



Klimaatmaatregelen en waterkwaliteit

Potentie en effecten in de agrarische polders ten oosten van de
Weerribben en ten noorden van de Wieden

Ir. Maarten van Doorn

Dr. Ing. Debby van Rotterdam

Dr. Ing. Casper Cusell

Referaat

van Doorn, M, van Rotterdam, D & Cusell, C, 2021, Klimaatmaatregelen en waterkwaliteit; Potentie en effecten in de agrarische polders ten oosten van de Weerribben en ten noorden van de Wieden. Nutriënten Management Instituut BV, Wageningen, Rapport 1803.N.20, pp 80

Rapport in het kort

Nederlandse veen(weide)gronden stoten naar schatting 2-3% van de totale Nederlandse broeikasgasemissie uit. De doelstelling van het kabinet is om deze uitstoot te reduceren met 1 megaton CO₂-equivalent voor 2030. In dit rapport zijn voor de agrarische polders ten noorden van het Natura-2000 gebied De Wieden en ten oosten van het Natura-2000 gebied Weerribben de potentie en de effecten van maatregelen beschreven die zich richten op het tegengaan van bodemdaling en CO₂-emissie door veenoxidatie. Waar welke maatregelen potentie hebben, is bepaald op basis van verschillen in bodemeigenschappen, agrarisch management en waterbeheer. De maatregelen richten zich op vernatting van de veenweide, wat kan zorgen voor ongewenste mobilisatie van fosfaat. Mogelijke effecten van klimaatmaatregelen op de fosfaatvrucht als ook de agrarische bedrijfsvoering zijn in beeld gebracht.

© 2021 Wageningen, Nutriënten Management Instituut NMI B.V.

Alle rechten voorbehouden. Niets uit de inhoud mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, op welke wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de directie van Nutriënten Management Instituut NMI.

Rapporten van NMI dienen in eerste instantie ter informatie van de opdrachtgever. Over uitgebrachte rapporten, of delen daarvan, mag door de opdrachtgever slechts met vermelding van de naam van NMI worden gepubliceerd. Ieder ander gebruik (daaronder begrepen reclame-uitingen en integrale publicatie van uitgebrachte rapporten) is niet toegestaan zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van NMI.

Disclaimer

Nutriënten Management Instituut NMI stelt zich niet aansprakelijk voor eventuele schadelijke gevolgen voortvloeiend uit het gebruik van door of namens NMI verstrekte onderzoeksresultaten en/of adviezen.

Verspreiding

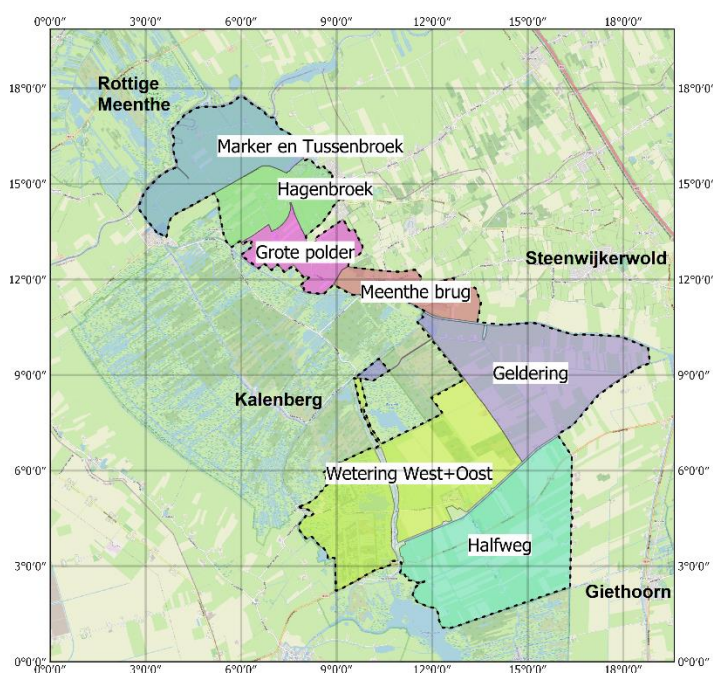
Dhr. Siebinga, provincie Overijssel

digitaal

Samenvatting

De Nederlandse veenweide kent een opgave voor het tegengaan van bodemdaling en een reductie van de daarbij vrijkomende broeikasgasemissies. Door ontwatering van veengronden oxideert veen, wat leidt tot het dalen van de bodem en het vrijkomen van broeikasgassen. Naar schatting wordt 2-3% van de totale Nederlandse broeikasgasemissies veroorzaakt door mineralisatie van veengronden. Het kabinet heeft daarom de doelstelling om de broeikasgasemissie vanuit veenweidegebieden te reduceren met 1 Mton CO₂-eq in 2030. In opdracht van de provincie Overijssel heeft het NMI de specifieke invulling en de effectiviteit van met name hydrologische klimaatmaatregelen onderzocht voor de agrarische polders ten oosten van het Natura 2000 gebied Weerribben en ten noorden van het Natura 2000 gebied De Wieden. Deze polders kennen door de connectiviteit van het watersysteem met de aangrenzende natuurgebieden een dubbele opgave; verlagen van zowel de broeikasgasemissies als het verbeteren van de oppervlaktewaterkwaliteit. Klimaatmaatregelen mogen dus niet een negatief effect hebben op de fosforbelasting van de Natura 2000 gebieden. Dit onderzoek geeft inzicht in kansrijke klimaatmaatregelen in het onderzoeksgebied. Hierbij is gekeken naar het effect van de maatregelen op bodemdaling, broeikasgasemissie, water aan- en afvoer, de fosfaatvrucht van landbouwpercelen naar oppervlaktewater als ook de inpasbaarheid ervan binnen een agrarische bedrijfsvoering.

Het onderzoeksgebied (Figuur 1) laat een grote variatie zien in bodemeigenschappen, agrarisch management en waterbeheer, en beïnvloedt daarmee de kansrijkheid van klimaatmaatregelen. Het handelingsperspectief is als gevolg van dikke (>120cm) veenlagen met hoge organische stofgehalten het grootst in de polder tussen de Weerribben en Rottige Meenthe, (Marker- en Tussenbroek), gevolgd door de laaggelegen delen van de polders ten (noord)oosten van de Weerribben (Meenthebrug, Hagenbroek en de Grote polder) en dat deel van de lager gelegen polders in de Weerribben (grotendeels al tot natuur omgevormde Wetering-West). Het handelingsperspectief is laag in de laaggelegen polders tussen de Weerribben en de Wieden in (Halfweg, Geldering en Wetering-Oost) door slechts dunne (0-50cm) veenlagen die veelal zijn opgemengd met zand.



Figuur 1: Situering van de polders

Afhankelijk van de veendikte en organische stofgehalte van de polder, zijn het verhogen van slootpeilen, het verkleinen van peilgebieden en het toepassen van onderwaterdrainage kansrijke maatregelen om bodemdaling te remmen. Hiernaast kan bodemdaling additioneel worden geremd door het vergroten van de invloed van sloten op de grondwaterstand door het graven van bredere of extra sloten en watervoerende greppels (smallere landbouwpercelen), en door het stimuleren van niet-kerende grondbewerking en permanent grasland. Peilfixatie lijkt in enkele polders een kansrijke maatregel om bodemdaling te stoppen, maar alleen wanneer het wordt gecombineerd met peilverhoging. Het overgaan op natte teelten is een mogelijke maatregel om bodemdaling te stoppen, en lijkt het meest kansrijk in gebieden met dikke veenlagen met hoge organische stofgehalten (Marker en Tussenbroek, Wetering-West, zuidelijke rand van Meenthebrug, Hagenbroek en de Grote Polder). Voor commerciële teelt bestaan er echter nog onzekerheden voor de boer (afzetmarkt, teeltmethoden, verdienmodel), fosfaatuitspoeling naar het watersysteem (o.a. afhankelijk van de mate van hydrologische isolatie en bemesting) en broeikasgasemissie (methaan en lachgas-emissies worden zeer relevant, huidige formules hebben grote onzekerheden) die nader onderzocht moeten worden. Binnen het onderzoeksgebied zouden fosfaatarme percelen in Wetering-West en Marker- en Tussenbroek goede locaties zijn voor pilots.

De klimaatmaatregelen die gericht zijn op vernatten leiden tot een verwachte toename in de fosfaatvrucht naar het watersysteem. Een uitzondering hierop is het vergroten van het nat oppervlak (meer sloten) in de diep gelegen polders. Door de verblijftijd van water in de polders te verhogen wordt meer fosfaat in de (door kwel met ijzer verrijkte) slootbodems vastgelegd. Het wordt aanbevolen om een integrale geohydrologische studie uit te voeren om de kweldruk en samenstelling van het kwelwater te bepalen, waarna ook het effect van klimaatmaatregelen op de kweldruk kan worden geschat. Hoewel vernatting van het huidig onderzoeksgebied zal leiden tot een verlaging van de kweldruk en corresponderende fosfaatvrucht dat met kwel wordt aangevoerd, heeft een afname van de wegzijging vanuit de N2000 gebieden waarschijnlijk tot gevolg dat er minder basenrijk oppervlaktewater de natuurgebieden zal worden ingelaten. Dit heeft consequenties voor diverse habitattypen die gevoelig zijn voor de basenhuishouding en dient nader onderzocht te worden.

Op basis van de onderzoeksresultaten (aan te vullen met MKBA, pilots en draagvlak) worden de volgende combinaties van klimaatmaatregelen als het meest kansrijk gezien:

- **Laag gelegen polders Wetering, Halfweg en Geldering:** het handelingsperspectief is in deze polders beperkt door de relatief dunne veenlagen en de vermenging van veen met zand. Waar van toepassing (dikkere veenlagen), kan bodemdaling worden geremd door het verhogen van het slootpeil en het verkleinen van de peilgebieden Wetering en Geldering. Bodemdaling kan additioneel worden geremd remmen door het verkleinen van percelen door het graven van sloten/watervoerende greppels. Naar verwachting heeft dit ook een positief effect op de waterkwaliteit door de vastlegging van fosfaat aan de (door kwel met ijzer verrijkte) slootbodems.
- **Marker -en Tussenbroek:** het handelingsperspectief is in deze polder hoog. Kansrijke maatregelen zijn het stoppen van bodemdaling door natte teelten of peilfixatie, of bodemdaling remmen middels het verhogen van slootpeilen in combinatie met het toepassen van traditionele onderwaterdrainage.
- **Tussenpolders Hagenbroek, Meenthebrug en de Grote Polder:** het handelingsperspectief is in de veenpercelen die grenzen aan het natuurgebied hoog. Kansrijke maatregelen zijn het stoppen van bodemdaling middels peilfixatie of natte teelten, of bodemdaling remmen middels het verhogen van slootpeilen in combinatie met het toepassen van traditionele onderwaterdrainage in het zuiden van Hagenbroek.
- **Brede veenpercelen (>60m):** Additioneel remmen van bodemdaling door het verkleinen van percelen middels het graven van sloten/watervoerende greppels.

- **Gehele onderzoeksgebied:** Remmen van bodemdaling middels het stimuleren van niet-kerende grondbewerking/permanent grasland op veenpercelen.

Bij maatregelen die zich richten op het remmen van bodemdaling lijkt de gewasderving slechts licht toe te nemen (+0-5% in vergelijking met het huidig peilbeheer, afhankelijk van het maatregelpakket en de polder). Bij het stoppen van bodemdaling door peilfixatie wordt natschade over de tijd wel groter en zal de landbouw geleidelijk (moeten) extensiveren.

Bij het kiezen van klimaatmaatregelen is het advies om met alle betrokkenen een integrale lange-termijn visie voor het gebied te creëren, waarbij rekening wordt gehouden met de doelen voor klimaat, natuurontwikkeling en het landbouwkundig functioneren van het landschap.

Inhoudsopgave

Samenvatting	2
1 Inleiding	4
1.1 Achtergrond	4
1.2 Doelstelling en onderzoeksvragen	4
2 Opzet en uitvoering	6
2.1 Aanpak	6
2.2 Onderzoeksgebied	6
2.3 Veldwerk	9
2.4 Bodememissiemodel	12
3 Gebiedsanalyse	15
3.1 Bodem en organische stofgehalte	15
3.2 Fosfaattoestand van de bodem	17
3.2.1 Resultaten fosfaattoestand van de bodem	19
3.2.2 Fosfaat in het grondwater	20
3.3 Hydrologie en watersysteem	20
3.4 Landgebruik en agrarisch management	22
4 Klimaatmaatregelen en scenario's	23
4.1 Bodemdaling en broeikasgasemissie	23
4.2 Kwantificeren bodemdaling en CO ₂ -emissie	24
4.3 Klimaatmaatregelen	26
4.3.1 Onderwaterdrainage (OWD)	27
4.3.2 Peilaanpassingen	29
4.3.3 Natte teelten	31
4.3.4 Agrarisch management	32
4.4 Uitwerking scenario's	32
4.4.1 Referentie scenario - continuering huidige situatie	32
4.4.2 Scenario remmen bodemdaling	32
4.4.3 Scenario stoppen	39
5 Broeikasgasemissie en bodemdaling	42
5.1 Referentie scenario	42
5.2 Scenario remmen	42
5.3 Scenario stoppen	45
6 Watervraag	47
6.1 Scenario remmen	47
6.2 Scenario stoppen	49
7 P-belasting oppervlaktewater	50
7.1 Referentie scenario	50
7.2 Scenario remmen	52
7.3 Scenario stoppen	54

8	Fosfaat in het (polder)watersysteem	55
8.1	Fosfaat bindingscapaciteit van de slootbodems	55
8.2	Invloed slootbodem op de P-vrachten	56
9	Landbouw	57
9.1	Opbrengstderving door natschade	57
10	Discussie	61
10.1	Handelingsperspectief van klimaatmaatregelen	61
10.2	Klimaatmaatregelen in de laag gelegen polders	62
10.3	Klimaatmaatregelen in Marker- en Tussenbroek	65
10.4	Klimaatmaatregelen in Meenthebrug, Grote polder en Hagenbroek	68
10.5	Remmen van bodemdaling via NKG en perceelsgrootte	70
10.6	Impact van verhoogde P-vracht	70
10.7	Onzekerheden	71
11	Conclusies	73
12	Aanbevelingen	75
	Literatuur	77
	Bijlage I: Monsternamelocaties	81
	Bijlage II Grondslag, hydrologie en landgebruik van de onderzoekslocatie	82
	Bijlage III: Pilotresultaten onderwaterdrainage	87
	Bijlage IV: Effecten peilfixatie CO₂	90
	Bijlage V: Effecten maatregelen op bodemdaling en CO₂-emissie	91
	Bijlage VI: Gebruikte modellen	95

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

De Weerribben en Wieden zijn aangewezen als Natura 2000-gebieden met een opgave voor oppervlaktewaterkwaliteit (Provincie Overijssel, 2019), waarbij met name de fosfor (P)-concentraties en -belastingen in de boezem de nodige aandacht behoeven. Hoewel in delen van het systeem (vooral in de haarvaten) sprake is van een gewenste toestand, zijn er ook aanwijzingen dat de P-concentraties in een aanzienlijk deel van het oppervlaktewatersysteem van de Wieden en Weerribben nog niet op orde zijn (Cusell et al. 2018). De hoofdbronnen van de P-belasting in de boezem zijn de poldergemalen van de diepe polders Giethoorn, Wetering, Gelderingen en Halfweg, en de ondiepe polders bij de gemalen Broammeule en Eesveen en de Steenwijker Aa (Witteveen & Bos, 2019). De landbouw-gerelateerde P-vracht richting oppervlaktewater van de natuurgebieden is voor een belangrijk deel afkomstig van landbouwpercelen op veengrond in de lager gelegen polders (van Rotterdam, 2019).

Deze veen(weide)gronden kennen ook een klimaatopgave die is vastgelegd in het klimaatakkoord. Het betreft een opgave om de broeikasgasemissie te beperken door het tegengaan van bodemdaling. Mogelijke maatregelen om dit te bereiken zijn onder meer het aanpassen (verhogen) van waterpeilen en het toepassen van (al dan niet pomp gestuurde) onderwaterdrainage. Vernatting van agrarisch beheerde veenweide kan echter leiden tot de mobilisatie van aanzienlijke hoeveelheden van het in de bodem aanwezige fosfor met als gevolg het risico op een potentiële extra belasting van het watersysteem. Vooral op korte -en middellange termijn kunnen grote hoeveelheden fosfaat vrijkomen. Een vermindering in fosfaatuitspoeling door gereduceerde veenmineralisatie valt hierbij naar alle waarschijnlijkheid in het niet, ook omdat bij veenmineralisatie ook ijzer vrijkomt waar fosfaat weer aan kan binden. Alleen in een zeer extensief systeem waar weinig wordt bemest, is het mogelijk dat de waterkwaliteit op lange termijn (over enkele decennia) verbeterd (Smolders et al., 2013).

De klimaatgerichte maatregelen in het agrarisch beheerde veenweidegebied in de omgeving van de Natura 2000 gebieden Weerribben en Wieden kunnen daarmee een negatief effect hebben op de oppervlaktewaterkwaliteit. In opdracht van de Provincie Overijssel heeft het Nutriënten Management Instituut onderzoek uitgevoerd om inzicht te krijgen in enerzijds kansrijke klimaatmaatregelen en anderzijds de afwenteling van deze klimaatgerichte maatregelen op de oppervlaktewaterkwaliteit.

1.2 Doelstelling en onderzoeksvragen

De doelstelling van dit onderzoek is om inzicht te krijgen in kansrijke klimaatmaatregelen in de agrarisch beheerde veengebieden ten oosten van de Wieden en Weerribben en het potentiële effect op water aan- en afvoer en de oppervlaktewaterkwaliteit –met name de fosforbelasting – in de Wieden en Weerribben. De klimaatgerichte maatregelen zijn gericht op het beperken van de broeikasgasemissie en bodemdaling door middel van waterhuishoudkundige maatregelen zoals peilverhogingen en/of toepassing van (al dan niet pompgestuurde) onderwaterdrainage. De fosforbelasting betreft zowel de P-vrachten van de percelen naar het oppervlaktewater als de belasting ter plaatse van de instroompunten/ gemalen van het aanvoerwater naar de boezem.

De hoofdonderzoeksvraag luidt: “Wat zijn kansrijke klimaatgerichte (met name hydrologische) maatregelen in het veen(weide)gebied van NW-Overijssel en wat is het effect van maatregelpakketten op de P-vrachten naar het watersysteem en bij de instroompunten, gemalen van het oppervlaktewater naar de Natura 2000-gebieden Weerribben en Wieden?”

Deelvragen bij deze hoofdvraag zijn:

- 1 Wat zijn realistische en effectieve klimaatgerichte (hydrologische) maatregelpakketten?
 - a) Wat is het globale effect van deze maatregelen op CO₂-emissie en bodemdaling?
 - b) Wat zijn kansrijke mogelijkheden voor het agrarisch grondgebruik bij deze maatregelen?
- 2 Wat is het effect van deze klimaatgerichte maatregelpakketten op het watersysteem (water aan- en afvoer)?
- 3 Wat is het effect van deze klimaatgerichte maatregelpakketten op de P-vracht van de veengronden naar het oppervlaktewater in de diverse veengebieden/-polders?
- 4 Wat gebeurt er met het fosfaat in het watersysteem onderweg naar instroompunt /gemaal?
- 5 Wat betekent het voorgaande voor het effect op de P-vracht bij de instroompunten/ gemalen?

De samenhang tussen de onderzoeksvragen is geïllustreerd in Figuur 1.1.



Figuur 1.1. Schematische weergave van de samenhang tussen de vijf onderzoeksvragen.

2 Opzet en uitvoering

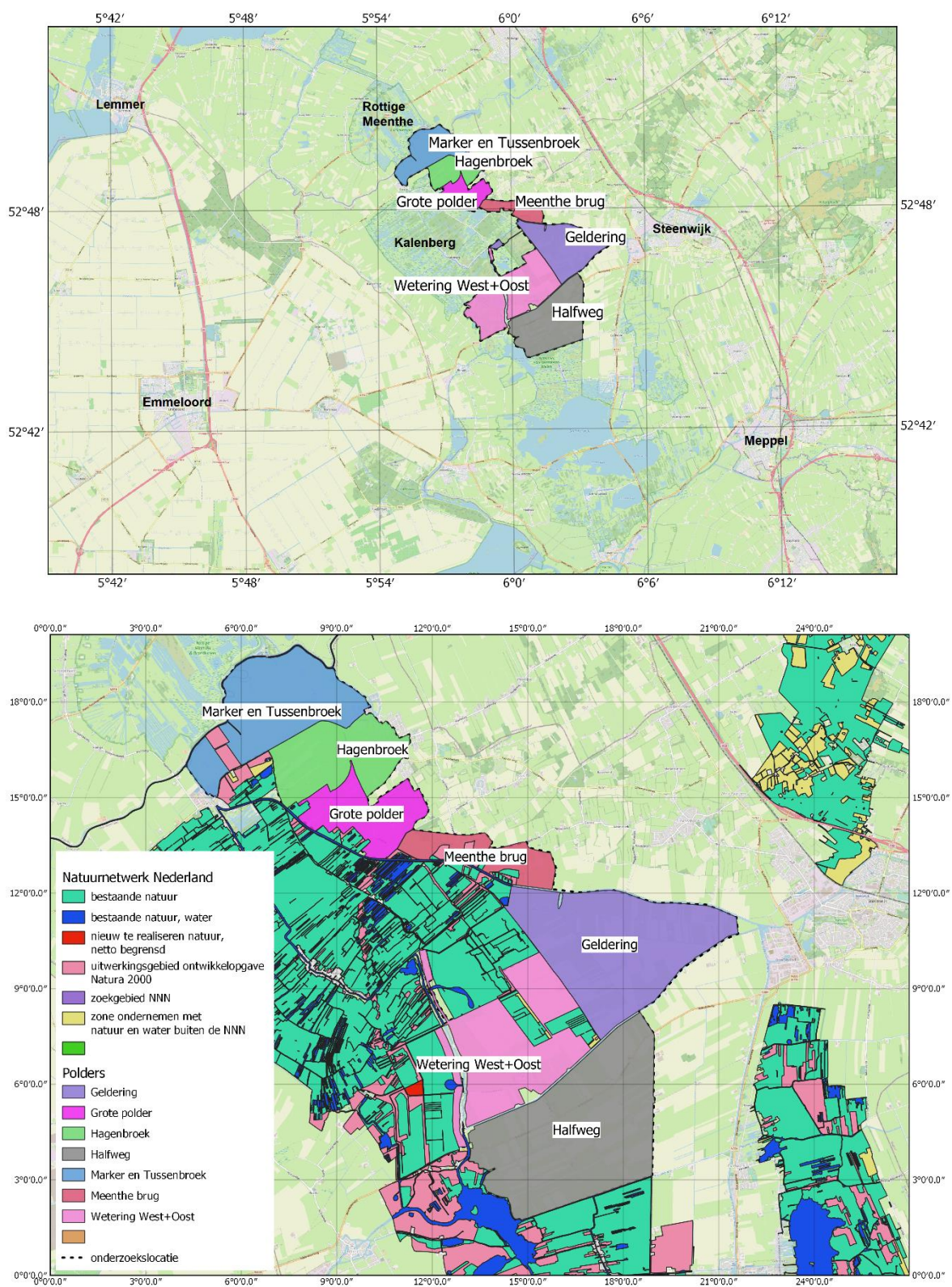
2.1 Aanpak

Om de onderzoeksvragen te beantwoorden is het onderzoek opgebouwd uit de volgende stappen:

- Gebiedsanalyse voor wat betreft grondslag, hydrologie, waterbeheer en landgebruik.
- Literatuuronderzoek naar klimaatmaatregelen, de effectiviteit wat betreft beperking CO₂-emissies en bodemdaling, gevolgen voor de agrarische bedrijfsvoering en kansrijkheid.
- Modelstudie naar het effect van geselecteerde klimaatmaatregelen op het watersysteem in nauw overleg met Witteveen+Bos.
- Modelstudie naar het effect van geselecteerde klimaatgerichte maatregelen/ maatregel-pakketten op de P-vracht van de veengronden naar het oppervlaktewater in de geselecteerde veengebieden/-polders.
- Modelstudie naar het effect van geselecteerde kansrijke klimaatmaatregelen/ maatregel-pakketten op directe en indirecte opbrengstderving.
- Literatuuronderzoek en veldonderzoek naar het gedrag van fosfaat in het (polder)watersysteem onderweg naar instroompunt/gemaal.
- Communicatie en afstemming van resultaten met Witteveen+Bos.
- Synthese van alle voorgaande bouwstenen op het uiteindelijke effect van geselecteerde klimaatmaatregelen op de P-vracht bij de instroompunten/ gemalen.

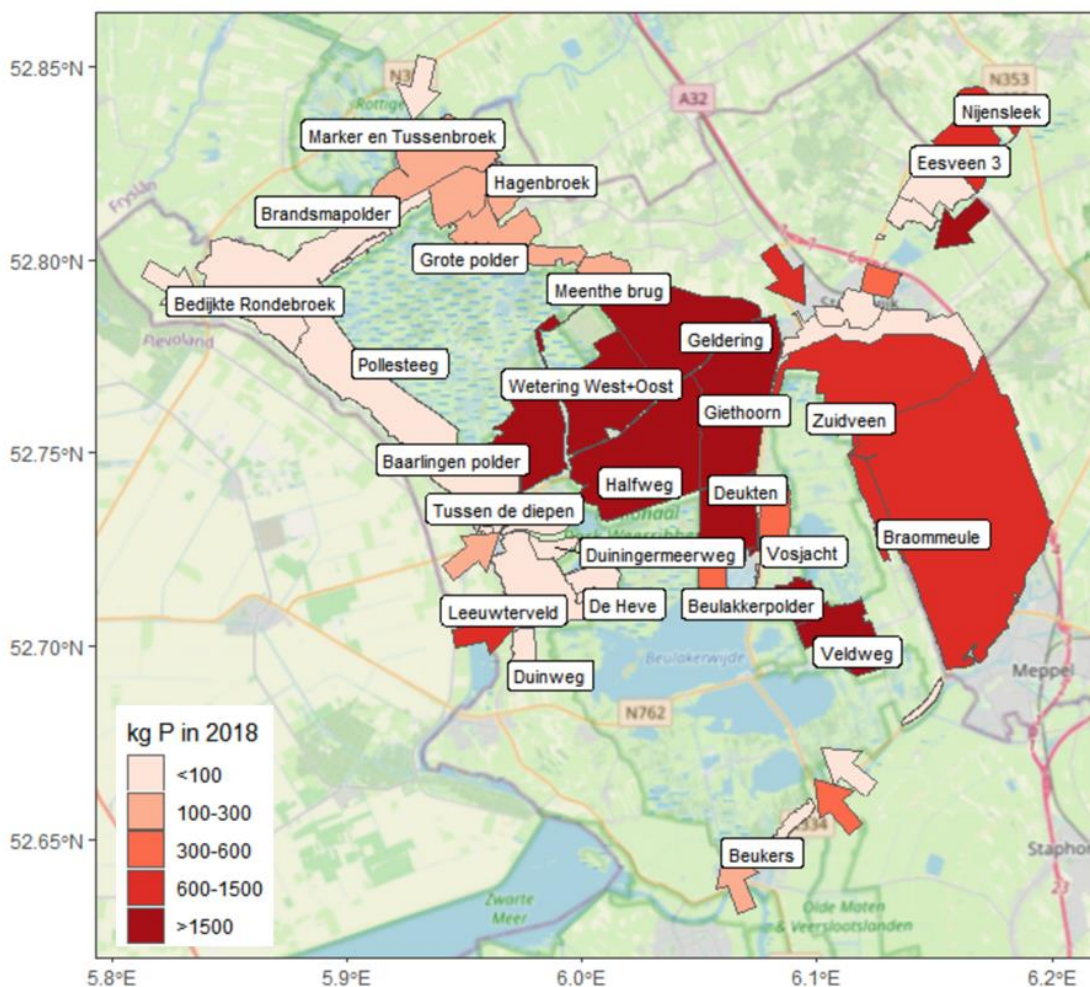
2.2 Onderzoeksgebied

Het onderzoeksgebied betreft 7 polders ten oosten van het N2000 gebied Weerribben en ten noorden van het N2000 gebied De Wieden, gelegen in Noord West Overijssel. Het onderzoeksgebied omvat de laag gelegen polders Halfweg, Wetering en Gelderingen en de hoger gelegen polders Marker- en Tussenbroek, Hagenbroek, de Grote Polder en Meenthebrug. De regionale ligging van de onderzoekslocatie en van de verschillende polders is weergegeven in Figuur 2.1. Een deel (Wetering-West) is al grotendeels omgevormd naar natuur (Figuur 2.1, onder), en enkele locaties zijn aangewezen als N2000 ontwikkelopgaven (zuidwestelijk deel Marker en Tussenbroek, zuiden van Meenthebrug, deel van Wetering-West).

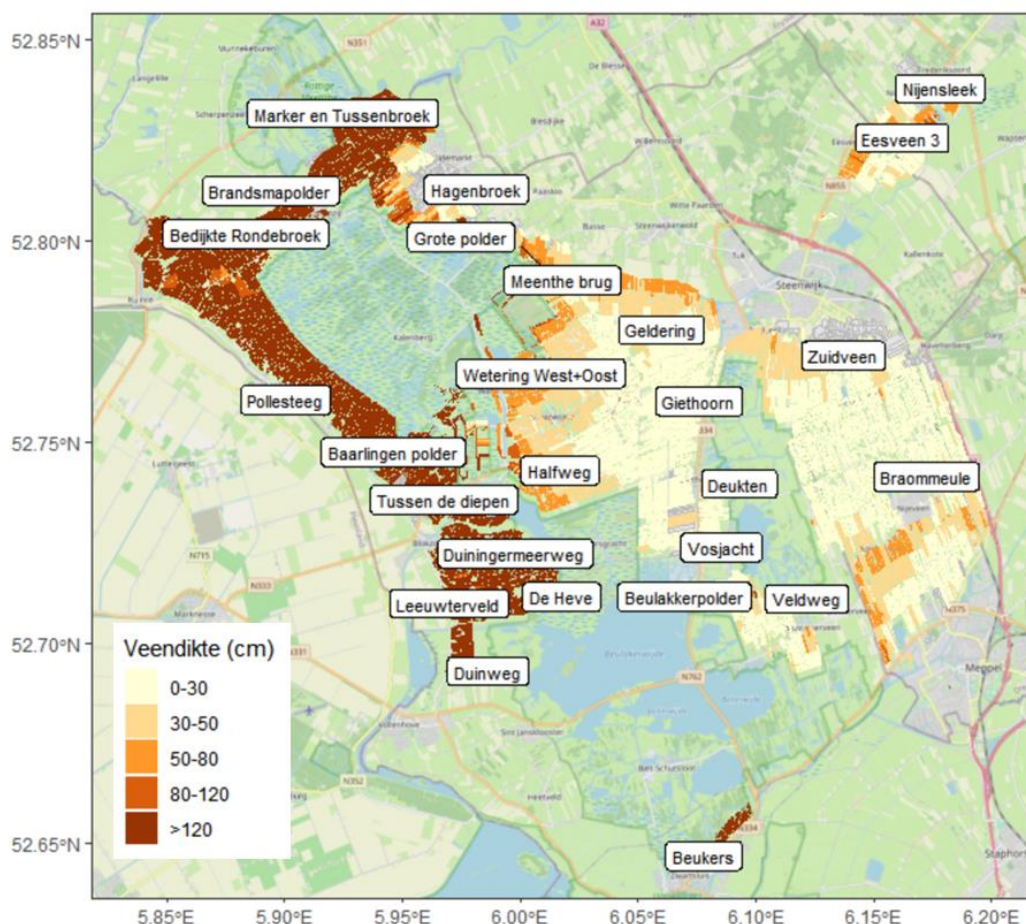


Figuur 2.1. Regionale ligging van het onderzoeksgebied (boven) en het onderzoeksgecombineerd met de kaart van Natuurnetwerk Nederland (onder, data afkomstig van het Geoportaal provincie Overijssel)

Het onderzoeksgebied is tot stand gekomen door een vergelijking te maken tussen de gemeten fosfaatvrachten van de polders bij de gemalen (Figuur 2.2, resultaten Mandemakers et al., 2019) en de veendiktes in het gebied (Figuur 2.3, veenkaart WODDelta). De hoogste P vrachten worden gemeten bij de gemalen van Giethoorn, Wetering, Gelderingen, Veldweg en Halfweg (Figuur 2.2). Dit maakt de polders interessant om te onderzoeken vanuit een waterkwaliteitsperspectief. In polders Veldweg en Giethoorn ligt echter nauwelijks veen en zijn daarom niet relevante om de toepasbaarheid van klimaatmaatregelen te onderzoeken om bodemdaling te remmen/stoppen (Figuur 2.3). In de overgebleven polders (Halfweg, Wetering en Geldering) zijn veenlagen echter ook beperkt (maximaal 80cm). De keuze is daarom gemaakt om een aantal polders ten noorden van de laag gelegen polders mee te nemen in het onderzoek (Meenthebrug, Grote polder, Hagenbroek en Marker -en Tussenbroek). Deze polders zijn met name interessant vanuit een klimaatperspectief door de aanwezigheid van dikke veenpakketten.



Figuur 2.2 Gemeten fosfaatvracht in 2018 bij de gemalen van de polders (Mandemakers, 2019)



Figuur 2.3 Veendiktes van het gebied rondom de Wieden-Weerribben (veendiktekaart WDODelta)

2.3 Veldwerk

Aanvullend op de gebiedsanalyse zijn op 13 graslandpercelen over de diepte van het bodemprofiel tot 1 meter onder de grondwaterspiegel bodemonsters genomen. Daarnaast is op elke locatie een monster genomen van het grondwater. Het veldwerk is uitgevoerd op 16 en 18 september, en 28 oktober 2020. Verder is op een tracé van percelen naar gemalen op 3 december 2020 de waterbodem bemonsterd. Het veldonderzoek geeft inzicht in de volgende vragen:

- 1) Wat is de variatie in fosfaatconcentraties in het bodemprofiel bij percelen die variëren in grondwaterstand?
Relevant om het effect van vernattingsmaatregelen op de fosfaatconcentraties over de diepte te bepalen.
- 2) Wat zijn de fosfaatconcentraties over de diepte bij percelen die representatief zijn voor relevante delen/polders van het onderzoeksgebied?
Relevant om data te verkrijgen om het model mee te parametriseren
- 3) De bodemkaarten geven aan waar veen ligt en hoe dik de veenlagen zijn, maar hoe zand/venig is dit veen?
Relevant om te zien waar welke maatregelen mogelijk effectief zijn. Hoe hoger het organisch stofgehalte, des te meer winst is er te behalen met klimaatmaatregelen.
- 4) Wat zijn verschillen in de samenstelling van de waterbodem op een tracé van perceel naar gemaal?
Relevant om iets te kunnen zeggen over het transport van P van de percelen naar de Wieden en Weerribben. Het kan zijn dat veel P in de slootbodem wordt vastgelegd, of juist niet. Dit hangt

met name af van de P bindingscapaciteit in de slootbodem, en hoeveel deze bindingscapaciteit al is "opgeladen".

Monsternamelocaties bodem

Vragen 1 en 2 vragen om een verschillende aanpak in de bemonsteringsstrategie. Voor vraag 1 is gebruik gemaakt van niet-willekeurige sampling, waarbij over het gehele onderzoeksgebied een aantal percelen zijn geselecteerd die volgens MIPWA sterk variëren in grondwaterstand. Voor vraag 2 is gebruik gemaakt van *stratified-random sampling* techniek, waarbij in elke polder willekeurig percelen zijn gekozen. Deze sampling strategie wordt veelal gebruikt om onderzoekseenheden te selecteren die representatief zijn voor een bepaalde onderzoekspopulatie. Voor deze percelen zijn de perceeleigenaren benaderd om het veldwerk af te stemmen.

In Tabel 2-1 zijn de locaties opgenomen waar monstername is uitgevoerd. De bemonsteringslocaties zijn opgenomen in Bijlage I. De exacte monsternamelocatie is niet weergegeven wegens de wens van ondernemers dat onderzoeksresultaten niet aan hun perceel kan worden gekoppeld.

Tabel 2-1. Beredenering achter de selectie van de bemonsterde percelen.

Monsterlocatie	Polder	Reden voor bemonstering
L24	Gelderingen	Geeft inzicht in het deel Gelderingen waar veenlagen relatief dun zijn (circa 20cm), en waar de peilen voor de polder relatief hoog zijn (lager gelegen perceel in het peilgebied)
L100	Gelderingen	Voor het algemene beeld in Gelderingen
L25	Gelderingen	Reflecteert deel Gelderingen waar de veenlagen het dikst zijn (60cm), en waar de peilen voor de polder relatief laag zijn (hoger gelegen perceel in het peilgebied)
L5	Wetering	Volgens MIPWA één van de natste percelen in de Wetering
L7	Wetering	Gelegen in Wetering-West, en in hetzelfde peilgebied als Wetering-Oost
L23	Wetering	Reflecteert extensief stuk van Wetering West wat in een peilgebied ligt met een hoog slootpeil. Hier zijn grondwaterstanden hoog en zijn veenlagen relatief dik (circa 100-150cm)
L8	Wetering	Reflecteert het deel van de Wetering waar niet veel veen ligt (Wetering Oost, veendiktes van circa 30-40cm)
L4	Halfweg	Voor het algemene beeld in de polder Halfweg
L9	Halfweg	Voor het algemene beeld in de polder Halfweg
L1	Marker- en Tussenbroek	Voor het algemene beeld in Marker- en Tussenbroek
L21	Marker- en Tussenbroek	Veel klimaatmaatregelen lijken van toepassing in deze polder de veenlagen het dikst zijn (gemiddeld 176cm). Er is daarom gekozen om (als enige van de hoog gelegen polders) hier een extra bemonstering uit te voeren
L3	Hagenbroek	Reflecteert het deel van Hagenbroek waar veenlagen dikker zijn (rond de 100cm)
L22	Meenthebrug	Reflecteert de zuidrand van de Meenthebrug/Grote polder waar meer veen is (150-200cm)

Monstername grond

Om de bodemsamenstelling en fosfaatconcentraties over de diepte te bepalen zijn per perceel op vier dieptes grondmonsters genomen. Als uitgangspunt zijn de volgende dieptes bemonsterd:

- 0-10cm

- 10-30cm
- 30cm tot gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG)
- GLG tot 100cm onder GLG

Deze dieptes zijn soms in het veld aangepast om aan te sluiten bij het bodemprofiel en heterogeniteit van het perceel. De monsters zijn, afhankelijk van de diepte en grondsoort genomen middels edelmanboringen, gutschteken en/of zuigerboorsteken.

Bodemanalyses

In alle bodemmonsters zijn ten behoeve van een algemene beschrijving van de bodemkwaliteit het organische stofgehalte, textuur (zand-, silt-, kleifractie), klei-humuscomplex (CEC) en stabiliteit van het organische stof (C/N ratio) bepaald. Naast de grootte van het adsorptiecomplex van de bodem voor kationen (CEC) is ook de samenstelling van kationen aan dit adsorptiecomplex (Ca, Mg, K, Na bezetting) bepaald. De nutriëntentoestand van N, S, K, Ca, Mg, en Na is met verschillende indicatoren gemeten om inzicht te krijgen in de directe beschikbaarheid en de beschikbare reserves. Ook de zuurgraad, en de buffering door kalk en basensamenstelling van het klei-humuscomplex zijn gemeten.

In de grondmonsters zijn de volgende parameters bepaald om de fosfaattoestand te karakteriseren:

- de directe fosfaatbeschikbaarheid (P-CaCl₂, ofwel P geëxtraheerd met 0.01 M CaCl₂). Hiermee wordt een P-fractie verkregen die goed vergelijkbaar is met de P-concentratie in het bodemvocht;
- de P voorraad die reversibel is gebonden aan de bodem en relatief gemakkelijk beschikbaar komt voor het gewas (P-AL, ofwel P geëxtraheerd met ammoniumlactaat azijnzuur);
- de totaal gebonden P voorraad (P-ox, ofwel P geëxtraheerd met ammoniumoxalaat-oxaalzuur);
- een maat voor het oppervlak in de bodem dat makkelijk P bindt (Fe-ox + Al-ox; ofwel Fe en Al geëxtraheerd met ammoniumoxalaat-oxaalzuur).
- een maat voor hoe sterk de totaal beschikbare fosfaat gebonden zit in de bodem (de fosfaatverzadigingsgraad (FVG) welke wordt berekend door verhouding tussen P-ox en de totale bindingscapaciteit die geschat wordt als de helft van de hoeveelheid (Fe+Al)-oxiden.

Monstername grondwater

Om de fosfaatconcentratie in het grondwater te bepalen is per perceel een grondwatermonster genomen. Met een edelmanboor is een gat geboord tot circa 0.5m onder de grondwaterstand. Hierin is een peilbuis geplaatst met filterkous. Voor het verkrijgen van een grondwatermonster is grondwater voorgepompt tot het elektrisch geleidingsvermogen (EC) van het grondwater constant bleef. Hierbij is minstens een liter water voorgepompt. De monsters zijn in het veld gesplitst in twee submonsters, waarbij één monster is aangevuld met chloroform om de microbiële activiteit te onderdrukken en één monster is aangevuld met salpeterzuur om de totaal concentraties te meten. In de monsters met chloroform zijn door middel van kleurreacties (DA-analyse) concentraties aan de opgeloste ionen fosfaat, nitraat, nitriet, chloride en sulfaat gemeten. In de aangezuurde monsters zijn met de ICP-MS de totaal concentraties van de elementen Na, Mg, Al, P, S, K, Ca, Cu en Zn gemeten.

Monstername waterbodem

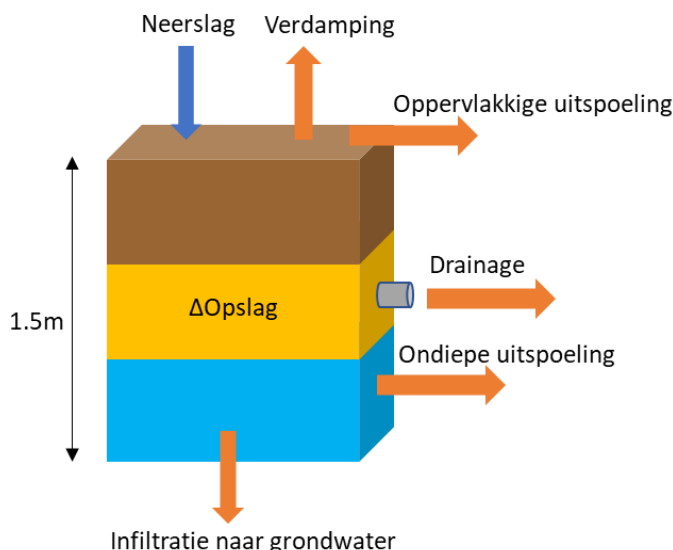
Binnen vier polders zijn op een tracé tussen poldersloot aan het begin van het peilgebied en het gemaal aan het eind, op vier locaties waterbodemmonsters genomen. Per locatie is het porievocht van de sliblaag en de waterbodem apart bemonsterd. Voor de laag gelegen polders (Halfweg Geldering en Wetering) zijn per polder 4 monsternamelocaties geselecteerd. In Marker- en Tussenbroek zijn ook 4 monsternamelocaties geselecteerd omdat deze polder sterk verschilt van de laag gelegen polders (dikste veenpakketten, infiltratiegebied). De bemonsteringslocaties zijn opgenomen in Bijlage I.

Met behulp van een zuigerboor is per monsternamelocatie een monster genomen van de sliblaag en de onderwaterbodem. Een monster van het porievocht van de onderwaterbodem is vervolgens verkregen met behulp van rhizons. De monsters van het poriewater zijn in het veld gesplitst in twee monsters, waarbij één monster is aangevuld met chloroform om de microbiële activiteit te onderdrukken en één monster aangevuld met salpeterzuur om de totaal concentraties te meten. In de monsters met chloroform zijn door middel van kleurreacties (DA-analyse) concentraties aan de opgeloste ionen fosfaat, nitraat, nitriet, chloride en sulfaat gemeten. In de aangezuurde monsters zijn met de ICP-MS de totaal concentraties van de elementen Na, Mg, Al, P, S, K, Ca, Cu en Zn gemeten.

2.4 Bodememissiemodel

Voor het berekenen van risico's op fosfaatsuitlekking van landbouwpercelen naar het oppervlaktewater van de polders is gebruik gemaakt van het bodememissiemodel van het NMI. Dit model is ontwikkeld om (i) lokale verschillen in bodemeigenschappen en hydrologische condities te vertalen naar een risico op fosfaatsuitlekking van landbouwperceel naar het watersysteem en om (ii) het effect van veranderende bodemeigenschappen en hydrologische condities op het risico op fosfaatsuitlekking te visualiseren. Het model is expliciet niet bedoeld om kwantitatieve uitspraken te doen over de hoogte van de P-belasting maar om verschillen binnen een gebied in kaart te brengen en om het effect van verschillende scenario's te bepalen. Hiermee kan het handelingsperspectief worden onderbouwd om op de juiste plekken de juiste maatregelen te nemen.

De belangrijkste sturende variabelen in het model zijn de fosfaattoestand van de bodem en de transportroutes waarlangs het water uit de bodem spoelt (Figuur 2.4). Het model houdt rekening met fosfaatvrachten van oppervlakkige uitspoeling, drainage en ondiepe uitspoeling (Figuur 2.4). De waterbalans en fosfaatvracht is afhankelijk van diverse variabelen, waaronder, de geohydrologische setting (kwel/ infiltratie), grondsoort en bodemopbouw, drooglegging, landgebruik, locatie, helling van het perceel, percentage van de perceelsomtrek wat aan een watergang ligt en de fosfaatconcentratie in de bodem. Voor een gedetailleerde omschrijving wordt verwezen naar Bijlage VI.



Figuur 2.4. Waterbalans van het P bodem emissiemodel.

