms modulate the effects of climate warming on the taxon richness of soil meso- and macrofauna in an agricultural system. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 278: 72-80.
- Singh, J., Schädler, M., Demetrio, W., Brown, G. G., & Eisenhauer, N. (2019). Climate change effects on earthworms - a review. *Soil Org*, 91(3), 114-138. doi:10.25674/so91iss3pp114
- Song, D., K. Pan, A. Tariq, F. Sun, Z. Li, X. Sun, L. Zhang, O. A. Olusanya and X. Wu (2017). Large-scale patterns of distribution and diversity of terrestrial nematodes. *Applied Soil Ecology* 114: 161-169. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.02.013>
- Spurgeon, D.J., A.M. Keith, O. Schmidt, D.R. Lammertsma, J.H. Faber (2013) land-use and land-management change: relationships with earthworm and fungi communities and soil Structural Properties. *BMC Ecology* 13:46. <http://www.biomedcentral.com/1472-6785/13/46>
- Starr, J. L., Mai, W. F. (1976). Predicting on-set of egg production by *Meloidogyne hapla* on lettuce from field soil temperatures. *J. Nematol.* 8:87-88
- Stephens, P. M., C. W. Davoren, M. H. Ryder, B. M. Doube, and R. L. Correll (1994). Field evidence for reduced severity of Rhizoctonia bare-patch disease of wheat, due to the presence of the earthworms *Aporrectodea Rosea* and *Aporrectodea Trapezoides*. *Soil Biology and Biochemistry* 26:1495-1500. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(94\)90090-6](https://doi.org/10.1016/0038-0717(94)90090-6)
- STOWA. 2021. Belang van bodemorganische stof voor het waterbeheer. Deltafact. Beschikbaar op: <https://www.stowa.nl/deltafacts/zoetwatervoorziening/droogte/belang-van-bodemorganische-stof-voor-het-waterbeheer>
- Sulkava, P., & Huhta, V. (2003). Effects of hard frost and freeze-thaw cycles on decomposer communities and N mineralisation in boreal forest soil. *Applied Soil Ecology* 22(3): 225-239. [https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(02\)00155-5](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(02)00155-5)
- Sun, D., Bi, Q., Li, K., Dai, P., Yu, Y., Zhou, W., Lv, T., Liu, X., Zhu, J., Zhang, Q., Jin, C., Lu, L., Lin, X., 2018. Significance of temperature and water availability for soil phosphorus transformation and microbial community composition as affected by fertilizer sources. *Biology and Fertility of Soils* 54.
- Sun, F., Pan, K., Li, Z., Wang, S., Tariq, A., Olatunji, O. A., Sun, X., Zhang, L. & Wu, X. (2018). Soybean supplementation increases the resilience of microbial and nematode communities in soil to extreme rainfall in an agroforestry system. *Science of The Total Environment*, 626, 776-784. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.063>
- Tang, C.-S., X.-P. Gong, Z. Shen, Q. Cheng, H. Inyang, C. Lv, B Shi. 2022. Soil micro-penetration resistance as an index of its infiltration processes during rainfall. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, in-press. <https://doi.org/10.106/j.jrmge.2021.12.009>
- Ten Cate, J. A. M., van Holst, A. F., Kleijer, H., & Stolp, J., 1995. Handleiding bodemgeografisch onderzoek; richtlijnen en voorschriften. Deel D: interpretatie van bodemkundige gegevens voor diverse vormen van bodemgebruik. Technisch document / DLO-Staring Centrum; No. 19-D. Staring Centrum.
- Thakur, M. P., P. B. Reich, N. A. Fisichelli, A. Stefanski, S. Cesarz, T. Dobies, R. L. Rich, S. E. Hobbie and N. Eisenhauer (2014). Nematode community shifts in response to experimental warming and canopy