Het bodememissiemodel is in het agrarisch gebied rond de Wieden en Weerribben toegepast om een inschatting te maken of het risico op fosfaatsuitlekking veranderd wanneer klimaatmaatregelen worden toegepast. Verschillende scenario's van maatregelpakketten zijn doorgerekend. Het model is

geparametriseerd aan de hand van een gebiedsanalyse en veldwerk. Voor de gebiedsanalyse zijn de volgende databronnen geanalyseerd:

- Basisregistratie Gewaspercelen (locatie landbouwpercelen en landgebruik)
- Alterra (1:50.000 bodemkaart)
- Bodemarchief NMI (fosfaattoestand van de bodem)
- MIPWA model (grondwaterstanden, kwel/infiltratiedruk, aanwezigheid drainage)
- Basisregistratie topografie (ligging van watergangen)
- Actueel Hoogtebestand Nederland (maaiveldhoogte)
- Open Data Portaal WDOdelta (ligging peilgebieden, slootpeilen, locatie gemalen)
- Infram & WDOdelta (kaarten van klei – en veendiktes)
- KNMI (historische neerslagdata van weerstation Marknesse)

Het bodem emissiemodel is gekoppeld aan een aantal andere modellen, waaronder een model die bepaalt waar klimaatmaatregelen effectief kunnen zijn, een model die de effecten van klimaatmaatregelen op de hydrologie bepaalt en een veenafbraak model. Een uitleg van de werking van de modellen is opgenomen in Bijlage VI. Gezien het verkennend karakter van de huidige studie is er voor gekozen om modellen toe te passen die grotendeels bestaan uit empirische en conceptuele relaties. Deze modellen zijn met name geschikt voor het schetsen van verhaallijnen en het geven van grove indicaties. Bij het concreter uitwerken van specifieke klimaatmaatregelen is het advies om over te gaan op veldmetingen en/of pilots in combinatie met meer data-behoevende procesmodellen.

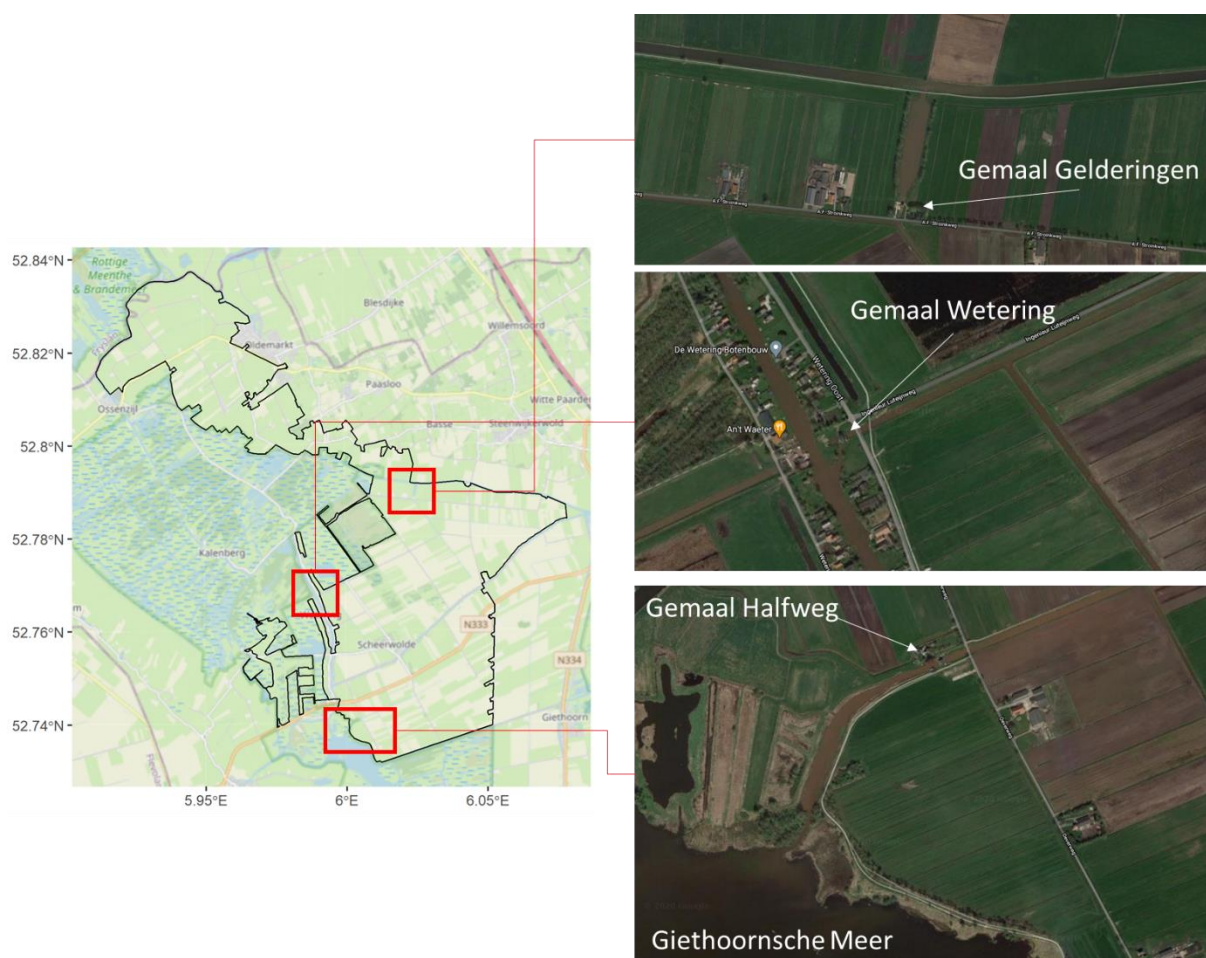
Kwel versus inzijging

Een belangrijke variabele voor het model is kwel en infiltratie. In het bodememissiemodel is de kweldruk aangepast naar de waarden die ook in de studie van Witteveen + Bos worden gehanteerd (Tabel 2-2). Volgens de modeloutput van MIPWA (standaard input van het bodememissiemodel) is sprake van netto wegzijging in de diep gelegen polders Gelderingen, Wetering en Halfweg. Dit is opvallend, gezien de lage ligging van de polders ten opzichte van het gebied eromheen (Mandemakers, 2019). Resultaten van Witteveen+Bos (Mandemakers, 2019) geven aan dat er in deze polders geen netto wegzijging is maar kwel. Een schatting van de kwelflux is gemaakt op basis van gemaaldebieten en chloridebalansen. Om het watermodel op polderniveau in het SOBEK-model sluitend te krijgen moesten de kwelfluxen sterk worden verhoogd en opzichte van de MIPWA resultaten (Tabel 2-2). In het huidig onderzoek zijn de aangepaste kwelfluxen van Witteveen+Bos toegepast voor Wetering, Halfweg en Gelderingen. Voor de overige polders geldt dat de MIPWA kwelfluxen zijn gebruikt. Dit brengt een onzekerheid met zich mee, gezien Witteveen+Bos ook voor deze polders (behalve Marker- en Tussenbroek) bezig is om de kweldruk te verhogen, omdat er verwacht wordt dat dit leidt tot een verbetering van de modelresultaten (persoonlijke communicatie C. Cusell).

Tabel 2-2. Kwelfluxen van Witteveen+Bos (WB) om hun waterbalans sluitend te krijgen, onderbouwd met chloridebalansen (zie Mandemakers, 2019) versus de kwelfluxen van MIPWA. Alleen de polders van het huidig onderzoeksgebied zijn in de tabel opgenomen. De dik gedrukte kwelfluxen zijn in het huidig onderzoek gebruikt.

Polder	Kweldruk MIPWA (mm/dag)	Kweldruk WB (mm/dag)
Wetering	-0.64	4.5
Halfweg	-0.37	2.3
Gelderingen	-0.18	5.0
Meenthebrug	-0.051	Waarschijnlijk hoger
Grote polder	-0.070	Waarschijnlijk hoger
Hagenbroek	-0.40	Waarschijnlijk hoger
Marker- en Tussenbroek	-0.030	-

Dat in de laag gelegen polders sprake is van (ijzerrijke) kwel wordt ook duidelijk door de bruine kleur (ijzer-oxides) van het uit de polder stromende water ter plaatse van de gemalen van de diepe polders. (Vliex et al., 2013; Figuur 2.5). De aanwezigheid van (ijzerrijke) kwel heeft ook een effect op de fosfaatvrucht naar het oppervlaktewater van de polder. Aan de ene kant kan er veel fosfaat met kwel meekomen, maar aan de andere kant is de beschikbaarheid (onder zuurstofrijke omstandigheden) laag omdat het fosfaat aanwezig is in de vorm van ijzerfosfaten en geadsorbeerd is aan ijzer(hydr)oxiden. Wanneer het water voldoende tijd krijgt om te bezinken, kan het fosfaat ophopen in het sediment en heeft dan niet direct een negatief effect op de oppervlaktewaterkwaliteit. Wanneer omstandigheden zuurstofloos worden, kan dit fosfaat echter weer vrijkomen. Een studie van Vliex et al. (2013) toont aan dat de verblijftijd van het water in de polders gemiddeld slechts twee dagen is. Het contactoppervlak tussen water en slootbodembodem is daardoor relatief klein waardoor enerzijds het vrije fosfaat niet bindt aan de slootbodembodem en het fosfaat dit is gebonden aan kleine deeltjes (colloïden) niet kan uitzakken naar de bodem. De korte verblijftijd draagt daarmee bij aan de te hoge P-vrachten bij de gemalen voor de gewenste oppervlaktewaterkwaliteit in het aangrenzende natuurgebied.



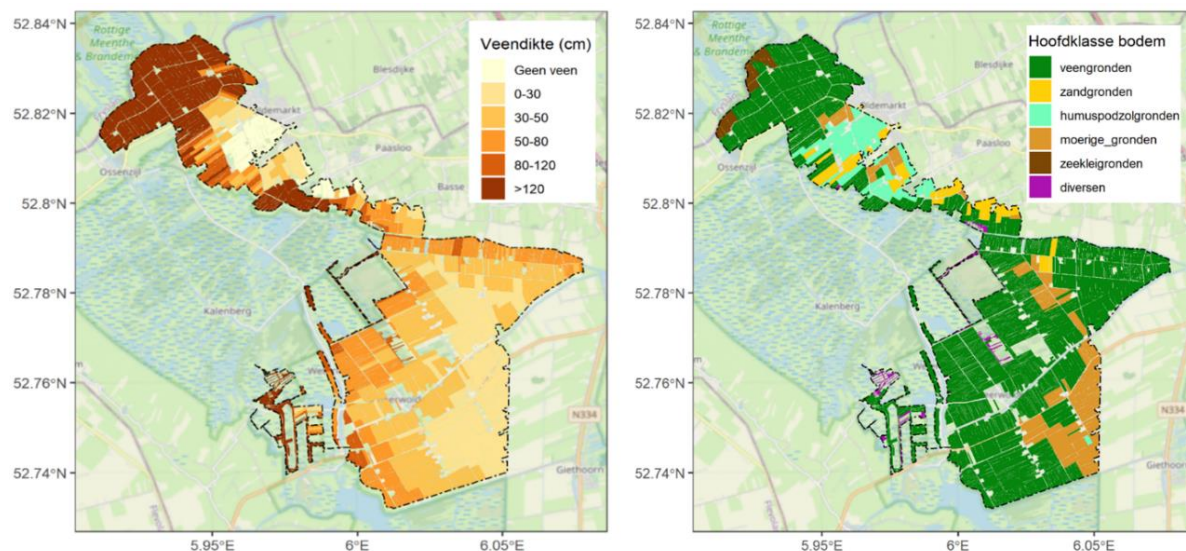
Figuur 2.5. Luchtfoto's ter plaatse van de gemalen Halfweg, Gelderingen en Wetering (luchtfoto's uit Google Maps).

3 Gebietsanalyse

In dit hoofdstuk is op basis van open-source data, data uit agrarische meetnetten en de resultaten uit het veldonderzoek een gebiedsanalyse gemaakt. De belangrijkste resultaten worden in dit hoofdstuk beschreven. De ondersteunende kaarten zijn opgenomen in Bijlage II.

3.1 Bodem en organische stofgehalte

Een belangrijke variabele om te bepalen waar klimaatmaatregelen realistisch/kansrijk zijn, is de dikte van het veenpakket in het onderzoeksgebied. Dit is gevisualiseerd in Figuur 3.1. Binnen het onderzoeksgebied is de variatie in veendiktes groot. Opmerkelijk zijn de relatief dunne veenlagen (meestal <50cm) in de lagergelegen polders (Halfweg, Wetering en Gelderingen). De dikste veenlagen zijn te vinden in Marker- en Tussenbroek en in de zuidelijke rand van Hagenbroek, Meenthebrug en de Grote Polder (gedeelte van de polders dat grenst aan de Weerribben en zover mogelijk van de pleistocene rug ligt). Hier zijn veenlagen te vinden die dikker zijn dan 120cm. In de Marker- en Tussenbroek polder is ook een kleidek aanwezig, die in dikte afneemt van het noordwesten naar het zuidoosten (Figuur S2-3 in Bijlage II). De aanwezigheid van een kleidek heeft effect op de bodemdaling, omdat er minder makkelijk zuurstof bij het veen kan komen. De aanwezigheid van klei in de Marker- en Tussenbroek polder is ook te zien op de bodemkaart (Figuur 3.1, rechts).



Figuur 3.1. Links: Veendiktes in het gebied (in centimeter). Gezien de ligging van de gebieden waar geen data beschikbaar is voor veen is aangenomen dat hier geen veen aanwezig is. Data afkomstig van WDOdelta/Alterra en Staveren et al. (in ontwikkeling) Rechts: Hoofdklasse van de bodem op basis van de 1:50.000 bodemkaart.

In de polders Halfweg en Wetering zijn moerige gronden aanwezig op plaatsen waar de veenlagen dunner zijn (Figuur 3.1, rechts). Dit geeft aan dat de bodems in deze polders in een overgang zitten van

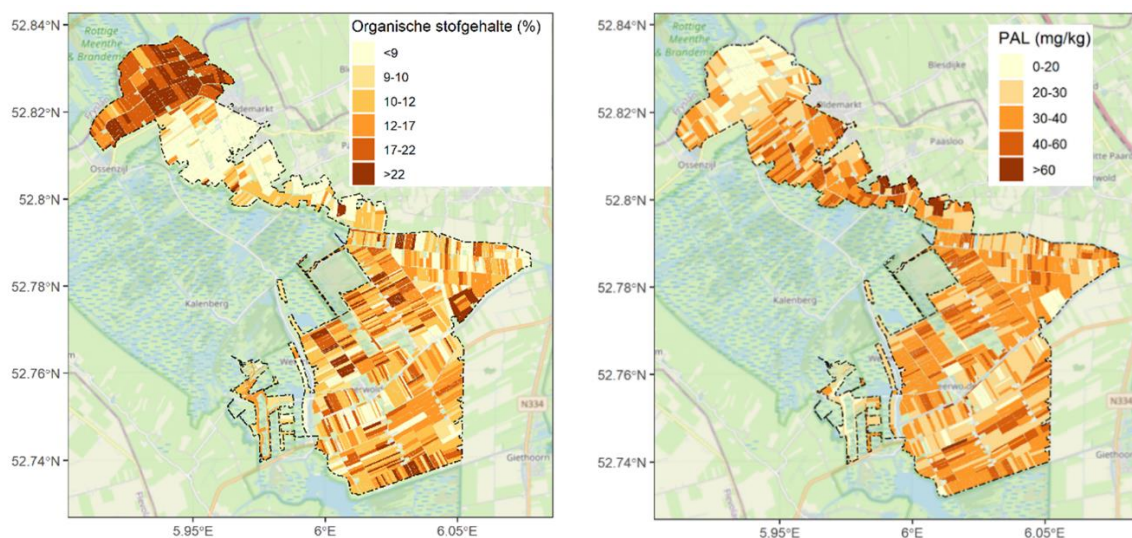
veen naar zand, waardoor hier lage(re) organische stofgehalten worden verwacht. In de polders Meenthebrug, Grote Polder en Hagenbroek zijn zandgronden en humuspodzolgronden aanwezig. Deze bodems liggen met name in de hoger gelegen delen (uitlopers van de pleistocene stuwwal, zie hoogtekartaat Figuur S2-2 in Bijlage II). De polders Halfweg, Wetering en Geldering liggen lager dan de andere polders. Door een historische sterke ontwatering en turfwinning zijn deze polders een stuk lager komen te liggen dan de aangrenzende natuurgebieden Wieden en Weerribben (Provincie Overijssel, 2019).

Data agrarische meetnetten en veldonderzoek

In het onderzoek is gebruik gemaakt van zowel de bodemdata uit agrarische meetnetten van de bovenste bodemlaag (0-10cm op grasland en 0-25cm op bouwland) en van bodemdata die in het kader van dit project is verkregen van het gehele bodemprofiel tot onder grondwaterstand. Uit de bodemdata uit agrarische meetnetten blijkt dat in de bovenste bodemlaag het organische stofgehalte duidelijk het hoogst is in Marker- en Tussenbroek (>22%, Figuur 3.2, links). Opvallend is dat in de bovenste bodemlaag, op Marker- en Tussenbroek na, het organische stofgehalte lager is dan de 20% die op veengronden verwacht mag worden. Op veel plekken is het veen in de toplaag van de bodem volledig veraard en gemengd met zand.

Opvallend is ook de variatie in organische stofgehalte tussen de percelen (Figuur 3.2). Dit is zeer waarschijnlijk het gevolg van het agrarische management. Door ruimtelijke variatie in veendikte in de ondergrond ontstaat namelijk een oneffen maaiveld wat de agrarische bedrijfsvoering belemmert. Sommige ondernemers gaan dit tegen door percelen tot 1.00 tot 2.00m diep te ploegen en zandige en venige bodemlagen op te mengen als ook door het perceel te egaliseren. Hierdoor ontstaat een meer homogene bodemopbouw en worden lokale verschillen in bodemdaling kleiner. Wel leidt dit tot lagere organische stofgehalten en het opmengen van veenlagen.

Dat de bodem zandiger is dan verwacht mag worden op basis van de veendiktekaart en de bodemkaart (Figuur 3.1) blijkt niet alleen uit de bodemdata van de toplaag (Figuur 3.2) maar ook uit het veldonderzoek. In **Gelderingen** noord is in overeenstemming met de bodemkaart tot 80cm veraard veen aangetroffen dat vanaf 50cm uit onveraard veen bestaat. In Gelderingen zuidwest was het profiel veel zandiger dan de verwachte 30 tot 50cm veen; tot 30cm was het organische stofgehalte 20% (60% zand) en tussen 30 en 60cm was het gehalte hoger dan 37%. Vanaf 60cm diepte was alleen zand aanwezig. De grondwaterstand stond op 1m diepte.



Figuur 3.2. Organische stofgehalte (links) en fosfaattoestand benaderd door PAL (rechts) van de bemonsterde toplaag van de bodem (10cm grasland en 25cm bouwland) van de landbouwpercelen van het onderzoeksgebied.

In polder **Halfweg** zijn twee percelen onderzocht waar volgens de veenkaart 30 tot 50 cm veen wordt verwacht. In het zuidelijke perceel bestaat de bovenste 30cm uit zandig veen (organische stofgehalte 33%). Daaronder is de bodem tot 70cm diepte zeer zandig met wat venige bijmenging en slechts 7% organische stof. Vanaf 70/ 80 cm is alleen permanent gereduceerd zand. Het grondwater staat op 80cm diepte. In het noordoostelijke perceel in polder Halfweg is geen veen aangetroffen, alleen moerig zand tot 55cm diepte met een organische stofgehalte van slechts rond 12%. Daaronder is geel zand. De grondwaterstand staat op 1.1m onder maaiveld. Volgens de veenkaart zou in het gehele oostelijke deel van polder Halfweg tot 30cm veen aanwezig moeten zijn. Resultaten van het veldwerk onderbouwen hiermee de resultaten van de bodemdata uit het landbouwkundig meetnet dat de bovengrond van deze polder vooral uit zandig veen of moerig zand bestaat en alleen in het westelijke deel veendiktes tot 50cm aanwezig (zullen) zijn.

In polder **Wetering** is een duidelijk verschil tussen het westelijk en het oostelijk deel. Voor de meeste (resterende) agrarische percelen in **Wetering west** is volgende de veenkaart het veen meer dan 1.20m dik. In dit deel van Wetering zijn 3 percelen bemonsterd. Eén perceel bleek echter in het verleden opgehoogd en wordt buiten beschouwing gelaten. Voor het meest westelijk gelegen perceel bestaat het gehele bemonsterde bodemprofiel uit veen, waarbij het veen in de bovenste 35cm is veraard en daaronder uit onveraard veen bestaat. Het grondwater stond vrij hoog, op 60 cm onder maaiveld. In het oostelijke perceel is alleen tussen 60 en 110 cm diepte een veenlaag aangetroffen. Daarboven bestaat de bodem uit moerig zand met een organische stofgehalte rond 15%. Het grondwater stond op 110 cm-mv en daaronder is alleen permanent gereduceerd zand aanwezig. In **Wetering oost** is net als in polder Halfweg de veendikte het grootst in het westelijk deel en neemt het af richting het oosten. In de twee onderzochte percelen in Wetering oost komt de dikte van de veenlaag (30 tot 50 cm) overeen met de dikte op de veendiktekaart. In de bovenste 55 cm is het organische stofgehalte ongeveer 30%. Met 40 tot 50% zand is het zandig veen – met name in de toplaag is het zandiger. Onder 55cm is een duidelijke overgang naar zand met een zeer laag organische stofgehalte (1-4%) dat onder het grondwater (75cm diepte) permanent is gereduceerd.

In de tussenpolders **Hagenbroek en Meenthebrug** zijn ook twee percelen onderzocht waar volgens de veendikte kaart meer dan 120cm veen moet zijn. Op beide percelen is het veen ongeveer 80cm dik. De bovenste 30cm zijn weer zandig veen met 20 tot 30% organische stof en ongeveer 50% zand. Tussen 30 en 80cm bestaat uit veraard veen en daaronder bevindt zich zand.

In **Marker- en Tussenbroek** zijn twee percelen onderzocht, beide ook met meer dan 120cm veen volgens de veendiktekaart. De bovenste 30cm bestaat uit klei in het zuidelijke perceel (L21) en uit zandige klei in het noorderlijke perceel (L1). Daaronder bestaat het gehele bemonsterde profiel (tot 140 cm-mv) uit veraard veen en onder het grondwater uit onveraard veen.

Uit het veldonderzoek kan geconcludeerd worden dat in de laag gelegen polders het profiel veel zandiger is en het veen minder dik dan op basis van de veendiktekaart verwacht mag worden. Waar naar verwachting minder dan 30 of 50cm veen aanwezig zou zijn, is de bodem vrij zandig en vanaf 50 tot 60 cm diepte bestaat de bodem uit wit zand. Op Marker- en Tussenbroek na is het organische stofgehalte in de toplaag slechts zeer lokaal hoger dan 20% (data agrarische meetnetten).

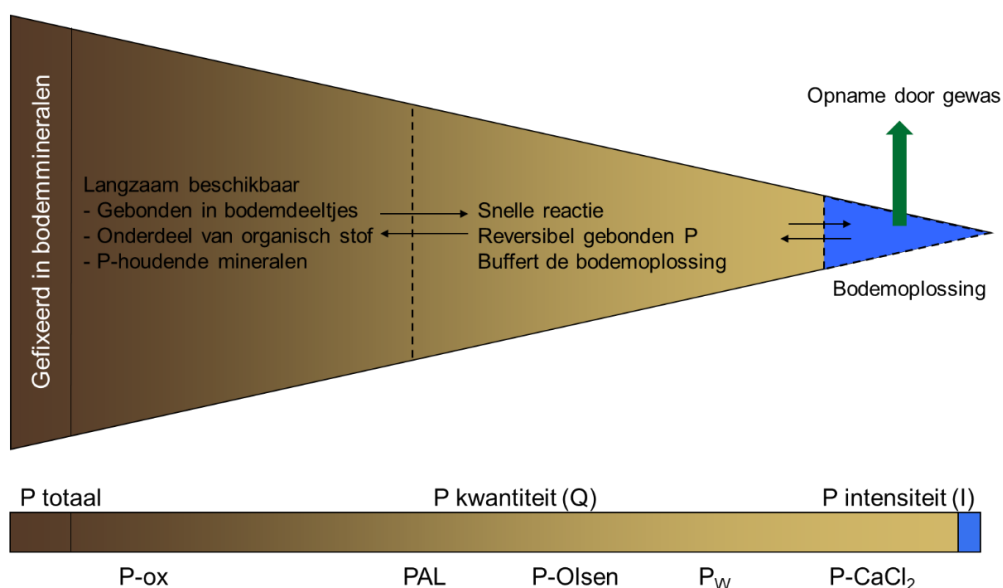
3.2 Fosfaattoestand van de bodem

Klimaatmaatregelen om bodemdaling en broeikasgasemissies te beperken, staan in het veenweide gelijk aan vernattingsmaatregelen. Vernattingsmaatregelen kunnen echter een negatief effect hebben op de oppervlaktewaterkwaliteit door de mobilisatie van fosfor. Verhoogde P-vrachten vanuit de landbouw kunnen een bedreiging vormen voor meerdere habitattypen die in de Wieden en Weerribben voorkomen, zoals Kranswierwateren (H3140), Meren met krabbenscheer (H3150) en Trilvenen (H7140A) (Provincie Overijssel, 2019).

De reden dat vernatting kan leiden tot verhoogde P-vrachten is tweeledig. Enerzijds worden stroombanen ondieper en zal het water dat naar het oppervlaktewater stroomt in contact staan met ondiepere bodemlagen die, als gevolg van het agrarische landgebruik, meer zijn opgeladen met fosfaat. Anderzijds leidt vernatting tot anaerobe omstandigheden waarbij de micro-organismen die veen afbreken niet zuurstof gebruiken maar een andere elektronenbron zoals ijzeroxides (nadat nitraat en mangaanoxides zijn verbruikt). Het stabiele ijzer(III) in de ijzeroxides wordt omgezet in ijzer dat een veel hogere oplosbaarheid heeft. Dit is een probleem omdat ijzeroxides zeer bepalend zijn voor de binding van fosfaat in de bodem. Wanneer de ijzeroxides in oplossing gaan, komt het daaraan gebonden P ook vrij. Hoe meer fosfaat was gebonden aan de ijzeroxides, des te sterker is dit effect.

Om de fosfaattoestand van de bodem te kunnen duiden, moet onderscheid worden gemaakt tussen de totale hoeveelheid in de bodem, de beschikbare reserves en de directe P-beschikbaarheid (Figuur 3.3). Voor een groeiend gewas zijn vooral de laatste twee relevant. De beschikbaarheid wordt voor een belangrijk deel bepaald door de binding van fosfaat aan ijzer- en aluminium(hydr-)oxiden. Drie aspecten zijn hierbij van belang: i) de totale bindingscapaciteit (Fe- en Al-(hydr)oxiden), ii) de mate waarin deze bindingscapaciteit is opgeladen met fosfaat én iii) het huidige landbouwkundige management. Naarmate een bodem meer is opgeladen (ofwel verzadigd is) met fosfaat des te groter is de beschikbaarheid en des te gemakkelijker kunnen de bodemdeeltjes het fosfaat loslaten. Het gemak waarmee een bodem kan worden opgeladen is echter sterk afhankelijk van de bindingscapaciteit. Wanneer een bodem een hoge bindingscapaciteit heeft, kan de bodem veel fosfaat binden en is een hoge (directe) beschikbaarheid dus moeilijker te bereiken. Het aanwezige fosfaat zal, door de sterke binding dan minder gemakkelijk uitspoelen naar grond- en oppervlaktewater. Een bodem met een lage bindingscapaciteit kan echter relatief makkelijk worden opgeladen met fosfaat. Hoe sterker de bodem is opgeladen des te zwakker is de binding waardoor de (directe) beschikbaarheid ook sterk toeneemt bij een hoge verzadigingsgraad.

In een veenbodem en bodems met een hoog organisch stofgehalte komt door mineralisatie ook fosfaat vrij. Bij mineralisatie verdwijnt de koolstof naar de atmosfeer en blijven geoxideerde mineralen, zoals ijzer en aluminium als (hydr)oxide, in de toplaag van de bodem achter (Smolders et al., 2012). Het fosfaat dat bij mineralisatie vrijkomt, blijft ook grotendeels achter in de toplaag van de bodem, door de binding aan deze aluminium- en ijzer(hydr)oxides. Het is typisch voor veen dat de bindingscapaciteit voor P ten opzichte van zandgronden (zeer) hoog is. De totale hoeveelheid P is ook hoog maar tegelijk is de P-beschikbaarheid vaak relatief laag.



Figuur 3.3. Schematische weergave van fosfaat in de bodem en de veel gebruikte meetmethodes om de beschikbaarheid te duiden (Van Rotterdam, 2010).

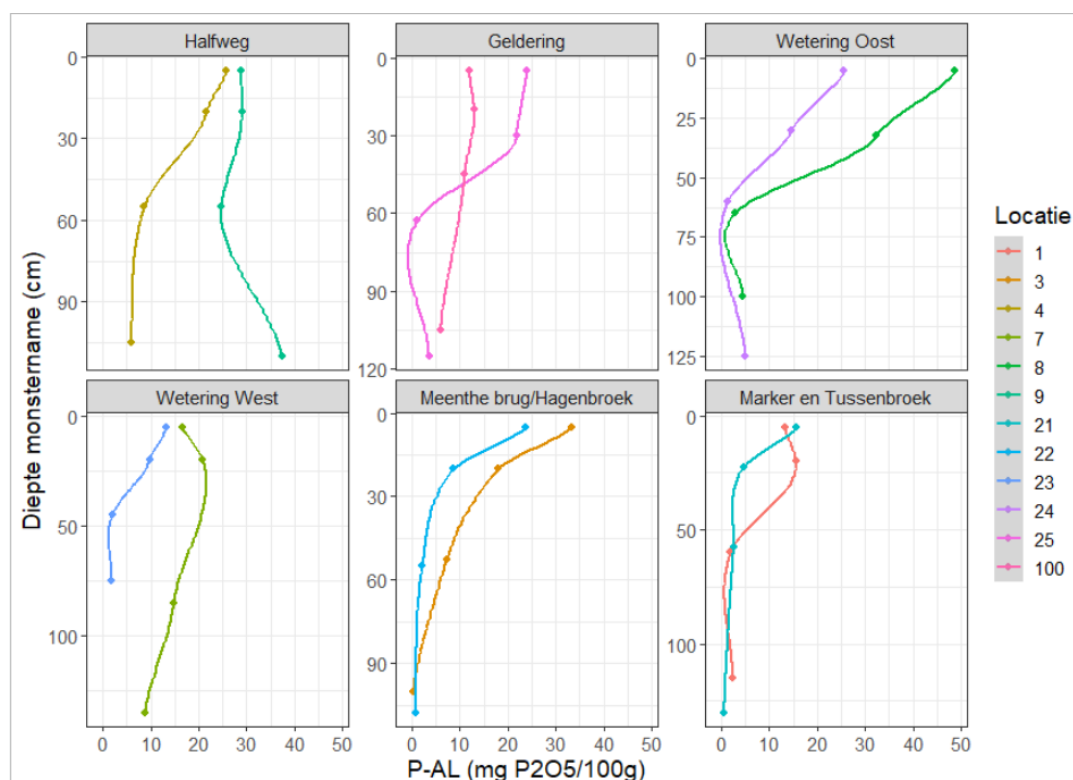
3.2.1 Resultaten fosfaattoestand van de bodem

In Figuur 3.4 is de ruimtelijke variatie in de P-AL (plant beschikbaar fosfaat door buffering) van de bodem in de bovenste bodemlaag weergegeven. Daarnaast wordt ook het organische stofgehalte in dezelfde bodemlaag weergegeven. Het organische stofgehalte in de bovenste bodemlaag is duidelijk het hoogst in Marker- en Tussenbroek (>22%). Zoals hierboven beschreven is de bindingscapaciteit hier ook hoog waardoor de P-beschikbaarheid in deze polder laag is. In grote delen van Marker- en Tussenbroek is de P-AL lager dan de landbouwkundige streefwaarde (27 tot 36 mg $P_2O_5/100g$).

Wanneer de toplaag uit (moerig) zand bestaat, is de bindingscapaciteit voor P lager. Door het agrarisch gebruik kan de P-AL in de toplaag lokaal vrij gemakkelijk (sterk) verhoogd worden. Het veldonderzoek bevestigt echter het beeld uit de agrarische meetnetten dat de P-AL van de toplaag van de bodem relatief laag is (Figuur 3.4). Boven een P-AL van 50 mg $P_2O_5/100g$ is de fosfaattoestand in de landbouwkundige klasse 'hoog'. Alleen in Wetering oost is de P-AL in de toplaag van één perceel bijna 50 mg $P_2O_5/100g$, voor alle andere percelen ligt P-AL lager.

Met de diepte neemt de P-AL van de bodem sterk af (Figuur 3.4). De bodemprofielen met een hoog organische stofgehalte hebben door de hoge bindingscapaciteit een lagere P-AL. In de percelen met alleen veen in het profiel (met of zonder kleidek) is de P-AL in de toplaag laag en neemt deze met de diepte sterk af (Marker- en Tussenbroek en Wetering west nr 23). In de bodemprofielen zonder een veenlaag in het bodemprofiel (Geldering nr 100 en Halfweg nr 9) neemt door de gering bindingscapaciteit de P-AL over het gehele profiel slechts beperkt af.

Voor de emissies naar het watersysteem en het effect van vernatten zijn twee zaken relevant. Enerzijds het verloop van het direct beschikbaar fosfaat met de diepte. Het direct beschikbaar fosfaat zoals benaderd met $P-CaCl_2$ is een maat voor de P-concentratie in het uitspoelend bodemvocht. Anderzijds is de mate waarin de bindingscapaciteit van de bodem is opgeladen met P van belang in dat deel van het bodemprofiel dat wordt vernat; dit is de fosfaatverzadigingsgraad (FVG). Hoe hoger de FVG des te meer P kan worden gemobiliseerd als gevolg van vernatting.



Figuur 3.4 Verandering van de fosfaattoestand op basis van P-AL met de bodemdiepte, uitgesplitst per polder. De x-as met P-AL is voor alle figuren hetzelfde.

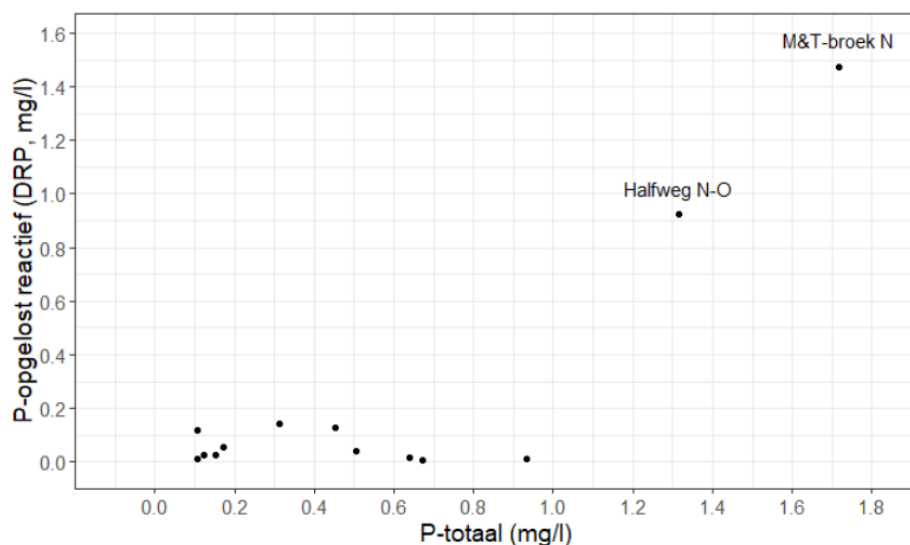
In dit onderzoek is het bodememissiemodel geparametriseerd met de bodemprofieldata van het veldonderzoek. Dit is gedaan door per polder de gemiddelde relatieve verandering in P-CaCl_2 in het bodemprofiel te combineren met de P-CaCl_2 in de toplaag van de bodem in elk perceel op basis van de data uit de agrarische meetnetten. De gebruikte relatieve verandering in P-CaCl_2 met de diepte is getoond in Bijlage VI (Figuur S6-3).

P-AL en de FVG zijn zeer sterk aan elkaar gecorreleerd in dit gebied ($r^2=0.96$). Uit Figuur 3.4 is af te leiden dat in de bodemprofielen met veen in de ondergrond de mate waarin de bindingscapaciteit is opgeladen met P zeer laag is vanaf 30/50 cm onder maaiveld. Alleen in die percelen waar geen veen meer is door mineralisatie of opmenging met zand is de fosfaattoestand ook in de ondergrond verhoogd.

3.2.2 Fosfaat in het grondwater

Tijdens het veldonderzoek is het zowel de hoeveelheid reactief opgelost P (DRP) als totaal P in het grondwater geanalyseerd. De relatie tussen DRP en P-totaal is weergegeven in Figuur 3.5. Op twee locaties (Halfweg N-O en M&T-broek N) na is DRP lager dan 0.15 mg/l. In dezelfde monsters varieert P-totaal echter tussen 0.11 en 0.9 mg/l en is daarmee een factor 1 tot 100 hoger dan DRP. Op twee locaties is zowel DRP als P-totaal hoog. Dit is in het noordoostelijke perceel in Halfweg waar het gehele bodemprofiel uit (deels moerig) zand bestaat. Het andere perceel waar geen veen in het bodemprofiel is aangetroffen, is P-totaal ook hoog (0.9 mg/l) maar is DRP laag (0.1 mg/l). In Marker- en Tussenbroek is de hoogste P-concentratie in het grondwater aangetroffen. De reden voor deze hoge concentratie is niet duidelijk.

In het bodememissiemodel is voor de berekening van de P-vracht met kwel de P-totaal concentratie in het grondwater gebruikt.



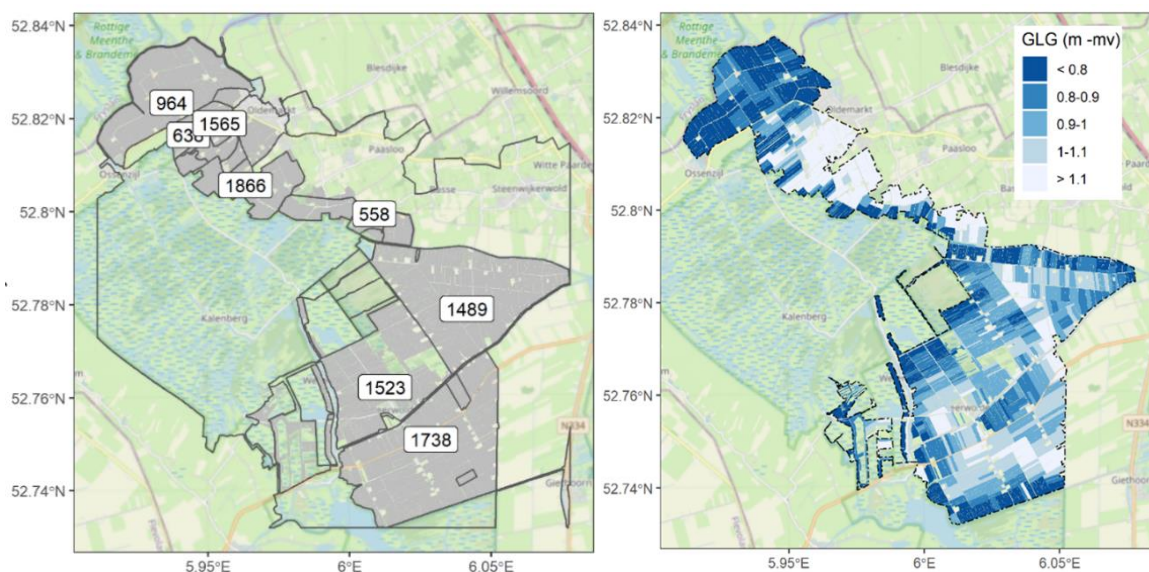
Figuur 3.5. Relatie tussen opgelost reactief P en totaal P in het grondwater.

3.3 Hydrologie en watersysteem

Peilgebieden en slootpeilen

Slootpeilen verschillen tussen de peilgebieden in het onderzoeksgebied. De peilgebieden in het onderzoeksgebied komen meestal één op één overeen met de ligging van de polders (Figuur 3.6). Alleen de polders Hagenbroek en Grote Polder zijn door het grote hoogteverschil opgedeeld in meerdere peilgebieden.

De slootpeilen van de grootste peilgebieden van het onderzoeksgebied zijn opgenomen in Tabel 3-1. Uit de peilen blijkt dat de gemiddelde droogleggingen (slootpeil ten opzichte van de hoogte van het maaiveld gemiddeld op een perceel) in elke polder vrij groot is met uitzondering van de meest veenrijke polders Hagenbroek en Marker- en Tussenbroek. In de Grote Polder en Meenthebrug is de gemiddelde drooglegging een resultaat van grote hoogteverschillen binnen de peilgebieden door de aanwezigheid van uitlopers van de pleistocene stuwwal. De diepe droogleggingen zijn daardoor aanwezig in gedeelten met minder tot geen veen en waar dus ook nagenoeg geen problemen (meer) zijn met bodemdaling. Bij de laag gelegen polders (Halfweg, Wetering en Gelderingen) zijn de diepe droogleggingen een resultaat van een keuze om diep te ontwateren voor de landbouw. Alhoewel dit gunstig is voor de landbouw (als het niet te droog is) is deze diepe ontwatering ongunstig voor bodemdaling en veenafbraak.



Figuur 3.6. Links: Peilgebieden in het onderzoeksgebied. Omlijning van de peilgebieden is begrenst op de omvang van het onderzoeksgebied. Voor het overzicht zijn alleen labels geplaatst bij de grootste peilgebieden. Data afkomstig van het open dataportaal van WDOdelta. Rechts Gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG) ten opzichte van maaiveld. Data afkomstig van het MIPWA model (NHI 2020, data van 2000-2014).

Tabel 3-1. Gemiddelde droogleggingen en waterpeilen per peilgebied met veen. Drooglegging is berekend op basis van slootpeil ten opzichte van de hoogte van het maaiveld gemiddeld op een perceel.

Peil- gebied	Polder	Gem. Veen- dikte (cm)	Zomerpeil (m - NAP)	Gem. Zomer- drooglegging (m - mv)	Winterpeil (m - NAP)	Gem. Winter- drooglegging (m -mv)
1738	Halfweg	36	2.7	1.2	Gelijk aan zomerpeil	
1523	Wetering	50	3.1	1.3	Gelijk aan zomerpeil	
1489	Gelderingen	42	2.5	1.0	2.85	1.32
558	Meenthebrug	78	1.45	2.1	Gelijk aan zomerpeil	
1866	Grote Polder	63	1.45	1.7	Gelijk aan zomerpeil	
1565	Hagenbroek	26	1.0	0.82	1.40	1.2
638	Hagenbroek	156	1.40	0.78	1.50	0.88
964	Marker- en Tussenbroek	179	1.0	0.57	1.45	1.0

Grondwaterstand en kweldruk

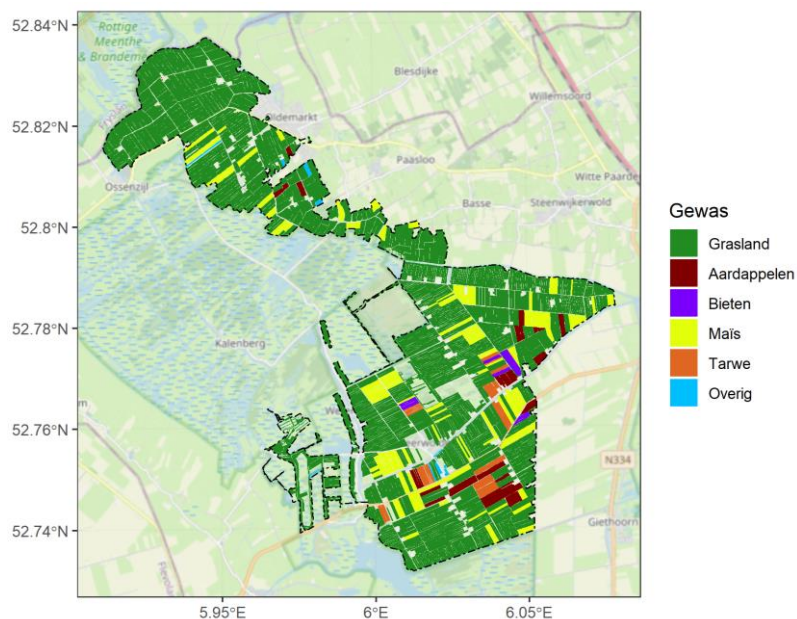
De mate van bodemdaling is mede afhankelijk van de gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG, zie Figuur 3.6). Deze grondwaterstand geeft aan hoe diep zuurstof in potentie in het bodemprofiel kan binnendringen en tot welke diepte inklinking plaatsvindt.

Een vergelijking van de GLG kaart met de veendiktekaart laat zien dat gebieden met een dikker veenpakket ook een hogere GLG hebben (vergelijking van Figuur 3.1 met Figuur 3.6). Met name de polder Marker- en Tussenbroek springt eruit, door de relatief hoge GLG ($<0.8\text{m-mv}$).

3.4 Landgebruik en agrarisch management

In de polder Gelderingen en Halfweg wordt op de moerige gronden akkerbouw bedreven door de teelt van aardappelen, bieten en tarwe (Figuur 3.7). Daarnaast wordt in de diepe polders ook maïs geteeld. Dit beperkt zich niet tot de moerige gronden, maar vindt verspreid over de polders plaats. Dit heeft in de praktijk een negatieve invloed op bodemdaling omdat veel grondbewerking nodig is voor de teelt (gras scheuren, ploegen, frezen).

Tijdens het veldonderzoek werd duidelijk dat de landbouw in de diepe polders vrij intensief is. Percelen zijn groot en diep ontwaterd en opbrengsten lijken hoog (uniforme grassamenstelling in combinatie met maïssteelt). Verschillende perceeleigenaren geven aan dat percelen vlak worden gemaakt om de gevolgen van heterogene bodemdaling op te heffen. De bodemprofielen wijzen ook op (historische) kerende grondbewerking door de menging van zand met het veen in het profiel.



Figuur 3.7. Landgebruik in 2019 op basis van data RVO.

4 Klimaatmaatregelen en scenario's

4.1 Bodemdaling en broeikasgasemissie

Agrarisch beheerde veengebieden zijn in het verleden op grote schaal ontwaterd. Ontwatering heeft met name plaatsgevonden door turfwinning, inpoldering en het creëren van gunstige omstandigheden voor de akkerbouw en melkveehouderij. Ontwatering leidt tot bodemdaling door inklinking en door de snelle afbraak van het veen omdat zuurstofrijke omstandigheden het afbraakproces versnellen. De inklinking gaat het snelst in de eerste jaren na ontwateren. Veenmineralisatie is afhankelijk van onder andere de grondwaterstand, vochtgehalte, temperatuur, pH en type veenbodem. Hoe lager het grondwater staat in de zomer, hoe dieper in het bodemprofiel het veen kan mineraliseren. De verwachting is dat door drogere zomers bodemdaling wordt versneld door inklinking en mineralisatie. Diepere grondwaterstanden door drogere zomers waren bijvoorbeeld te zien in de droge jaren van 2018 en 2019, waar de grondwaterstand decimeters dieper zakten dan voorheen (resultaten Gagelpolder, Utrecht, niet gepubliceerde data Hendriks en Schipper). Of dit ook leidt tot hogere veenmineralisatie is afhankelijk van onder andere vocht en temperatuur (Hoogland et al., 2019) en de samenstelling van het organisch materiaal (Hendriks, 1992; van Agtmaal et al, 2018).

Het afbreken van veen door ontwatering, met bijbehorende bodemdaling, heeft gevolgen op meerdere schaalniveaus. Regionaal kan bodemdaling zorgen voor schade aan gebouwen en wegen, en kan het indirect invloed hebben op de realisatie van natuurdoelstellingen. De Wieden en Weerribben zijn bijvoorbeeld hoger komen te liggen dan de daaromheen gelegen diep ontwaterde landbouwpolders, waardoor de wegzijging is toegenomen (van Wirdum 1990; Cusell & Mandemakers, 2017). Deze wegzijging wordt in het N2000-beheerplan als knelpunt beschreven, omdat er meer water ter compensatie ingelaten moet worden wat mogelijk kan leiden tot eutrofiëring. Aan de andere kant zorgt wegzijging ook voor de aanvoer van basenrijk oppervlaktewater, wat bijvoorbeeld gunstig kan zijn voor trilvenen (Provincie Overijssel, 2017).

Door veenoxidatie komen veel broeikasgassen vrij, wat relateert aan het mondiale klimaatprobleem. Naar schatting stoten Nederlandse veengronden 4.2 Mton CO₂-equivalent per jaar uit, wat neerkomt op 2-3% van de totale Nederlandse broeikasgasemissie (Kwakernaak et al., 2010). De doelstelling van het kabinet is daarom om de broeikasgasemissie vanuit veenweidegebieden te reduceren met 1 Mton CO₂-eq, waarbij de reductie in 2030 gerealiseerd moet zijn (Ministerie van Economische Zaken en Klimaat, 2019). De overheid heeft 276 miljoen euro vrijgemaakt voor de opzet van pilots en demo's, het uitrollen van specifieke maatregelen en het ontwikkelen van verdienmodellen voor de agrarische bedrijven in de veenweidegebieden.

Meerdere maatregelen zijn mogelijk om bodemdaling (en daarmee broeikasgasemissie) tegen te gaan. Leidend is de keuze om bodemdaling te remmen of te stoppen. Voorbeelden van maatregelen die gericht zijn op het remmen van bodemdaling zijn onderwaterdrainage en het verhogen van slootpeilen. Peilfixatie en een (geleidelijke) functieverandering van landbouw naar natte landbouw of natuur zijn voorbeelden van maatregelen die gericht zijn op het stoppen van bodemdaling. Het is met name belangrijk dat een integrale aanpak wordt toegepast bij de uitrol van maatregelen, omdat maatregelen naast het tegengaan van bodemdaling ook effect hebben op de agrarische bedrijfsvoering,

oppervlaktewaterkwaliteit, water toe- en afvoer en natuurwaarden. Bij het creëren van deze integrale zienswijze is het essentieel dat er samengewerkt wordt tussen andere provincies, waterschappen en agrariërs (PBL, 2016). Door de complexiteit van bodemdaling (technisch-inhoudelijk en sociaal) is daarom het advies om belangen van de verschillende belanghebbenden (inclusief de natuur) inzichtelijk te maken met een maatschappelijke kosten-baten analyse. Uitvoering hiervan leidt tot het objectief afwegen van verschillende belangen en ondersteunt hiermee transparante en integrale besluitvorming.

4.2 Kwantificeren bodemdaling en CO₂-emissie

Om bodemdaling en CO₂-emissies door veenoxidatie te kwantificeren maken de meeste onderzoeken gebruik van zogeheten “van den Akker functies” op basis van de gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG). Deze formules zijn o.a. opgesteld op basis van meetgegevens van KTC Zegveld (van Asselen et al. 2020; van den Akker et al. 2010). Vervolgens wordt er op basis van veeneigenschappen een CO₂ flux gekoppeld aan de berekende bodemdaling. Naast grondwaterstand worden geen andere variabelen meegenomen die van invloed zijn op veenafbraak zoals vocht en temperatuur, en wordt alleen de CO₂-emissie berekend en geen lachgas en methaan emissies die ook bijdragen aan de totale broeikasgasemissie. Op dit moment wordt er vanuit het Nationaal Kennisprogramma Bodemdaling kennis ontwikkeld om deze kennisleemte te dichten. In dit onderzoek is, bij gebrek aan metingen en/of betere functies, gebruik gemaakt van de eerder genoemde Van den Akker functies. Wel zijn de functies aangepast om beter aan te sluiten bij de eigenschappen van het onderzoeksgebied. Deze aanpassingen worden hieronder onderbouwd.

Berekenen van bodemdaling

In de “Van den Akker functies” (Van den Akker et al. 2010; van Asselen et al. 2020) wordt onderscheid gemaakt tussen veenbodems zonder kleidek (Formule 1) en veenbodems met een dun kleidek (Formule 2, kleidek van <40cm). Dit onderscheid is met name gemaakt omdat er minder bodemdaling is wanneer er klei op veen ligt, omdat er minder zuurstof het veen binnen kan dringen.

$$B = 23.537 \cdot GLG - 6.68 \text{ (Formule 1, veenbodems zonder kleidek)}$$

$$B = 23.537 \cdot GLG - 8.68 \text{ (Formule 2, veenbodems met kleidek <40cm)}$$

Waar:

- B = bodemdaling door veenoxidatie (mm jaar⁻¹)
- GLG = Gemiddeld Laagste Grondwaterstand (m -mv)

Vergelijkbare formules zijn ook bepaald voor veenbodems met een dik kleidek (kleidek >40cm). Deze zijn in dit onderzoek niet meegenomen omdat deze situatie niet voorkomt in het onderzoeksgebied (op slechts 11 van de 1235 percelen is de dikte van het kleidek net iets dikker dan 40cm).

Een kanttekening op deze functies is dat het gehalte organische stof niet is meegenomen. De percelen waarvoor de relaties zijn afgeleid betreffen met name veenpercelen met hoge organische stofgehalten. Dit staat in sterk contrast met de veenpercelen van de onderzoekslocatie, waar veelal erg zandig veen aanwezig is (zie gebiedsanalyse, paragraaf 3.1). Als er geen rekening wordt gehouden met deze verschillen in organische stofgehalten wordt de bodemdaling met bijbehorende broeikasgasemissie

“Een kanttekening op de van den Akker functies is dat ze geen rekening houden met verschillen in organische stofgehalten. De percelen waar de relaties voor zijn afgeleid betreft met name veenpercelen met hoge organische stofgehalten. Dit staat sterk in contrast met de veenpercelen van de huidige onderzoekslocatie, waar veelal erg zandig veen aanwezig is met lage organische stofgehalten”

overschat. Een soortgelijke kanttekening op de van den Akker formules is ook beschreven door Erkens et al. (2019).

In een onderzoek van Staveren et al. (eindrapport verwacht 2021) wordt dit punt ook aangehaald. Hier staat beschreven dat er om deze reden een bandbreedte om de resultaten zit (bodemdaling is sneller wanneer de organische stofgehalten hoger zijn dan in Zegveld en langzamer wanneer organische stofgehalten lager zijn). Voor het huidige onderzoeksgebied zijn de formules van Van den Akker aangepast. Er is aangenomen dat Formules 1 en 2 gelden voor percelen waarbij het gehalte aan organische stof hoger is dan 50%. Deze organische stofgehalten komen redelijk overeen met de organische stofgehalten in de toplaag van de veenpercelen waar de relatie is geobserveerd (van den Akker., 2010). Als het organische stofgehalte lager is dan 50% is een lineaire afname van bodemdaling aangenomen. In dit geval gelden Formules 3 en 4.

$$B = (23.537 \cdot GLG - 6.68) \cdot \frac{OS}{50} \text{ (Formule 3, veenbodems zonder kleidek)}$$

$$B = (23.537 \cdot GLG - 8.68) \cdot \frac{OS}{50} \text{ (Formule 4, veenbodems met kleidek <40cm)}$$

Waar:

- B = bodemdaling door veenoxidatie (mm jaar⁻¹)
- GLG = Gemiddeld Laagste Grondwaterstand (m -mv)
- OS = Organische stofgehalte van de toplaag (%)

In dit onderzoek zijn de aangepaste Formules 3 en 4 gebruikt om op basis van de lokale GLG en het organische stofgehalte van het perceel de bodemdaling te berekenen.

Naast irreversibele bodemdaling door veenoxidatie bestaat er in ontwaterde veengronden ook een seizoensfluctuatie. Nauwkeurige hoogtemetingen laten door het jaar heen een nauw verband zien tussen maaiveldhoogte en grondwaterstanden, waarbij een uitzakkende grondwaterstand van 100cm een maaiveldddaling van ongeveer 5-10cm (in een jaar) tot gevolg heeft (Van den Berg et al., 2019). Een deel van deze bodemdaling is echter reversibel omdat veen- en deklagen weer opzwellen. In een agrarisch perceel, dat in het veenweidegebied is omringd door sloten, bepaalt het waterpeil de stand van het grondwater langs de slootranden.

Omdat het grondwater in het midden van een perceel dieper uitzakt dan langs de slootranden komen percelen over de tijd hol te liggen. Dit is vanuit agrarisch management ongewenst omdat dat leidt tot een slechte afwatering. In de agrarische praktijk wordt dit opgeheven door het perceel weer 'bol te leggen'. Hierdoor worden bodemlagen gemengd en komt er (veel) zuurstof in het profiel wat veenmineralisatie versnelt. De agrarische praktijk wordt beïnvloed door bodemdaling maar beïnvloedt ook zelf de bodemdaling.

Berekenen van CO₂-emissie

De reductie van maaiveldddaling wordt vaak één op één gerelateerd aan de CO₂-emissie, waarbij 1 millimeter bodemdaling gelijk wordt gesteld met 2259 kg CO₂ ha⁻¹ (Verstand et al. 2020, gebaseerd op van den Akker et al. 2010). Zoals aangegeven geldt deze relatie alleen voor de bodems van Zegveld (van den Akker et al. 2010). In het huidige onderzoek wordt met behulp van Formule 5 en middels lokale data van organische stofgehalten de relatie gelegd tussen broeikasgasemissie en bodemdaling (gebaseerd op van den Akker et al. 2010).

$$CO_2 = B \cdot \rho_d \cdot fr_{OS} \cdot fr_c \cdot \frac{44}{12} \cdot 10^4 \text{ (Formule 5)}$$

Waar:

- CO₂ = CO₂ emissie (kg CO₂ ha jaar⁻¹)
- B = bodemdaling door veenoxidatie (m jaar⁻¹, berekend met formule 3 of 4)
- ρ_d = bulkdichtheid veen (aangenomen waarde van 358 kg m⁻³)

- fr_{OS} = fractie van organische stof in het veen (gehaald uit lokale data)
- fr_c = koolstoffractie van het organische stof (aangenomen waarde van 0.55)

Samenvattend wordt eerst de bodemdaling door veenoxidatie geschat op basis van de GLG (Formules 3 en 4), en wordt vervolgens, in combinatie met lokale bodemeigenschappen de CO₂-emissie berekend.

Een kanttekening hierbij is dat de relatie tussen GLG en bodemdaling, en daarmee tussen bodemdaling en CO₂-emissie, een puur empirische relatie betreft. Enkele meer procesgerichte onderzoeken suggereren dat andere variabelen ook van invloed zijn op bodemdaling/broeikasgasemissie. Van den Berg et al. (2019) concluderen dat op basis van daadwerkelijke CO₂-metingen in de Friese veenweiden in de meetjaren 2017 en 2018, temperatuur de belangrijkste factor is voor de variatie in de gemeten CO₂-emissie en niet grondwaterstand. Verder toont van den Berg et al. (2019) aan dat een extreem droog jaar (2018) tot iets lagere CO₂-emissies (gemiddeld 15%) leidt vergeleken met een even warm jaar (2017) maar met een matig neerslagtekort en frequente neerslag in de maanden juli en augustus. Door het dieper wegzakken van de GLG in 2018 ten opzichte van 2017 zou een hogere CO₂-emissie verwacht kunnen worden. Het optreden van hoge CO₂-emissies bij optimale vochtvoorziening van de toplaag (40 cm, zoals in 2017) is in de literatuur al eerder beschreven op basis van resultaten van kolomexperimenten. Hoogland et al. (2019) stellen ook vast dat bodemvocht de belangrijkste variabele is voor veenafbraak door het effect op de beschikbaarheid van nutriënten en zuurstof.

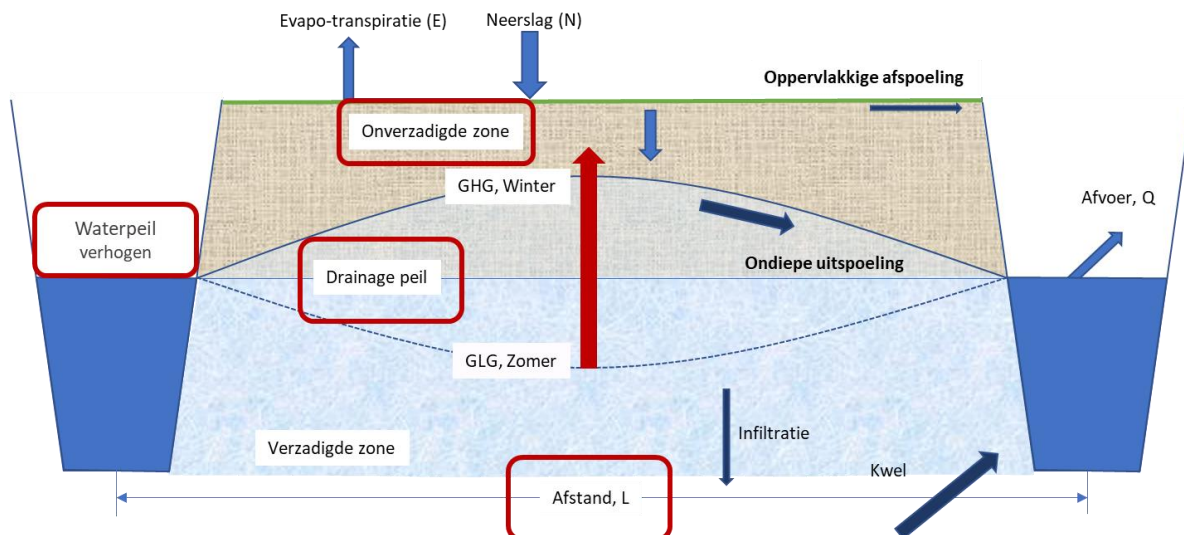
Alhoewel bodemvocht en temperatuur van invloed zijn op o.a. de snelheid van veenafbraak en CO₂-emissies, en dat methaan en lachgas emissies ook relevant zijn voor het berekenen van de totale broeikasgasemissie, bestaan er op dit moment geen handvatten om dit in het huidig onderzoek te kwantificeren. Op dit moment wordt het gebruik van aangepaste van den Akker functies op basis van gebied specifieke kenmerken als beste methode gezien om bodemdaling en broeikasgasemissie te berekenen. Als er in de loop der jaren nieuwe formules ontwikkeld worden die procesmatig bodemdaling kunnen berekenen (en de data beschikbaar is om deze berekening uit te voeren) is het aan te raden de huidige onderzoeksresultaten te herevalueren.

4.3 Klimaatmaatregelen

Maatregelen om bodemdaling en broeikasgasemissies tegen te gaan zijn gebaseerd op vernatten – en meer specifiek het verhogen van de laagste grondwaterstand in de zomer. In de zomer zakt door het netto neerslagtekort de grondwaterstand het diepste weg waardoor zuurstof tot diep in het bodemprofiel kan dringen. In de zomer is ook de microbiële activiteit die zorgt voor veenmineralisatie het hoogst. Voor het bepalen van de CO₂-emissiereductie door vernatting van veengrond wordt uitgegaan van Formules 3 t/m 5.

De ‘knoppen’ waaraan gedraaid kan worden om de GLG te verhogen en veenmineralisatie en daarmee bodemdaling en CO₂-emissies te beperken zijn schematisch weergegeven in Figuur 4.1. Deze omvatten het verhogen van het waterpeil in de sloten, het aanleggen van (peilgestuurde) onderwaterdrainage, het verkleinen van de afstand tussen de watergangen – smaller maken van het perceel en het agrarische management van de onverzadigde zone. Deze worden in de volgende paragrafen in meer detail besproken.

De omstandigheden in de uitgangssituatie zijn bepalend voor de mate waarin CO₂-emissiereductie en beperking van bodemdaling kunnen worden bereikt. De bodemopbouw – diepte van het veen, aanwezigheid van een deklaag of tussenlaag, grondwaterstand, peil en drooglegging, (historisch) agrarisch management en de toekomstige functie zijn bepalend voor de potentie van maatregelen om CO₂-emissies te beperken.



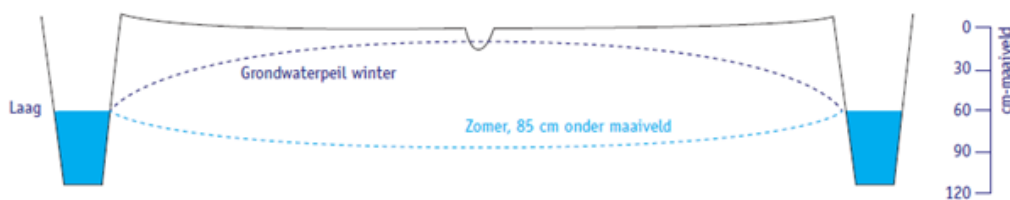
Figuur 4.1. Schematische weergave van de 'knoppen' (rode kaders) waar in een agrarisch beheerd perceel kan worden gedraaid om veenmineralisatie en bodemdaling te beperken.

4.3.1 Onderwaterdrainage (OWD)

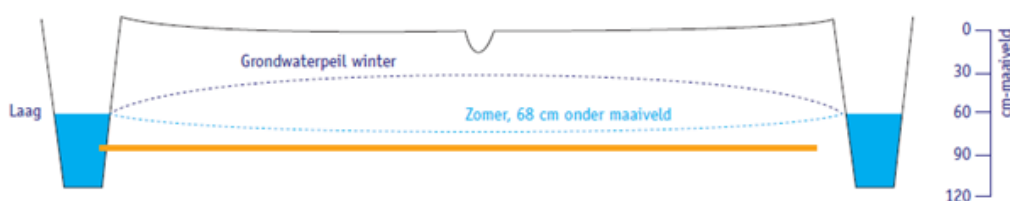
Traditionele onderwaterdrainage

Het doel van onderwaterdrainage is het infiltreren van water in droge tijden en het draineren van water in natte tijden. Ter vergelijking; traditionele buisdrainage is alleen aangelegd voor afwatering en ligt daarom op afschot richting de sloot. Om bij onderwaterdrainage ook infiltratie mogelijk te maken moeten de buizen vlak worden gelegd. In droge tijden (zomer) ligt de grondwaterstand onder het slootpeil, en zorgt onderwaterdrainage ervoor dat er water via de drains in de bodem infiltreert. Hierdoor zakt de gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG) minder ver uit. Omdat de snelheid van veenafbraak mede afhankelijk is van de GLG wordt hiermee veenafbraak geremd. In natte tijden (winter) wordt er water naar de sloot gedraineerd, waardoor de grondwaterstand (in dit geval de gemiddeld hoogste grondwaterstand) wordt verlaagd. Dit heeft voordelen voor de boer, het land blijft bijvoorbeeld beter berijdbaar, maar heeft ook andere, vaak gunstige, effecten op verliezen naar het oppervlaktewater (Woestenburg et al., 2009; Hendriks et al., 2012; van Asselen et al. 2020). Het effect van OWD op de grondwaterstanden is gevisualiseerd in Figuur 4.2.

A Ongedraineerd



B Met onderwaterdrains



Figuur 4.2. Werking van OWD (Nationaal Kennisprogramma Bodemdaling, 2020).

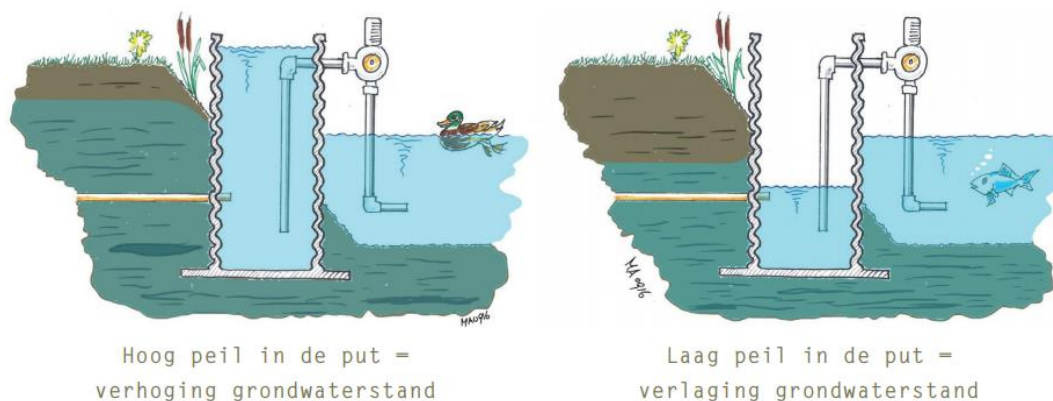
Door onderwaterdrainage fluctueert de grondwaterstand minder gedurende het jaar, en komen daarmee de GLG en GHG dichter bij elkaar te liggen (Figuur 4.2). Op het moment zit onderwaterdrainage vooral in de pilotfase. De bekendste pilots zijn uitgevoerd op KTC Zegveld, waar al meer dan 15 jaar de effecten van onderwaterdrainage op de grondwaterstand worden onderzocht. Het effect van onderwaterdrainage op veenafbraak blijkt afhankelijk te zijn van meerdere variabelen. Ten eerste is het effect van onderwaterdrainage afhankelijk van slootpeil. Meestal is onderwaterdrainage passief, waardoor de hoogte van het slootpeil mede bepaalt hoe snel water via de drains in de bodem infiltreert. Dit is onder andere aangegeven in van den Akker et al. (2013), waar beschreven staat dat bij een hoog slootpeil de infiltrerende werking van onderwaterdrainage goed tot zijn recht komt. Ten tweede is de horizontale doorlatendheid van de bodem relevant. Water kan minder ver de bodem in infiltreren als de bodem slecht water doorlaat. Dit beperkt de effectiviteit van vele maatregelen die zich richten op vernatting, waaronder onderwaterdrainage. Ten derde hangt de effectiviteit van onderwaterdrainage af van de aanleg. Een kleinere drainafstand (meer drains) kan een groter effect hebben op de grondwaterstand (zie bijvoorbeeld Hoving et al. 2013), maar dit is ook afhankelijk van de bodemeigenschappen. Een grotere drainafstand kan worden aangehouden bij percelen waar de bodem goed doorlatend is.

In veldonderzoek op 11 percelen in Friesland zijn de effecten van onderwaterdrainage op zowel maaiveldddaling als broeikasgasemissie gemeten door emissiemetingen (Van den Berg, 2019). Dit onderzoek bevestigt dat OWD leidt tot het minder diep uitzakken van de GLG in de zomer (10-30cm) en tot een beperking van zowel de fluctuaties in de hoogte van het maaiveld als de bodemdaling over de tijd. Dit kon echter niet vertaald worden naar verminderde CO₂ en CH₄ emissie. Waarschijnlijk zorgde de hogere grondwaterstanden in percelen met onderwaterdrainage voor vochtigere omstandigheden en hierdoor meer veenafbraak. In de controlepercelen was de bodem mogelijk zo ver uitgedroogd dat vocht-limiterende omstandigheden ontstonden voor micro-organismen, waardoor de afbraak van organisch materiaal werd geremd.

Drukdrainage

De meeste proeven zijn uitgevoerd met traditionele onderwaterdrainage. Hier kan niet actief worden gestuurd op de grondwaterstand. Dit kan wel bij drukdrainage. Dit is een type drainagesysteem waar een put komt te liggen tussen de sloot en het perceel, waar middels een pomp gestuurd kan worden op peil. Het waterpeil in de put bepaald in welke mate er water wordt geïnfilteerd (verhogen grondwaterstand) of gedraineerd (verlagen grondwaterstand). Dit is gevisualiseerd in Figuur 4.3.

In Figuur 4.3 is te zien dat bij drukdrainage drainagebuizen worden aangesloten op een verzamelput. Er wordt water gepompt vanuit de sloot in de verzamelput, waardoor er hogere of lagere waterpeilen kunnen worden gecreëerd ten opzichte van de sloot. Dit geeft extra flexibiliteit in het sturen van de grondwaterstand. Wel observeerde Van den Berg (2019) hoge N₂O emissiepieken op het perceel met drukdrainage, wat mogelijk komt door snel wisselende vochtgehalten. Er wordt geconcludeerd dat verder onderzoek nodig is om deze hypothese verder te onderbouwen.



Figuur 4.3. Werking van drukdrainage (Nationaal Kennisprogramma Bodemdaling, 2020).

Of het wenselijk is om onderwaterdrainage toe te passen hangt af van de langetermijnvisie voor een gebied. Drukdrainage past bij een meer intensief veehouderijsysteem (PBL, 2016), waar de keuze wordt gemaakt om het gebied te optimaliseren voor agrarische productie (in dit geval door lokaal de grondwaterstand actief te verhogen en verlagen). Traditionele onderwaterdrainage past nog steeds bij een intensief landbouwsysteem maar hierbij zijn vaak hogere slootpeilen noodzakelijk om het effectief toe te passen, en correspondeert hierdoor met een minder intensief veehouderijsysteem als bij drukdrainage. Als er gekozen wordt om ecosysteemdiensten zwaarder te laten meewegen worden maatregelen als peilfixatie en een overgang van landgebruik relevant, wat past bij een extensiever systeem (PBL, 2016).

Uitgangspunten onderwaterdrainage

OWD is nog niet grootschalig geïmplementeerd, en zit nog veelal in de pilotfase. Wel zijn er verschillende initiatieven opgezet om op een groter schaalniveau bodemdaling tegen te gaan, waar onderwaterdrainage soms onderdeel van is (zie bijvoorbeeld de poldergerichte aanpak in het project "klimaatstim boeren op veen"). Een samenvatting van het effect van onderwaterdrainage op de GLG is opgenomen in Bijlage III. Deze bijlage beschrijft de observaties van pilotonderzoeken uitgevoerd op verschillende veengronden in Nederland. Op basis van deze onderzoeken kan geconcludeerd worden dat bij traditionele onderwaterdrainage de GLG verhoogd wordt met ongeveer 4-10cm (25^{ste} en 75^{ste} kwantiel van alle onderzoeksresultaten) en dat de GHG met ongeveer 15cm wordt verlaagd. Deze range wordt in deze studie gehanteerd om het effect van OWD door te rekenen. Deze range komt qua ordegrrootte overeen met de resultaten van Rozemeijer et al. (2019) waar een gemiddeld effect van 5-10cm verhoging van de laagste grondwaterstanden is gebruikt. Voor drukdrainage is de verwachting dat er onafhankelijk van het slootpeil kan worden gestuurd op een bepaald streefpeil van de grondwaterstand (Hoving et al. 2018).

4.3.2 Peilaanpassingen

Aanpassen slootpeil

Voor het agrarische landgebruik zijn slootpeilen veelal verlaagd om de bereikbaarheid van het land te waarborgen en natschade te beperken. Bij lagere slootpeilen (diepere drooglegging) komt er echter meer zuurstof bij het veen, waardoor veen sneller wordt afgebroken. Dit gaat gepaard met een snellere bodemdaling. Dit is bijvoorbeeld te zien in Rienks et al. (2004), waar de effecten van verschillende peilstrategieën in de veenweidegebieden van Friesland zijn beoordeeld.

Om bodemdaling te remmen kan er daarom voor gekozen worden om de slootpeilen te verhogen. Net als bij onderwaterdrainage is de effectiviteit afhankelijk van de horizontale weerstand van de bodem en het (beoogde) slootpeil. Verder is ook de breedte van het perceel relevant. Tussen twee sloten ligt de grondwaterstand namelijk hol in droge tijden en bol in natte tijden (Bos et al., 2017). Wanneer percelen groter worden, kan, afhankelijk van de weerstand van het veen, de grondwaterstand sterker fluctueren. Bij bredere percelen en meer afstand tussen de sloten zal het effect van peilverhoging op de grondwaterstand geringer zijn. De effectiviteit van het verhogen van slootpeilen kan worden verhoogd met additionele maatregelen zoals onderwaterdrainage of smallere percelen.

Holshof et al. (2011) meten een bodemdaling van 2.8mm per jaar bij een drooglegging van 30 cm-mv (slootpeil is verhoogd van 50 tot 30 cm-mv) en een bodemdaling van 7.5mm per jaar bij een drooglegging van 50 cm-mv (gebaseerd op metingen van 2005-2010 te Zegveld). Dit verschil was echter niet statistisch significant omdat er een grote spreiding was tussen en binnen de percelen. Empirische relaties tussen slootpeil en bodemdaling kunnen worden beschreven door Formules 6 en 7 (van den Akker et al., 2007, zie ook van Asselen et al. 2020).

$$B = 14.455 \cdot S + 2.75 \text{ (Formule 6, veenbodems zonder kleidek)}$$

$$B = 15.455 \cdot S - 3.75 \text{ (Formule 7, veenbodems met kleidek <40cm)}$$

Waar:

- B = bodemdaling door veenoxidatie (mm jaar⁻¹)
- S = Drooglegging (m-mv)

Deze formules houden net als de andere van den Akker functies geen rekening met organische stofgehalten, waardoor de bodemdaling wordt overschat in gebieden waar organische stofgehalten lager liggen. Het berekenen van bodemdaling op basis van drooglegging is minder nauwkeurig dan de berekening op basis van GLG. Daarnaast is het de verwachting dat naast drooglegging ook andere variabelen effect hebben op de relatie tussen het drooglegging en de GLG waaronder:

- Perceelsbreedte. Als het perceel breder is komt de grondwaterstand meer hol te liggen/hebben sloten een minder groot effect op de grondwaterstand (interactie-effect met drooglegging).
- Natte omtrek van het perceel: als er relatief weinig sloten langs het perceel liggen hebben sloten een minder groot effect op de grondwaterstand (interactie-effect met drooglegging)
- Kwel/infiltratie: een hogere kweldruk zorgt voor een hogere grondwaterstand
- Veendikte: als de veenlagen dikker zijn kan water vanuit de sloot minder makkelijk in de bodem infiltreren. Daardoor kan de grondwaterstand dieper uitzakken.

Om recht te doen aan de complexere interactie tussen bodemdaling en drooglegging dan de relatie zoals beschreven in Formule 6 en 7 is een lineair regressiemodel opgesteld tussen GLG en de data van het huidig onderzoeksgebied (Formule 8).

$$GLG = 0.634 \cdot S_z - 0.302 \cdot N_{omtrek} + 0.0419 \cdot SeepInf + 8.80 \cdot 10^{-4} \cdot V - 0.411 \cdot S_z \cdot N_{omtrek} - 0.533 \text{ (Formule 8)}$$

Waar:

- GLG = Gemiddeld Laagste Grondwaterstand (m -mv, negatief getal)
- S_z = Drooglegging in de zomer (m -mv, negatief getal)
- $SeepInf$ = kweldruk (mm dag⁻¹). Negatief getal is infiltratie, positief getal is kwel.
- V = veendikte (cm)

Het model heeft een R^2 van 0.66 op basis van 1200 percelen. Alle variabelen zijn statistisch significant. Het was de verwachting dat perceelsbreedte ook relevant zou zijn om de GLG te berekenen op basis van drooglegging. Deze variabele bleek echter niet significant. Dit is mogelijk het resultaat van de manier waarop GLG wordt bepaald in de gebruikte MIPWA-data, aangezien de modelwaarden interpolaties zijn op een hogere resolutie dan een perceel.

In dit onderzoek is Formule 8 gebruikt om het effect van het aanpassen van drooglegging op de GLG te bepalen. De verandering van de GLG is vervolgens gebruikt om met de eerder beschreven formules bodemdaling en bijbehorende CO₂-emissie te berekenen (Formules 3 t/m 5).

Peilfixatie

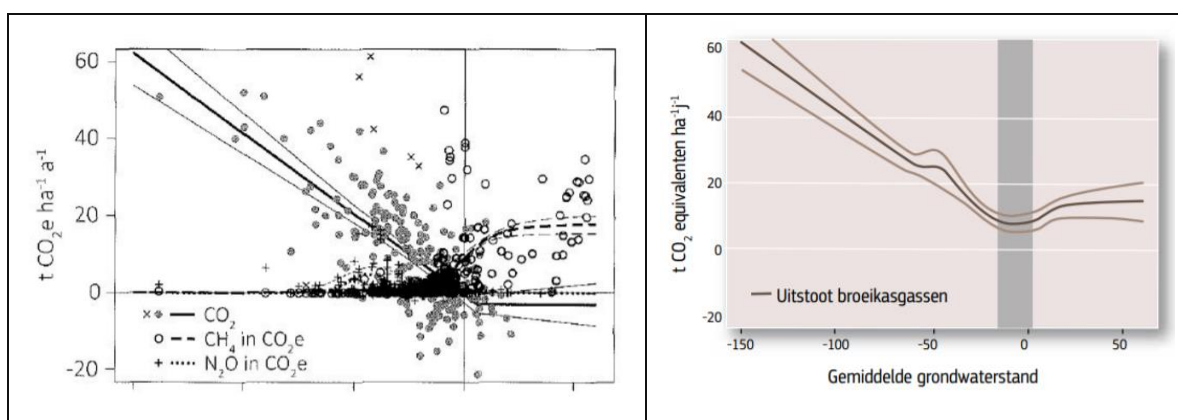
Bij peilfixatie wordt het peil in de sloot vastgezet. In andere woorden het waterpeil beweegt niet meer mee met het dalen van de bodem. In eerste instantie wordt de bodemdaling hiermee geremd. Het uiteindelijke effect is dat bodemdaling stopt, maar het kan vele decennia duren voordat dit wordt bereikt (PBL, 2016). Bodemdaling kan sneller gestopt worden als peilfixatie wordt gecombineerd met andere vernattende maatregelen (zoals het verhogen van slootpeilen).

Als peilfixatie binnen een peilgebied wordt ingevoerd is het afhankelijk van de hoogteverschillen binnen een peilgebied wat de lokale effecten zullen zijn. De laagstgelegen percelen zullen het meest vernatten. Afhankelijk van de hoogteverschillen zullen uiteindelijk zones ontstaan waar extensieve

melkveehouderij nog haalbaar is, maar ook zones waar het te nat is voor de gangbare grasproductie en alleen natte teelten mogelijk worden.

4.3.3 Natte teelten

Bij het overgaan van de landbouw op natte teelt (paludicultuur) wordt bodemdaling gestopt (PBL, 2016). De grondwaterstand wordt bij natte teelten verhoogd van net onder tot ruim boven maaiveld. Voorbeelden van gewassen zijn lisdodde, cranberry, azolla, veenmos en riet (Nationaal Kennisprogramma Bodemdaling, 2018). Afhankelijk van welk gewas er wordt geteeld, kan de gemiddelde grondwaterstand worden gezet op circa -45 tot circa +45 cm tov maaiveld. Voor het effect van natte teelten op de broeikasgasemissies wordt veelal (o.a. Bestman et al., 2019; Nationaal Kennisprogramma Bodemdaling, 2018; Motelica-Wagenaar & Beemster, 2020) verwezen naar de resultaten van Jurasinski et al., (2016), waar de gemiddelde grondwaterstand is uitgezet tegen de broeikasgasemissie (Figuur 4.4 **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.**).



Figuur 4.4 Gemiddelde grondwaterstand (x-as) uitgezet tegen de broeikasgasemissie (y-as). Links is de figuur uit Jurasinski et al. (2016) met de oorspronkelijke datapunten. Een variant uit Bestman et al. (2019) is rechts toegevoegd omdat de x-as hier zichtbaar is.

Uit de bovenstaande figuur blijkt dat het opzetten van het slootpeil voor natte teelt de CO₂-emissie door veenoxidatie sterk wordt gereduceerd tot gestopt. De emissies van lachgas en methaan gaan echter een belangrijke bijdrage leveren aan de totale broeikasgasemissie (CO₂-equivalent). Een gemiddelde grondwaterstand tussen de 0-20cm onder maaiveld lijkt een optimum te zijn voor de broeikasgasemissie. Bij waterstanden hierboven neemt de broeikasgasemissie weer toe, met name door verhoogde methaanemissies. Hoewel informatief, is het onbekend in hoeverre de situatie uit Jurasinski et al., (2016) van toepassing is op andere gebieden. Veel proceskennis ontbreekt nog om de broeikasgasemissie na vernatting te schatten, als aangegeven in Jurasinski et al., (2020). Uit het veldonderzoek in het huidige onderzoeksgebied blijkt dat de veenlagen in de laag gelegen polders (Halfweg, Gelderingen en Wetering) slechts dun en zandig zijn, wat in contrast staat met de veengronden waar methaan en lachgasemissies zijn verricht. Het is te verwachten dat de relatie tussen grondwaterstanden en broeikasgasemissie hierdoor verschilt.

Gezien de schijnnaauwkeurigheid die zou ontstaan bij het kwantitatief doorrekenen van natte teelt is ervoor gekozen de maatregel niet door te rekenen. Wel wordt er op basis van de resultaten van het veldonderzoek een inschatting gemaakt op welke locaties het opzetten van pilots met natte teelten het meest realistisch lijkt (Paragraaf 4.4.3.). Het effect op de broeikasgasemissie zou in deze pilots kunnen worden onderzocht. Ook zou er binnen deze pilots ervaring kunnen worden opgedaan in de teeltmethodiek, mate van hydrologische isolatie, bemesting en de corresponderende effecten op de fosfaatbelasting naar het watersysteem.

4.3.4 Agrarisch management

Agrarisch management kan op verschillende manieren bijdragen aan veenaafbraak en bodemdaling. Gewaskeuze, grondbewerking, drainage en grootte van de percelen zijn agrarische keuzes die effect hebben op de snelheid van veenmineralisatie. In het westelijk veenweidegebied wordt maïs niet of nauwelijks meer geteeld en het zwartleggen van de bodem zo veel mogelijk beperkt. In de Friese veenweidegronden wordt het telen van gewassen waar veel grondbewerking voor nodig is, ontmoedigd volgens de Feangreidefisy (veenweidevisie) van de provincie (Wetterskip & provinsje Fryslân, 2020). Naar aanleiding hiervan zijn praktijkonderzoeken uitgevoerd waarbij het doel was om alternatieve maïssteelsystemen te testen zonder kerende-grondbewerking. Met name strokenfrees lijkt een gunstige methodiek (Deru & Prins, 2014; Wesselink et al., 2019). Hiermee wordt de grondbewerking verminderd ten opzichte van standaard maïssteelt, lijkt de opbrengst gelijk te blijven, en zijn bijkomende voordelen het verhogen van de draagkracht van de veengrond en het stimuleren van bodemleven. Verder lijkt het er op dat maïssteelt met strokenfrees goed te combineren is met maatregelen die zich richten op vernatting. In Hoving et al. (2013) werd er maïs gezaaid met strokenfrees, het slootpeil verhoogd tot 25cm-mv (welke bij het zaaien en oogsten werd verlaagd) en werd er onderwaterdrainage toegepast. De standvastigheid van de maïs en de berijdbaarheid van het land bleef voldoende.

De minste grondbewerking vindt echter plaats bij permanent grasland en alle handelingen waarbij de bodem zwart komt te liggen, leiden tot extra veenaafbraak. Het effect van agrarisch management op bodemdaling is te variabel om modelaannames te maken en zal daarom niet worden doorgerekend maar wel worden besproken.

4.4 Uitwerking scenario's

In het huidige onderzoek zijn drie scenario's uitgewerkt. Dit zijn i) het referentie scenario "doorgaan met de huidige landbouwpraktijk en waterbeheer", ii) het scenario "remmen van bodemdaling en CO₂-emissies" en iii) het scenario "stoppen van bodemdaling en CO₂-emissies". In deze sectie wordt nader uitgewerkt wat de scenario's inhouden en waar de maatregelen die onder de scenario's vallen van toepassing zijn en zullen worden doorgerekend. Gezien het tijdspad van de klimaatdoelstellingen zijn de scenario's doorgerekend tot 2030 en tot 2050. In de modelruns is geen rekening gehouden met het effect van klimaatverandering op bodemdaling. Naar verwachting leidt klimaatverandering tot extremere droogte in de zomer, wat gepaard gaat met lagere grondwaterstanden en over het algemeen een verhoogde veenaafbraak (Brouns, 2016). De berekende bodemdaling en broeikasgasemissie worden in het huidige scenarioanalyse hierdoor waarschijnlijk onderschat.

4.4.1 Referentie scenario - continuering huidige situatie

Het eerste scenario betreft het doorgaan van de huidige situatie. In met name de diepe polders is het landgebruik intensief en is de drooglegging diep. Door de intensiteit van het agrarische management en de diepe ontwatering is 'gewoon' doorgaan daarmee voor bodemdaling een worst-case scenario. In dit scenario is aangenomen dat het peil de functie blijft volgen, dus dat bodemdaling wordt gecompenseerd met een verlaging van het peil. Dit scenario is doorgerekend om de effecten van de andere twee scenario's te bepalen.

4.4.2 Scenario remmen bodemdaling

Dit scenario richt zich op het remmen van bodemdaling en de jaarlijkse CO₂-emissie. Binnen dit scenario zijn drie maatregelpakketten doorgerekend, die bestaan uit een combinatie van (i) het verkleinen van peilgebieden om beter te kunnen sturen op drooglegging (ii) het verhogen van slootpeilen en (iii) het

toepassen van onderwaterdrainage (al dan niet drukgestuurd). De maatregelpakketten verschillen in de wijze waarop slootpeilen worden verhoogd en daarmee in de toepassing van onderwaterdrainage. Hieronder is uitgelegd wat de individuele maatregelen inhouden, waar ze zijn toegepast, en hoe maatregelen zijn gecombineerd tot maatregelpakketten.

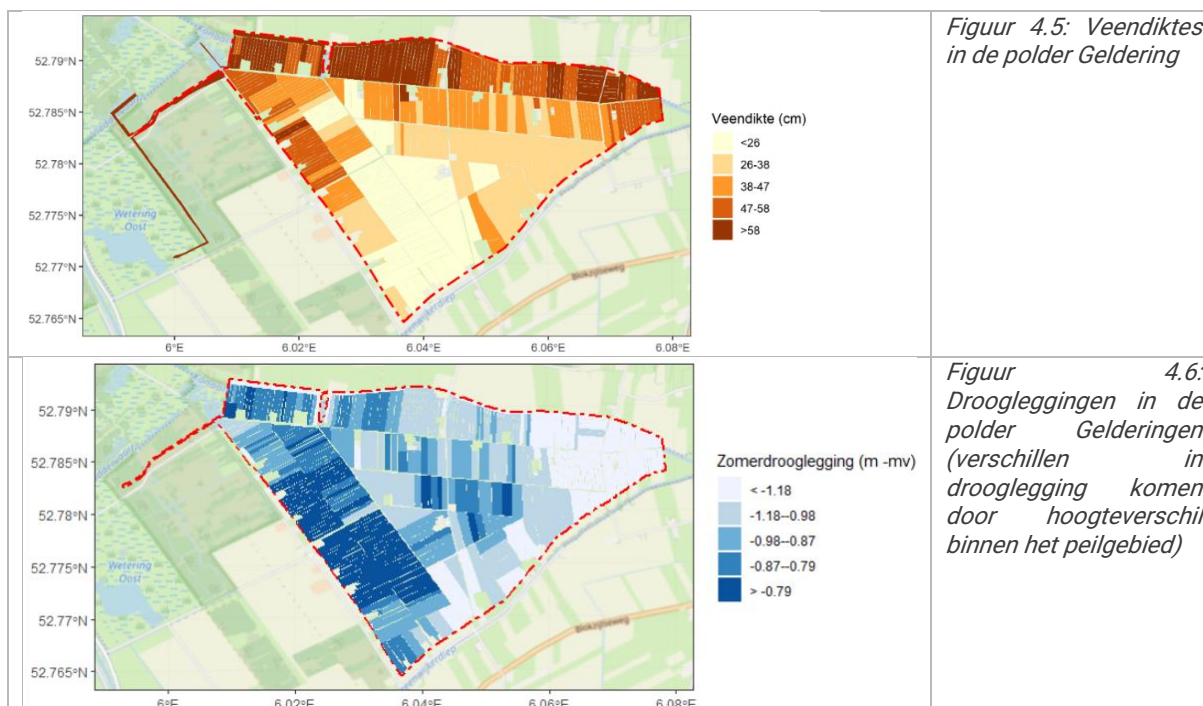
Verkleinen van peilgebieden

Idealiter zijn hoogteverschillen binnen een peilgebied beperkt, zodat makkelijk gestuurd kan worden op een uniforme drooglegging. In het kader van bodemdaling is het gewenst dat binnen een peilgebied meer veen aanwezig is in de laag gelegen delen van een peilvak, waar de drooglegging het ondiepst is en daarmee de percelen het natst zijn. In het huidig onderzoeksgebied is dit niet altijd het geval. Dit is te zien in de correlaties tussen veendikte en drooglegging (zie Tabel 4-1, voor de peilgebieden die het grootste deel van het onderzoeksgebied in beslag nemen).