- conditions are associated with plant community changes in the temperate-boreal forest ecotone. *Oecologia* 175(2): 713-723.
- Tian, J., Dong, G., Karthikeyan, R., Li, L., Harmel, R.D., 2017. Phosphorus Dynamics in Long-Term Flooded, Drained, and Reflooded Soils. *Water* 9, 531.
- Tian, Z., D. Kool, T. Ren, R. Horton and J. L. Heitman. 2019. Approaches for estimating unsaturated soil hydraulic conductivities at various bulk densities with the extended Mualem-van Genuchten model. *Journal of Hydrology* 572: 719-731. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.03.027
- Tisdall, J.M. (1994) Possible role of soil microorganisms in aggregation in soils. *Plant Soil* 159: 115-121. DOI: 10.1007/BF00000100
- Tiunov, A. V., Hale, C. M., Holdsworth, A. R., & Vsevolodova-Perel, T. S. (2006). Invasion patterns of Lumbricidae into the previously earthworm-free areas of northeastern Europe and the western Great Lakes region of North America. In *Biological Invasions Belowground: Earthworms as Invasive Species* (pp. 23-34), Springer.
- Van Tol-Leenders, D., Knotters, M., De Groot, W., Gerritsen, P., Reijneveld, A., Van Egmond, F., Wösten, H., Kuikman, P. 2019. Koolstofvoorraad in de bodem van Nederland (1989-2018); CC-NL. Rapport 2974, Wageningen Environmental Research, Wageningen.
- Van Dam, R.A., Camilleri, C. and Finlayson, C.M. (1998). The potential of rapid assessment techniques as early warning indicators of wetland degradation: A review. *Environ. Toxicol. Water Qual.*, 13: 297-312. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/%28SICI%291098-2256%281998%2913%3A4%3C297%3A%3AAID-TOX3%3E3.0.CO%3B2-2>
- Van den Elsen, E., M. Knotters, M. Heinen, P. Römken, J. Bloem, G. Korthals. 2019. Noodzakelijke indicatoren voor de beoordeling van de gezondheid van Nederlandse landbouwbodems. Selectie van fysische, chemische en biologische indicatoren voor het meten van de bodemgezondheid. Rapport 2944, Wageningen Environmental Research, Wageningen. <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/475874>
- Van Genuchten, M.Th., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* 44(3): 892-898.
- Van Middelkoop, J.C., van der Salm, C., Ehlert, P.A.I., de Boer, I.J.M., Oenema, O., 2016. Does balanced phosphorus fertilisation sustain high herbage yields and phosphorus contents in alternately grazed and mown pastures? *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, 1-19.
- van Oort, P.A.J., B.G.H. Timmermans, R.L.M. Schils and N. van Eekeren. 2022. Recent weather extremes and their impact on crop yields of the Netherlands. *European Journal of Agronomy* 142, 126662. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126662>
- Van Sundert, K., Brune, V., Bahn, M., Deutschmann, M., Hasibeder, R., Nijs, I., Vicca, S., 2020. Post-drought rewetting triggers substantial K release and shifts in leaf stoichiometry in managed and abandoned mountain grassland. *Plant Soil* 448, 353-368.
- Veerman, C., T. P. Correia, C. Bastioli, B. Biro, J. Bouma, E. Cienciala, B. Emmett, E. A. Frison, A. Grand and L. H. Filchev (2020). Caring for soil is caring for life: ensure 75% of soils are healthy by 2030 for healthy food, people, nature and climate. Interim report for the European Commission, Directorate-General for Research and Innovation and Directorate-General for Agriculture and Rural Development. European Commission, Publ. Office of European Union: 82 pp. DOI: 10.2777/918775
- Vries, M., de, Hoving, I., Middelkoop, J. van, Napel, J. ten, Weide, R. van der, Verhagen, J., Vellinga, T., (2018). *Klimaatsslimme melkveehouderij: een routekaart voor implementatie van mitigatie- en adaptatiemaatregelen* (Ser. Wageningen livestock research rapport, 1131). Wageningen Livestock Research. Retrieved October 27, 2022, from <https://doi.org/10.18174/463803>.
- Waksman, S. A., & Gerretsen, F. C. (1931). Influence of Temperature and Moisture Upon the Nature and Extent of Decomposition of Plant Residues by Microorganisms. *Ecology* 12: 33-60. <https://doi.org/10.2307/1932933>
- Wang, W., Y. Li, P Guan, L. Chang, X. Zhu, P. Zhang, D. Wu. 2022. How do climate warming affect soil aggregate stability and aggregate-associated phosphorus storage under natural restoration? *Geoderma* 420, 115891. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115891>
- Wang, Y., S. Gao, C. Li, J. Zhang, L. Wang. 2016. Effects of temperature on soil organic carbon fractions contents, aggregate stability and structural characteristics of humic substances in a Mollisol. *Journal of Soils and Sediments* 16: 1849-1857. doi:10.1007/s11368-016-1379-4
- Website Slim Landgebruik. Onderzoeksprogramma dat kennis aanlevert voor extra vastlegging van 0,5 Mton CO₂-eq in Nederlandse minerale landbouwbodems. <https://slimlandgebruik.nl/>

-
- Wever LA, Lysyk TJ, Clapperton MJ. (2001). The influence of soil moisture and temperature on the survival, aestivation, growth and development of juvenile *Aporrectodea tuberculata* (Eisen) (Lumbricidae) *Pedobiologia*. 45:121–133.
- Williams, C. M., Henry, H. A. L., & Sinclair, B. J. (2015). Cold truths: how winter drives responses of terrestrial organisms to climate change. *Biological Reviews* 90(1): 214-235. doi: <https://doi.org/10.1111/brv.12105>
- Wösten, J.H.M., A. Lilly, A. Nemes, C.I. Bas. 1999. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma* 90: 169-185. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(98\)00132-3](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(98)00132-3)
- Wösten, J.H.M., G.J. Veerman, W.J.M. de Groot, J. Stolte. 2001. Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks. Alterra-rapport 153, Alterra, Wageningen.
- Yan, D., D. Yan, X. Song, Z. Yu, D. Peng, X. Ting, and B. Weng (2018). Community structure of soil nematodes under different drought conditions. *Geoderma* 325:110-116.
- Yang, Y., X. Wu, T. He, Y. Wang, O. Wendroth, X. Chen, B. Liu, G. Zhang. 2022. Factors controlling saturated hydraulic conductivity along a typical black soil slope. *Soil and Tillage Research* 220, 105391. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105391>
- Yao, Y., J. Liu, Z. Wang, X. Wei, H. Zhu, W. Fu, M. Shao. 2020. Responses of soil aggregate stability, erodibility and nutrient enrichment to simulated extreme heavy rainfall. *Science of the Total Environment* 709, 136150. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136150>
- Yeates, G. W., T. Bongers, R. G. De Goede, D. W. Freckman and S. Georgieva (1993). Feeding habits in soil nematode families and genera—an outline for soil ecologists. *Journal of nematology* 25(3): 315.
- Yost, J. L. and A. E. Hartemink (2019). Chapter Four - Soil organic carbon in sandy soils: A review. In: D. L. Sparks (Ed.), *Advances in Agronomy* 158: 217-310. Academic Press.
- Yuste, J. C., Penuelas, J., Estiarte, M., GARCIA-MAS, J., Mattana, S., Ogaya, R., . . . Sardans, J. (2011). Drought-resistant fungi control soil organic matter decomposition and its response to temperature. *Global Change Biology*, 17(3), 1475-1486. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02300.x>
- Zhang, Q., M. Shao, X. Jia, C. Zhang. 2018. Understorey Vegetation and Drought Effects on Soil Aggregate Stability and Aggregate-Associated Carbon on the Loess Plateau in China. *Soil Science Society of America Journal* 82: 106-114. doi:10.2136/sssaj2017.05.0145
- Zhang, W.; Parker, K.M.; Luo, Y.; Wan, S.; Wallace, L.L.; Hu, S. (2005). Soil microbial responses to experimental warming and clipping in a tallgrass prairie. *Glob. Chang. Biol.*, 11: 266–277.
- Zörb, C., Senbayram, M., Peiter, E., 2014. Potassium in agriculture – Status and perspectives. *Journal of Plant Physiology* 171, 656-669.