Uit Tabel 4-1 blijkt dat in de peilgebieden van Wetering en Gelderingen negatieve correlaties aanwezig zijn tussen veendikte en drooglegging, waarbij de correlatie in het geval van polder Gelderingen statistisch significant is. De ruimtelijke variatie van veendikte en drooglegging is voor beide polders weergegeven in Figuur 4.5 en Figuur 4.6.

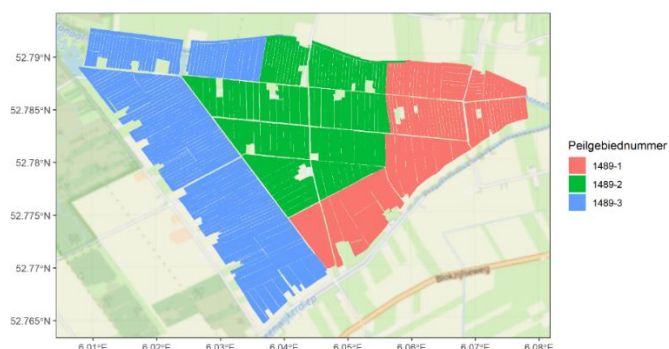
Tabel 4-1 Correlatie tussen veendikte en (zomer)drooglegging per peilgebied (* = statistisch significant)

Peilgebied	Correlatie	P-waarde
1523 (Wetering)	-.031	0.63
1738 (Halfweg)	0.13	0.04 *
1489 (Gelderingen)	-0.26	2.7e-06 *
1866 (Grote Polder)	0.58	2.7e-07 *
558 (Meenthebrug)	0.58	2.7e-04 *
964 (Marker- en Tussenbroek)	0.54	2.9e-10 *



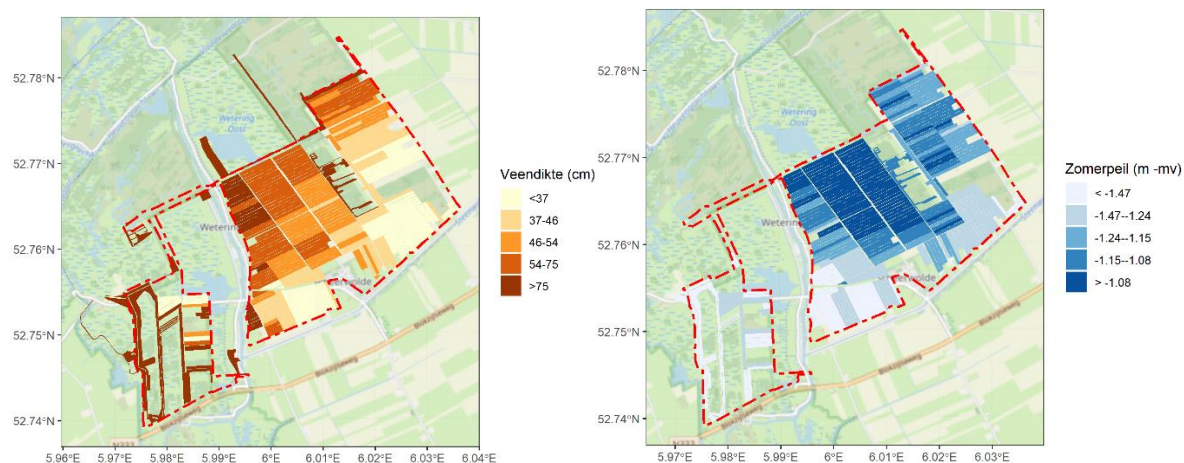
In de polder Gelderingen is te zien dat de veenlagen het dunst zijn in het zuiden/zuidwesten, en dat de veenlagen het dikst zijn in het noorden (Figuur 4.5). Voor de droogleggingen geldt dat de drooglegging

het ondiepst is in het zuidwesten en het diepst in het noordoosten (Figuur 4.6). Een mogelijkheid is dat er bij het kanaal minder veen is ontgraven (persoonlijke communicatie C. Cusell). Om het veen beter te beschermen is er in het huidig onderzoek voor gekozen het peilgebied modelmatig op te delen in drie delen, zodat er beter gestuurd kan worden op drooglegging (Figuur 4.7). Hierbij is vooral rekening gehouden met hoogteverschillen, met als doel om de hoogteverschillen binnen de nieuwe peilgebieden te minimaliseren. De voorgestelde opdeling van het peilgebied zoals weergegeven in Figuur 4.7 betreft een voorstel. Het waterschap heeft mogelijk ook andere afwegingen die meegenomen moeten worden bij een ingrijpende beslissing om peilgebieden te verkleinen.



Figuur 4.7. Opdeling van peilgebied nr 1489 (polder Gelderlingen) in drie kleinere peilgebieden.

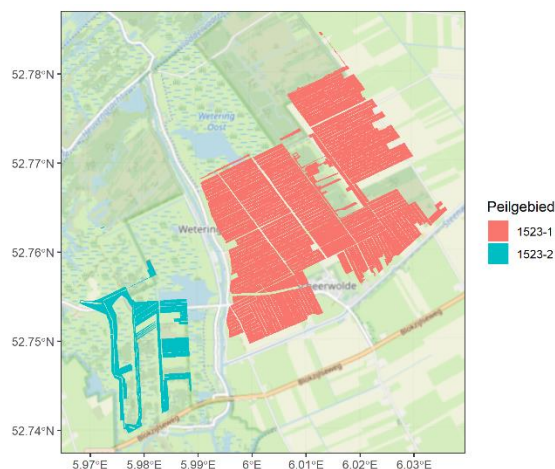
Peilgebied 1489-1 vertegenwoordigt het hoogstgelegen deel van de Gelderlingen polder (drooglegging in de huidige situatie is het diepst), waarbij met name in de noordoosthoek relatief veel veen ligt. Peilgebied 1489-2 vertegenwoordigt het gemiddeld gelegen deel van de Gelderlingen polder, waar met name in het noorden relatief veel veen ligt. Peilgebied 1489-3 vertegenwoordigt het laagstgelegen deel van de Gelderlingen polder (drooglegging het ondiepst), waarbij er meer veen ligt richting het noordwesten.



Figuur 4.8. Veendiktes (links) en drooglegging (rechts) in de Wetering polder.

In polder Wetering valt het onderscheid op tussen oost en west. In het westelijk (meer extensief agrarisch beheerde) deel van de Wetering polder zijn veenlagen dikker en is de drooglegging het diepst. Een groot deel van Wetering-West is ook al omgevormd naar natuur (Figuur 2.1). Om het veen in het westelijk deel beter te beschermen is in het huidig onderzoek het peilgebied modelmatig opgedeeld in twee aparte peilgebieden voor Wetering-Oost en Wetering-West (Figuur 4.9).

Wetering-West is omringt door een aantal kleinere peilgebiedjes met extensief beheerde agrarische percelen. Het waterschap zou de overweging kunnen maken om Wetering-West met (één van deze) peilgebied(en) te combineren. In het huidig onderzoek is hier geen rekening mee gehouden.



Figuur 4.9. Opdeling van peilgebied nr 1523 (polder Wetering) in twee kleinere peilgebieden.

Verhogen van het slootpeil

Door het slootpeil te verhogen wordt de grondwaterstand langs de randen van het perceel hoger en zakt de GLG in de zomer ook minder diep weg. Het effect van deze maatregel op de GLG is onder andere afhankelijk van de horizontale doorlatendheid van de bodem, de perceelgrootte en of er veel/weinig sloten aan het perceel grenzen. Met hoeveel het slootpeil verhoogd kan worden, hangt af van de huidige peilgebieden en het hoogteverschil daarbinnen. De peilgebieden zijn in Figuur 3.6 in paragraaf 3.3 weergegeven. Voor de vraag met hoeveel de peilen kunnen worden verhoogd, is als uitgangspunt verondersteld dat een drooglegging van 60cm-mv gunstig is voor de melkveehouderij (zie Van den Akker et al., 2010). Deze drooglegging zorgt echter voor relatief snelle bodemdaling. Er zal dus een compromis gevonden moeten worden tussen de productie gerelateerde belangen van agrariërs (bijv. berijdbaarheid land, trapschade gras) en de klimaatdoelstellingen. Er zijn drie opties doorgerekend:

- 1 Verhogen van het peil tot 10% van de percelen een zomerdrooglegging heeft van <60cm-mv
- 2 Verhoging van het peil tot 10% van de percelen een zomerdrooglegging heeft van <40cm-mv
- 3 Verhoging van het peil tot 10% van de percelen een zomerdrooglegging heeft van <20cm-mv

De concrete slootpeilverhogingen die bij de verschillende opties horen, zijn per peilgebied opgenomen in Tabel 4-2. Peilgebied nummer 1709 (Hagenbroek) is weggelaten. Hier ligt nauwelijks veen (gemiddelde veendikte van 8cm) waardoor het verhogen van het slootpeil niet als een kansrijke klimaatmaatregel wordt gezien.

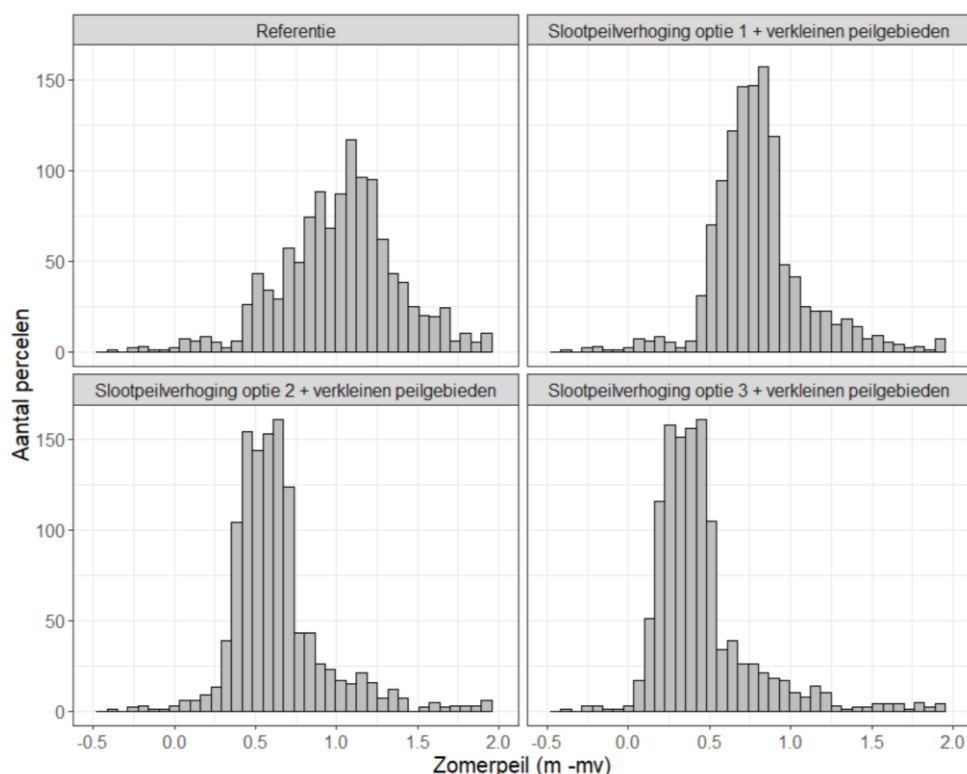
Wat opvalt is de grote potentie die ontstaat om slootpeilen te verhogen wanneer peilgebieden worden verkleind op basis van hoogteligging en veendikte (peilgebieden met een * in Tabel 4-2). Doordat bijvoorbeeld het lagergelegen deel van de polder Gelderingen (Peilgebied 1498-3, Figuur 4.7) is gescheiden van de hoger gelegen delen (1489-1 en 1489-2), kunnen de peilen in peilgebieden 1489-1 en 1489-2 ruim 30cm hoger worden gezet dan wanneer het peilgebied niet zou worden opgedeeld (vergelijking slootpeilverhogingen bij peilgebied 1489 en de slootpeilverhogingen bij de nieuwe peilgebied).

Ter indicatie van de droogleggingen die in het gebied ontstaan na het verhogen van de slootpeilen zijn in Figuur 4.10 de droogleggingen weergegeven na het doorrekenen van de drie opties van slootpeilverhoging. Hierbij is aangenomen dat de peilgebieden van Wetering en Gelderingen worden verkleind. Hieruit blijkt dat (i) de drooglegging ondieper wordt wanneer slootpeilen verder worden verhoogd en (ii) dat de ruimtelijke variatie in drooglegging kleiner wordt (in vergelijking met de referentie).

Tabel 4-2. Effect van drie verschillende scenario's (zie tekst) op de benodigde slootpeilverhoging per peilgebied. De peilgebieden met een asterix zijn hypothetisch wanneer kleinere peilvakken zouden worden gehanteerd.

Peilgebiednr	Polder	Gemiddelde veendikte (cm)	Huidig zomerpeil (m – NAP)	Huidig winterpeil (m – NAP)	Peilverhoging optie 1 (m)	Peilverhoging optie 2 (m)	Peilverhoging optie 3 (m)
1738	Halfweg	36.3	2.7	2.7	0.369	0.569	0.769
1523	Wetering	57.9	3.1	3.1	0.327	0.527	0.727
1523-1*	Wetering-Oost	50.2	3.1	3.1	0.308	0.508	0.708
1523-2*	Wetering-West	108.5	3.1	3.1	0.766	0.965	1.17
1489	Gelderingen	42.2	2.5	2.85	0.101	0.301	0.501
1489-1*	Gelderingen	44.2	2.5	2.85	0.464	0.664	0.864
1489-2*	Gelderingen	39.6	2.5	2.85	0.227	0.427	0.627
1489-3*	Gelderingen	32.9	2.5	2.85	0.0313	0.231	0.431
558	Meenthebrug	86.5	1.45	1.45	0.178	0.378	0.578
1866	Grote polder	72.7	1.45	1.45	0.263	0.463	0.663
1565	Hagenbroek	27.1	1.0	1.4	0 (situatie bereikt)	0.0678	0.268
638	Hagenbroek	157	1.40	1.50	0.0538	0.254	0.454
964	Marker- en Tussenbroek	224	1.0	1.45	0 (situatie bereikt)	0.0631	0.263

*Deze peilgebieden betreffen de nieuw gecreëerde peilgebieden, die daarmee de oude peilgebieden (1489 en 1523) vervangen als voor de maatregel "verkleinen van peilgebieden" wordt gekozen.



Figuur 4.10. Droogleggingen bij de drie opties van slootpeilverhoging in combinatie met het verkleinen van de peilgebieden Gelderingen en Wetering ten opzichte van de referentie. Outliers (zomerpeilen < -0.5 en > 2.0 m -mv) zijn niet weergegeven om de figuur overzichtelijk te houden.

Slootpeilverhoging in combinatie met onderwaterdrainage

Met behulp van onderwaterdrainage is het mogelijk om de GLG in droge perioden te verhogen (infiltratie) en om de GHG in natte perioden te verlagen (GHG). Of onderwaterdrainage geschikt is als maatregel hangt met name af van de veendikte, GLG, kweldruk en slootpeil in het geval van traditionele onderwaterdrainage. Voor het huidige onderzoek zijn de volgende aannames gemaakt (gebaseerd op Nationaal Kennisprogramma Bodemdaling (2020) en Rozemeijer et al. (2019):

- De veenlaag moet dikker zijn dan de GLG (dat wil zeggen dat het verhogen van de GLG direct leidt tot het beschermen van veen). Hier is voor gekozen om onderwaterdrainage zo effectief mogelijk toe te passen. Als voorbeeld heeft traditionele onderwaterdrainage een effect van circa 5-10cm verhoging van de GLG, wat door dit uitgangspunt overeenkomt met het beschermen van 5-10cm veen. Een overzicht van waar onderwaterdrainage verder toepasbaar zou zijn als dit uitgangspunt niet zou worden gehanteerd is opgenomen in Figuur S6-1 in Bijlage VI. De veenlaag moet dikker zijn dan 60cm
- Bij onderwaterdrainage zonder drukdrains mag het slootpeil niet hoger staan dan 25cm -mv en moet worden verhoogd als het lager ligt dan 40cm-mv
- De kweldruk moet lager zijn dan 100mm per jaar.

Eerdere maatregelen richten zich op het verhogen van de slootpeilen. Dit werkt door op de toepasbaarheid van onderwaterdrainage. Het kan bijvoorbeeld zo zijn dat droogleggingen eerst dieper waren dan 40cm -mv en met de aangepaste peilen tussen 20-40cm -mv komen te liggen, waardoor traditionele onderwaterdrainage direct toepasbaar wordt. De toepasbaarheid van onderwaterdrainage hangt dus af van de rest van het maatregelpakket. In welke vorm en wanneer onderwaterdrainage is doorgerekend is in de onderstaande paragraaf geïllustreerd.

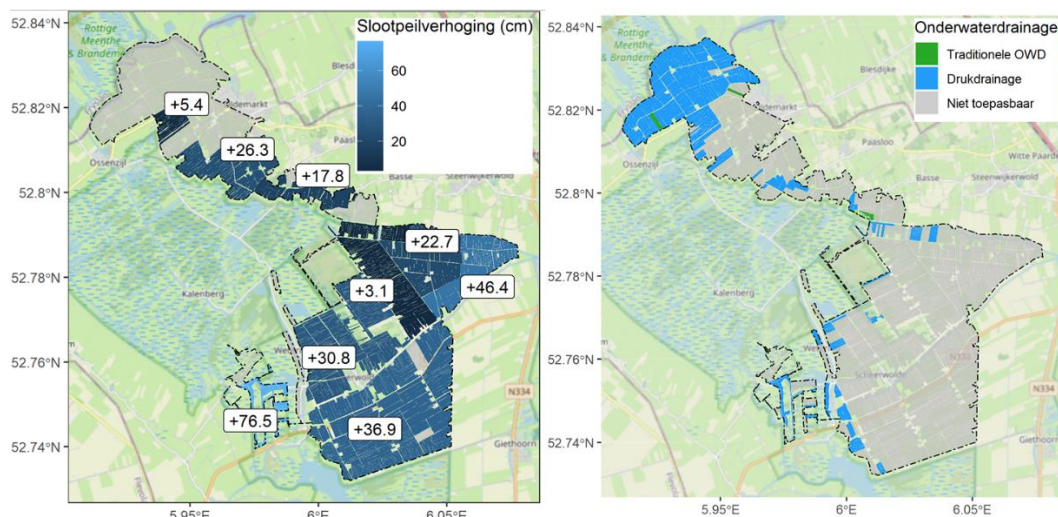
De maatregelpakketten voor het scenario “Remmen”

Gebaseerd op bovenstaande informatie zijn de volgende maatregelpakketten opgesteld voor het ophogen van het slootpeil (allemaal in combinatie met het verkleinen van peilgebieden en het toepassen van onderwaterdrainage:

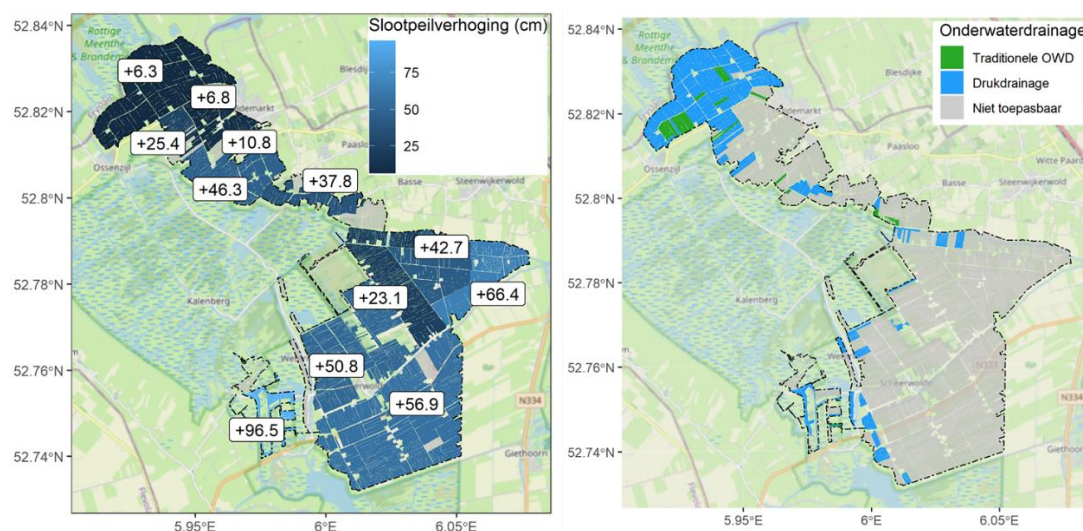
- Maatregelpakket 1: verhoging 1 (10% percelen drooglegging in de zomer van <60cm-mv)
- Maatregelpakket 2: verhoging 2 (10% percelen drooglegging in de zomer van <40cm-mv)
- Maatregelpakket 3: verhoging 3 (10% percelen drooglegging in de zomer van <20cm-mv)

In de onderstaande figuren is weergegeven welke concrete slootpeilverhogingen horen bij welk maatregelpakket (dit is een visuele weergave van Tabel 4-2 en Figuur 4.10), en waar onderwaterdrainage op welke manier (drukgestuurd of traditioneel) is doorgerekend.

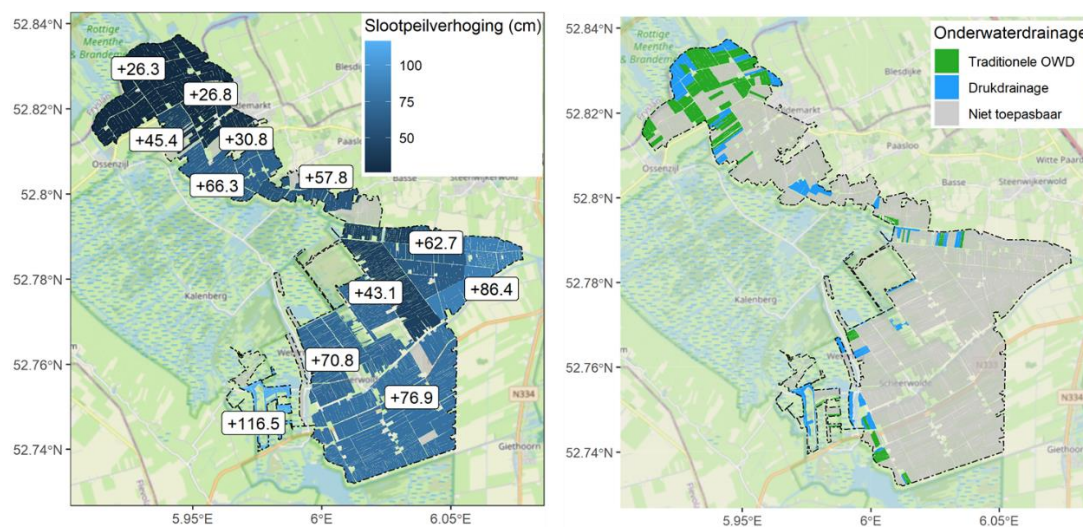
Uit Figuur 4.11 en Figuur 4.12 blijkt dat onderwaterdrainage met name effectief is toe te passen in Marker- en Tussenbroek en slechts zeer lokaal in de overige polders. Verder verandert de vorm van onderwaterdrainage lokaal van drukdrainage naar traditionele onderwaterdrainage naarmate slootpeilen verder worden verhoogd (droogleggingen komen in het optimum van 20-40cm -mv voor traditionele onderwaterdrainage), maar ook dat onderwaterdrainage lokaal soms niet meer van toepassing is omdat sommige droogleggingen boven de 10cm -mv komen te liggen.



Figuur 4.11. Slootpeilverhogingen bij maatregelpakket 1 (links) en de toepasbaarheid van onderwaterdrainage (rechts). In de linker figuur geeft het cijfer in de label de slootpeilverhoging in cm aan voor het peilgebied.



Figuur 4.12. Slootpeilverhogingen bij maatregelpakket 2 (links) en de toepasbaarheid van onderwaterdrainage (rechts). In de linker figuur geeft het cijfer in de label de slootpeilverhoging in cm aan voor het peilgebied.



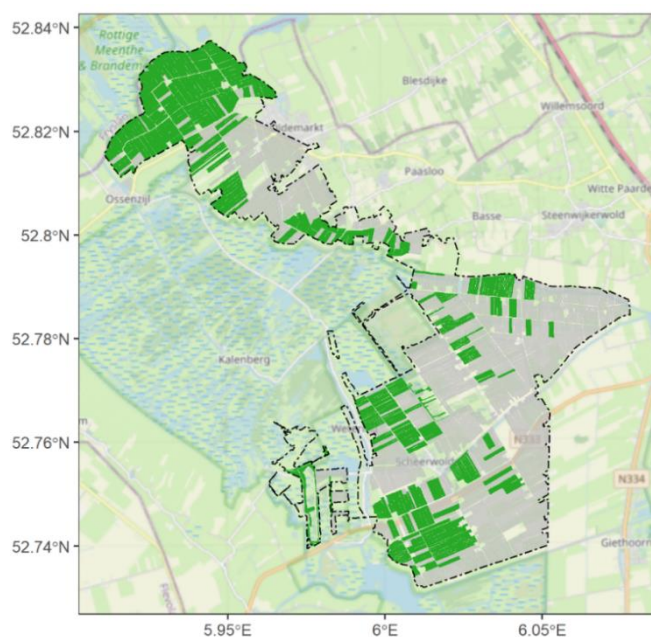
Figuur 4.13. Slootpeilverhogingen bij maatregelpakket 3 (links) en de toepasbaarheid van onderwaterdrainage (rechts). In de linker figuur geeft het cijfer in de label de slootpeilverhoging in cm aan voor het peilgebied.

Aanpassen van de perceelgrootte (niet doorgerekend)

Bij smallere percelen kan de GLG minder diep uitzakken/hol komen te liggen, wat daarmee leidt tot een remming van bodemdaling. Percelen kunnen in theorie worden verkleind door sloten of watervoerende greppels te graven in percelen. Modelmatig is dit niet doorgerekend, omdat we gebruik maken van een grondwatermodel dat geen rekening houdt met perceelgrootte (MIPWA). De relatie tussen de breedte van het perceel en de GLG was daarom niet te kwantificeren.

In plaats van een kwantificatie van het effect van het verkleinen van percelen wordt hieronder een idee gegeven waar het verkleinen van percelen het meest voor de hand ligt. Als indicator is de natte omtrek van een perceel (de omtrek van het perceel dat grenst aan een sloot/watergang) gedeeld door het oppervlak van het perceel (in hectare). Hoe groter deze indicatorwaarde des te groter is de mate van afwatering van een perceel, met andere woorden meer slootlengte per hectare. Hoe kleiner deze waarde, hoe meer potentie er is voor de maatregel om het perceel te verkleinen. In Figuur 4.14 zijn de percelen weergegeven waar de indicatorwaarde < 0.35 is (mediaan) en waar het slootpeil boven de veenlaag staat (uitgaande van optie 3 van slootpeilverhoging, waar circa 10% van de percelen een slootpeil krijgen van $< 20\text{ cm -mv}$). Op de groen gekleurde percelen zou er voor gekozen kunnen worden om sloten of watervoerende greppels te graven, waardoor de invloed van de sloot op de grondwaterstand wordt vergroot (en daarmee bodemdaling wordt geremd).

Deze maatregel is verder niet doorgerekend, maar kan in overleg met de relevante partijen worden besproken. Als ervoor gekozen wordt deze optie verder te verkennen, is het advies om een geohydrologische studie uit te voeren om het effect op de grondwaterstanden en kweldruk te bepalen.



Figuur 4.14. Percelen die perspectief bieden door verkleinen van de perceelgrootte (via extra sloten of watervoerende greppels). Het betreft percelen met een indicatorwaarde < 0.35 en een slootpeil boven de veenlaag, aangenomen dat het slootpeil wordt verhoogd tot circa 10% van de percelen een drooglegging hebben van $< 20\text{ cm -mv}$ (slootpeilverhoging optie 3)

4.4.3 Scenario stoppen

Peilfixatie

Peilfixatie is voor de peilgebieden uit Tabel 4-2 op twee manieren doorgerekend: voor een situatie zonder slootpeilverhoging en voor een situatie in combinatie met slootpeilverhoging. Peilfixatie is in combinatie met slootpeilverhoging optie 3 doorgerekend omdat peilfixatie vele decennia kan duren

voordat het effectief wordt (zie PBL, 2016). Door het te combineren met slootpeilverhogingen wordt dit proces versneld.

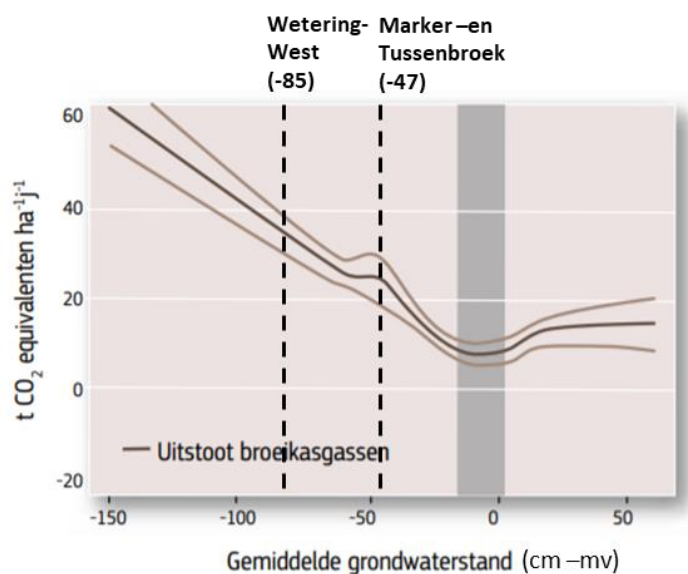
Natte teelt

Gezien de onzekerheid van natte teelt op broeikasgasemissie, teeltmethodiek (o.a. bemesting) en de gevolgen voor emissies naar het watersysteem is het advies om pilots op te zetten voordat natte teelten grootschalig worden geïmplementeerd. Uit de gebiedsanalyse blijken de volgende gebieden het meest geschikt voor het toepassen van pilots:

- **Marker -en Tussenbroek.** In deze polder zijn veenlagen dik (>120cm, Figuur 3.1) en organische stofgehalten het hoogst van het onderzoeksgebied (20%, Figuur 3.2). De huidige grondwaterstand is het hoogst en de drooglegging het ondiepst in vergelijking met de rest van het onderzoeksgebied (Figuur 3.6 en Tabel 3-1). Het beheer is hierdoor ook extensief (permanent grasland, Figuur 3.7). Enkele percelen kennen ook al een N2000 ontwikkelopgave (Figuur 2.1). Het doel is dat een deel van de polder wordt ingericht als een verbindingszone tussen de Rottige Meenthe en de Wieden-Weerribben (Provincie Overijssel, 2019).
- **Wetering-West.** In dit deel van de laag gelegen polders zijn veenlagen dik (>120cm Figuur 2.1) en is het beheer zeer extensief (percelen liggen tussen de rietlanden, alles is permanent grasland). Dit deel van de laag gelegen polders is ook al deels omgevormd naar natuur of kent een N2000 ontwikkelopgave (Figuur 2.1). Volgens het definitief beheerplan (Provincie Overijssel, 2019) wordt het graslandbeheer gericht op verschraling en inrichten van moeras voor de grote vuurvliinder. Natte teelten kunnen hier mogelijk worden toegepast om de fosfaattoestand op voormalige landbouwgronden uit te mijnen (als alternatief op verschralen, plaggen en ontgraven, zie o.a. Bestman et al., 2019). Bij uitmijnen wordt, in tegenstelling tot verschralen, met N en K bemest om de drogestofopbrengst te vergroten. Door maaien en afvoeren wordt de fosfaattoestand verlaagd tot gewenste waarden voor natuurontwikkeling. Opbrengsten worden echter te laag voor commerciële teelt, en uitmijnen dient te worden beschouwd als een maatregel voor het realiseren van natuurdoelstellingen.

Opschaling zou eventueel, naast de bovengenoemde polders, plaats kunnen vinden in de zuidrand van Meenthebrug, Hagenbroek en de Grote polder. Hier zijn veenlagen lokaal ook dikker dan 120cm (Figuur 3.1). De veenpercelen in deze polders liggen ook lager dan de zandpercelen. Deze percelen zullen na verhoging van het peil daarom het meest vernatten. Dit maakt het mogelijk om natte teelten te ontwikkelen op de veenpercelen terwijl de mogelijkheid voor regulier (mogelijk iets extensiever) agrarisch beheer op de zandpercelen behouden blijft. Natte teelten lijken niet realistisch in de laag gelegen polders door de dunne veenlagen (<50cm) en lage organische stofgehalten (Figuur 3.1 en Figuur 3.2). Mogelijk zouden natte teelten als bufferstrook tussen landbouw en natuur kunnen worden toegepast in de westzijde van de laag gelegen polders, waar de veenlagen iets dikker zijn (50-80cm, Figuur 2.3) en de grondwaterstanden hoger (GLG <80cm -mv, Figuur 3.6). Dit zou gewenst zijn vanuit het oogpunt van waterkwaliteit en klimaat, maar niet vanuit het oogpunt van opbrengst. Zeker, omdat er waarschijnlijk bemestings-restricties in de bufferstrook gesteld worden. Verdienmodellen en waardering van de grond dienen hierop aangepast te worden om natte teelten op deze locaties kansrijk te maken.

Om een zeer indicatief idee te geven van de effectiviteit van natte teelten op het reduceren van de broeikasgasemissie zijn in de figuur van Bestman et al. (2019) de mediaan van de gemiddelde grondwaterstand van Wetering-West en Marker -en Tussenbroek toegevoegd (Figuur 4.15). Bij het verhogen van de gemiddelde grondwaterstand tot het optimum (circa 0-20cm onder maaiveld) zou, op basis van de bevindingen van Jurasinski et al. (2016) waar onderstaande figuur op is gebaseerd, de broeikasgasemissie reduceren met circa 82% in Wetering-West en 70% in Marker -en Tussenbroek.



Figuur 4.15 Gemiddelde grondwaterstand (cm -mv) uitgezet tegenover de broeikasgasemissie in CO₂-eq (Bestman et al., 2019). De mediaan van de grondwaterstanden van Wetering-West en Marker-en Tussenbroek zijn toegevoegd middels zwarte lijnen.

Het uitvoeren van pilots op deze locaties, waarbij metingen worden verricht van CO₂, CH₄ en N₂O, zijn echter noodzakelijk om een betrouwbaar beeld te krijgen van de reductie in broeikasgasemissie bij het toepassen van natte teelt. Ook zullen verdienmodellen moeten worden ontwikkeld om draagvlak voor deze maatregel te creëren bij de agrarische sector. Het aspect van bemesting en de gevolgen voor emissies naar het watersysteem zouden expliciet meegenomen moeten worden.

5 Broeikasgasemissie en bodemdaling

5.1 Referentie scenario

In het scenario waarbij de huidige situatie wordt voortgezet, wordt een veenoxidatie berekend van 3.4 miljoen m³ veen in 2050 (Tabel 5-1). De corresponderende CO₂-emissie is naar verwachting 385.000 ton (i.e. 0.385 Mton CO₂-eq) over een periode van 30 jaar. Over 10 jaar is de berekende totale CO₂-emissie 0.135 Mton CO₂-eq. Ter vergelijking is de doelstelling om in 2030 de broeikasgasemissie vanuit veenweidegronden te reduceren met 1 Mton CO₂-eq in 10 jaar naar 3.7 Mton CO₂-eq in 2030.

Tabel 5-1. Berekende veenoxidatie en broeikasgasemissie in de polders bij het referentie scenario. Veenoxidatie is afgerond op vijfhonderdtal, CO₂-emissie op honderdtal. De CO₂-emissie is voor 2050 ook in ton CO₂/hectare weergegeven om een indicatie te krijgen van de locaties waar maatregelen het effectiefst te nemen zijn.

Polder	Veenoxidatie 2030 (m ³ veen)	Veenoxidatie 2050 (m ³ veen)	CO ₂ -emissie 2030 (ton CO ₂)	CO ₂ -emissie 2050 (ton CO ₂)	CO ₂ -emissie 2050 (ton CO ₂ /ha)
Halfweg	320.000	849.000	32.600	87.200	107
Gelderingen	280.500	807.500	33.000	93.100	133
Weteringen	208.000	624.000	23.000	69.000	121
Meenthebrug	64.500	182.500	4.900	14.100	90
Grote Polder	77.500	213.000	5.400	15.300	80
Hagenbroek	43.500	124.000	3.100	8.700	54
Marker- en Tussenbroek	193.500	581.000	32.600	97.700	213
Totaal	1.188.000	3.381.000	134.800	385.000	

Uitgedrukt per hectare is de CO₂-emissie in Marker- en Tussenbroek hoger in vergelijking met de andere polders (circa het dubbele). Dit is het gevolg van hogere organische stofgehalten en dikkere veenpakketten, waardoor meer CO₂ vrijkomt bij dezelfde aangenomen snelheid van veenoxidatie. Dit is ondanks de aanwezigheid van een kleidek en de vrij hoge GLG in Marker- en Tussenbroek, wat beide de bodemdaling vertraagt. De relatief hoge CO₂-emissie per hectare in Marker- en Tussenbroek in vergelijking met de andere polders geeft aan dat maatregelen hier het meest effectief zijn.

In de laag gelegen polders (Halfweg, Gelderingen en Wetering) is de totale veenoxidatie hoog omdat de polders veel groter zijn dan de andere polders en de polders diep worden ontwaterd. Uitgedrukt per hectare is de CO₂-emissie wel lager dan in Marker- en Tussenbroek door de dunnere veenlagen.

5.2 Scenario remmen

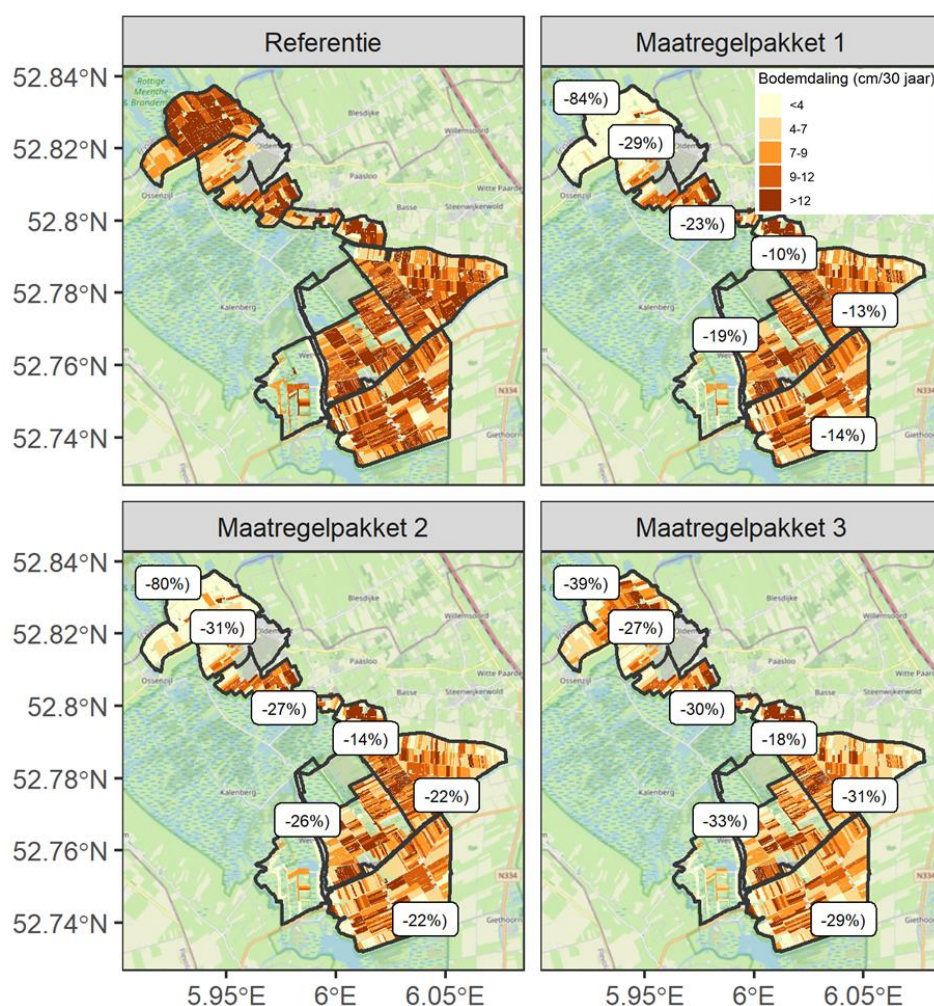
In deze paragraaf worden de resultaten van drie maatregelpakketten beschreven; de drie verschillende opties van slootpeilverhoging (10% heeft een drooglegging <60cm-mv, 10% een drooglegging <40cm-

mv en 10% heeft een drooglegging <20cm-mv) in combinatie met het verkleinen van peilgebieden en waar mogelijk in combinatie met onderwaterdrainage (Figuur 4.11, Figuur 4.12, Figuur 4.13).

De totale geschatte bodemdaling en broeikasgasemissie is weergegeven in Tabel 5-2. Hieruit blijkt dat voor het gebied als geheel, maatregelpakket 2 de bodemdaling en broeikasgasemissie het sterkst remt. Nuance is hier echter op zijn plaats, aangezien dit gaat om een totaalcijfer van alle polders samen en de ruimtelijke variatie buiten beschouwing wordt gelaten. De ruimtelijke variatie van bodemdaling over 30 jaar tijd (tot 2050) is in Figuur 5.1 geïllustreerd. In principe geldt dat in elke polder maatregelpakket 3 het grootste effect heeft, maar in Marker- en Tussenbroek is dat maatregelpakket 2.

Tabel 5-2. Berekende veenoxidatie en broeikasgasemissies bij de verschillende maatregelpakketten.

Maatregel	Veenoxidatie in 2030 (m3 in 10 jaar)	Veenoxidatie in 2050 (m3 in 30 jaar)	Broeikasgasemissie in 2030 (ton CO ₂ in 10 jaar)	Broeikasgasemissie in 2050 (ton CO ₂ in 30 jaar)
Referentie	1.188.000	3.381.000	134.800	385.000
Maatregelpakket 1	859.500	2.444.000	90.120	258.000
Maatregelpakket 2	794.500	2.270.500	83.300	239.900
Maatregelpakket 3	804.000	2.320.500	89.200	259.600

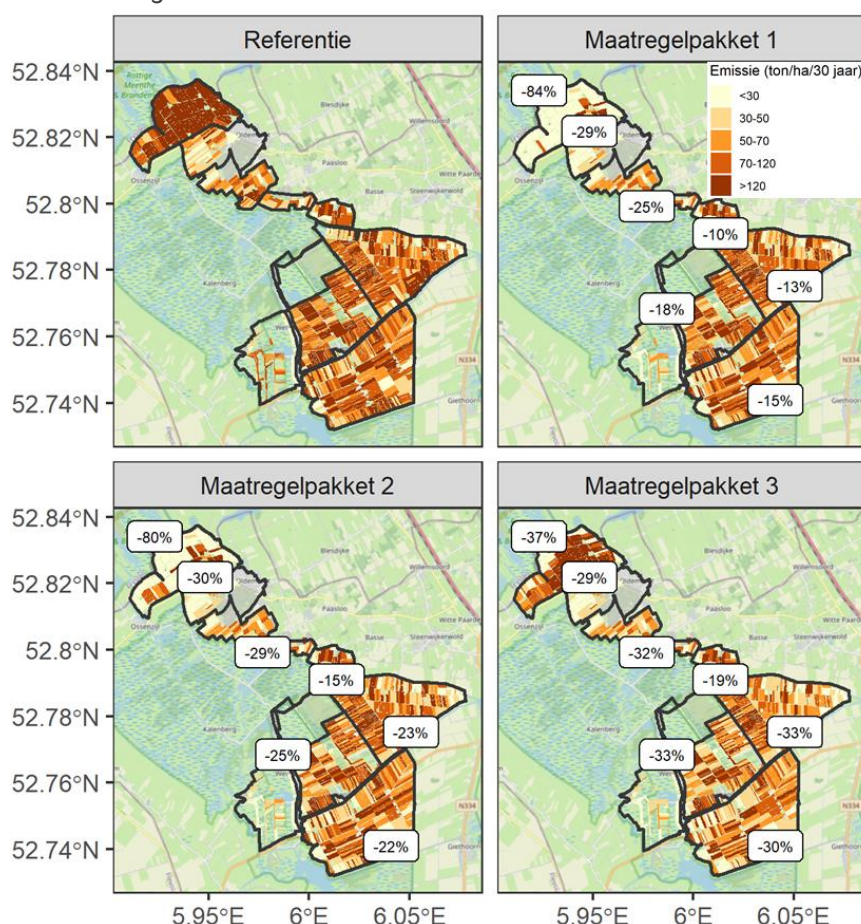


Figuur 5.1. Gemodelleerde effecten van de maatregelpakketten op bodemdaling (tot 2050). Het getal in de label geeft aan hoeveel bodemdaling is geremd ten opzichte van het referentiescenario (-10% is 10% minder bodemdaling).

Op basis van het effect van de verschillende remmende maatregelpakketten op de ruimtelijke variatie in bodemdaling (Figuur 5.1) kan geconcludeerd worden dat:

- Voor de laag gelegen polders Halfweg, Gelderingen en Wetering en de hoog gelegen polders Meenthebrug en Grote polder geldt dat bodemdaling sterker wordt geremd naarmate slootpeilen meer worden verhoogd; maatregelpakket 3 is het meest effectief.
- Binnen het onderzoeksgebied wordt bodemdaling het sterkst geremd in Marker- en Tussenbroek, omdat hier onderwaterdrainage toepasbaar is (zie Figuur 4.11 - Figuur 4.13).
- Het effect van het verkleinen van de peilgebieden van Gelderingen en Wetering is terug te zien in een sterkere remming in bodemdaling bij de percelen die hoog liggen.
- In Marker- en Tussenbroek neemt de remming van bodemdaling af van maatregelpakket 1 naar maatregelpakket 3. Dit komt omdat de maatregelpakketten verschillen in de toepassing van drukdrainage (zie Figuur 4.11 - Figuur 4.13). Naarmate slootpeilen hoger worden gezet, wordt vaker drukdrainage vervangen met traditionele onderwaterdrainage, waarvan de aangenomen effectiviteit lager is. Het voordeel van traditionele onderwaterdrainage in vergelijking met drukdrainage is echter dat het goedkoper is en dat de grondwaterstanden meer in balans zijn met de omgeving (met drukdrainage wordt de grondwaterstand actief verhoogd en verlaagd).
- In alle percelen waar onderwaterdrainage geen optie is, zijn grotere reducties in bodemdaling te zien waar slootpeilen meer worden verhoogd (zie Figuur 4.11 - Figuur 4.13)

De ruimtelijke variatie in broeikasgasemissie (Figuur 5.2) komt overeen met de ruimtelijke variatie van bodemdaling (Figuur 5.1). De interpretatie van de resultaten is hetzelfde als hierboven beschreven voor bodemdaling.



Figuur 5.2. Gemodelleerde effecten van de maatregelpakketten op broeikasgasemissies (tot 2050). Het getal in de label geeft aan hoeveel broeikasgasemissie is geremd ten opzichte van het referentiescenario (-10% is 10% minder broeikasgasemissie).

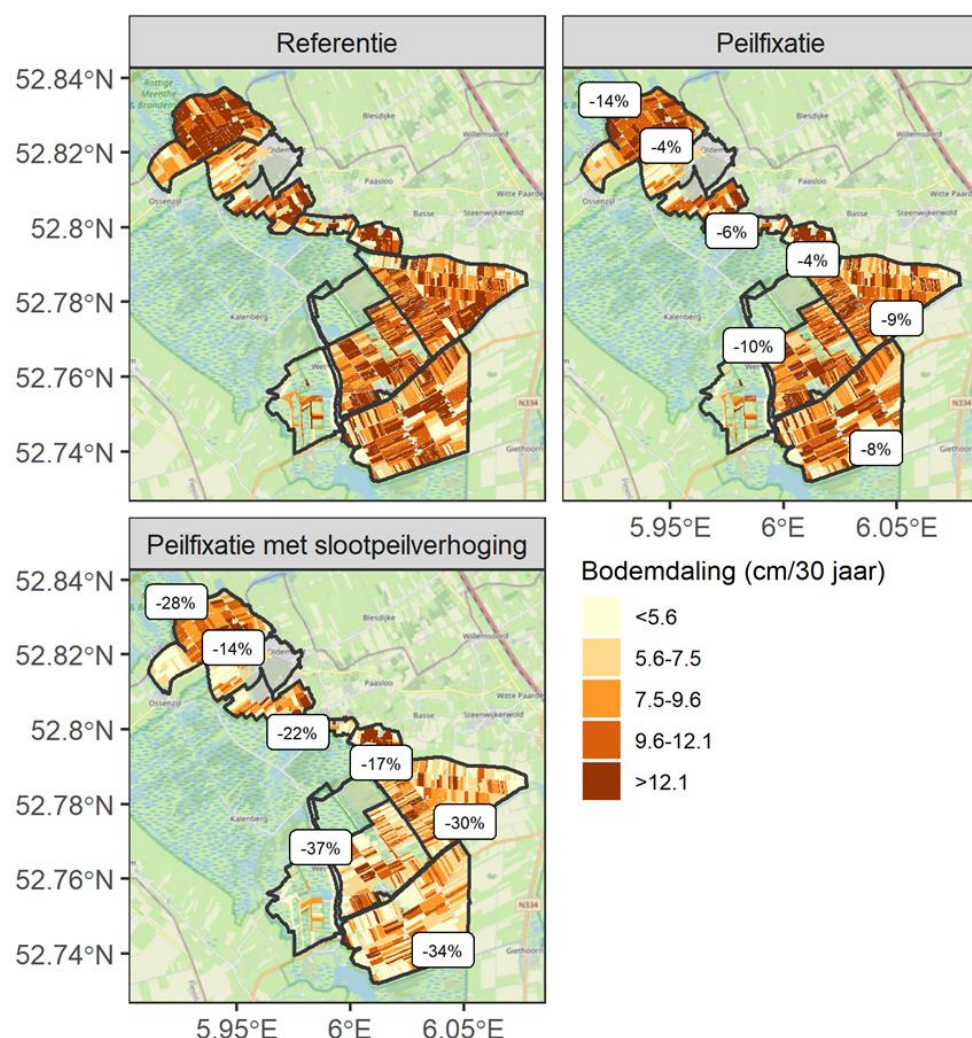
5.3 Scenario stoppen

Peilfixatie

De geschatte veenoxidatie en broeikasgasemissie bij de verschillende vormen van peilfixatie (alleen peilfixatie of peilfixatie gecombineerd met slootpeilverhoging optie 3 is opgenomen in Tabel 5-3. De ruimtelijke variatie in bodemdaling (cm bodemdaling in 30 jaar, tot 2050) is in Figuur 5.3 getoond. Geconcludeerd kan worden dat het effect van peilfixatie op zichzelf niet groot is, maar de effectiviteit sterk toeneemt wanneer het gecombineerd wordt met een andere vernattingsmaatregel.

Tabel 5-3. Berekende veenoxidatie en broeikasgasemissies bij peilfixatie.

Maatregel	Veenoxidatie in 2030 (m3 in 10 jaar)	Veenoxidatie in 2050 (m3 in 30 jaar)	Broeikasgasemissie in 2030 (ton CO ₂ in 10 jaar)	Broeikasgasemissie in 2050 (ton CO ₂ in 30 jaar)
Referentie	1.188.000	3.381.000	134.800	385.000
Peilfixatie	1.151.500	3.080.000	129.800	345.000
Peilfixatie icm slootpeilverhoging	867.500	2.353.500	97.400	262.400

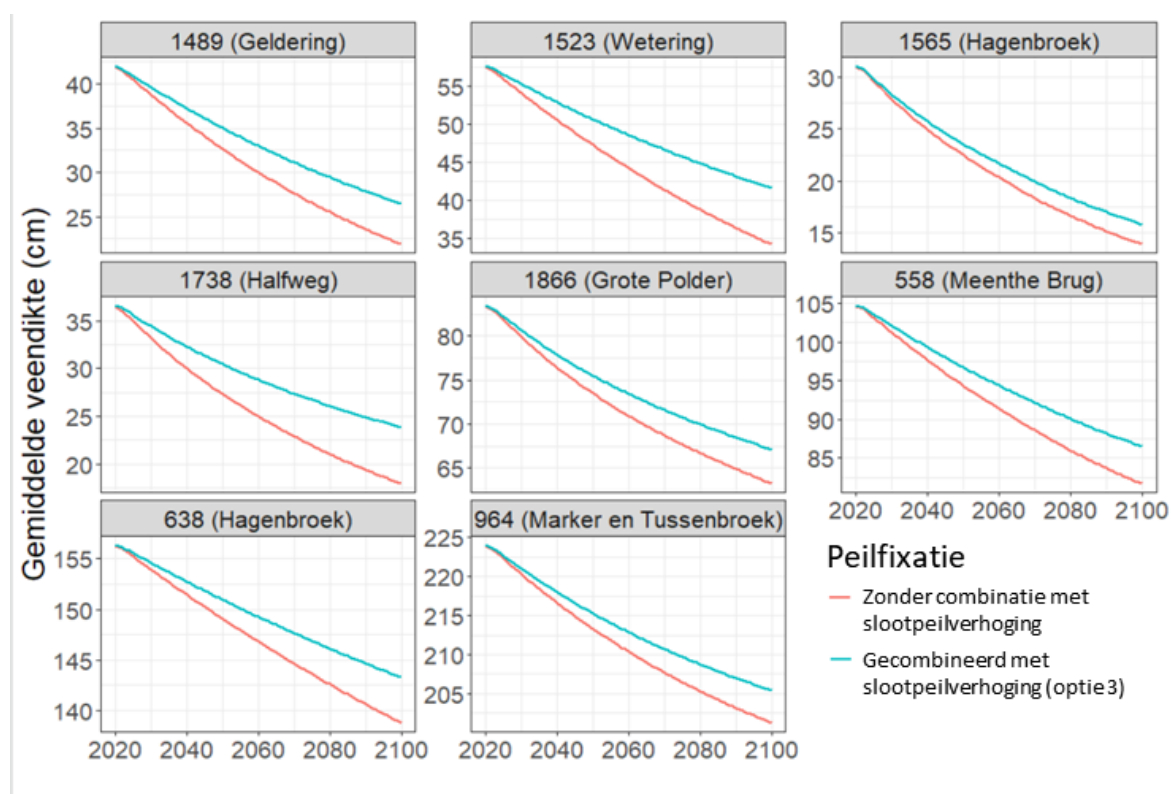


Figuur 5.3. Gemodelleerde effecten van peilfixatie op bodemdaling (tot 2050). Het getal in de label geeft aan hoeveel bodemdaling is geremd ten opzichte van het referentiescenario (-10% is 10% minder bodemdaling).

Op basis van het effect van peilfixatie op de ruimtelijke variatie in bodemdaling (Figuur 5.3) kan geconcludeerd worden dat:

- Het effect van peilfixatie relatief klein is wanneer dit niet wordt gecombineerd met een vernattende maatregel omdat de peilen in de uitgangssituatie laag zijn.
- Het effect van peilfixatie is het grootst in de delen van het onderzoeksgebied waar de peilen hoger zijn (Marker- en Tussenbroek, zie Figuur 3.6 en Figuur S2-6 in Bijlage II).
- Door peilfixatie te combineren met een vernattende maatregel (in dit geval slootpeilverhoging optie 3) wordt het effect van peilfixatie vergroot.

Peilfixatie is als maatregel gekozen omdat het op termijn leidt tot het stoppen van bodemdaling. In het huidige onderzoeksresultaat blijft peilfixatie echter nog een lange tijd een remmende maatregel, ook als het wordt gecombineerd met slootpeilverhoging optie 3. Dit is te zien wanneer peilfixatie wordt doorgerekend tot 2100 (Figuur 5.4). Hieruit blijkt dat bodemdaling in 2100 naar verwachting nog niet is gestopt. Bodemdaling stopt sneller wanneer peilfixatie wordt gecombineerd met actieve vernatting. In sommige polders zal peilfixatie leiden tot het permanent beschermen van dikke veenlagen (Marker- en Tussenbroek, Hagenbroek). In de laag gelegen polders (met name Gelderingen en Halfweg) wordt uiteindelijk niet zoveel veen permanent beschermd (dunne gemiddeld veenlaag). Lokaal zullen in de laag gelegen polders veenlagen in zijn geheel verdwijnen.



Figuur 5.4. Gemodelleerd effect van peilfixatie op de gemiddelde veendikte tot 2100, voor elk peilgebied waar peilfixatie is doorgerekend. Bij het berekenen van de gemiddelde veendikte zijn alleen de percelen geselecteerd waar in 2020 veen aanwezig was.

De ruimtelijke variatie van broeikasgasemissie is gelijk aan de ruimtelijke variatie van bodemdaling. Deze is getoond in Bijlage IV.

6 Watervraag

In dit hoofdstuk is een inschatting gemaakt van het effect van de klimaatmaatregelen op de waterafvoer van landbouwpercelen naar oppervlaktewater in de polders. Berekent is wat de verandering is in het transport van water van landbouwpercelen (neerslagoverschot en grondwater) naar het oppervlaktewater. Wanneer het slootpeil wordt verhoogd, neemt de grootte van de waterverzadigde zone in het bodemprofiel toe. Het hoogteverschil tussen water in de bodem en in de sloot wordt kleiner waardoor de druk op het water in de bodem om naar de sloot te stromen afneemt. De ondiepe uitspoeling neemt daardoor af. De waterbergingscapaciteit van de bodem neemt echter ook af. Het regenwater kan dus in beperktere mate worden opgenomen door de bodem en een groter deel van het neerslagoverschot zal via oppervlakkige afspoeling worden afgevoerd naar de sloot. In het bodem-emissie model wordt de verdeling van het neerslagoverschot over de verschillende transportroutes bepaald op basis van de grondwaterstand (ondiepe uitspoeling versus infiltratie) en de infiltratiesnelheid van de bodem en de bergingscapaciteit (oppervlakkige afspoeling). Dit is een (sterk) versimpelde weergave van de werkelijkheid omdat niet wordt gecorrigeerd voor de drukverschillen tussen grondwater en oppervlaktewater. In bijvoorbeeld het procesmodel SWAP wordt hier rekening mee gehouden door het oplossen van de Richard's vergelijking (Kroes et al. 2017). Dit verschil leidt ertoe dat het bodem-emissie model de toename in ondiepe uitspoeling bij vernatting waarschijnlijk overschat. Daarnaast is binnen het onderzoeksgebied de kweldruk een belangrijke maar ook onzekere factor (zie ook paragraaf 2.4). Veranderingen in slootpeil hebben een effect op de kweldruk. Dit is niet meegenomen in de berekeningen. Dit vereist de uitvoering van een aparte geohydrologische studie waarmee ook de kwel/wegzijgingspatronen van en naar het natuurgebied in kaart wordt gebracht. Ondanks genoemde beperkingen kunnen met het model relatieve verschillen binnen een gebied in kaart worden gebracht en het effect van verschillende scenario's worden bepaald.

Voor een kwantitatieve(re) onderbouwing van de verandering in watervraag wordt aanbevolen om na verdere selectie van klimaatmaatregelen een gedetailleerdere watersysteemanalyse/ hydrologische studie per polder uit te voeren. Het advies is om dit te combineren met het nauwkeuriger bepalen van de (huidig onzekere) kwelfluxen, en het bepalen van het effect van klimaatmaatregelen op deze kwelfluxen (inclusief consequenties op de N2000 gebieden).

6.1 Scenario remmen

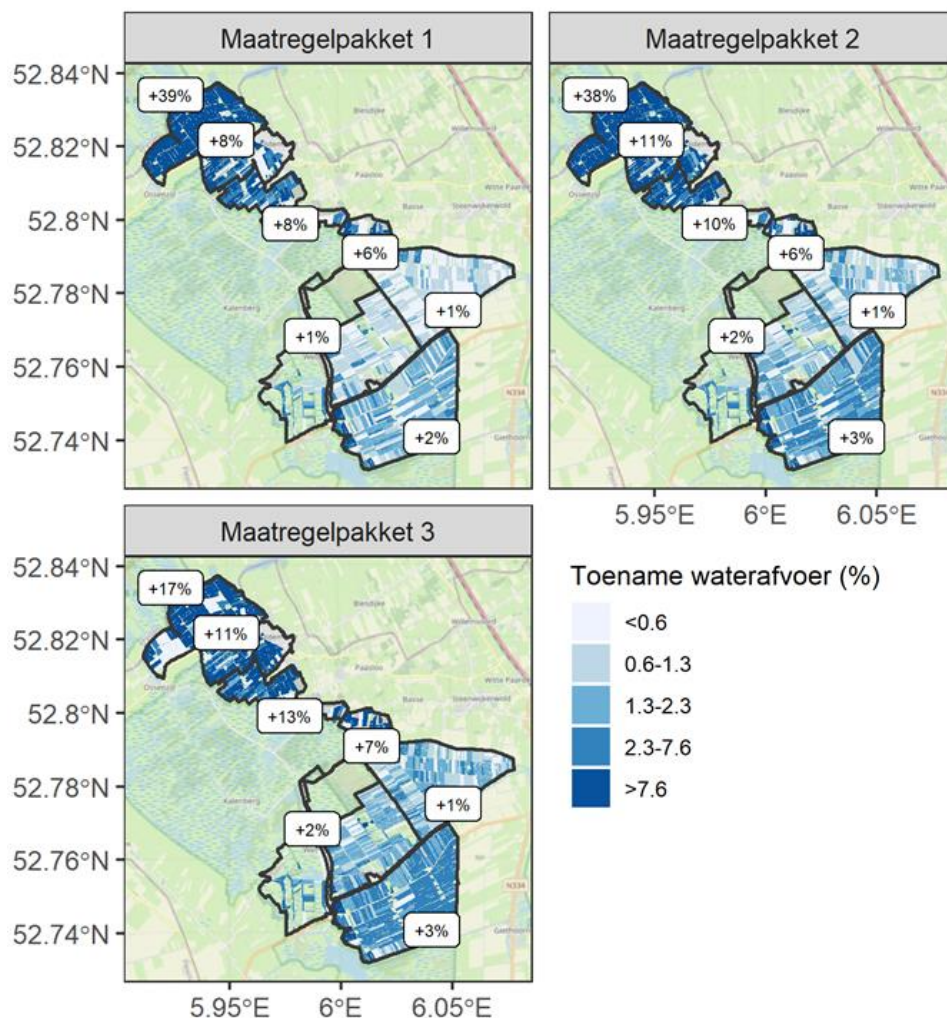
De gemodelleerde verandering in de waterafvoer van landbouwpercelen naar oppervlaktewater is voor de verschillende polders weergegeven in Figuur 6.1. Dit betreft het netto effect van de som van oppervlakkige uitspoeling (runoff), ondiepe uitspoeling, drainage (van onderwaterdrains) en kwel (zie waterbalans van het model in Figuur 2.4).

Op basis van het effect van de remmende maatregelpakketten op de ruimtelijke variatie in de waterflux van landbouwpercelen naar het oppervlaktewater (Figuur 6.1) kan geconcludeerd worden dat:

- De netto waterafvoer van landbouw naar oppervlaktewater naar verwachting in elke polder hoger wordt door het toepassen van vernattingsmaatregelen.

- In de laaggelegen polders is het effect van de maatregelpakketten op de waterafvoer procentueel slechts zeer beperkt hoger (gemodelleerde waarden van 1 tot 3%) in vergelijking met de hoog gelegen polders (6 tot 39%). Dit komt door de relatief grote bijdrage van kwel in de totale waterafvoer.
- In Marker- en Tussenbroek is de toename in waterafvoer van landbouwpercelen naar oppervlaktewater voor maatregelpakket 3 lager in vergelijking met maatregelpakketten 1 en 2. Dit komt omdat er in maatregelpakket 3 (i) minder onderwaterdrainage van toepassing is en (ii) vaker traditionele onderwaterdrainage is aangelegd in plaats van drukdrainage (zie Figuur 4.11 - Figuur 4.13). De draindiepte van drukdrainage is in het model lager dan de draindiepte voor traditionele onderwaterdrainage, waardoor voor drukdrains een grotere drainage wordt berekend (grondwaterstand komt sneller boven de draindiepte). De berekende verschillen in Marker- en Tussenbroek voor de verschillende maatregelpakketten hebben door de aannames en de verschillen in traditionele onderwaterdrainage en drukdrainage een grote marge.

De verhoging van de waterafvoer via ondiepe stroombanen van landbouwpercelen naar oppervlaktewater leidt naar verwachting tot een toename in de P-vracht vanuit de landbouwpercelen naar het oppervlaktewater. Dit zal in het volgende hoofdstuk worden besproken. Het effect van klimaatmaatregelen op de kweldruk is niet meegenomen in de modelberekening. Met name in de laag gelegen polders is de invloed van kwel op de aanvoer van fosfaat (en ijzer waar fosfaat aan bindt) groot door hoge kwelfluxen (zie Tabel 2-2).



Figuur 6.1. Gemodelleerde toename in de waterflux van landbouwpercelen naar het oppervlaktewater bij de verschillende maatregelpakketten.

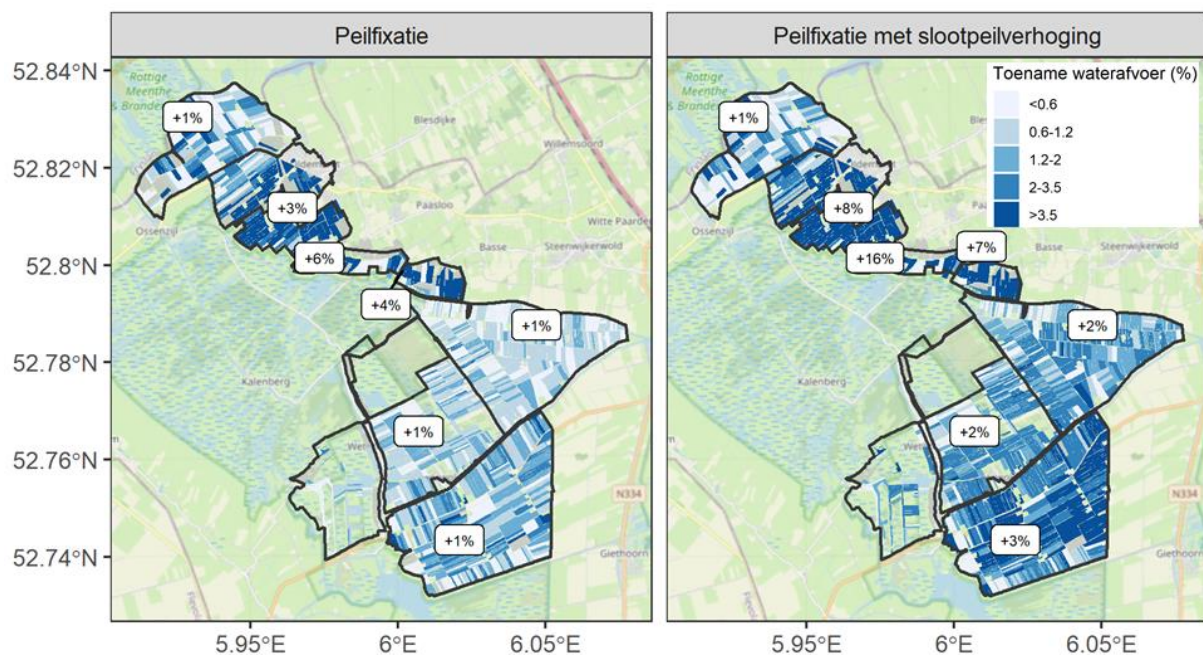
6.2 Scenario stoppen

Peilfixatie

Naar verwachting wordt bij peilfixatie de waterafvoer van landbouwpercelen naar oppervlaktewater over de tijd steeds groter, totdat bodemdaling is gestopt. Grondwaterstanden komen steeds dichterbij maaiveld te liggen, waardoor enerzijds het drukverschil tussen grondwater en oppervlaktewater kleiner wordt en anderzijds de bergingscapaciteit in de tijd steeds kleiner wordt. Omdat het gemodelleerde effect van peilfixatie hierdoor groter is in 2050 dan in 2030 is in Figuur 6.2 het resultaat voor 2050 weergegeven. Op basis van het effect van peilfixatie op de ruimtelijke variatie in waterafvoer naar het oppervlaktewater (Figuur 6.2) kan geconcludeerd worden dat:

- Peilfixatie zonder slootpeilverhoging in eerste instantie zorgt voor marginale toenames in de waterafvoerflux van landbouwpercelen naar oppervlaktewater (langzaam proces). Wanneer peilfixatie wordt gecombineerd met het verhogen van slootpeilen verloopt dit proces sneller.
- De waterafvoerflux wordt, net als bij de remmende maatregelen, in relatieve zin groter in de hoger gelegen polders dan in de laag gelegen polders. Dit komt door de sterke kweldruk in de laag gelegen polders waardoor de relatieve bijdrage klein is.

Peilfixatie zal naar verwachting in 2050 (en ook in 2100) niet leiden tot het stoppen van bodemdaling (Figuur 5.4). Hierdoor zal de waterafvoerflux van landbouwpercelen naar oppervlaktewater in de tijd waarschijnlijk nog blijven toenemen (totdat bodemdaling is gestopt). Bodemdaling zal eerder stoppen wanneer peilfixatie wordt gecombineerd met een vernattende maatregel.



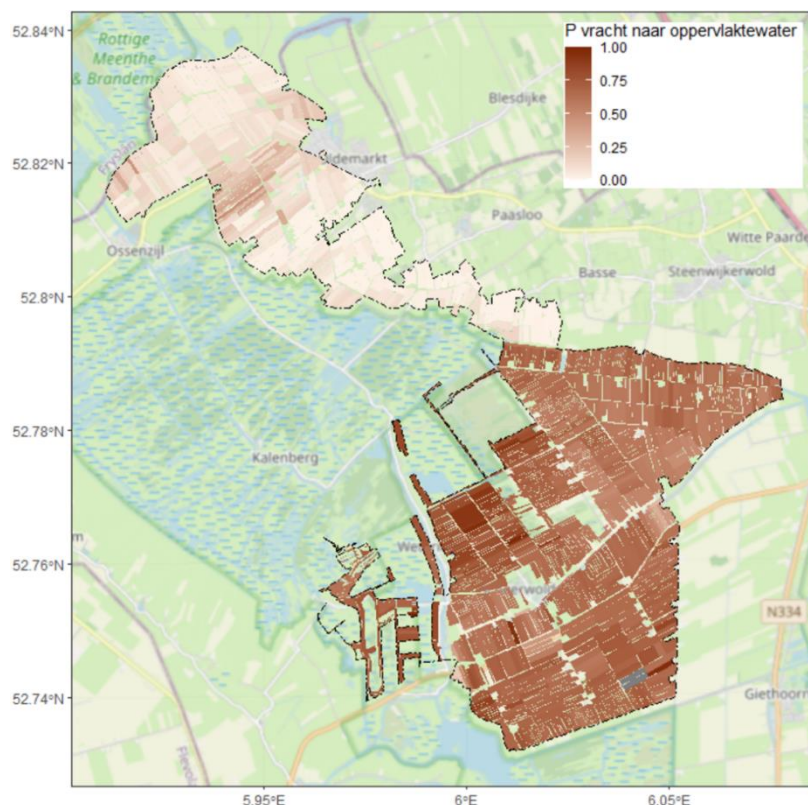
Figuur 6.2. Gemodelleerde toename in de waterflux van landbouwpercelen (in het jaar 2050) naar het watersysteem bij de verschillende maatregelpakketten.

7 P-belasting oppervlaktewater

Dit hoofdstuk beschrijft het effect van klimaatmaatregelen op de P-verliezen naar het oppervlaktewater die zijn berekend met het bodememissiemodel. Dit model is gebiedsspecifiek gemaakt voor de aanpassing van de kwelflux, de verandering van de fosfaattoestand in het bodemprofiel en de gemeten P-concentratie in het grondwater. Voor het effect van de scenario's en de daarbij horende maatregel-pakketten wordt voortgebouwd op de resultaten vanuit de voorgaande hoofdstukken.

7.1 Referentie scenario

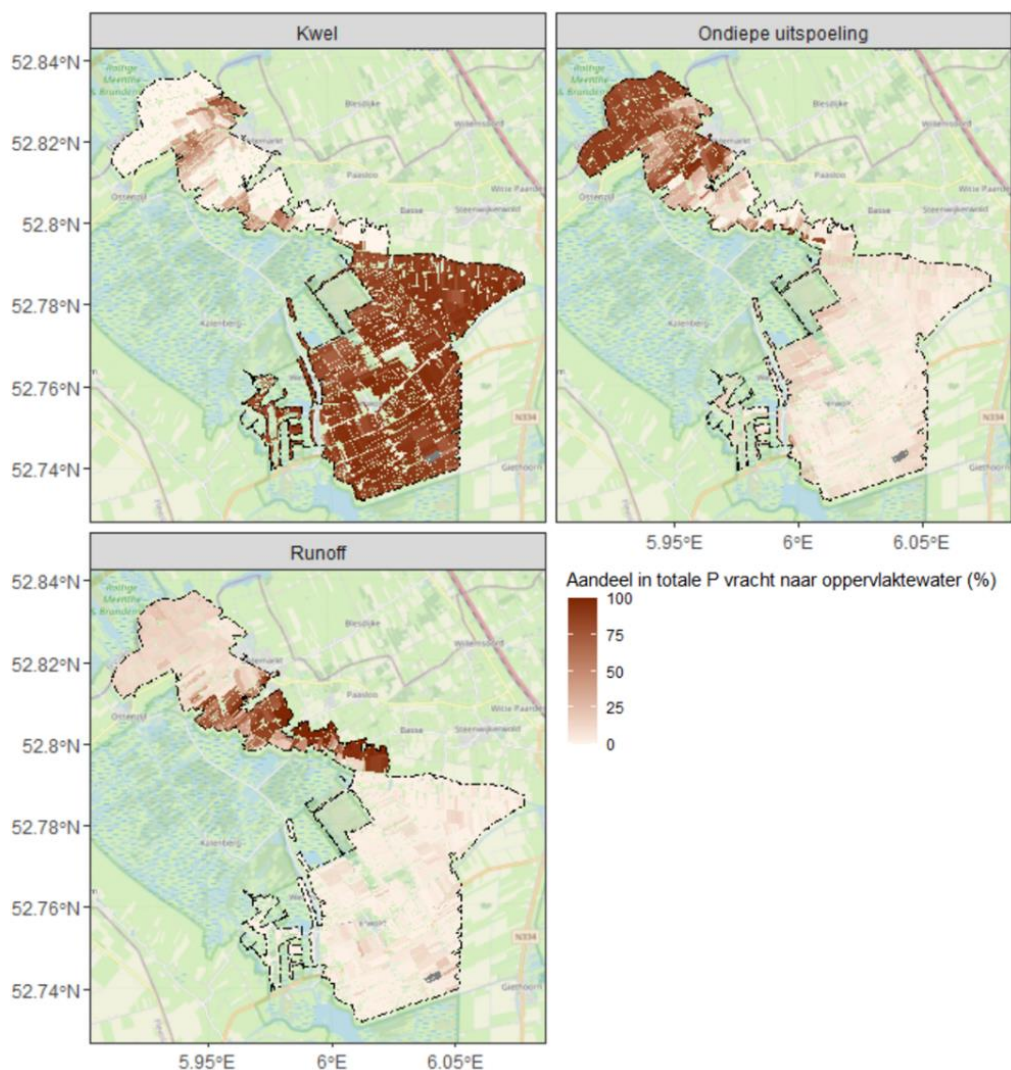
De ruimtelijke variatie van de P-vracht van landbouwpercelen naar het oppervlaktewater in de polders is weergegeven in Figuur 7.1. De totale P-vracht naar het oppervlaktewater in de polder betreft een optelsom van de P-vracht vanuit oppervlakkige uitspoeling, ondiepe uitspoeling en kwel. De bijdrage van deze individuele transportroutes staan weergegeven in Figuur 7.2.



Figuur 7.1. Ruimtelijke variatie in de gemodelleerde P-vracht naar het oppervlaktewater in de polders (variabelen geschaald naar een 0-1 schaal).

De grootste P-vrachten in het onderzoeksgebied worden berekend voor de diepe polders Halfweg, Wetering en Gelderingen (Figuur 7.1). Bij het hanteren van de aangepaste kwelfluxen van Witteveen +

Bos in combinatie met de gemeten grondwaterconcentraties uit het veldonderzoek, blijkt dat kwel een grote bijdrage levert aan de totale P-vracht in de diepe polders. Dit is geïllustreerd in Figuur 7.2. Bij de tussenpolders Meenthebrug en Grote polder bestaat het grootste deel van de P-vracht uit runoff, waarbij dat sterker het geval is in het noordelijke en hoger gelegen deel. In de noordelijke polders Marker- en Tussenbroek en Hagenbroek heeft ondiepe uitspoeling het grootste aandeel in de totale gemodelleerde P-vracht naar oppervlaktewater. Het verschil tussen Marker -en Tussenbroek (hoog aandeel ondiepe uitspoeling) en de tussenpolders (hoog aandeel runoff) is afhankelijk van een aantal factoren. Aan de ene kant staan grondwaterstanden hoger in Marker -en Tussenbroek, wat leidt tot een verminderde bergingscapaciteit van de bodem. Tijden van kortdurende heftige neerslag leiden daarmee gemakkelijker tot oppervlakkige afstroming. De fosfaatvracht is echter ook afhankelijk van het beschikbaar fosfaatgehalte over de diepte (Figuur S6-3 in Bijlage VI). In de tussenpolders neemt dit fosfaatgehalte (die sterk gecorreleerd is aan de concentratie van P in het bodemvocht en dus het P wat uitspoelt) sterk af met de diepte (P-CaCl₂ is vrijwel 0 mg P kg⁻¹ vanaf 50cm -mv). In Marker -en Tussenbroek is het P-CaCl₂ gehalte nog steeds 40% van het gehalte van de toplaag op een diepte van 150cm -mv. Dit zorgt er voor dat, in het geval van gelijke waterfluxen via ondiepe stroombanen, er in Marker -en Tussenbroek meer fosfaat naar het oppervlaktewater uitspoelt in vergelijking met de tussenpolders. Netto leiden bovenstaande punten tot een hoog aandeel van ondiepe uitspoeling in Marker -en Tussenbroek en een hoog aandeel van runoff in de tussenpolders.

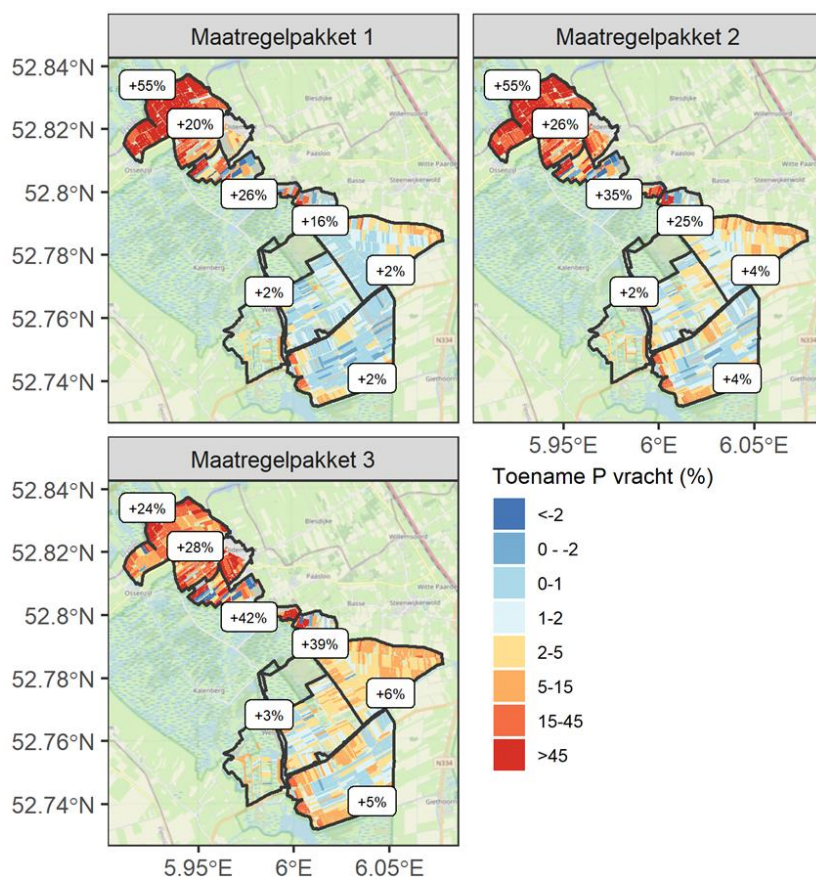


Figuur 7.2. Gemodelleerde bijdrage van kwel, ondiepe uitspoeling en oppervlakkige afspoeling (runoff) op de totale P-vracht naar oppervlaktewater in de polders.

De resultaten van Figuur 7.2 geven aan dat de kwelflux een belangrijke parameter is voor het bepalen van de fosfaatvrucht naar het oppervlaktewater in de diepe polders, terwijl de onzekerheid van de exacte kwelflux groot is. In het SOBEK-model van Witteveen en Bos is de kwelflux gebruikt om de waterbalans rond te krijgen en niet gemeten (wel gebaseerd op een chloridebalans). Verder wordt in het SOBEK-model de kwelflux waarschijnlijk ook verhoogd in de hoger gelegen polders omdat de waterbalans daar met de huidige grondwatermodellen niet volledig klopt (persoonlijke communicatie C. Cusell). Er zijn echter op dit moment onvoldoende chloridegegevens beschikbaar om een aangepaste kwelflux goed te onderbouwen. Dit leidt waarschijnlijk tot een onderschatting van de kwelflux (en de bijdrage van kwel aan de totale P-vracht) in de hoger gelegen polders. Verder zijn in het model P-totaal waarden van het grondwater gebruikt als kwelconcentraties. Een deel van het P-totaal zal (sterk) gebonden zijn aan ijzer, wat gedeeltelijk als particulier materiaal zal neerslaan (in de polders en/of in het natuurgebied). Voor de berekende P-vrachten is daarmee het gebruik van P-totaal geschikt, maar dit staat niet één op één met de effecten van de P-aanvoer op waterkwaliteit. Met name door de onzekerheid in de kwelflux zit er een relatief grote bandbreedte rond de gemodelleerde P-vracht naar het oppervlaktewater in de polders.

7.2 Scenario remmen

Voor het scenario remmen zijn de drie maatregelenpakketten doorgerekend. Het effect van elk van de scenario's op de verandering van de P-vracht van landbouwpercelen naar oppervlaktewater in de polder is voor de verschillende polders weergegeven in Figuur 7.3. Dit betreft som van de P-verliezen met oppervlakkige uitspoeling (runoff), ondiepe uitspoeling, drainage (van onderwaterdrains) en kwel. De verandering in P-vracht is het gevolg van zowel een verandering in waterfluxen van landbouwpercelen naar het oppervlaktewater van de polders (Hoofdstuk 6) als een verandering in P-concentraties.



Figuur 7.3. Gemodelleerde toename van gemodelleerde fosfaatvrachten bij de verschillende klimaatmaatregelen.

Op basis van deze modelresultaten zijn de volgende conclusies getrokken:

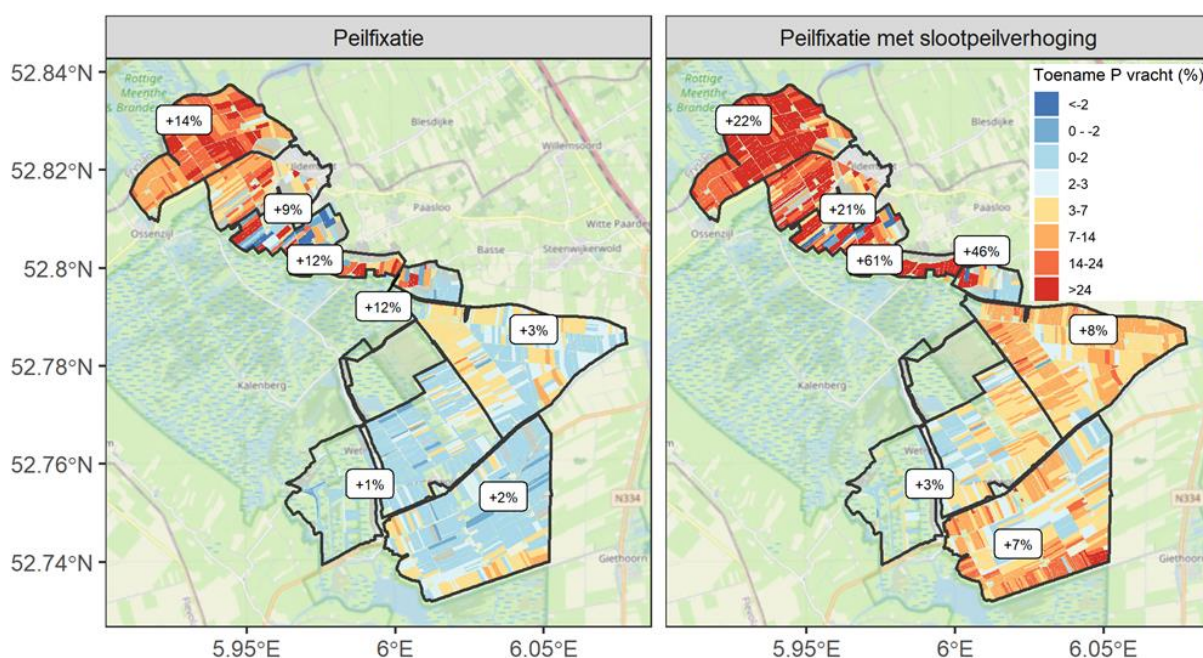
- De fosfaatvracht neemt naar verwachting toe bij toenemende vernatting (pakket 1 tot en met 3) voor alle polders op Marker- en Tussenbroek na;
- De fosfaatvracht neemt naar verwachting slechts zeer beperkt (2-6%) toe in de lager gelegen polders. Dit is het resultaat van de hoge bijdrage van kwel aan de totale P-vracht in deze polders (Figuur 7.2). Dit resultaat geeft ook aan dat het effect van klimaatmaatregelen op de kweldruk zeer relevant is om nader te onderzoeken. Naar verwachting zal vernatting leiden tot een verlaagde kweldruk, en daarmee een verminderde aanvoer van fosfaat via kwel, naar de polders.
- De berekende relatieve toename van de P-vracht naar het oppervlaktewater in de polder is het grootst in Marker- en Tussenbroek. De fosfaattoestand van de bodem is in de uitgangssituatie echter laag en de berekende agrarische P-vrachten zijn in de uitgangssituatie ook laag (Figuur 7.1). Hierdoor kan een kleine absolute toename leiden tot een grote relatieve toename. Daarnaast is dit scenario onderwaterdrainage als maatregel meegenomen, wat in het model leidt tot een netto toename in de P-vracht (afname fosfaatuitspoeling in de winter door verlaging GHG, toename fosfaatuitspoeling in de zomer door extra drainage voor het verlagen van de GLG). Het is echter mogelijk dat op een langere termijn (>40 jaar), onderwaterdrainage een positief effect heeft op de waterkwaliteit. Onderwaterdrainage leidt tot het remmen van bodemdaling, waardoor de kweldruk (met corresponderende aanvoer van fosfaat) minder snel toeneemt als bij het referentie scenario (Schipper et al., 2015).
- Voor maatregelpakket 3 geldt dat de P-vracht in elke polder toeneemt behalve in Marker- en Tussenbroek. De lagere P-vracht bij maatregelpakket 3 in vergelijking met de pakketten 1 en 2 komt door verschillen in type onderwaterdrainage tussen de maatregelpakketten (Figuur 4.11 tot Figuur 4.13). In maatregelpakket 3 is vaker traditionele onderwaterdrainage in plaats van drukdrainage in vergelijking met maatregelpakketten 1 en 2. Traditionele onderwaterdrainage wordt in het model als minder effectief beschouwd in zowel het verhogen van de GLG als in het verlagen van de GHG. Omdat uitspoeling door het neerslagoverschot met name in de winter plaatsvindt, is, door de hogere GHG, de totale gemodelleerde fosfaatvracht bij traditionele onderwaterdrainage hoger in vergelijking met drukdrainage. Daarnaast is traditionele onderwaterdrainage modelmatig minder diep (20cm onder slootpeil) aangelegd dan drukdrainage (75cm onder maaiveld). Omdat in het model is aangenomen dat de drains water gaan afvoeren wanneer de grondwaterstand boven de draindiepte uitkomt, wordt in het model minder water afgevoerd bij traditionele onderwaterdrainage. Dit verklaart deels de lagere totale fosfaatvracht bij de toepassing van traditionele onderwaterdrainage.
- Bij de tussen polders (Meenthebrug, Grote Polder en Hagenbroek) is de procentuele toename in de P-vracht naar het oppervlaktewater van de polders hoger dan in de lager gelegen polders Halfweg, Gelderingen en Wetering, en bij maatregelpakket 3 ook hoger dan in Marker -en Tussenbroek.

Het effect van verhoogde P-vrachten op de N2000 gebieden Wieden en Weerribben is in het huidige onderzoek niet bepaald. Gezien de grote invloed van kwel op de modelresultaten is de aanbeveling om een geohydrologische studie uit te voeren waar de huidige kweldruk, de verandering van deze kwel na en het effect hiervan op de fosfaatvracht richting gemaal wordt onderzocht. Hiernaast wordt aanbevolen om de verandering in wegzijging vanuit de N2000 gebieden na vernattingsmaatregelen in deze geohydrologische studie te onderzoeken, inclusief de consequenties voor de basenhuishouding (mogelijk verminderde inlaat van basenrijk oppervlaktewater). De resultaten van het huidige onderzoek kunnen vervolgens met de resultaten van het geohydrologisch onderzoek worden gecombineerd en aan het SOBEK-model van Witteveen+Bos worden gekoppeld om het potentiële effect op de N2000 gebieden te bepalen.

7.3 Scenario stoppen

Peilfixatie

Naar verwachting nemen bij peilfixatie, net als bij de waterflux, de agrarische P-vrachten toe naarmate grondwaterstanden dichterbij maaiveld komen te liggen. Hierdoor geven de modelresultaten een grotere toename in agrarische P-vracht aan in 2050 vergeleken met 2030. Het resultaat voor 2050 is in Figuur 7.4 weergegeven.



Figuur 7.4. Gemodelleerde toename van gemodelleerde fosfaatvrachten voor het jaar 2050 bij peilfixatie.