Bijlage 1 Overzicht weersextremen

Overzicht frequenties van weersextremen op maandbasis referentieperiode (1981-2010) voor weerstation De Bilt.

Weersextreem /Maand	Jan	Feb	Mrt	Apr	Mei	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dec	Totaal
Hittegolf						1	4	8					13
>= 2 dagen achter elkaar met Tmax 31,9						1	3	2					6
>= 2 dagen achter elkaar met Tmax 33,6									1				1
>= 10 dagen achter elkaar met Tmax >=24,9					1		3	2					6
>= 10 dagen achter elkaar met Tmax >=26,9							1						1
Neerslagtekort (203,4 mm)												6	6
Neerslagtekort (243,6 mm)												1	1
7 dagen achter elkaar met Tmax <=0		4										2	6
12 dagen achter elkaar met Tmax <=0		1										1	2
Kwakkelwinter		4										2	6
20% droogste neerslagsom van 1 februari - 31 maart (80,5 mm)				6									6
3,3% droogste neerslagsom van 1 februari - 31 maart (44,1 mm)				1									1

Overzicht verandering frequenties van weersextremen op maandbasis voor KNMI-klimaatsscenario 2030 (2016-2045) t.o.v. referentieperiode (1981-2010) voor weerstation De Bilt.

Weersextreem / Maand	Jan	Feb	Mrt	Apr	Mei	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dec	Totaal
Hittegolf						+2	+8	+4					+14
>= 2 dagen achter elkaar met Tmax 31,9						+1	+7	+7					+15
>= 2 dagen achter elkaar met Tmax 33,6						+1	+2	+1					+4
>= 10 dagen achter elkaar met Tmax >=24,9					+1	+1	+3						+5
>= 10 dagen achter elkaar met Tmax >=26,9							+1	+1					+2
Neerslagtekort (203,4 mm)												-6	-6
Neerslagtekort (243,6 mm)												-1	-1
7 dagen achter elkaar met Tmax <=0		-1										-2	-3
12 dagen achter elkaar met Tmax <=0		-1											-1
Kwakkelwinter		-4	+1								+1	-2	-4
20% droogste neerslagsom van 1 februari - 31 maart (80,5 mm)				-2									-2
3,3% droogste neerslagsom van 1 februari - 31 maart (44,1 mm)				-1									-1

Overzicht verandering frequenties van weersextremen op maandbasis voor KNMI-klimaatsscenario GL (2036-2065) t.o.v. referentieperiode (1981-2010) voor weerstation De Bilt.

Weersextreem / Maand	Jan	Feb	Mrt	Apr	Mei	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dec	Totaal
Hittegolf						+2	+8	+3					+13
>= 2 dagen achter elkaar met Tmax 31,9						+3	+9	+7					+19
>= 2 dagen achter elkaar met Tmax 33,6						+1	+2	+1					+4
>= 10 dagen achter elkaar met Tmax >=24,9					+2	+2	+4						+8
>= 10 dagen achter elkaar met Tmax >=26,9							+1	+1					+2
Neerslagtekort (203,4 mm)												+1	+1
Neerslagtekort (243,6 mm)												+1	+1
7 dagen achter elkaar met Tmax <=0		-1										-2	-3
12 dagen achter elkaar met Tmax <=0		-1											-1
Kwakkelwinter		-4	+1									-2	-5
20% droogste neerslagsom van 1 februari - 31 maart (80,5 mm)				-2									-2
3,3% droogste neerslagsom van 1 februari - 31 maart (44,1 mm)													

Overzicht verandering frequenties van weersextremen voor KNMI-klimaatsscenario GH (2036-2065) t.o.v. referentieperiode (1981-2010) op maandbasis voor weerstation De Bilt.