Op basis van het effect van peilfixatie op de ruimtelijke variatie in gemodelleerde fosfaatvrachten naar het oppervlaktewater (Figuur 7.4) kan geconcludeerd worden dat:

- De toename in P-vracht van landbouwpercelen naar het oppervlaktewater van de polders wordt bij peilfixatie naar verwachting groter in vergelijking met de maatregelpakketten die zich richten op het remmen van bodemdaling. Door peilfixatie te combineren met actieve vernatting zal dit sneller gebeuren, omdat het effect van peilfixatie naar voren wordt gehaald (bodemdaling zal sneller stoppen waardoor grondwaterstanden sneller dichtbij maaiveld komen te liggen)
- De ruimtelijke variatie in de toename in de P-vracht is gelijk als in het scenario 'remmen'. Door de hoge bijdrage van kwel aan de totale P-vracht in de laag gelegen polders is de relatieve toename in de P-vracht hier gering en lager dan in de hoger gelegen polders. Het effect van vernatting op de kweldruk is echter niet in het huidig onderzoek meegenomen, waardoor de P-vracht mogelijk wordt overschat.

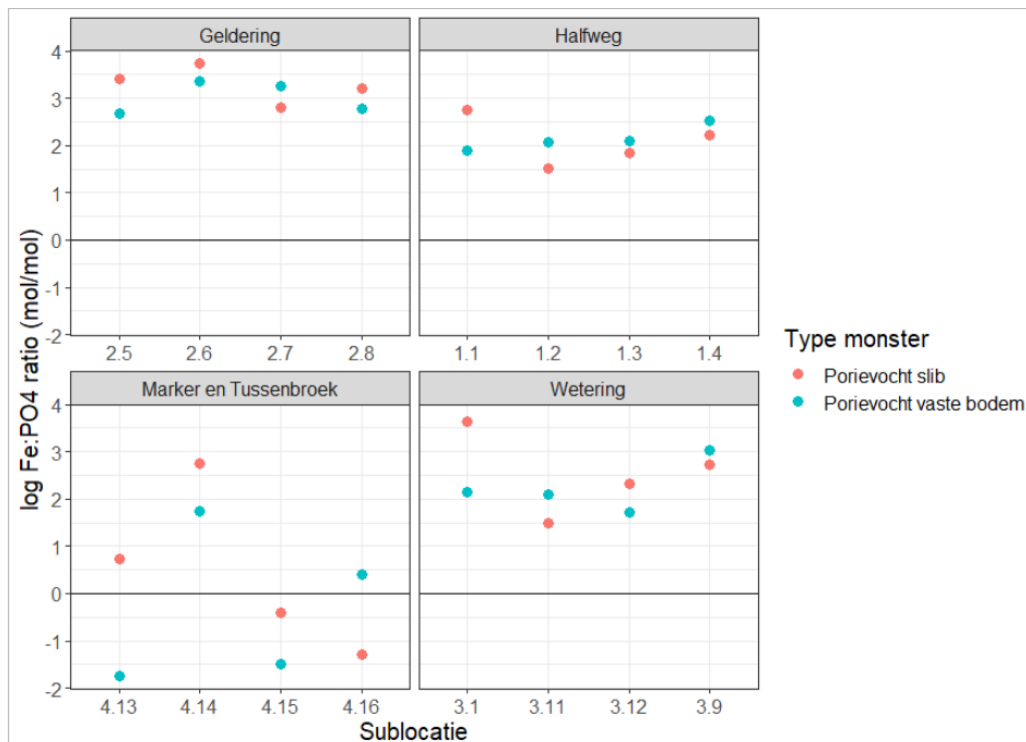
Ook voor peilfixatie geldt het advies om de resultaten van het huidig onderzoek aan te vullen met resultaten van een voorgesteld geohydrologisch onderzoek en deze resultaten te koppelen aan het SOBEK-model van Witteveen+Bos om de impact van de gemodelleerde verandering in P-vrachten op de N2000-gebieden Wieden en Weerribben te bepalen. Daarnaast wordt bij peilfixatie aanbevolen om eerst lange termijn model-runs uit te voeren (berekenen wanneer peilfixatie leidt tot het stoppen van bodemdaling, en dan bepalen wat de toename is van de agrarische P-vrachten). Op de lange termijn zullen die P-vrachten acceptabel moeten zijn.

8 Fosfaat in het (polder)watersysteem

8.1 Fosfaat bindingscapaciteit van de slootbodems

Het gedrag van fosfaat in het watersysteem is voor een deel afhankelijk van de capaciteit van de slootbodem om fosfaat te binden. De capaciteit van de slootbodem om fosfaat te binden en na te leveren wordt in de literatuur geschat op basis van de verhouding tussen ijzer en fosfaat en tussen ijzer en sulfaat in het porievocht van de slootbodem en/of het sediment (Geurts et al., 2010; Poelen et al., 2012). Het idee achter het gebruik van deze element-verhoudingen is om een inschatting te krijgen van het aandeel van beschikbaar ijzer in de slootbodem, waar fosfaat aan kan binden. De Fe:S ratio geeft een indicatie van de kans dat ijzer gereduceerd wordt en de buffercapaciteit zal afnemen door het neerslaan van het opgeloste Fe met S. Door het neerslaan van Fe als Fe-sulfide gaat het bindingsoppervlak voor fosfaat verloren. Het geeft echter geen informatie over de hoeveelheid fosfaat die vrijkomt, omdat dat ook afhankelijk is van de hoeveelheid fosfaat die aan dit ijzer geadsorbeerd is.

Verschillende studies hebben drempelwaarden afgeleid waaronder de fosfaat nalevering laag is. Als de ratio's Fe:PO₄ in het porievocht en de Fe:S ratio in het slootsediment boven de 1 zijn is de nalevering van fosfaat niet meer lineair gecorreleerd met de fosfaatconcentratie in het porievocht, en is het fosfaat naleverend vermogen van slootbodems beperkt (Geurts et al., 2010; Dijkstra et al., 2013; Poelen et al., 2012). De Fe:PO₄ ratio's in het porievocht (van zowel het slib als de vaste slootbodem) zijn voor het huidige onderzoeksgebied weergegeven in Figuur 8.1. Zie Bijlage I voor de situering van de monsterpunten.



Figuur 8.1. De Fe:PO₄ ratio (mol/mol, in logaritmische schaal 0 = 1) in het porievocht van de sliblaag en de vaste slootbodem. De zwarte lijn is de ratio waaronder fosfaatnalevering kan plaatsvinden (ratio van 1, log(1) = 0).

Op basis van de hoge Fe:PO₄ ratio's (50 tot 3500) wordt verwacht dat in de laag gelegen polders fosfaatnalevering vanuit de slootbodem zeer beperkt is (alle Fe:PO₄ ratio's ruim boven de 1). Dit kan worden verklaard door de grote hoeveelheid kwel, wat veel ijzer meeneemt. De Fe:S ratio's van het sediment zijn niet bepaald, maar door de sterke correlatie tussen de Fe:S ratio van het sediment en de Fe:PO₄ ratio van het porievocht (Dijkstra et al., 2013) in combinatie met de hoge Fe:PO₄ ratio's in het porievocht wordt niet verwacht dat zwavel in deze in de laag gelegen polders de vastlegging van fosfaat in de slootbodem belemmert.

In Marker- en Tussenbroek zijn Fe:PO₄ ratio's lager en komen soms beneden de 1 (in 4 van de 8 monsters). Het is de verwachting dat er in deze polder lokaal nalevering van fosfaat kan plaatsvinden van de slootbodem naar het oppervlaktewater. Door de dikke(re) veenlagen is het ook de verwachting dat de S-verliezen naar het oppervlaktewater significant zijn. Aan wordt bevolen om naast het porievocht ook het slib en de onderwaterbodem nader te onderzoeken (monsters zijn nog aanwezig) om een gedetailleerder inzicht te krijgen in de fosfor, ijzer en sulfaat dynamiek en daarmee in de potentiële nalevering van fosfor in Marker- en Tussenbroek.

8.2 Invloed slootbodem op de P-vrachten

Hoewel de fosfaat bindingscapaciteit van de slootbodems groot is in de laag gelegen polders (door ijzerrijke kwel), hoeft dit niet te betekenen dat het fosfaat dat van het perceel naar het watersysteem afspoelt ook wordt vastgelegd. Dit is afhankelijk van de interactie-potentie door bijvoorbeeld de debieten. Vliex et al. (2013) geeft ook aan dat de slootbodems in Wetering een hoge fosfaat bindingscapaciteit hebben, maar dat de debieten hoog zijn omdat er relatief weinig sloten in de polder aanwezig zijn ten opzichte van het totaal af te wateren areaal. Door de hoge stroomsnelheid heeft fosfaat niet de mogelijkheid om te bezinken of zich te binden aan de slootbodem en stroomt vrijwel alle P dat uitspoelt van de percelen naar de sloot naar het gemaal en richting de N2000-gebieden. In Vliex et al. (2013) wordt daarom voorgesteld om een deel van het landbouwgebied (10-20%) om te zetten in sloten en/of waterbassins. Op deze manier zou een natuurlijke vorm van defosfatering plaatsvinden. Natuurlijke defosfatering in de kwelpolders door het vergroten van het oppervlak aan sloten is ook beschreven in het PAS-onderzoek in de Wieden en Weerribben (Cusell & Mandemakers, 2017).

Het graven van extra sloten is in het huidig onderzoek al als maatregel besproken om bodemdaling te beperken (zie Figuur 4.14). Door smallere percelen krijgen sloten een grotere invloed op de grondwaterstanden en komen grondwaterstanden minder hol te liggen, waardoor bodemdaling wordt vertraagd. Het verkleinen van percelen middels het graven van sloten kan dus een dubbel positief effect hebben:

- Grondwaterstanden komen minder hol te liggen, wat leidt tot remming van bodemdaling.
- Het contactoppervlak van water met de onderwaterbodem en ijzerrijk slib wordt vergroot (geldt voor de laaggelegen polders met ijzerrijke kwel), wat mogelijk leidt tot vastlegging van fosfaat in de slootbodem (natuurlijke defosfatering).

Effecten van het verkleinen van percelen op de kweldruk en op de gewasopbrengst zijn echter onbekend, en het advies is om de effecten hierop te bepalen wanneer de optie serieus wordt overwogen. Vooralsnog is het contactoppervlak van water met het ijzerrijke slib dusdanig laag dat is aangenomen dat er geen significante vastlegging plaatsvindt in de slootbodem. Het advies is daarom om in de geadviseerde SOBEK modelruns geen rekening te houden met P-vastlegging door de slootbodem.

9 Landbouw

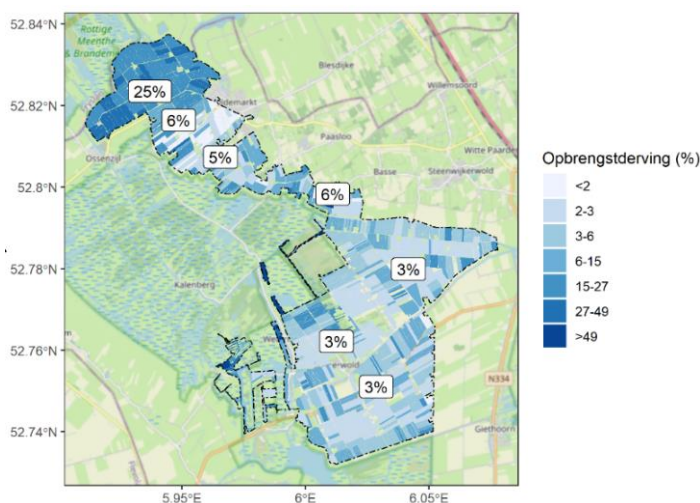
In dit hoofdstuk worden de effecten van de klimaatscenario's en maatregelen op de landbouw besproken en de opbrengstderving door natschade berekent. Deze natschade is gekwantificeerd met behulp van de Waterwijzer Landbouw (WWL, <https://waterwijzerlandbouw.wur.nl/>).

Vernattingsmaatregelen hebben verschillende effecten op het agrarische management. Door vernatting (drooglegging ondieper dan 20 tot 30cm onder maaiveld) zal het groeiseizoen korter worden omdat de agrariër in het voor- en najaar door te natte omstandigheden niet op het land kan. De teelt van maïs en akkerbouw is dan niet meer mogelijk, alleen gras. Door later te bemesten komt de eerste grassnede later op gang en zal ook later worden geoogst. De verwachting is dat ook in het najaar de laatste snede eerder of niet kan worden geoogst. Dit betekent 1 tot 2 snedes minder onder nattere omstandigheden. Hier zal de bemesting op (moeten) worden aangepast wat automatisch leidt tot extensivering. Door lagere bemesting zal de grassamenstelling verschuiven naar meer kruidenrijk. Meer kruidenrijke graslanden en nattere omstandigheden voor de weidevogels zou ook kansen kunnen bieden voor andere maatschappelijke opgaves en verdienmodellen.

9.1 Opbrengstderving door natschade

Bij de berekening van de opbrengstderving door natschade zijn voor de verschillende scenario's zowel directe (bijv. verandering van de transpiratie gedurende het groeiseizoen) als indirecte effecten (e.g. land is te nat voor grondbewerking wat leidt tot een verschuiving van het groeiseizoen) in de berekening meegenomen. In het huidig onderzoek is weerdata van station Eelde gebruikt (periode 1981-2010), en is aangenomen dat er geen irrigatie plaatsvindt. Voor de volledige documentatie en achtergronden van de berekening wordt verwezen naar Waterwijzer Landbouw (2020).

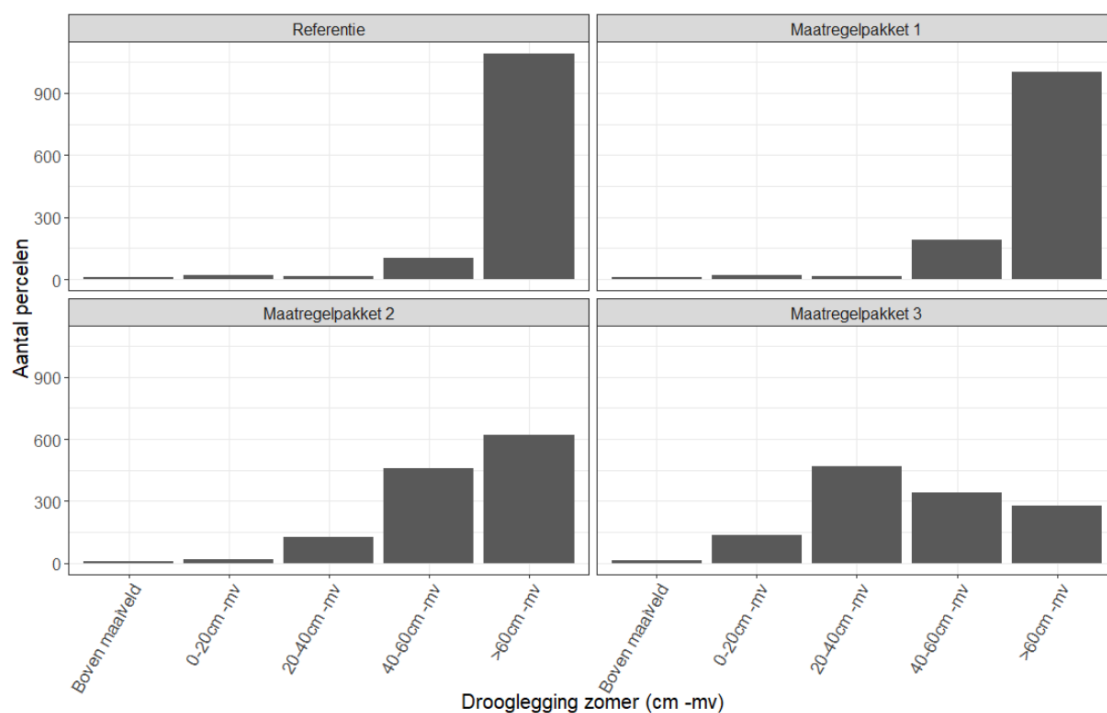
Referentie scenario



Figuur 9.1. Gemodelleerde opbrengstderving in 2050 bij het referentie scenario. De kleur geeft de totale opbrengstderving in procent aan. Het getal in de label geeft de mediaan aan van de opbrengstderving in de polder.

Scenario remmen

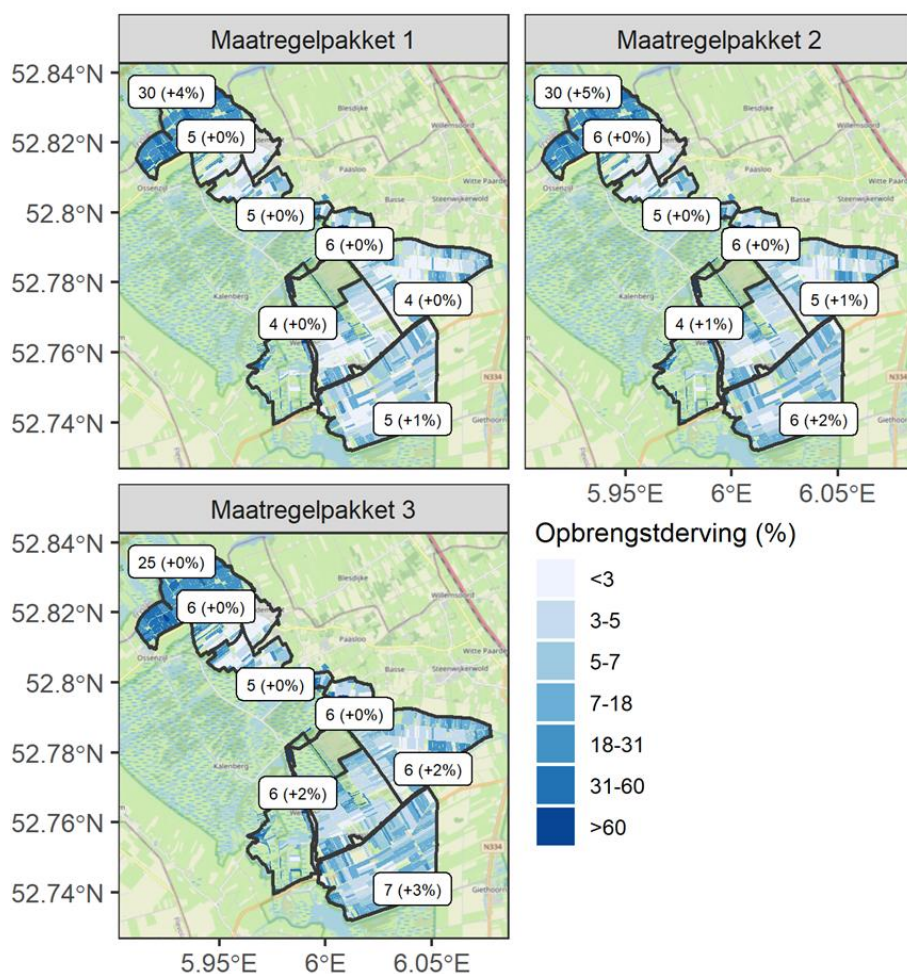
De insteek van de maatregelpakketten die zich richten op het remmen van bodemdaling is dat de drooglegging bij de maatregelpakketten 1, 2 en 3 successievelijk ondieper wordt. Dit is te zien in Figuur 9.2 waar de drooglegging (x-as) voor elk maatregelpakket is uitgezet tegen de verdeling van het totaal aan percelen met deze drooglegging (y-as). Zoals eerder is besproken in paragraaf 4.4 is het effect van het verhogen van het slootpeil verschillend binnen een peilgebied door de verschillen in maaiveldhoogte. Het verkleinen van de peilgebieden in de polders Gelderingen en Wetering zijn daarom onderdeel van de maatregelpakketten 1 tot en met 3. Dit is ook de reden dat in Figuur 9.2 peilverhoging leidt tot een variatie in de daadwerkelijke drooglegging van de percelen binnen het gebied.



Figuur 9.2. Droogleggingen in de zomer bij het referentie scenario en de drie maatregelpakketten die zich richten op het remmen van bodemdaling.

Een verhoging van de slootpeilen heeft consequenties voor de totale opbrengstderving (ofwel een vermindering van droogteschade, ofwel een toename van de natschade). De ruimtelijke variatie is geïllustreerd in Figuur 9.3. Vanuit het perspectief van het agrarisch management is het beeld vrij positief. De gemodelleerde opbrengstderving neemt over het algemeen slechts zeer beperkt (0 tot 5%) toe bij de verschillende maatregelpakketten. Dit geeft aan dat het gevolg van de remmende klimaatmaatregelen zoals in deze studie zijn geformuleerd zeer beperkt lijken te zijn wat betreft opbrengstderving en bereikbaarheid van de percelen. Dit komt enerzijds door de relatief dunne en zandige veenlagen in de dieper polders en dat de drooglegging in het meest extreme maatregelpakket (pakket 3) gemiddeld nog 40cm onder maaiveld ligt.

In Marker- en Tussenbroek bestaat de bodem uit klei op veen. Dit is positief voor de draagkracht van de bodem en het klei vormt een beschermende laag op het veen waardoor mineralisatie en bodemdaling wordt beperkt. Om ook in droge jaren het veen te beschermen is het echter wel van belang dat de klei nat wordt gehouden en niet gaat scheuren. Irrigatie of bevoeiing kunnen effectief zijn in het voorkomen van droogte scheuren in de kleilaag zodat deze het veen beschermt blijft. Daarnaast is in de maatregelpakketten aangenomen dat in Marker- en Tussenbroek onderwater drainage wordt aangelegd. Dit zorgt ook voor afwatering en het op peil houden van de bewerkbaarheid van een perceel.



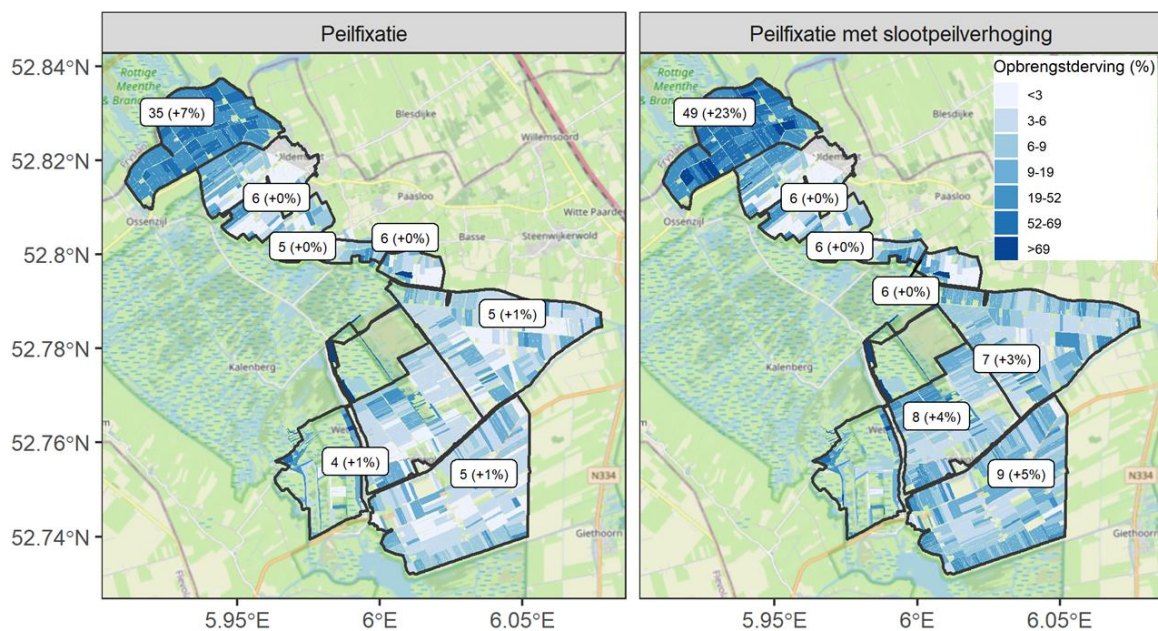
Figuur 9.3. Gemodelleerde opbrengstderving in 2050 bij de verschillende maatregelpakketten. Het getal in de label geeft de opbrengstderving aan (%), en het getal tussen haakjes de toename ten opzichte van het referentie scenario. Berekeningen zijn gebaseerd op de water wijzer landbouw (<https://waterwijzerlandbouw.wur.nl/>).

Scenario stoppen, peilfixatie

Peilfixatie zorgt voor een geleidelijke vernatting totdat de bodemdaling is gestopt. Zoals eerder besproken leidt peilfixatie zelfs in 2100 naar verwachting nog niet tot het stoppen van bodemdaling. Hierdoor zal de opbrengstderving nog een lange tijd blijven toenemen. Omdat in 2050 de grondwaterstanden dichterbij maaiveld liggen dan in 2030 (en de opbrengstderving daarmee groter is) is in Figuur 9.4 de verwachte opbrengstderving in 2050 geïllustreerd en worden de volgende conclusies getrokken:

- Peilfixatie leidt, ook als het gecombineerd wordt met een vernattingsmaatregel als slootpeilverhoging (waarbij op 10% van de percelen de zomerdrooglegging ondieper is dan 20cm-mv), naar verwachting tot een (zeer) beperkte toename in opbrengstderving in 2050. Een uitzondering is Marker- en Tussenbroek.
- In Marker- en Tussenbroek leidt peilfixatie al snel tot een toename in gewasderiving, omdat in Marker- en Tussenbroek de peilen al relatief hoog staan en peilfixatie eerder leidt tot opbrengstderving dan in de laag gelegen polders
- Peilfixatie leidt sneller tot een toename in gewasderiving wanneer het gecombineerd wordt met een vernattingsmaatregel.

Omdat naar verwachting peilfixatie niet leidt tot het stoppen van bodemdaling in 2100 zal de gewasderiving met de tijd groter worden. Dat zal (op termijn) leiden tot verdere extensivering.



Figuur 9.4. Gemodelleerde opbrengstderving in 2050 bij peilfixatie. Het getal in de label geeft de opbrengstderving aan (%), en het getal tussen haakjes de toename ten opzichte van het referentie scenario.

Scenario stoppen, natte teelt

Er bestaan nog veel obstakels voor het grootschalig implementeren van commerciële natte teelten. Er is met name nog gebrek aan een betrouwbare afzetmarkt en een gebrek aan kennis over teeltmethoden (Nationaal Kennisprogramma Bodemdaling, 2018). Dit zorgt voor economische risico's voor ondernemers. Compensatie is mogelijk door ondernemers te betalen voor het leveren van ecosysteemdiensten. Hierbij kan gedacht worden aan het koppelen van waarde aan CO₂-emissies via CO₂-certificaten/carbon credits (zie bijvoorbeeld het project "Valuta voor Veen"), waarbij een ondernemer geld kan verdienen door het reduceren van broeikasgasemissies. Andere mogelijkheden zijn het financieel belonen van het bijdragen aan biodiversiteitsdoelstellingen, zuiveren van nutriëntrijk water en het bergen van water (Bestman et al., 2019).

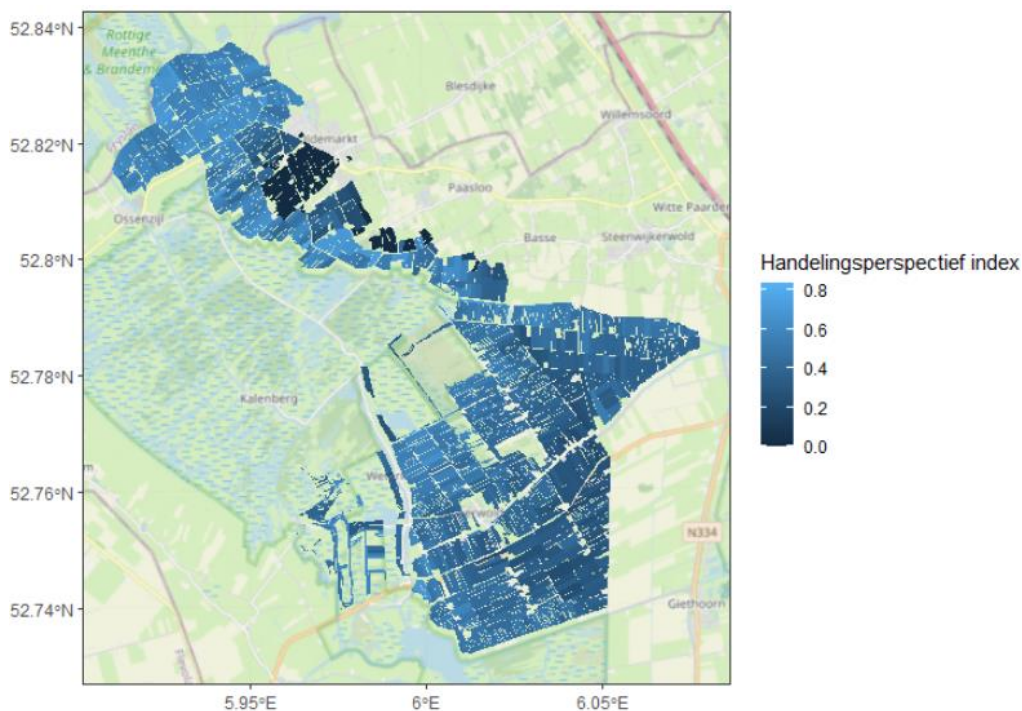
10 Discussie

10.1 Handelingsperspectief van klimaatmaatregelen

Het perspectief om klimaatmaatregelen toe te passen, is over het algemeen groter wanneer

- 1 er veel veen boven de gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG) aanwezig is,
- 2 het veen bestaat uit een hoog gehalte organisch materiaal (weinig zand of klei bijmenging),
- 3 het grondwaterstand grenst aan de veenlaag en
- 4 de fosfaattoestand van de bodem laag is zodat het negatieve effect op de oppervlaktewaterkwaliteit beperkt is.

Op basis van deze 4 criteria is een handelingsperspectief index ontwikkeld en is dit voor het gebied inzichtelijk gemaakt (Figuur 10.1, hogere indexwaarde staat gelijk aan een hoger perspectief).



Figuur 10.1. Handelingsperspectief index voor het onderzoeksgebied.

De ruimtelijke variatie in handelingsperspectief laat zien dat:

- In de polder Marker- en Tussenbroek (meest noordelijke polder) de kansrijkheid voor klimaatmaatregelen het grootst is, wat met name komt door de aanwezigheid van de dikste veenlagen in combinatie met de hoogste organische stofgehalten (Figuur 3.1 en Figuur 3.2).

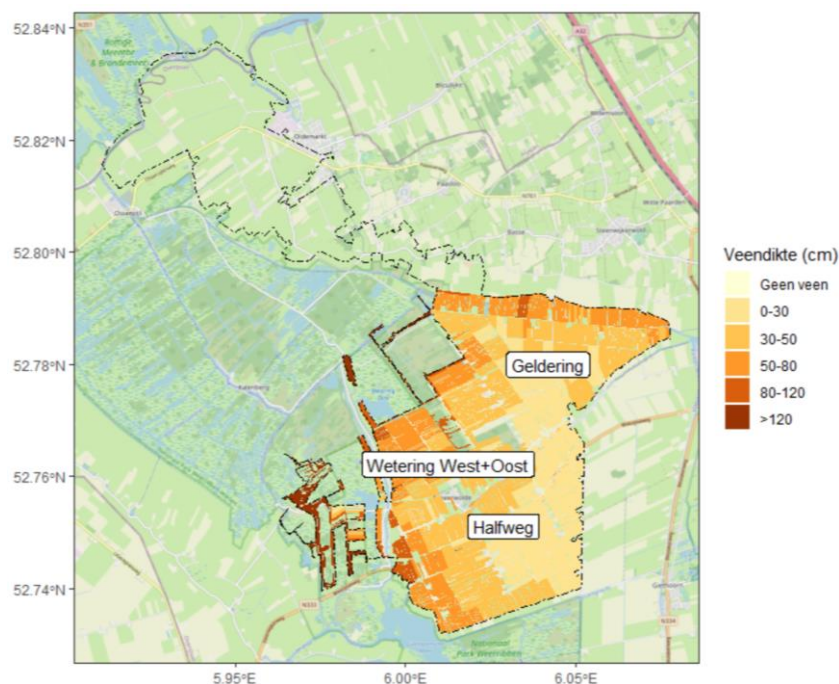
- In de laag gelegen polders (Halfweg, Gelderingen en Wetering) is het perspectief relatief laag. Dit komt met name door de aanwezigheid van dunnere, zandige veenlagen met lage organische stofgehaltes.
- In de polders hiertussen (Meenthebrug, Hagenbroek en Grote polder) is het handelingsperspectief groot in het lager gelegen deel dat grenst aan de Weerribben (zuid/zuidwesten) en is er geen handelingsperspectief richting de pleistocene zandrug (noorden/noordoosten, Figuur 3.1 en Figuur S2-2 in Bijlage II).

Opvallend is dat gedeelten van de gebieden met een hoge kansrijkheid soms al uitwerkingsgebieden of reeds geplande natuurgebieden zijn volgens het N2000-beheerplan (zie Bijlage 12 in Provincie Overijssel, 2019). Dit gaat om een gedeelte van Marker- en Tussenbroek (gepland nieuw natuurgebied, in het beheerplan geduïd als “Verbindingszone Weerribben-Rottige Meenthe”), een klein stukje van Hagenbroek (nog te onderzoeken uitwerkingsgebied “Hagenbroekweg, Ossenzijl”) en een deel van Meenthebrug (nog te onderzoeken uitwerkingsgebied “Meenthebrug”). Mogelijk zijn hier win-win situaties te halen door ondernemers te stimuleren om over te gaan op extensiever beheer (bijvoorbeeld kruidenrijk grasland), en dit te combineren met vernattingsmaatregelen om bodemdaling tegen te gaan. Bij de inrichting van de verbindingszone Weerribben-Rottige Meenthe wordt verder aanbevolen om na te gaan of er rekening is gehouden met de aanwezigheid van een dunne kleilaag (Figuur S2-3 in Bijlage II). Mogelijk heeft dit consequenties voor de inrichtingsmaatregelen.

Op basis van de ruimtelijke verschillen in handelingsperspectief (Figuur 10.1) is voor de discussie het onderzoeksgebied opgedeeld in drie groepen; (i) de laag gelegen polders Halfweg, Gelderingen en Wetering, (ii) de hooggelegen veenpolder Marker- en Tussenbroek en (iii) de hoog gelegen tussenpolders Meenthebrug, Grote polder en Hagenbroek.. De resultaten worden per deelgebied bediscussieerd.

10.2 Klimaatmaatregelen in de laag gelegen polders

De laag gelegen polders omvat de polders Halfweg, Gelderingen en Wetering (Figuur 10.2).



Figuur 10.2 Veendiktekaart van de laag gelegen polders. De zwarte rand is de omlijning van het gehele onderzoeksgebied.

Kenmerken van de laag gelegen polders

De laag gelegen polders onderscheiden zich van de overige polders door een combinatie van een aantal kenmerken. De veenlagen in de polders zijn dun (0-30 / 30-50cm, zie Figuur 10.2) en vrij zandig (Figuur 3.2). Dit is terug te zien in de organische stofgehalten, die lager liggen dan de 20% die op veengronden verwacht mag worden. Op de bodemkaart is ook te zien dat de bodems op een overgang zitten van veengrond naar zandgrond (enkele bodems worden geclassificeerd als “moerige grond” in plaats van “veengrond”, zie Figuur 3.1). Deze bodemeigenschappen zorgen ervoor dat bodemdaling relatief beperkt is. Dat het geen pure veengronden betreft is ook te zien aan het agrarisch management. Dit is vrij intensief, onder andere als gevolg van de diepe droogleggingen (Tabel 3-1, Figuur S2-4 in Bijlage II). Uit de gesprekken met de lokale agrariërs blijkt dat lokaal de bodem sterk wordt geroerd om de percelen vlak te maken om de gevolgen van heterogene bodemdaling op te heffen. Ook de vrij algemeen voorkomende maïsteelt in de omgeving leidt tot een snellere bodemdaling in vergelijking met grasland, wat door de ondernemers wordt onderschreven. Het waterbeheer in deze polders is ook ongunstig in relatie tot bodemdaling. Naast de diepe droogleggingen zijn de peilgebieden van de laag gelegen polders groots in oppervlak (Figuur 3.6). Door hoogteverschillen binnen de peilgebieden is de variatie in drooglegging binnen het gebied ook groot. Idealiter zijn de droogleggingen het ondiepst bij percelen waar meer veen ligt, maar het omgekeerde is bij Gelderingen en Wetering het geval. Hier zijn op de plaatsen met de diepste droogleggingen nog de dikste veenlagen aanwezig (Tabel 4-1, Figuur 4.5 t/m Figuur 4.8). Dit is vanuit het perspectief van veenmineralisatie en bodemdaling ongunstig.

De laag gelegen polders onderscheiden zich ook van de overige polders door de hoge kweldruk (Tabel 2-2 en Figuur 2.5). Dit leidt tot de toevoer van veel ijzer en fosfaat naar het oppervlaktewater van de polders, waardoor de gemodelleerde P-vrachten naar het watersysteem hoog zijn (Figuur 7.1) door de grote verwachte aanvoer via kwel (Figuur 7.2). Door de relatief grote kweldruk (2.3 tot 5mm/dag, Tabel 2-2) kan een lage P-concentratie toch leiden tot een hoge P-vracht.

Een uitzondering binnen de laag gelegen polders is Wetering-West. Dit deel is al grotendeels omgevormd naar natuur (Figuur 2.1) en het agrarisch beheer op de resterende percelen is zeer extensief. In dit gebied zijn dikkere veenlagen aanwezig (tot meer dan 1 meter) en is het landgebruik alleen grasland. Alhoewel het merendeel van Wetering West diepe droogleggingen heeft (het deel van Wetering West wat in hetzelfde peilgebied ligt als Wetering Oost) zijn er ook enkele percelen die in kleine aparte peilgebiedjes liggen. Hier staan de grondwaterstanden hoger, en is het agrarisch management extensiever (sommige percelen zijn ook in beheer van Staatsbosbeheer).

Passende klimaatmaatregelen

Door de kenmerken van de laag gelegen polders is het handelingsperspectief voor klimaatmaatregelen relatief beperkt, liggen sommige maatregelen voor de hand en zijn sommige maatregelen juist (zo goed als) niet toepasbaar. Gezien het agrarisch management, huidig waterbeheer en de staat van de zandige veen/moerige gronden lijken maatregelen het meest passend die zich richten op het remmen van bodemdaling. De onderzochte maatregelpakketten zijn een combinatie van slootpeilverhoging, verkleinen van peilgebieden om beter te sturen op drooglegging en onderwaterdrainage. Onderwaterdrainage is in deze polders echter (vrijwel) niet toepasbaar. Deze conclusie komt overeen met de studie van Staveren et al. (eindrapport verwacht in 2021).

In deze polders is de combinatie van slootpeilverhoging en het verkleinen van peilgebieden het meest perspectiefvol om het overgebleven veen te beschermen en bodemdaling te remmen. Het verkleinen van peilgebieden is uitgewerkt door Gelderingen op te delen in drie peilgebieden (Figuur 4.7), en om het extensieve, grotendeels al tot natuur omgevormde, Wetering-West te scheiden van het intensievere beheerde Wetering-Oost (Figuur 4.9). Slootpeilen kunnen hierdoor sterk worden verhoogd in de delen waar nu de droogleggingen diep zijn en de veenlagen het dikst. Als voorbeeld is de potentiële slootpeilverhoging in het nieuwe peilgebied Wetering-West circa 34cm meer dan mogelijk zou zijn wanneer het peilgebied niet zou worden verkleind. Bodemdaling kan in deze polders additioneel worden

geremd middels het graven van sloten/watervoerende greppels op brede percelen (verkleinen percelen), wat mogelijk ook een gunstig effect heeft op de waterkwaliteit. Naast dat de grondwaterstand minder hol komt te liggen in droge perioden, leidt het ook tot een verhoogde verblijftijd van water in de polders. Gezien de hoge capaciteit van de slootbodems om fosfaat te binden (Figuur 8.1) leidt dit waarschijnlijk tot een verhoogde fosfaatvastlegging in de diep gelegen polders (natuurlijke defosfatering, zie ook pagina's 46-47 in Cusell & Mandemakers, 2017).

De meer ingrijpende maatregelen als peilfixatie en natte teelten, die (op termijn) bodemdaling stoppen, zijn theoretisch mogelijk maar liggen minder voor de hand door het beperkte handelingsperspectief. Peilfixatie zorgt op termijn voor het stoppen van bodemdaling omdat grondwaterstanden steeds dichterbij maaiveld komen te liggen. Het kan echter zo lang duren voordat dit punt is bereikt (PBL, 2016), dat de verwachting is dat de veenlagen al grotendeels zijn verdwenen. Dit kan worden beperkt door peilfixatie te combineren met actieve vernattingsmaatregelen, maar naar verwachting moeten deze vernattingsmaatregelen intensief zijn om ervoor te zorgen dat uiteindelijk veenlagen permanent worden beschermd. Het overgaan op natte teelten is theoretisch gezien ook mogelijk, maar is zeer ingrijpend. Voor niet-commerciële teelt liggen er enkele mogelijkheden. Wetering-West is al grotendeels naar natuur omgevormd of kent een N2000 ontwikkelopgave (Figuur 2.1). Volgens het definitief beheerplan wordt het graslandbeheer gericht op verschraling en het inrichten van moeras voor de grote vuurvinder. Pilots met natte teelten lijken hier kansrijk als een manier om de fosfaattoestand van de bodem versneld te verlagen (uitmijnen in plaats van verschralen). Door te bemesten met N en K wordt de opbrengst vergroot en de fosfaattoestand van de bodem versneld verlaagd. Inzichten die in deze pilots worden verkregen kunnen ook worden gebruikt om andere niet-commerciële vormen van natte teelten te plannen. Hierbij kan bijvoorbeeld gedacht worden aan het inrichten van een bufferstrook tussen de landbouw en natuur in de westzijde van de polders, waar veenlagen dikker zijn (Figuur 2.3) en de grondwaterstand hoger staat (Figuur 3.6) in vergelijking met het overig deel van de laag gelegen polders. Uitgangspunt in het huidig onderzoek is echter dat agrarisch beheer nog mogelijk moet zijn, en opschaling naar commerciële teelt lijkt in de laag gelegen polders door de dunne, zandige veenlagen en intensiever agrarisch beheer niet realistisch. Dit zou objectiever kunnen worden bepaald middels een maatschappelijke kosten-basen analyse (MKBA).

Gemodelleerde effecten van de klimaatmaatregelen

Voor de remmende maatregelen geldt dat bodemdaling en CO₂-emissies sterker worden geremd naarmate slootpeilen hoger worden gezet, en wanneer ervoor gekozen wordt om de peilgebieden van Gelderingen en Wetering op te delen. Maatregelpakket 3 is daarmee het meest effectief. Het verkleinen van de peilgebieden van de polders Wetering en Gelderingen hebben een duidelijk positief effect op het remmen van bodemdaling (Figuur 5.1). Ruimtelijke analyses waar veendikte-kaarten worden vergeleken met hoogteverschillen binnen peilgebieden lijkt in een bredere context hiermee een nuttige analyse om te onderzoeken hoe het waterbeheer kan worden aangepast om bodemdaling tegen te gaan.

De maatregelpakketten die zich richten op het remmen van bodemdaling leiden, afhankelijk van het maatregelpakket en de polder, tot een berekende remming van bodemdaling en CO₂-emissie van circa 10-33% ten opzichte van het referentie scenario (tijdsperiode van 2020-2050). Bij peilfixatie geldt dat de maatregel bodemdaling nog tot na 2100 zal doorgaan, ook wanneer het gecombineerd wordt met de voorgestelde slootpeilverhoging (Figuur 5.4). Hiermee blijft het een remmende maatregel en zullen in verloop van tijd de veenlagen in de polders in zijn geheel verdwijnen. De gemodelleerde remming van bodemdaling is, afhankelijk van de polder, 4-10% wanneer peilfixatie op zichzelf wordt ingevoerd en 30-37% wanneer het wordt gecombineerd met de voorgestelde slootpeilverhoging (tijdsperiode van 2020-2050, zie Figuur 5.3).

De maatregelpakketten leiden naar verwachting tot een kleine toename van de waterafvoer (circa 1-3%) en van de P-vracht (circa 2-6%) van landbouwpercelen naar het oppervlaktewater van de polders. De toename is in relatieve zin (in % toename) laag in vergelijking met de overige polders door de grote

bijdrage van kwel aan de totale waterafvoer en aan de P-vracht. In het bodemprofiel kan de fosfaat-toestand echter ook op grotere diepte nog hoog zijn. In de veenlagen is de bindingscapaciteit voor P hoog waardoor de beschikbaarheid beperkt is. Door het opmengen met zand is de bindingscapaciteit van de bodem relatief laag en in combinatie met vrij intensieve agrarische beheer kan de fosfaat-beschikbaarheid tot de grondwaterstand vrij hoog zijn (Figuur 3.4).

Door de ijzerrijke kwel heeft de waterbodem een grote potentie om fosfaat te binden. Door de hoge debieten gebeurt dit naar verwachting slechts beperkt. Het vergroten van het natte oppervlak (meer sloten en smallere percelen) zal enerzijds leiden tot lagere debieten en meer vastlegging van P in de slootbodem en anderzijds tot hogere grondwaterstanden en het beperken van bodemdaling.

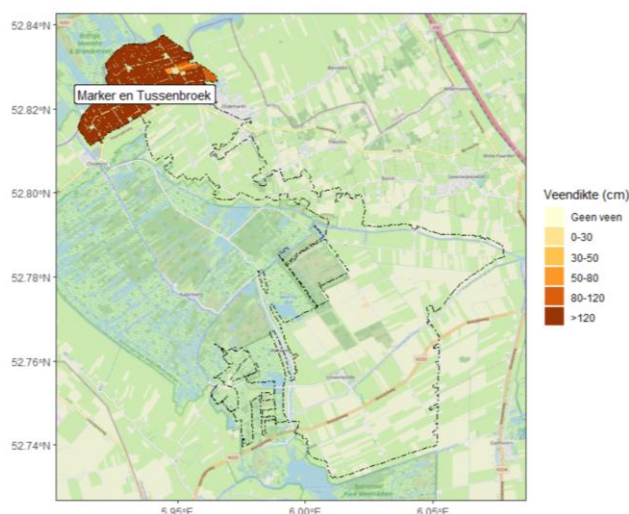
De gemodelleerde toename in gewasdiversiteit is bij de diverse maatregelpakketten en peilfixatie maximaal 5% (in 2050). Dit geeft ruimte om met ondernemers maatregelen te concretiseren die bodemdaling remmen zonder dat dit hoeft te leiden tot (significante) toenames in natschade. Bij peilfixatie geldt wel dat dit percentage hoger zal worden wanneer grondwaterstanden nog dichterbij maaiveld komen te liggen (na 2050).

Gebiedsspecifieke onzekerheden

- Uit het veldonderzoek blijkt dat de veenlagen dunner en zandiger zijn dan op basis van de veendiktekaart verwacht mag worden. Omdat de veendiktekaart is gebruikt voor het doorrekenen van de scenario's zou de daadwerkelijke effectiviteit van de klimaatmaatregelen op bodemdaling en CO₂-emissie veel kleiner kunnen zijn dan in deze studie is berekend. Hier zou meer inzicht in kunnen worden verkregen door de veendiktekaart te actualiseren en door op een aantal percelen bodemdaling en CO₂ metingen uit te voeren.
- De grote kweldruk in de polders heeft een grote invloed op de modelresultaten, terwijl deze nooit is gemeten. De gebruikte kweldruk is het resultaat van de studie van Witteveen+Bos om de waterbalans van het SOBEK-model voor deze polders kloppend te krijgen en is onderbouwd middels chloridebalansen. Het advies is om de kwelflux door geohydrologen te laten bepalen. Het bepalen de kweldruk in de polders is van meerwaarde voor het bepalen van effecten van klimaatmaatregelen, maar is met name van meerwaarde voor het beter begrijpen van het watersysteem van de Wieden en Weerribben.

10.3 Klimaatmaatregelen in Marker- en Tussenbroek

Marker -en Tussenbroek is de meest noordelijke polder van het huidig onderzoeksgebied (Figuur 10.3).



Figuur 10.3 Veendiktekaart van Marker- en Tussenbroek. De zwarte rand is de omlijnings van het gehele onderzoeksgebied.

Kenmerken van Marker- en Tussenbroek

Marker- en Tussenbroek onderscheidt zich van de overige polders door de aanwezigheid van de dikste veenpakketten (veenlagen van >120cm, Figuur 3.1 en Figuur 10.3) met hoge organische stofgehalten (>20%, Figuur 3.2). Op zichzelf verloopt bodemdaling hierdoor sneller, en zijn CO₂-emissies hoger. Dit wordt echter deels gecompenseerd door de relatief hoge grondwaterstanden (zie Figuur 3.6 voor de GLG en Figuur S2-6 in Bijlage II voor de GHG), ondiepe droogleggingen (Figuur S2-4 en Figuur S2-5 in Bijlage II) en de aanwezigheid van een dun (<40cm) kleidek, die afloopt van het noordwesten naar het zuidoosten (Figuur S2-3 in Bijlage II). Hierdoor komt zuurstof moeilijker bij het veen en wordt de afbraak vertraagd. De agrarische bedrijfsvoering lijkt ook aangepast te zijn aan de nattere condities. Dit is te zien aan dat alleen grasland wordt verbouwd (Figuur 3.7) en de lage fosfaattoestand van de toplaag van de bodem (Figuur 3.4). In de diepere bodemlagen is de fosfaat beschikbaarheid zeer laag. Daarnaast is het oostelijke deel van Marker- en Tussenbroek in het N2000-beheerplan aangewezen om als een natuurlijke verbindingzone te gaan fungeren tussen de Weerribben en de Rottige Meenthe (Provincie Overijssel, 2019).

Passende klimaatmaatregelen

Gezien de aanwezigheid van de dikste veenlagen met het hoogste organische stofgehalte liggen maatregelen die bodemdaling (uiteindelijk) stoppen het meest voor de hand in vergelijking met de overige polders. Dit zijn maatregelen als peilfixatie en natte teelten, maar mogelijk ook onderwaterdrainage en drukdrainage. Het Nationaal Kennisprogramma Bodemdaling geeft aan dat er een mogelijkheid is dat drukdrainage bodemdaling stopt in het geval dat er een kleidek aanwezig is, maar dat dit in de praktijk nader moet worden onderzocht (Nationaal Kennisprogramma Bodemdaling, 2020). In het huidige onderzoek is onderwaterdrainage vooralsnog beschouwd als een remmende maatregel. Bij natte teelten zijn win-win situaties misschien mogelijk in combinatie met het voornemen om een deel van de polder in te richten als een verbindingzone tussen de Weerribben en de Rottige Meenthe. Mogelijk kunnen natte teelten op een dusdanig manier worden gekozen dat het bijdraagt aan de doelstelling om een geschikter habitat te creëren voor de grote karekiet en de grote vuurvinder. Er zijn voor natte teelten echter nog veel onzekerheden over teeltmethoden, bemestingsstrategieën, afzetmarkten en verdienmodellen bij natte teelt, waarvan het advies is om dit gezamenlijk met ondernemers te verkennen mocht deze maatregel nader worden onderzocht.

Inzake de voorgestelde slootpeilverhogingen geldt dat de polder al in de uitgangssituatie grotendeels voldoet aan de voorgestelde slootpeilverhogingen van maatregelpakketten 1 en 2 (circa 10% van de percelen met een drooglegging van <60 of <40cm -mv, Tabel 4-2). Bij slootpeilverhoging optie 3 kunnen de slootpeilen wel worden verhoogd (circa 26cm) en wordt traditionele onderwaterdrainage breder toepasbaar (zie Figuur 4.13). In de huidige situatie is onderwaterdrainage vooral in de vorm van drukdrainage toepasbaar, omdat hier onafhankelijk van het slootpeil gestuurd kan worden op de grondwaterstand.

Gemodelleerde effecten van de klimaatmaatregelen

Het effect van de remmende maatregelen op de gemodelleerde bodemdaling verschilt erg tussen de maatregelpakketten 3 (remming van 39%) en maatregelpakketten 1 en 2 (remming van 80-85%). De gemodelleerde reductie in CO₂-emissie is van dezelfde orde grootte (Figuur 5.1 en Figuur 5.2). De lagere effectiviteit van maatregelpakket 3 in vergelijking met de andere twee maatregelpakketten lijkt in eerste instantie tegenstrijdig, omdat hier de slootpeilen het sterkst verhoogd worden. De lagere effectiviteit komt echter doordat onderwaterdrainage in maatregelpakket 3 door de ondiepe droogleggingen vaker in de vorm van traditionele onderwaterdrainage toepasbaar is. Onderwaterdrainage heeft op basis van de pilotresultaten (Bijlage III) die in het model zijn ingebouwd een lagere effectiviteit dan drukdrainage. Bij maatregelpakket 3 kan er echter ook voor gekozen worden om traditionele onderwaterdrainage te

vervangen met drukdrainage. Naar verwachting wordt hierdoor de grootste reductie in bodemdaling en CO₂-emissie behaald.

Nadelen van drukdrainage zijn dat het duurder is (circa 1000 euro per hectare extra, zie Nationaal Kennisprogramma Bodemdaling, 2020) en dat er middels pompen actief gunstige grondwaterstanden worden verkregen in plaats van dat het grondwater in balans staat met het slootpeil. Pompen vergen onderhoud en controle. Het past daarom over het algemeen bij een meer intensief veehouderij systeem (PBL, 2016).

Peilfixatie zal naar verwachting nog een lange tijd bodemdaling remmen (tot na 2100), ook als het wordt gecombineerd met slootpeilverhoging (Figuur 5.4). Wel zal peilfixatie uiteindelijk leiden tot het stoppen van bodemdaling en het permanent beschermen van relatief dikke veenlagen, vooral als het wordt gecombineerd met één of enkele vernattingsmaatregelen (zie Figuur 5.4). Voor een periode van 30 jaar (2020-2050) geldt een gemodelleerde reductie in bodemdaling van 14-28% ten opzichte van het referentie scenario, waarbij het hogere percentage geldt wanneer peilfixatie wordt gecombineerd met slootpeilverhoging (zie Figuur 5.3). De corresponderende remming in CO₂-emissie is nagenoeg gelijk (Figuur S4-1).

Bij de toepassing van natte teelten is de verwachting dat bodemdaling stopt en geen CO₂ meer vrijkomt door veenoxidatie. Wel wordt de emissie van lachgas en methaan relevant. Een zeer groffe indicatie is dat natte teelten in deze polder de broeikasgasemissie (in CO₂-equivalent) met 70% kan remmen (Figuur 4.15). Er mist echter nog veel proceskennis over met name de lachgas -en methaanuitstoot bij natte teelten, waardoor dit resultaat zeer indicatief is. Het wordt aanbevolen om de emissies van deze broeikasgassen te meten in eventuele pilotprojecten. Daarnaast is bemesting een heikel punt bij natte teelten. Om een rendabel gewas te krijgen zijn extra nutriënten nodig. Vanuit het perspectief van waterkwaliteit moet voorkomen worden dat deze nutriënten in het watersysteem terecht komen. Ook dit vergt nader onderzoek.

De maatregelpakketten die zich richten op het remmen van bodemdaling leiden tot een gemodelleerde toename van 17-38% in de waterafvoer van landbouwpercelen naar het oppervlaktewater van de polder (afhankelijk van het maatregelpakket). De extra aanvoer van water via drainage (door het verlagen van de GHG in de winter) lijkt hierbij een belangrijke variabele te zijn. De agrarische P-vracht neemt volgens het model afhankelijk van het maatregelpakket toe met 24-55%. Voor peilfixatie geldt dat de gemodelleerde waterafvoer van landbouwpercelen naar het water van de polder toeneemt met 1% (voor 2050, zie Figuur 7.4), en de P-vracht naar het oppervlaktewater toeneemt met 14-22% (voor 2050), waarbij het hogere percentage geldt wanneer peilfixatie wordt gecombineerd met slootpeilverhoging.

Het percentage waarmee de P-vracht naar het oppervlaktewater wordt verhoogd is hoog omdat de absolute agrarische P-vracht in de uitgangssituatie relatief laag is. Door de natte omstandigheden wordt het netto neerslagoverschot vooral via ondiepe stroombanen richting het oppervlaktewater getransporteerd. Met deze afvoer wordt ook fosfaat uit bodem en bemesting naar het oppervlaktewater getransporteerd. Bij hogere peilen en ondiepere stroombanen neemt de P-concentratie toe omdat in de toplaag de fosfaattoestand hoger is door het agrarisch gebruik. De fosfaattoestand van de bodem is echter in de toplaag van de bodem vrij laag en daaronder zeer laag waardoor de P-verliezen naar het oppervlaktewater beperkt zijn (Figuur 3.4). Daarnaast is de kwel bijdrage klein. De relatief sterke toename is in absolute zin beperkt.

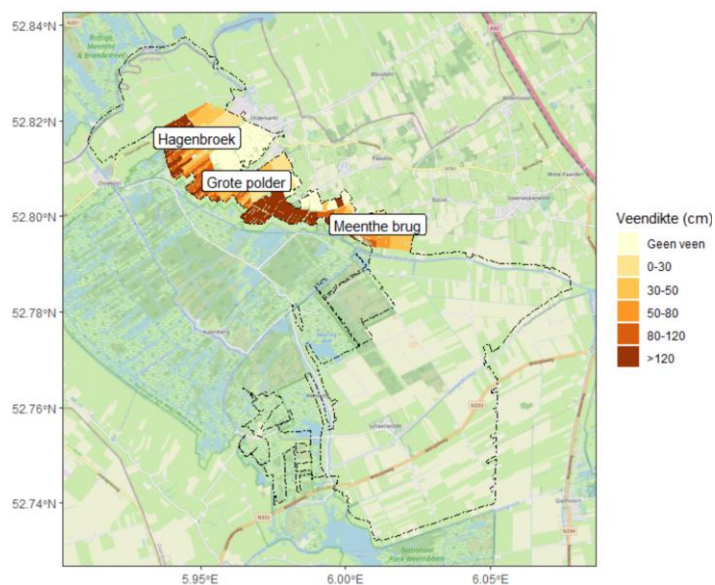
Het gemodelleerde effect van de maatregelpakketten die zich richten op het remmen van bodemdaling op de gewasgeving is vrij laag (maximaal +5%). Bij peilfixatie ligt dit percentage hoger (+14-22% in 2050), waarbij het hogere percentage geldt voor de combinatie van peilfixatie met slootpeilverhoging. Het percentage zal bij peilfixatie hoger worden naarmate de grondwaterstanden nog hoger komen te liggen (na 2050). De grotere toename van natschade bij peilfixatie in deze polder in vergelijking met de lager gelegen polders komt omdat de grondwaterstanden in de uitgangssituatie al hoger staan. Peilfixatie leidt hierdoor sneller tot natschade en gepaarde extensivering.

Gebied-specifieke onzekerheden

- In het model zijn MIPWA-kwelfluxen gebruikt. Op basis hiervan is Marker- en Tussenbroek gemiddeld gezien een infiltratiegebied. Witteveen+Bos is op het moment bezig om de kwelfluxen voor deze polder te verhogen om hun waterbalans rond te krijgen, maar aangepaste kwelfluxen kunnen op dit moment niet verder worden onderbouwd (er kunnen geen chloridebalansen opgesteld worden zoals bij de lager gelegen polders). Kweldruk kan ook een restrictie geven in de toepassing van onderwaterdrainage. Geadviseerd wordt om de kweldruk te meten.
- Het verschil in effectiviteit is in het huidige model erg groot tussen traditionele onderwaterdrainage en drukdrainage. Kennis over de effectiviteit van drukdrainage, vooral in het geval van klei-op-veen (van Agtmaal et al. 2019), is beperkter dan bij traditionele onderwaterdrainage. Het advies is daarom de verschillen tussen traditionele onderwaterdrainage en drukdrainage niet te zwaar te interpreteren en nader te onderzoeken.
- Een deel van de polder is in het N2000 beheerplan aangewezen als een verbindingszone tussen de Weerribben en de Rottige-Meenthe. Binnen dit onderzoek kwam naar voren dat er een dunne kleilaag in de polder aanwezig is. Het advies is om na te gaan of hier rekening mee is gehouden bij het huidige natuurontwikkelingsplan en of dit gevolgen heeft voor bijbehorende inrichtingsmaatregelen.

10.4 Klimaatmaatregelen in Meenthebrug, Grote polder en Hagenbroek

Meenthebrug, Grote polder en Hagenbroek liggen tussen de laag gelegen polders en Marker -en Tussenbroek in (Figuur 10.4).



Figuur 10.4 Veendiktekaart van Meenthebrug, Grote polder en Hagenbroek. De zwarte rand is de omlijning van het gehele onderzoeksgebied.

Kenmerken van de polders

De hoger gelegen polders Meenthebrug, Grote polder en Hagenbroek onderscheiden zich met name door het verschil in kansrijkheid binnen de polders. Een deel van de polders (noorden) bestaat uit de uitlopers van een pleistocene stuwwal, waar humuspodzol -en/of zandgronden liggen (Figuur 3.1 & Figuur 10.4). In het lager gelegen zuidelijk deel dat grenst aan de Weerribben zijn wel veenpercelen aanwezig. Het verschil tussen noord en zuid is ook te zien in de kweldruk. Het hoger gelegen noordelijk

deel bestaat uit een infiltratiegebied en het lager gelegen zuidelijk deel uit een kwelgebied. In het lager gelegen deel staan de grondwaterstanden hoger en zijn de droogleggingen ondieper. Op veel veenpercelen komt echter het grondwater (nog) niet tot de veenlaag; op 66% van de veenpercelen is de grondwaterstand lager dan de veendikte. Het agrarisch management zit tussen de laag gelegen polders en Marker- en Tussenbroek in; er is minder akkerbouw in vergelijking met de laag gelegen polders maar er wordt lokaal wel maïs op veen geteeld. Door de kerende groundbewerking die hierbij hoort wordt bodemdaling lokaal versneld. Verder is een deel van de polders aangewezen als 'nog te onderzoeken uitwerkingsgebieden' in het N2000-beheerplan ("Hagenbroek, Ossenzijl" en "Meenthebrug").

Passende klimaatmaatregelen

Voor de maatregelpakketten die zich richten op het remmen van bodemdaling geldt dat in Meenthebrug en de Grote polder slootpeilen al in het eerste maatregelpakket verhoogd zouden moeten worden (waar circa 10% van de percelen een drooglegging krijgt van <60cm -mv). In Hagenbroek is dit in de uitgangssituatie bereikt en kan het slootpeil pas significant worden verhoogd bij maatregelpakket 3. Door of te dunne veenlagen, een te hoge kweldruk en/of grondwaterstanden die te diep onder de veenlaag liggen is onderwaterdrainage slechts sporadisch toepasbaar.

Peilfixatie is in het geval van deze polders gunstig omdat het geen tot nauwelijks een effect heeft op de percelen waar geen veen ligt. Deze zijn hoger gelegen en zullen naar verwachting geen last hebben van de effecten van peilfixatie. Het toepassen van natte teelten is mogelijk op de zuidelijk gelegen veenpercelen. Bij positieve ervaringen met natte teelten in Marker -en Tussenbroek en Wetering-West (bij eventuele pilots) is dit, door de lage ligging in combinatie met dikkere veenlagen, een logisch gebied om naar op te schalen.

Gemodelleerde effecten van de klimaatmaatregelen

Voor de maatregelpakketten die zich richten op het remmen van bodemdaling is de berekende beperking van de bodemdaling 10-32%, afhankelijk van de polder en het maatregelpakket. De maatregelpakketten zijn effectiever naarmate de slootpeilen meer worden verhoogd; maatregelpakket 3 heeft hiermee de hoogste effectiviteit. Het effect op de daling in CO₂-emissie is van dezelfde orde grootte als bodemdaling. Voor peilfixatie geldt dat over een periode van 30 jaar (2020-2050) peilfixatie op zichzelf bodemdaling met 4-6% remt (afhankelijk van de polder zie Figuur 5.3). Als peilfixatie wordt gecombineerd met slootpeilverhoging is de effectiviteit groter (14-22%). De remming van de CO₂-emissie is nagenoeg gelijk (Figuur S4-1). Peilfixatie is echter niet in elk peilgebied zinvol, omdat in sommige peilgebieden weinig veen ligt. Peilfixatie lijkt, geordend van hoog naar laag, het meest zinvol in Peilgebiednummer 638 (Hagenbroek) > Peilgebiednummer 558 (Meenthebrug) > Peilgebiednummer 1866 (Grote Polder) > Peilgebiednummer 1565 (Hagenbroek). Dit is gebaseerd op de gemodelleerde gemiddelde veendiktes bij peilfixatie over de tijd (Figuur 5.4). Eventueel kan er voor gekozen worden om een aantal peilgebieden te combineren (eventueel met het peilgebied van Marker- en Tussenbroek) en in dit vergrote peilgebied peilfixatie toe te passen. Hierdoor ontstaat er een natuurlijk gradiënt in vernatting, met corresponderende verschillen in agrarisch management (natte teelt in de laagst gelegen delen, extensieve veehouderij in de wat hoger gelegen delen, reguliere veehouderij op de hoog gelegen zandpercelen).

De maatregelpakketten die zich richten op het remmen van bodemdaling leiden tot een gemodelleerde toename van 6-13% in de waterafvoer van landbouwpercelen naar het oppervlaktewater van de polder. De gemodelleerde P-vracht stijgt met 16-42%. Beide toenames zijn afhankelijk van het maatregelpakket en de polder. Voor peilfixatie geldt een hogere percentuele toename. Voor de waterafvoer is een toename van 3-6% berekend wanneer alleen peilfixatie wordt doorgevoerd, welke verhoogd wordt tot 8-16% wanneer peilfixatie wordt gecombineerd met slootpeilverhoging. Voor de P-vracht wordt een toename van 9-12% bij peilfixatie en 21-61% bij peilfixatie in combinatie met slootpeilverhoging berekend. Deze waarden zijn afhankelijk van de polder en gelden voor het jaar 2050.

De modelresultaten geven aan dat er geen noemenswaardige toename in gewasderiving verwacht wordt bij de gehanteerde klimaatmaatregelpakketten. Uiteindelijk zal bij peilfixatie de natschade wel toenemen (verwachting na 2050), wat zal leiden tot een geleidelijke extensivering.

10.5 Remmen van bodemdaling via NKG en perceelsgrootte

Stimuleren van permanent grasland en niet-kerende grondbewerking

In het onderzoeksgebied wordt lokaal op veengrond maïs geteeld. In het onderzoeksgebied worden ook akkerbouwgewassen als aardappelen, bieten, maïs en tarwe verbouwt maar dit beperkt zich tot de zandige gronden (Figuur 3.7). De teelt van maïs heeft in een negatieve invloed op bodemdaling omdat grondbewerking nodig is voor de teelt (gras scheuren, frezen, eventueel in combinatie met ploegen). Dat deze grondbewerking leidt tot meer bodemdaling komt ook naar voren in de gesprekken met de ondernemers gedurende het veldwerk. Het advies is daarom om permanent grasland en niet-kerende grondbewerking te stimuleren. Een concreet voorbeeld van niet-kerende grondbewerking is het stimuleren van strokenfrees bij maïsteelt (lijkt een veelbelovende methode, zie Deru & Prins, 2014; Wesselink et al. 2019). Deze methodiek lijkt bodemdaling te beperken zonder negatieve consequenties te hebben op gewasopbrengst, en lijkt goed te combineren met vernattingsmaatregelen.

Verkleinen van percelen

Voor de agrarische bedrijfsvoering is een groot perceel handig door de grotere werkgang. Het zorgt echter ook voor een minder grote invloed van sloot op de grondwaterstanden in het perceel; de grondwaterstand komt onder droge omstandigheden holler te liggen (laag in het midden van het perceel). Veen wordt hierdoor sneller afgebroken. Om de invloed van de sloot op de grondwaterstand te vergroten is het advies om ondernemers te stimuleren de percelen smaller te maken wanneer er relatief weinig sloot ligt ten opzichte van het areaal (e.g. lage invloed van de sloot op de grondwaterstanden door de aanwezigheid van weinig sloten of door grote percelen). Sloten, of watervoerende greppels kunnen worden gegraven om de percelen te verkleinen, waardoor de grondwaterstanden minder hol komen te liggen. Op welke percelen dit een logische maatregel zou zijn is geïllustreerd in Figuur 4.14. Hieruit blijkt verrassend genoeg dat deze maatregel effectief lijkt te zijn bij zo goed als alle percelen in Marker- en Tussenbroek. Gezien de hoeveelheid veen die daar ligt is het advies om deze optie voor te leggen aan de ondernemers in Marker- en Tussenbroek. Als rationeel hebben wij in dit onderzoek de natte omtrek van het perceel gedeeld door het areaal om een beeld te krijgen van percelen waar de maatregel gunstig is om te nemen. Als simpelere indicator kan ook de maximale breedte van een perceel worden gebruikt. Dit doet Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden bij het verlenen van vergunning bij het dempen van sloten in veengebieden, waarbij in het kader van bodemdaling vergunningen voor slootdemping over het algemeen niet worden verleend wanneer percelen daardoor breder dan 50–60 meter worden (Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden, 2000). Ter indicatie zijn vrijwel alle percelen in het huidige onderzoeksgebied breder dan 60 meter.

10.6 Impact van verhoogde P-vracht

Impact van verhoogde fosfaatvrachten op Wieden en Weerribben

Uit de resultaten blijkt dat het toepassen van de klimaatmaatregelen naar verwachting leidt tot een verhoging van de P-vracht naar het oppervlaktewater in de polder. Door nattere omstandigheden worden stroombanen oppervlakkiger en wordt door de grotere interactie met bodemlagen die door het (historische) agrarische management zijn opgeladen met fosfaat, de fosfaatconcentratie in het uitspoelend water hoger. Gezien de natuurdoelstellingen voor de N2000 gebieden Wieden en

Weerribben is het belangrijk om te bepalen welke P-vracht acceptabel is in de balans tussen natuur- en klimaatdoelstellingen. De impact van verhoogde P-vrachten op het natuurgebied ligt niet in de scope van het huidig onderzoek, maar de resultaten zijn op een dusdanige manier gepresenteerd dat een koppeling met het SOBEK-model van Witteveen + Bos mogelijk is. Met behulp van dit model kan een inschatting worden gemaakt of een fosfaatvracht negatieve consequenties heeft voor de N2000 gebieden Wieden en Weerribben. Voordat er een koppeling wordt gemaakt met het SOBEK-model wordt aanbevolen om een brede geohydrologische studie uit te voeren. De exacte kweldruk blijft (in met name de laag gelegen polders) onzeker, en heeft een grote invloed op de modelresultaten. Mogelijk zorgen vernattingsmaatregelen voor een afname van de kweldruk en daarmee de fosfaatvracht naar de polders, wat in deze studie niet is onderzocht. Voor de N2000 gebieden is het verder relevant dat vernattingsmaatregelen theoretisch kunnen leiden tot een afname van wegzijging vanuit de N2000 gebieden. Hierdoor zal er minder basenrijk water worden ingelaten, wat een groot effect kan hebben op habitattypen die gevoelig zijn voor de basenhuishouding. Het advies is om de resultaten van het huidig onderzoek te combineren met de resultaten van een geohydrologisch onderzoek die in deze punten inzicht verschaft, en deze resultaten vervolgens te koppelen aan het SOBEK-model van Witteveen+Bos om het potentiële effect van klimaatmaatregelen op de N2000 gebieden te bepalen.

Het graven van sloten als een mogelijkheid voor natuurlijke defosfatering

Een negatieve impact van een verhoogde fosfaatvracht door de klimaatmaatregelen op het natuurgebied hoeft niet direct te betekenen dat de maatregelen niet toegepast kunnen worden. Verschillende defosfateringsopties zouden verkend kunnen worden (zie bijvoorbeeld Cusell et al., 2013; Cusell & Mandemakers, 2017). Een defosfateringsmogelijkheid die er in het kader van het huidig onderzoek eruit springt is het natuurlijk defosfateren in de lager gelegen polders middels het vergroten van het oppervlak aan sloten. Het smaller maken van percelen is in het huidig onderzoek als maatregel geopperd om bodemdaling te remmen (grondwaterstanden komen hiermee minder hol te liggen), maar deze maatregel wordt ook genoemd in voormalig uitgevoerde onderzoeken als een natuurlijke defosfaterings mogelijkheid. In de laag gelegen polders is namelijk een sterke kweldruk aanwezig, wat veel ijzer met zich meebrengt. Dit leidt tot een hoge fosfaat bindingcapaciteit van de slootbodems, wat te zien is aan de hoge Fe:PO₄ ratio's in het bodemvocht van de slootbodems (Figuur 8.1). Door de hoge debieten heeft fosfaat echter niet de mogelijkheid om te bezinken en/ of om aan de slootbodem te binden, waardoor het meeste fosfaat naar de N2000 gebieden stroomt. Als er meer slootbodems aanwezig waren, door het graven van sloten, is de verwachting dat meer fosfaat in het sediment zal worden gebonden. Door het graven van sloten zou het daarmee theoretisch mogelijk zijn om het effect van de klimaatmaatregelen te versterken én de fosfaatvracht naar de N2000 gebieden te verminderen/constant te houden én de toevoer van basenrijk water naar de N2000 gebieden te behouden. Deze optie zal echter nader moeten worden onderzocht, inclusief het effect op de kwelstromen, om deze argumenten te onderbouwen.

10.7 Onzekerheden

Naast de beschreven onzekerheden voor de laag gelegen polders en Marker- en Tussenbroek zijn er ook een aantal onzekerheden die gelden voor het hele onderzoeksgebied. Deze zijn als volgt:

- **Validiteit MIPWA model (kweldruk):** In het huidig onderzoek is gebruik gemaakt van modelresultaten van MIPWA (hydrologisch model), tenzij op basis van gebiedspecifiek onderzoek betere waarden aanwezig waren. Hierdoor kunnen gebruikte hydrologische parameters verschillen van de realiteit. Dit lijkt in ieder geval het geval te zijn bij de kweldruk, die door Witteveen+Bos sterk is verhoogd in de laag gelegen polders (in dit onderzoek zijn de aangepaste waarden gebruikt) en mogelijk ook in Marker- en Tussenbroek aangepast zou moeten worden.

- **Invloed klimaatmaatregelen op de kweldruk:** In het huidige onderzoek is aangenomen dat de kweldruk constant blijft na het toepassen van de klimaatmaatregelen. Waarschijnlijk wordt de kweldruk lager doordat grondwaterstanden door vernatting hoger komen te staan, wat een gevolg heeft voor de fosfaatvrucht naar de polders. Verder kunnen vernattingsmaatregelen zorgen voor verminderde wegzijging vanuit de N2000 gebieden en daarmee een verminderde inlaat van basenrijk oppervlaktewater. Dit is zeer relevant voor habitattypen die gevoelig zijn voor de basenhuishouding.
- **Bodemdaling en CO₂-emissie:** De gebruikte empirische “van den Akker functies” om bodemdaling en CO₂-emissie te schatten zijn gebaseerd op data van pilotlocaties die sterk verschillen van het huidige onderzoeksgebied, en nemen geen variabelen mee als veentype, temperatuur en vochtgehalte. Hierdoor is er waarschijnlijk een verschil tussen de gemodelleerde bodemdaling/CO₂ emissie en de werkelijke waarden.
- **Methaan -en lachgasemissies:** Op het moment zijn er geen betrouwbare formules beschikbaar die gebruikt kunnen worden om de totale broeikasgasemissie bij klimaatmaatregelen te berekenen (CH₄, N₂O). Emissies van lachgas en methaan worden relevanter in de totale broeikasgasemissie naarmate gebieden natter worden. Dit is vooral belangrijk bij natte teelt (daarom niet doorerekend).
- **Verandering ondiepe uitspoeling bij vernatting:** Het huidige bodem emissiemodel houdt geen rekening met drukverschil tussen grondwaterstanden en slootpeilen maar wordt gedreven door de grondwaterstanden. Bij vernattingsmaatregelen wordt het drukverschil tussen het hoogste grondwaterstand en slootpeil kleiner wanneer de peilen hoger komen te liggen. In dit geval wordt de hoeveelheid extra water wat via ondiepe uitspoeling het perceel uitstroomt, en daarmee de fosfaatvrucht, afhankelijk van de resterende bergingscapaciteit van de bodem,, mogelijk overschat. Dit zou in een vervolgstudie nader uitgewerkt kunnen worden.
- **Effectiviteit klimaatmaatregelen:** Veel klimaatmaatregelen zitten op dit moment vooral in de pilotfase (bijvoorbeeld natte teelt en onderwaterdrainage), en er wordt nog veel kennis ontwikkeld over de effectiviteit. De huidige studie maakt gebruik van de kennis die tot nu toe is opgedaan, maar over de tijd zal er waarschijnlijk aanvullende informatie beschikbaar komen waar welke maatregelen het effectiefst toe te passen zijn.
- **Relatie veenmineralisatie en P belasting oppervlaktewater:** Een aantal studies geven aan dat de afname in veenmineralisatie er mogelijk toe leidt dat de P belasting naar het oppervlakte-water in de polder afneemt (Bakel et al., 2008; Nationaal Kennisprogramma Bodemdaling, 2020; Hendriks & van den Akker, 2012). Het huidige model houdt hier geen rekening mee omdat de gemeten beschikbaarheid van fosfaat en beschikbare reserves als uitgangspunt zijn genomen, waardoor de P-vracht naar het oppervlaktewater in de polder mogelijk wordt overschat. Het is echter niet de verwachting dat dit een grote invloed heeft op de conclusies van het huidige onderzoek. Bij veenmineralisatie komt er naast fosfaat ook ijzer vrij, waar fosfaat weer (in de bodem zelf of in de waterbodem) aan kan binden (zie o.a. Smolders et al., 2019). Ook wordt in Hendriks & van den Akker. (2012) beschreven dat voor het bepalen van de P-vracht naar het oppervlaktewater een vermindering van P-mineralisatie van veen door vernatting van ondergeschikt belang is in vergelijking met andere effecten van vernatting.
- **Klimaatverandering:** Effecten van klimaatverandering zijn niet in het huidige onderzoek meegenomen. Waarschijnlijk leidt dit tot een onderschatting van de bodemdaling -en CO₂-emissies op lange termijn, omdat verwacht wordt dat door klimaatverandering drogere zomers over het algemeen leiden tot het dieper wegzakken van het grondwater en een verhoogde snelheid van veenafbraak. Ook dit vergt nader onderzoek naar het afleiden van rekenregels voor de rol van vocht en temperatuur op veenmineralisatie.
- **Interpretatie modelresultaten:** De huidige gebruikte conceptuele/empirische modellen dienen als verkenning van maatregelen. De absolute waarden moeten ook als dusdanig geïnterpreteerd worden.

11 Conclusies

Uit het onderzoek naar kansrijke klimaatmaatregelen en het effect op de fosfaatverliezen naar het oppervlaktewater ten oosten van de Weerribben worden de volgende conclusies getrokken.

Toepasbaarheid klimaatmaatregelen

- De effectiviteit van klimaatmaatregelen verschilt sterk binnen het onderzoeksgebied. Dit komt met name door verschillen in veendiktes, organische stofgehaltes van het veen, afstand van de grondwaterstand tot de veenlaag, de fosfaattoestand van de bodem en het waterbeheer.
- Het handelingsperspectief is het grootst in Marker- en Tussenbroek, als gevolg van dikke veenlagen en hoge organische stofgehaltes, gevolgd door de (zuid)westelijke delen van de tussenpolders en Wetering-West. Het handelingsperspectief is relatief laag in de laag gelegen polders Halfweg, Gelderingen en Wetering-Oost door slechts dunne en zandige veenlagen.
- Afhankelijk van deze verschillen zijn het verhogen van slootpeilen, verkleinen van het peilgebied, de toepassing van onderwaterdrainage en het verkleinen van percelen middels het graven van sloten/watervoerende greppels kansrijke maatregelen om bodemdaling te remmen. Het verkleinen van percelen heeft mogelijk ook een positief effect op de waterkwaliteit door lagere stroomsnelheden en sedimentatie van aan deeltjes gebonden P. Peilfixatie is in de polders met een groot handelingsperspectief een kansrijke maatregel om bodemdaling te stoppen wanneer het gecombineerd wordt met actieve vernatting, en zal gepaard gaan met geleidelijk extensivering van het landbouwsysteem.
- Natte teelten lijken kansrijk in het grotendeels naar natuur omgevormde Wetering-West als inrichtingsmaatregel (verlagen fosfaattoestand tot geschikte waarden voor natuurontwikkeling), en in gebieden met dikke veenlagen en hoge organische stofgehaltes voor commerciële teelt (Marker- en Tussenbroek). De effecten op de totale broeikasgasemissie en nutriëntverliezen vragen nader onderzoek en zijn mede afhankelijk van de teeltmethodiek/bemesting.

Effect van klimaatmaatregelen

- Afhankelijk van de maatregelpakketten neemt de berekende bodemdaling af met 9-33% ten opzichte van het referentie scenario. Een reductie van 33% komt overeen met een berekende CO₂-emissie reductie van 145.000 ton CO₂-equivalenten over 30 jaar tijd. In sommige polders kan bodemdaling (op termijn) worden gestopt middels peilfixatie in combinatie met actieve vernatting.
- Remmende maatregelen zorgen naar verwachting slechts tot een (zeer) beperkte toename in gewasgeving. Peilfixatie zal wel leiden tot een geleidelijke extensivering van de landbouw.
- Door de klimaatmaatregelen zal de berekende waterafvoer slechts beperkt toenemen.
- De fosfaatvracht van landbouwpercelen naar het oppervlaktewater in de polders neemt naar verwachting toe. In de laaggelegen polders is de relatieve toename beperkt door de grote invloed van kwel, maar is de absolute toename hoog. Het is echter mogelijk dat de kweldruk (en daarmee de fosfaatvracht via kwel) na vernatting afneemt, en dat de toename in de fosfaatvracht in het huidige onderzoek wordt overschat. Dit vereist nader onderzoek. In Marker- en Tussenbroek is de relatieve toename hoog. Door de lage fosfaattoestand, en de toepassing van onderwaterdrainage zal de absolute toename slechts beperkt zijn.

Additionele klimaatmaatregelen

- Door grote percelen te versmallen middels het graven van sloten/watervoerende greppels komen grondwaterstanden minder hol te liggen en wordt het effect van de klimaatmaatregelen versterkt. In de laag gelegen polders zorgt dit naar verwachting ook voor natuurlijke defosfatering door de vastlegging van fosfaat in de onderwaterbodem. Pilots in de laag gelegen polders kunnen hier extra inzicht in verschaffen.
- Het stimuleren van niet-kerende grondbewerking/permanent grasland op veengronden zal bodemdaling extra remmen.

12 Aanbevelingen

Op basis van de onderzoeksresultaten en onzekerheden worden de volgende aanbevelingen gedaan:

- **Metten van kwelfluxen:** Gezien de grote invloed van kwel in de modelresultaten en het watersysteem van de N2000-gebieden, gecombineerd met de huidige onzekerheid van de exacte waarden, is het advies om een geohydrologische studie uit te voeren. Het advies is om hierin (i) de kwelfluxen te bepalen, met name in de laag gelegen polders Halfweg, Gelderingen en Wetering en de hoger gelegen polder Marker- en Tussenbroek, (ii) kwel te analyseren op fosfaatconcentraties en (iii) de invloed van de klimaatmaatregelen op de kweldruk te bepalen wanneer deze concreter worden uitgewerkt.
- **Metten van broeikasgasemissies:** Het meten van broeikasgasemissies (CO_2 , CH_4 en N_2O) en bodemdaling in het gebied om een goed beeld te krijgen van de huidige situatie. De verwachting is dat de metingen sterk kunnen variëren van de huidige empirische vergelijkingen, met name in de laag gelegen polders die sterk verschillen in veendikte en organisch materiaal in vergelijking met de gebieden waarvoor de gebruikte empirische relaties zijn opgesteld.
- **Opstellen watersysteemanalyse:** Middels een gedetailleerde watersysteemanalyse in combinatie met een water -en stoffenbalans wordt het mogelijk om het effect van klimaatmaatregelen op de water aan -en afvoer en de verandering in de aan - en afvoer van nutriënten te onderzoeken.
- **Pilots als eerste stap:** Met name bij maatregelen met hoge kosten (economisch en/of sociaal) met onzekerheden over de effectiviteit wordt aanbevolen om eerst pilots op te zetten voordat ze grootschalig worden geïmplementeerd. Naast een betere inschatting van de effectiviteit en kansrijkheid in het gebied creëert dit (als het in goed overleg wordt gedaan) ook meer draagvlak. Een aantal pilotsuggesties zijn:
 - Natte teelt als inrichtingsmaatregel in Wetering-West. Er wordt hier natuur ontwikkeld op voormalig landbouwgrond, waarbij het graslandbeheer gericht is op verschraling en inrichten van moeras voor de grote vuurvinder. Natte teelten kunnen hier worden gebruikt om de fosfaattoestand van de bodem te verlagen tot gewenste waarden voor natuurontwikkeling.
 - Natte teelt als commerciële teelt in Marker -en Tussenbroek. Hier zijn de veenlagen het dikst, de organische stofgehalten het hoogst, grondwaterstanden het hoogst, droogleggingen het ondiepst en is het agrarisch beheer het meest extensief. Dit maakt het gebied het meest geschikt om ervaring op te doen met natte teelten voor de commerciële teelt, en om de effecten van natte teelt op de broeikasgasemissie en nutriëntemissies naar het watersysteem te onderzoeken. Natte teelten zouden hier ook kunnen dienen als een verbindingszone tussen de Rottige Meenthe en de Weerribben.
 - Verhogen van slootpeilen in combinatie met de toepassing van traditionele onderwaterdrainage in Marker -en Tussenbroek. Hier lijkt de effectiviteit van onderwaterdrainage het grootst door een lage kweldruk, ondiepe droogleggingen, dikke veenpakketten met hoge organische stofgehalten en de aanwezigheid van een dun kleidek. Middels een pilot kan meer ervaring worden opgedaan met de effectiviteit van onderwaterdrainage bij klei -op veen, nutriëntverliezen naar het watersysteem. Hiernaast wordt, afhankelijk van de resultaten, het draagvlak voor de maatregel vergroot.

- Verkleinen van percelen middels het graven van sloten/watervoerende greppels in de laag gelegen polders (Halfweg, Gelderingen en Wetering-Oost). In deze pilot kan het effect van het verkleinen van percelen op bodemdaling (minder hol komen liggen grondwaterstand in droge perioden) en het effect op extra fosfaatvastlegging in de slootbodems (natuurlijke defosfatering) worden onderzocht.
- **Stimuleren van niet-kerende grondbewerking:** Het wordt aanbevolen om niet-kerende grondbewerking op veen te stimuleren door het continueren en promoten van subsidieregelingen (zoals de voormalige POP3 subsidie). Hierbij kan gedacht worden aan permanent grasland en eventueel strokenfrees bij maïsteelt, of het in zijn geheel ontmoedigen van grondbewerking.
- **Bepalen effect fosfaatvrachten op N2000-gebieden:** De resultaten van het huidige onderzoek zijn op een dusdanige manier gerepresenteerd dat een koppeling met het SOBEK model van Witteveen + Bos mogelijk is. Hiermee kan inzicht worden verkregen in het effect van verhoogde fosfaatvrachten op de N2000-gebieden. Het wordt aanbevolen om deze modelruns te maken. Bij een groot effect is de aanbeveling om defosfateringsmogelijkheden te verkennen, waarbij in het kader van bodemdaling natuurlijke defosfatering in de laag gelegen polders middels het vergroten van het oppervlak aan sloten een interessante optie lijkt te zijn om in verder onderzoek te verkennen.
- **Uitvoeren MKBA:** Gezien de complexiteit van bodemdaling en de verschillende belanghebbenden is het advies om een maatschappelijke kosten-baten analyse uit te voeren. Dit kan ondersteunend zijn en zorgen voor transparante bij een integrale besluitvorming.
- **Onderzoek en verdienmodellen bij natte teelt:** Op het moment is er een gebrek aan kennis over broeikasgasemissies, bemestingsstrategieën en nutriëntenverliezen naar het watersysteem, kennis van een betrouwbare afzetmarkt en kennis over teeltmethoden. Het is bij natte teelt daarom raadzaam om in pilots deze aspecten te onderzoeken en de mogelijkheden te verkennen om boeren financieel te compenseren voor ecosysteemdiensten die in stand worden gehouden door het nieuwe agrarisch management. Hierbij kan onder andere gedacht worden aan een systeem van CO₂-certificaten (zie het "Valuta voor Veen" project).
- **Interpretatie modelresultaten:** De resultaten van de huidige studie hebben een verkennend karakter, wat het mogelijk maakt om toekomstvisies te onderzoeken en handelingsperspectief te bepalen. Het wordt aanbevolen om op basis van de in dit onderzoek gepresenteerde resultaten klimaatmaatregelen te selecteren om nader uit te werken op basis van metingen en/of pilots, waarvan de data gebruikt kan worden in gedetailleerde procesmodellen.
- **Opschaling inzichten:** De uitkomsten van dit onderzoeksgebied kunnen niet één op één worden vertaald naar andere (nu niet beschouwde) polders in het gebied. De aanpak kan wel worden toegepast in andere gebieden. Cruciaal in het uitwerken van klimaatmaatregelen is een gedegen gebiedsanalyse naar onder andere bodemopbouw, dikte en diepte van veenlagen, hydrologie en agrarisch management.