Weersextreem / Maand	Jan	Feb	Mrt	Apr	Mei	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dec	Totaal
Hittegolf						+4	+12	+5					+21
>= 2 dagen achter elkaar met Tmax 31,9						+3	+12	+11					+26
>= 2 dagen achter elkaar met Tmax 33,6						+1	+4	+2					+7
>= 10 dagen achter elkaar met Tmax >=24,9					+2	+4	+5	+2					+13
>= 10 dagen achter elkaar met Tmax >=26,9							+2	+2					+4
Neerslagtekort (203,4 mm)												+3	+3
Neerslagtekort (243,6 mm)												+3	+3
7 dagen achter elkaar met Tmax <=0		-2										-2	-4
12 dagen achter elkaar met Tmax <=0		-1										-1	-2
Kwakkelwinter		-4										-1	-5
20% droogste neerslagsom van 1 februari - 31 maart (80,5 mm)				-2									-2
3,3% droogste neerslagsom van 1 februari - 31 maart (44,1 mm)													

Overzicht verandering frequenties van weersextremen op maandbasis voor KNMI-klimaatsscenario WL (2036-2065) t.o.v. referentieperiode (1981-2010) voor weerstation De Bilt.

Weersextreem / Maand	Jan	Feb	Mrt	Apr	Mei	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dec	Totaal
Hittegolf					+1	+3	+11	+6	+1				+22
>= 2 dagen achter elkaar met Tmax 31,9					+1	+3	+12	+15					+31
>= 2 dagen achter elkaar met Tmax 33,6						+1	+5	+7					+13
>= 10 dagen achter elkaar met Tmax >=24,9					+3	+3	+5	+4	+2				+17
>= 10 dagen achter elkaar met Tmax >=26,9							+2	+2					+4
Neerslagtekort (203,4 mm)												-1	-1
Neerslagtekort (243,6 mm)													
7 dagen achter elkaar met Tmax <=0		-2										-2	-4
12 dagen achter elkaar met Tmax <=0		-1										-1	-2
Kwakkelwinter		-4										-2	-6
20% droogste neerslagsom van 1 februari - 31 maart (80,5 mm)				-2									-2
3,3% droogste neerslagsom van 1 februari - 31 maart (44,1 mm)				-1									-1

Overzicht verandering frequenties van weersextremen op maandbasis voor KNMI-klimaatsscenario WH (2036-2065) t.o.v. referentieperiode (1981-2010) voor weerstation De Bilt.

Weersextreem / Maand	Jan	Feb	Mrt	Apr	Mei	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dec	Totaal
Hittegolf					+1	+5	+13	+13	+3				+35
>= 2 dagen achter elkaar met Tmax 31,9					+1	+7	+19	+19					+46
>= 2 dagen achter elkaar met Tmax 33,6						+4	+14	+10					+28
>= 10 dagen achter elkaar met Tmax >=24,9					+4	+5	+8	+6	+2				+25
>= 10 dagen achter elkaar met Tmax >=26,9						+1	+3	+2					+6
Neerslagtekort (203,4 mm)												+5	+5
Neerslagtekort (243,6 mm)												+8	+8
7 dagen achter elkaar met Tmax <=0		-3										-2	-5
12 dagen achter elkaar met Tmax <=0		-1										-1	-2
Kwakkelwinter		-4										-2	-6
20% droogste neerslagsom van 1 februari - 31 maart (80,5 mm)				-2									-2
3,3% droogste neerslagsom van 1 februari - 31 maart (44,1 mm)				-1									-1

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

Wageningen Environmental Research
Rapport 3361
ISSN 1566-7197



De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen Wageningen University en gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 7.700 medewerkers (7.000 fte), 2.500 PhD- en EngD-kandidaten, 13.100 studenten en ruim 150.000 Leven Lang Leren-deelnemers behoort Wageningen University & Research wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.

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



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

Rapport 3361
ISSN 1566-7197

De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen Wageningen University en gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 7.700 medewerkers (7.000 fte), 2.500 PhD- en EngD-kandidaten, 13.100 studenten en ruim 150.000 Leven Lang Leren-deelnemers behoort Wageningen University & Research wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.