Literatuur

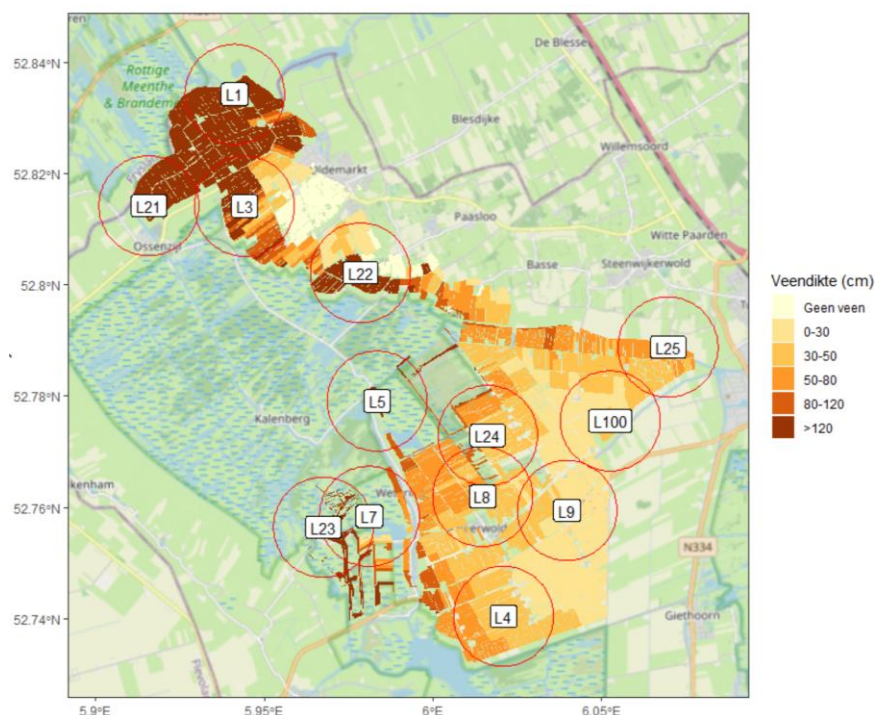
- Bakel, P. v., Boekel, E. v., & Noij, I. (2008). *Modelonderzoek naar effecten van conventionele en samengestelde, peilgestuurde drainage op de hydrologie en nutriëntenbelasting*. Wageningen: Alterra.
- Baston, D. (2020). *exactextractr: Fast Extraction from Raster Datasets using Polygons*. Opgehaald van <https://CRAN.R-project.org/package=exactextractr>
- Bates, D., Machler, M., Bolker, B., & Walker, S. (2015). Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. *Journal of Statistical Software*, 1-48.
- Bestman, M., Geurts, J., Egas, Y., Houwelingen, K. v., Lenssinck, F., Koornneef, A., . . . Eekeren, N. v. (2019). *Natte teelten voor het veenweidegebied*. Bunnik: LouisBolk.
- Bivand, R., Keitt, T., & Rowlingson, B. (2020). *rgdal: Bindings for the 'Geospatial' Data Abstraction Library*. Opgehaald van <https://CRAN.R-project.org/package=rgdal>
- Bos, A., Gies, T., & Male, B. v. (2017). *Vormgeven aan sturen met water*. Wageningen: Wageningen University & Research.
- Brouns, K. (2016). *The effects of climate change on decomposition in Dutch peatlands: an exploration of peat origin and land use effects*. Utrecht: Utrecht University.
- Bui, R., Buliung, R. N., & Rimmel, T. K. (2012). *aspace: A collection of functions for estimating centrophagic*. Opgehaald van <https://CRAN.R-project.org/package=aspace>
- Cusell, C., & Mandemakers, J. (2017). *PAS-onderzoek M1 naar defosfatering in de Wieden en Weerribben*. Deventer: Witteveen+Bos.
- Cusell, C., Haan, B. d., Kooijman, G., Dijk, G. v., Diggelen, J. v., & Kooijman, A. (2018). Roadmap voor herstel Weerribben-wieden. *Landschap*.
- Cusell, C., Kooijman, A., Mettrop, I., & Lamers, L. (2013). *Natura 2000 Kennislacunes in de Wieden & Weerribben*. Den Haag: Directie Agrokennis, Ministerie van Economische Zaken.
- Deru, J., & Prins, U. (2014). Strokenteelt mais: meer organische stof en beter bodemleven. *V-focus*, 17-18.
- Dijkstra, N., van Hardeveld, H., Spanjers, B., & Smolders, A. (2013). Verbeterde inschatting fosforlevering in De Stichtse Rijnlanden. *Stromingen*.
- Dowle, M., & Srinivasan, A. (2020). *data.table: Extension of 'data frame'*. Opgehaald van <https://CRAN.R-project.org/package=data.table>
- Dunnington, D. (2020). *ggspatial: Spatial Data Framework for ggplot2*. Opgehaald van <https://CRAN.R-project.org/package=ggspatial>
- Erkens, G., Louw, P. d., Bootsma, H., & Kooi, H. (2019). *Huidig en toekomstig opbarstrisico in de polder Middelburg en Tempelpolder*. Deltares.
- Geurts, J. J., Fritz, C., & Couwenberg, J. (2018). *Paludiculture pilots and experiments with focus on cattail and reed in the Netherlands*. Nijmegen: Radboud University.
- Geurts, J., Smolders, A., Banach, A., Graaf, J. v., Roelofs, J., & Lamers, L. (2010). The interaction between decomposition, N and P mineralization and their mobilization to the surface water in fens. *Water Research*, 3487-3495.

- Hendriks, R. (1992). *Afbraak en mineralisatie van veen*. Wageningen: DLO-Staring Centrum.
- Hendriks, R., & Akker, J. v. (2012). *Effecten van onderwaterdrains op de waterkwaliteit in veenweiden*. Wageningen: Alterra.
- Hendriks, R., van den Akker, J., van Houwelingen, K., van Kleef, J., Pleijter, M., & van den Toorn, A. (2013). *Pilot onderwaterdrains Utrecht*. Wageningen: Alterra Wageningen UR.
- Hijmans, R. J. (2020). *raster: Geographic Data Analysis and Modeling*. Opgehaald van <https://CRAN.R-project.org/package=raster>
- Holshof, G., Houwelingen, K. v., & Lenssinck, F. (2011). *Landbouwkundige gevolgen van peilverhoging in het veenweidegebied*. Lelystad: Wageningen UR Livestock Research.
- Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden. (2000). *Beleidsnota dempingen*. Opgehaald van decentrale.regelgeving.overheid:
<https://decentrale.regelgeving.overheid.nl/cvdr/XHTMLoutput/Actueel/Hoogheemraadschap%20De%20Stichtse%20Rijnlanden/CVDR271897.html#:~:text=Vanuit%20rationeel%20grondgebruik%20door%20de,om%20deze%20sloten%20te%20dempen.>
- Hoogland, F., Roelandse, A., de La Loma Gonzalez, B., & de Vos, A. (2019, Juli 2). *Bacteriën bepalen de snelheid van veenafbraak*. Opgehaald van H2O-Online: <https://www.h2owaternetwerk.nl/vakartikelen/bacterien-bepalen-de-snelheid-van-veenafbraak>
- Hoving, I., Akker, J. v., Massop, H., Holshof, G., & Houwelingen, K. v. (2018). *Precisiewatermaangement op veenweidegrond met pompgestuurde onderwaterdrains*. Wageningen: Wageningen Livestock Research.
- Hoving, I., Akker, J. v., Pleijter, M., & Houwelingen, K. v. (2011). *Hydrologische en landbouwkundige effecten toepassing onderwaterdrains in polder Zeevang*. Wageningen: Wageningen UR Livestock Research.
- Hoving, I., Vereijken, P., van Houwelingen, K., & Pleijter, M. (2013). *Hydrologische en landbouwkundige effecten toepassing onderwaterdrains by dynamisch slootpeilbeheer op veengrond*. Lelystad: Wageningen UR Livestock Research.
- Jurasinski, G., Ahmad, S., Anadon-Rosell, A., Berendt, J., Beyer, F., Bill, R., . . . al, e. (2020). From Understanding to Sustainable Use of Peatlands: The WETSCAPES Approach. *Soil systems*, 4(1).
- Jurasinski, G., Günther, A., Huth, V., Couwenberg, J., & Glatzel, S. (2016). *Ecosystem services provided by paludiculture - greenhouse gas emissions*. Schweizerbart Science Publishers.
- Jurasinski, Wichtmann, W., Schröder, C., & Joosten, H. (2016). *Productive use of wet peatlands*. Schweizerbart Science Publishers.
- Kroes, J., van Dam, J., Bartholomeus, R., Groenendijk, P., Heinen, M., Hendriks, R., . . . van Walsum, P. (2017). *SWAP version 4*. Wageningen: Wageningen Environmental Research.
- Kwakernaak, C., van den Akker, J., Veenendaal, E., van Huissteden, J., & Kroon, P. (2010). Veenweiden en klimaat. Mogelijkheden voor mitigatie en adaptatie. *Bodem*, 20(3), 6-8.
- Mandemakers, J. (2019). *Bijlagenrapport: Methode en uitgebreide resultaten onderzoeksvraag 1 - Onderzoek verbeteren waterkwaliteit Wieden en Weerribben*. Deventer: Witteveen+Bos.
- Microsoft Corporation. (2020). *foreach: Provides Foreach Looping Construct*. Opgehaald van <https://CRAN.R-project.org/package=foreach>
- Microsoft Corporation. (2020). *oParallel: Foreach Parallel Adaptor for the 'parallel' Package*. Opgehaald van <https://CRAN.R-project.org/package=doParallel>

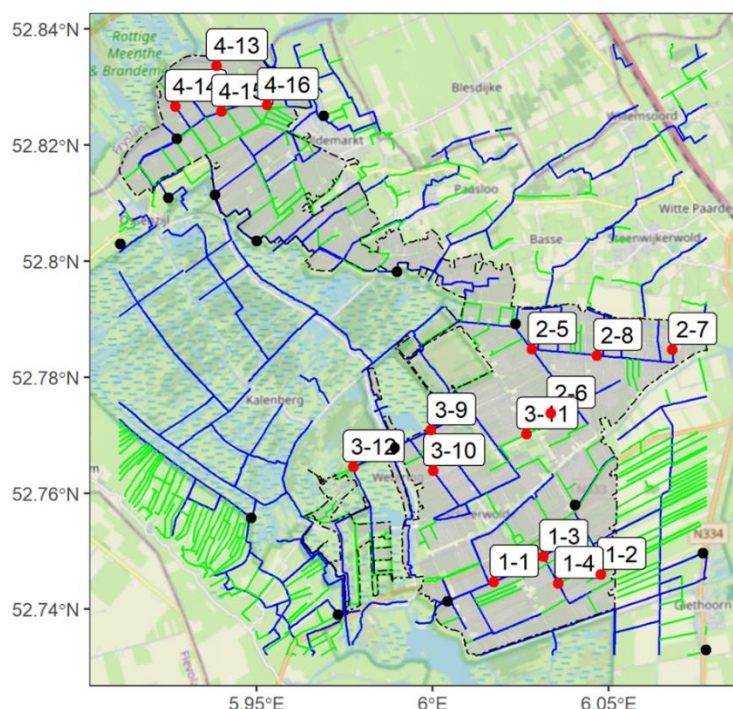
- Ministerie van Economische Zaken en Klimaat. (2019). *Klimaatakkoord*. Den Haag.
- Mishra, S. K., & Singh, V. P. (2003). *Soil conservation service curve number (SCS-CN) methodology*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Motelica-Wagenaar, A. M., & Beemster, J. (2020). Greenhouse gas emissions and surface water management. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 643-649.
- Nationaal Kennisprogramma Bodemdaling. (2018). *Factsheet natte teelten*.
- Nationaal Kennisprogramma Bodemdaling. (2018). *Factsheet natte teelten*.
- Nationaal Kennisprogramma Bodemdaling. (2020). *Factsheet onderwater- en drukdrainage*.
- NHI. (2020). *Data Portaal*. Opgehaald van Nederlands Hydrologische Instrumentarium: <http://www.nhi.nu/nl/index.php/data/>
- PBL. (2016). *Dalende bodems, stijgende kosten - Mogelijke maatregelen tegen veenbodemdaling in het landelijk en stedelijk gebied*. Den Haag: PBL Planbureau voor de Leefomgeving.
- Pebesma, E. (2018). *Simple Features for R: Standardized Support for Spatial Vector Data*. Opgehaald van <https://doi.org/10.32614/RJ-2018-009>
- Pierce, D. (2019). *ncdf4: Interface to Unidata netCDF (Version 4 or Earlier) Format Data*. Opgehaald van <https://CRAN.R-project.org/package=ncdf4>
- Pleijter, M., & van den Akker, J. (2007). *Onderwaterdrains in het veenweidegebied*. Wageningen: Alterra.
- Provincie Overijssel. (2019). *Natura 2000-beheerplan definitief - De Wieden en Weerribben*. Zwolle: Provincie Overijssel.
- Provincie Overijssel. (2019, 07 11). *Natura 2000-gebieden in Nederland*. Opgehaald van Geoportaal: <https://www.geoportaaloverijssel.nl/metadata/dataset/2101e166-89d7-433c-ace3-2c67ff63b62f>
- Provincie Overijssel. (2020, 12 14). *POP3 - Plattelandsontwikkeling*. Opgehaald van provincie Overijssel: <https://www.overijssel.nl/onderwerpen/economie/expertisecentrum-europa/pop3/>
- R Core Team. (2020). *R: A language and environment for statistical computing*. Opgehaald van <https://www.R-project.org/>
- Rozemeijer, J., Boomsma, H., Veldhuizen, A., Pouwels, J., Akker, J. v., & Kroon, T. (2019). *Effecten van onderwaterdrainage op de regionale watervraag*. Deltares.
- Schipper, P., Hendriks, R., Noij, I., Honkoop, W., Eekeren, N. v., & Boekhorst, L. (2015). *Potentie Kringlooplandbouw en onderwaterdrainage in veenweide*. Wageningen: Alterra.
- Slowikowski, K. (2020). *ggrepel: Automatically Position Non-Overlapping Text Labels with*. Opgehaald van <https://CRAN.R-project.org/package=ggrepel>
- Smolders, A., Diggelen, J. v., Geurts, J., Poelen, M., Roelofs, J., Lucassen, E., & Lamers, L. (2013). Waterkwaliteit in het veenweidegebied - de complexe interacties tussen oever, waterbodembodem en oppervlaktewater. *Landschap*, 145-153.
- Smolders, A., Loermans, J., & Lamers, L. (2012). *Effecten van flexibel peilbeheer op bodemprocessen en waterkwaliteit*. Onderzoekscentrum B-Ware.
- Smolders, F., Mullekom, M. v., Tomassen, H., & Westendorp, P.-J. (2019). *Waterkwaliteitsproblemen tot in de bodem uitgezocht*. Nijmegen: B-ware.
- Staveren, G. v., Bijker, F., Naus, L., Vries, G. d., Westerhof, R., & Berendrecht, W. (in ontwikkeling). *Verkenning bodemdaling veenweidegebied Overijssel*. Maarn: INFRAM.

- Tennekes, M. (2018). tmap: Thematic Maps in R. *Journal of Statistical Software*, 1-39.
- van Agtmaal, M., Deru, J., & Lenssinck, F. (2019). *Klei voor behoud van veen*. Bunnik: Louis Bolk Instituut.
- van Agtmaal, M., Iepema, G., Deru, J., & van Eekeren, N. (2018). *Effect van kunstmestgift op afbraak van organisch stof in veenweidebodems*. Bunnik: Louis Bolk.
- van Asselen, S., Kooi, H., & van den Akker, J. J. (2020). *Deltafact Bodemdaling*. Stowa.
- van den Akker, J., Hendriks, R., Hoving, I., & Pleijter, M. (2010). *Toepassing van onderwaterdrains in veenweidegebieden*. Wageningen: Alterra Wageningen UR.
- van den Akker, J., Hendriks, R., Hoving, I., Meerkerk, B., van Houwelingen, K., van Kleef, J., . . . van den Toorn, A. (2013). *Pilot onderwaterdrains Krimpenerwaard*. Wageningen: Alterra Wageningen UR.
- van den Akker, J., Kuikman, P., de Vries, F., Hoving, I., Pleijter, M., Hendriks, R., . . . Kwakernaak, C. (2010). *Emission of CO₂ from agricultural peat soils in the Netherlands and ways to limit this emission*. Wageningen: Alterra.
- van den Akker, J., van Diggelen, J., van Houwelingen, K., van Kleef, J., Pleijter, M., Smolders, A., . . . van der Wielen, S. (2016). *Praktijkproef onderwaterdrains Wormer- en Jisperveld*. Wageningen: Wageningen Environmental Research.
- van den Berg, M., Weideveld, S., Geurts, J., & Fritz, C. (2019). *CO₂, N₂O en CH₄ emissies en bodemdaling in de Friese Veenweiden - Kan onderwaterdrainage veenoxidatie en emissies uit veengebieden duurzaam verlagen?* Nijmegen: Radboud Universiteit.
- van Rotterdam, D., Postma, R., & Verweij, S. (2019). *Agrarische P-vrachten naar het watersysteem en handelingsperspectief Wieden en Weerribben*. Wageningen: NMI.
- van Wirdum, G. (1990). *Vegetation and Hydrology of Floating Rich-Fens*. Amsterdam: Universiteit van Amsterdam.
- Verstand, D., Bulten, E., & Vijn, M. (2020). *Naar klimaatbestendige agrarische bedrijven op veen en moerige gronden in de Veenkoloniën*. Wageningen: Stichting Wageningen Research.
- Vliex, M., Geurts, J., Cusell, C., & Lamers, L. (2013). *Fosfaatbinding door ijzerrijk slib in landbouwsloten*. Opgehaald van H2O online: <https://www.h2owaternetwerk.nl/vakartikelen/fosfaatbinding-door-ijzerrijk-slib-in-landbouwsloten>
- Waterwijzer Landbouw. (2020, 12 17). *WWL-tabel*. Opgehaald van waterwijzerlandbouw: <https://waterwijzerlandbouw.wur.nl/>
- Wickham, H. (2016). *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Opgehaald van <https://ggplot2.tidyverse.org>
- Wickham, H. (2020). *tidyr: Tidy Messy Data*. Opgehaald van <https://CRAN.R-project.org/package=tidyr>
- Wickham, H., François, R., Henry, L., & Müller, K. (2020). *dplyr: A Grammar of Data Manipulation*. Opgehaald van <https://CRAN.R-project.org/package=dplyr>

Bijlage I: Monsternamelocaties

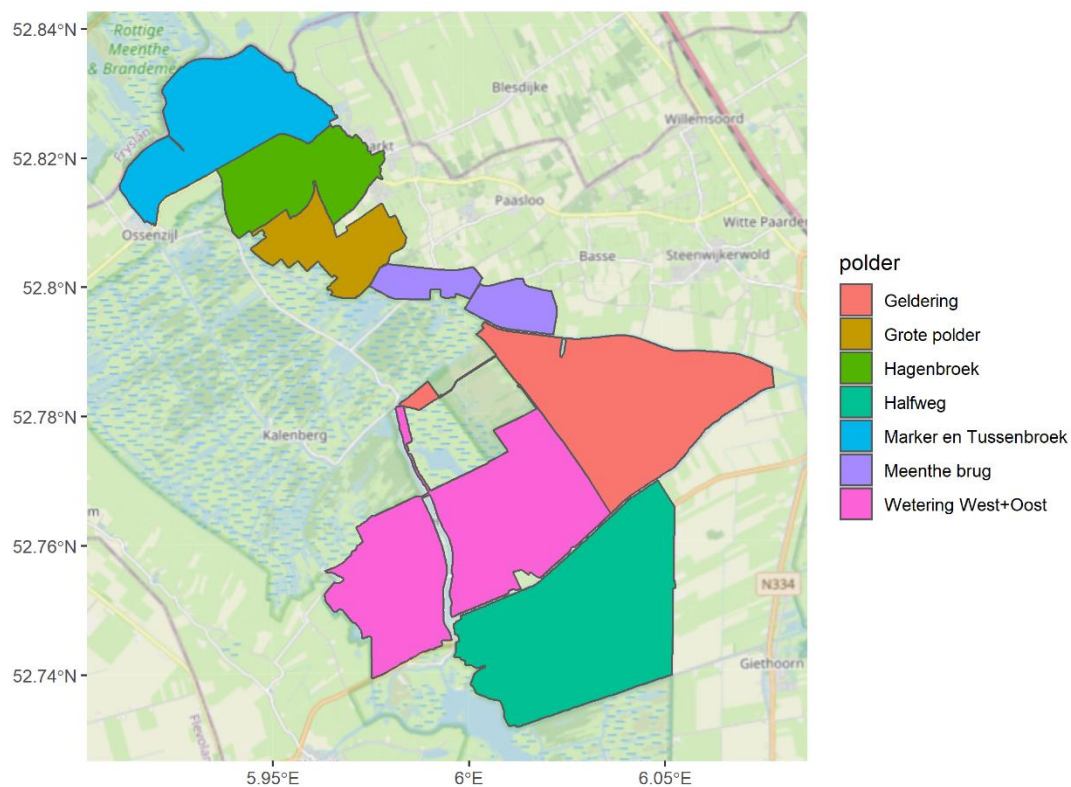


Figuur S1-1 Indicatie van de bemonsteringslocaties bodem (bemonsteringslocaties snijden of liggen ergens in de rode cirkels). De veendikte is als additionele informatie weergegeven.

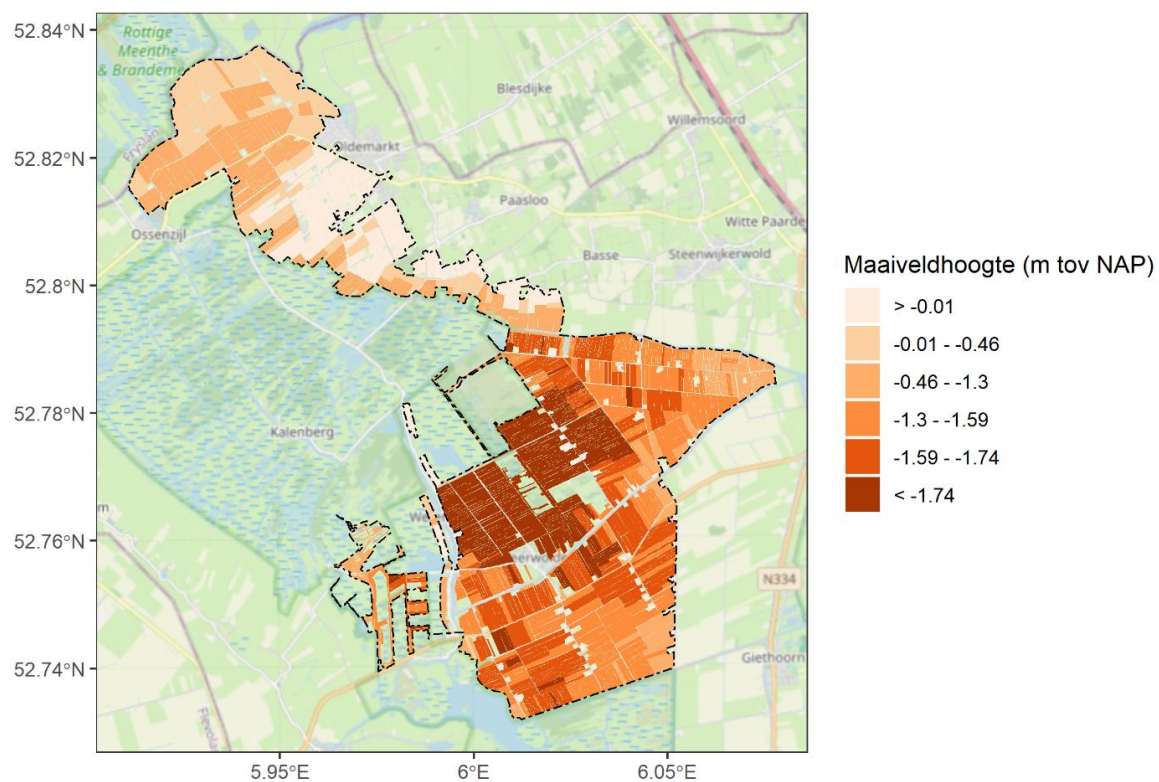


Figuur S1-2 Monsternamelocaties waterbodembodem (rode stippen, veldcode in het label). De grijze vlakken betreffen de percelen in het onderzoeksgebied. De blauwe lijnen zijn primaire watergangen. De groene lijnen betreffen secundaire watergangen. De gemalen zijn weergegeven als zwarte stippen.

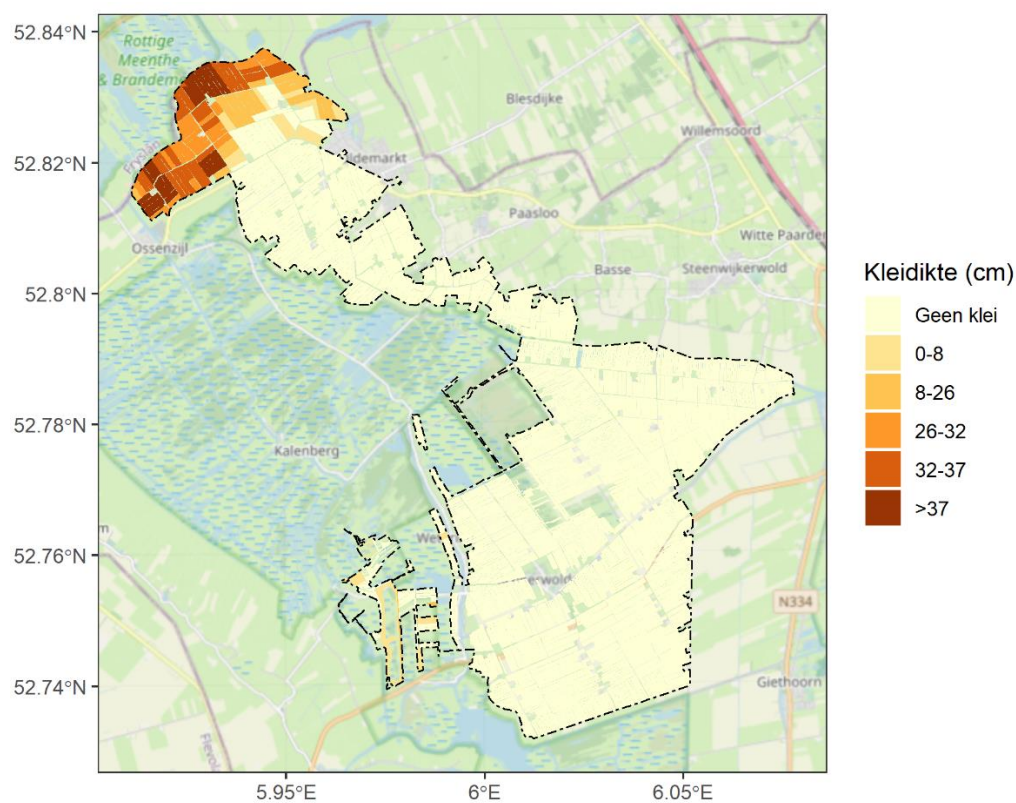
Bijlage II Grondslag, hydrologie en landgebruik van de onderzoekslocatie



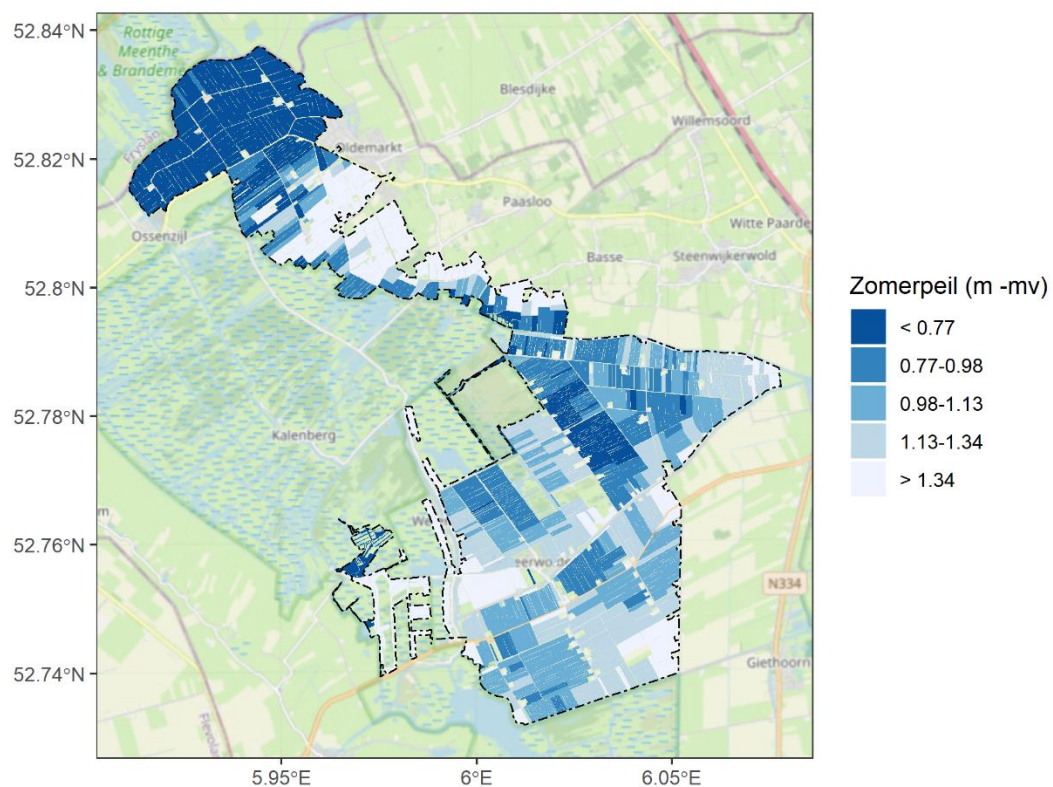
Figuur S2-1 Situering van de polders



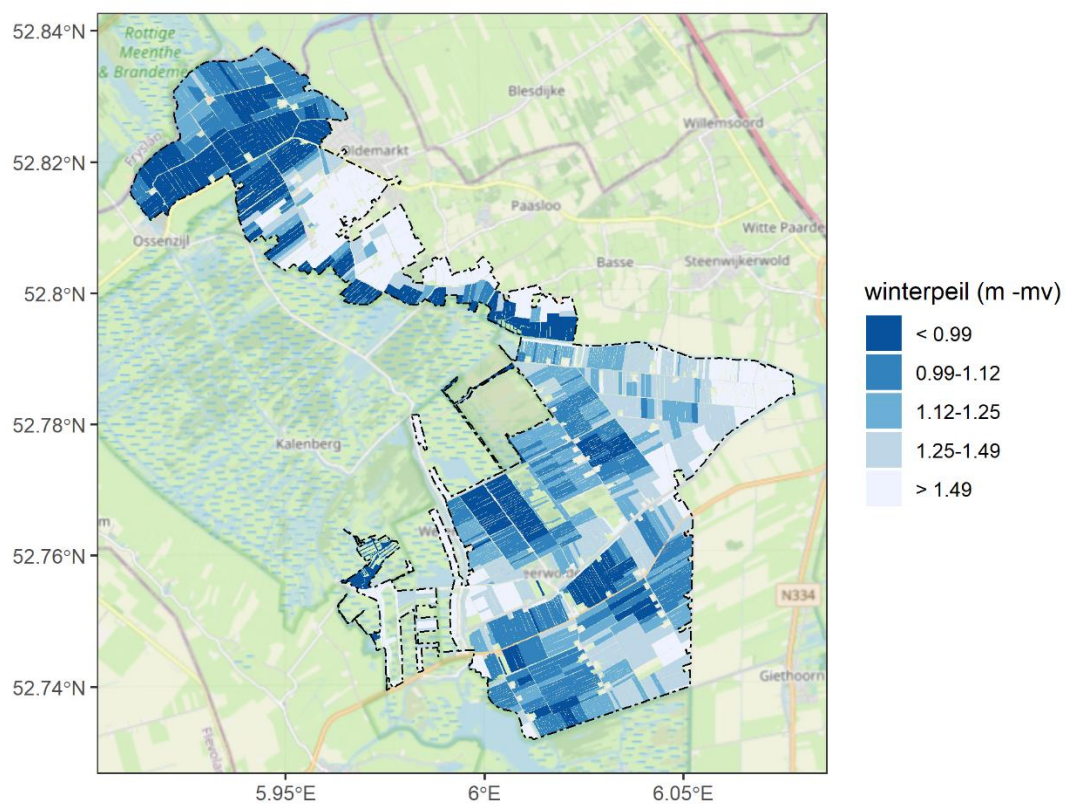
Figuur S2-2 Maaiveldhoogte van de percelen in het onderzoeksgebied



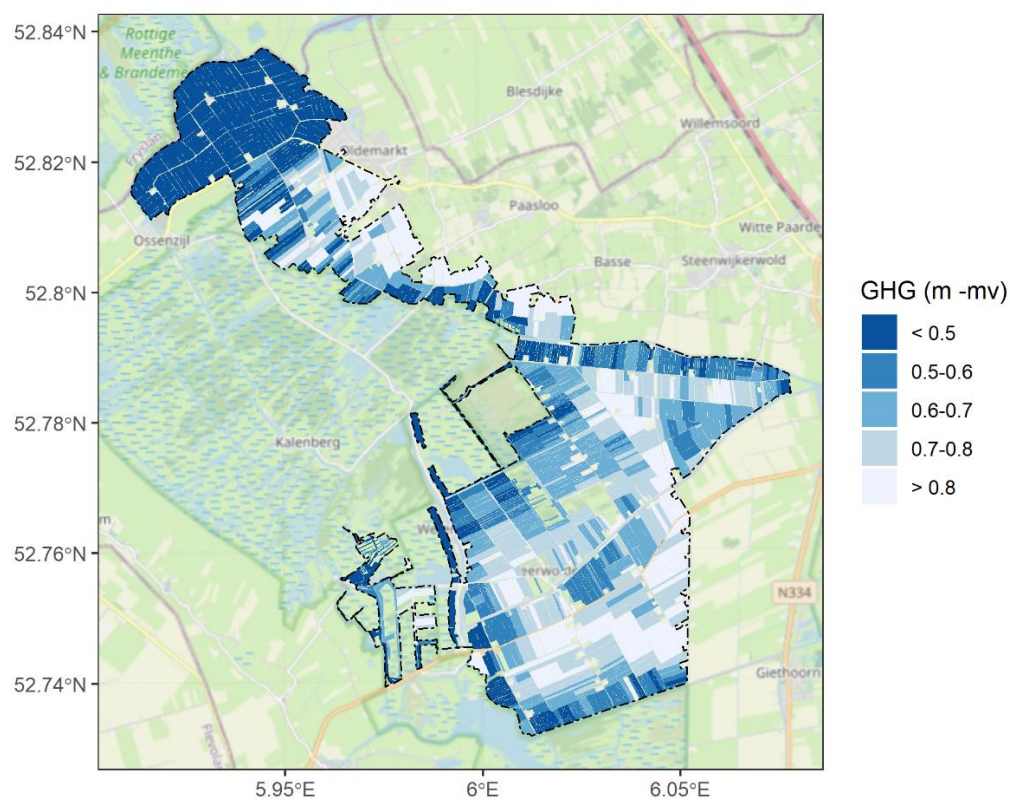
Figuur S2-3 Kleidikte van de percelen van het onderzoeksgebied



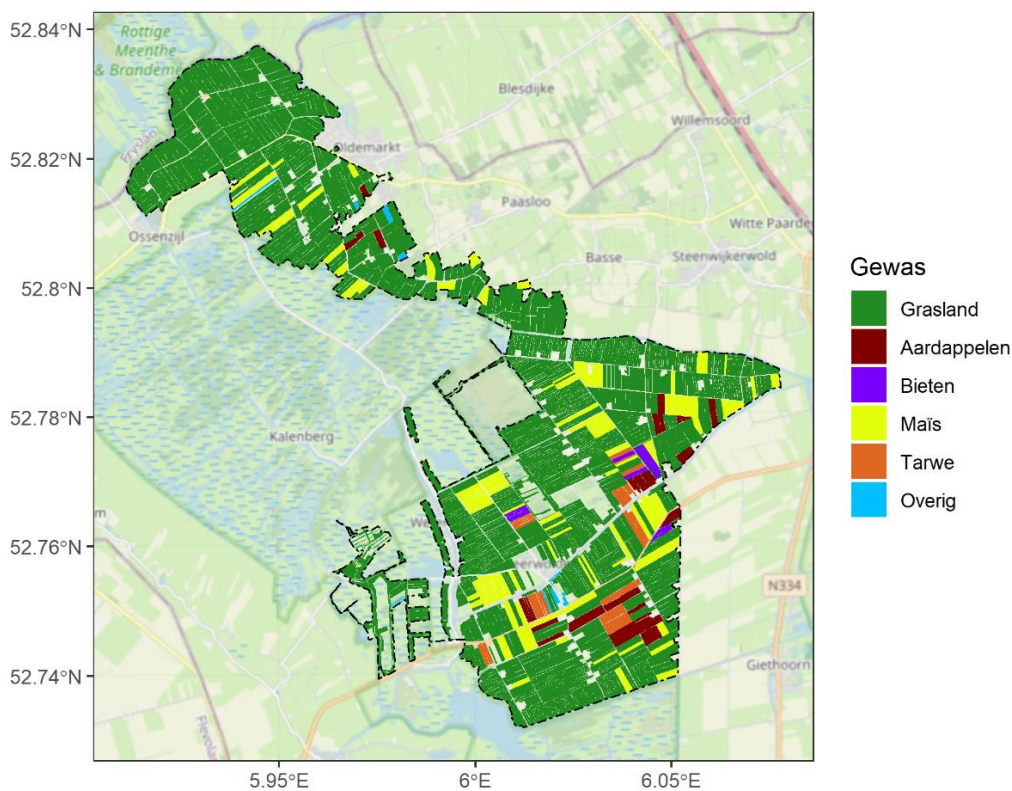
Figuur S2-4 Drooglegging in de zomer (m -maaiveld). Gebaseerd op de gemiddelde hoogte van het perceel (AHN hoogtekarta) en de gehanteerde slootpeilen ten opzichte van NAP.



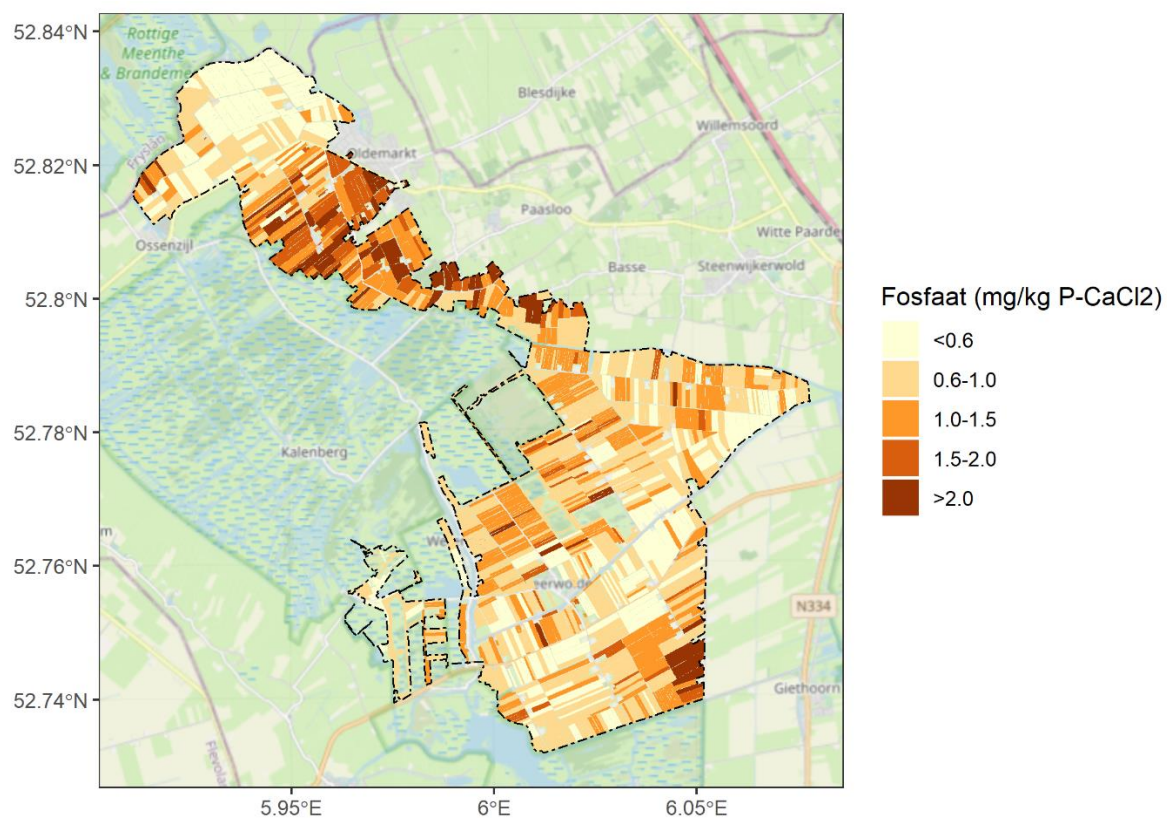
Figuur S2-5 Drooglegging in de winter (m -maaiveld). Gebaseerd op de gemiddelde hoogte van het perceel (AHN hoogtekarta) en de gehanteerde slootpeilen ten opzichte van NAP.



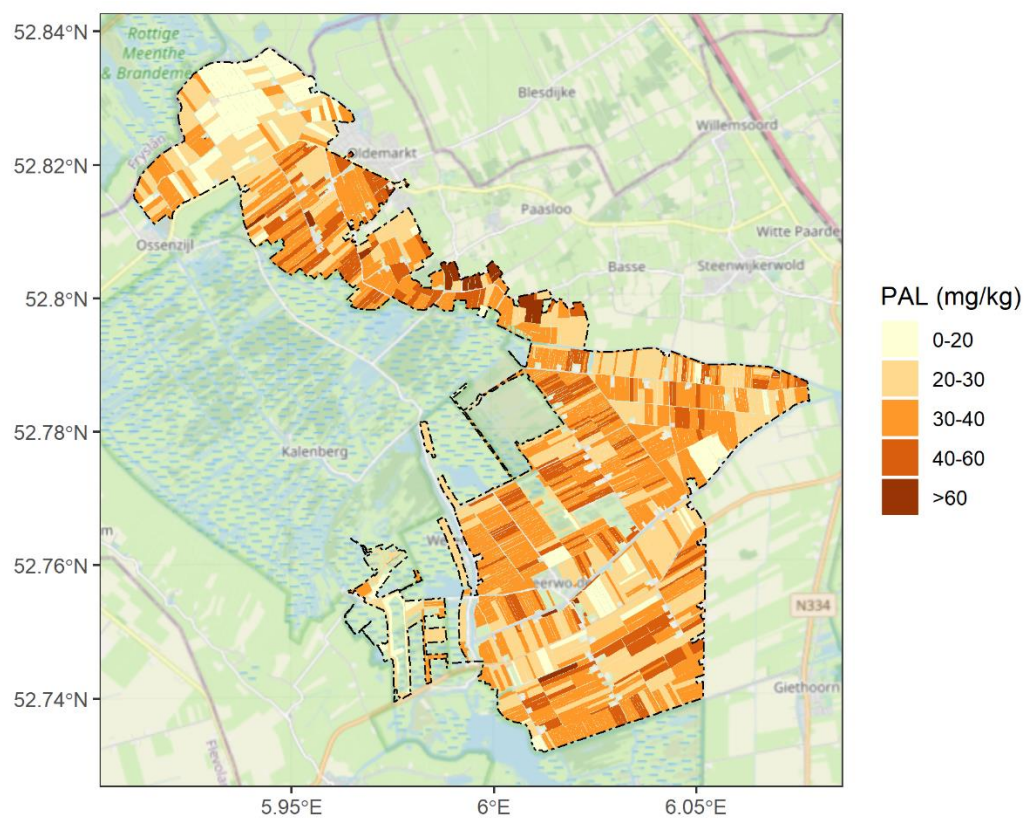
Figuur S2-6 Gemiddeld hoogte grondwaterstand (GHG) ten opzichte van maaiveld. Data afkomstig van het MIPWA model (gemiddelde GHG van 2000-2014).



Figuur S2-7 Landgebruik op de landbouwpercelen van het onderzoeksgebied



Figuur S2-8 Beschikbare fosfaatconcentraties op de landbouwpercelen van het onderzoeksgebied



Figuur S2-9 PAL gehalten op de landbouwpercelen van het onderzoeksgebied

Bijlage III: Pilotresultaten onderwaterdrainage

Zegveld

Precisiewatermanagement op veenweidegrond met pompgestuurde onderwaterdrains (Hoving et al. 2018)

Hoving et al. (2018) bespreekt de resultaten van een proef met onderwaterdrainage en drukdrainage op 4 percelen te KTC Zegveld (percelen 13 t/m 16). Op twee percelen werd een hoog slootpeil gehandhaafd (20 cm -mv) en op twee percelen een lager slootpeil (55cm -mv). Subbehandelingen waren (i) referentie; (ii) traditionele onderwaterdrainage en (iii) drukdrainage. Er werden over twee jaar metingen uitgevoerd (2016-2017). Als streefpeil werd voor drukdrainage een grondwaterstand van 40cm -mv aangehouden. De maximale verschillen in grondwaterstand in de zomer (gemiddelden tussen 2016 en 2017) bij de percelen met OWD in vergelijking met de referentiepercelen waren als volgt:

- Drukdrainage
 - +18-19.5cm bij een slootpeil van 20cm -mv, afhankelijk van het perceel
 - +23-31.5cm bij een slootpeil van 55cm -mv, afhankelijk van het perceel
- Traditionele OWD
 - +6-15.5cm bij een slootpeil van 20cm -mv, afhankelijk van het perceel
 - +4.5-18.5cm bij een slootpeil van 55cm -mv, afhankelijk van het perceel

De maximale verschillen in grondwaterstand in de winter waren als volgt:

- Drukdrainage
 - +9 tot -17cm bij een slootpeil van 20cm -mv, afhankelijk van het perceel
 - -14 tot -18cm bij een slootpeil van 55cm -mv, afhankelijk van het perceel
- Traditionele OWD
 - -14 tot +12cm bij een slootpeil van 20cm -mv, afhankelijk van het perceel
 - -7 tot -10cm bij een slootpeil van 55cm -mv, afhankelijk van het perceel

Voor drukdrainage wordt er geconcludeerd dat er onafhankelijk van het slootpeil gestuurd kan worden op de grondwaterstand.

Hydrologische en landbouwkundige effecten toepassing onderwaterdrains bij dynamisch slootpeilbeheer op veengrond (Hoving et al. 2013)

In Hoving et al. (2013) is onder andere het effect van dynamisch slootpeilbeheer op veengrond bij relatief hoge slootpeilen, al dan niet gecombineerd met onderwaterdrainage onderzocht. De onderzoekslocatie was KTC Zegveld, en er zijn metingen verricht over twee jaar (2011-2012). De hoofdbehandeling bestond uit vier verschillende peilstrategieën, namelijk:

- 1) Vast hoog peil (20-25cm -mv)
- 2) Dynamisch hoog peil. Winter- en zomerpeil van 20-25cm -mv met incidentele verlagingen tot 50-55cm -mv
- 3) Dynamisch peil. Winterpeil van 50-55cm -mv en zomerpeil van 20-25cm -mv met incidentele verlagingen tot 50-55cm -mv
- 4) Vast laag peil (50-55cm -mv)

De effecten op de gemiddeld laagste grondwaterstand worden niet kwantitatief besproken, maar zijn wel weergegeven in de resultaten (Bijlage 3 van het rapport). Uit het aflezen van de grafieken blijkt onderwaterdrainage het volgende effect te hebben op de GLG:

- Circa +2 tot +5cm bij een vast hoog peil (afhankelijk van drainafstand en perceel)
- Circa +0 tot +10cm bij een dynamisch hoog peil (afhankelijk van drainafstand en perceel)
- Circa +0 tot +6cm bij een dynamisch peil (afhankelijk van drainafstand en perceel)
- Circa +0 tot +7cm bij een vast laag peil (afhankelijk van drainafstand en perceel)

Voor de GHG geldt het volgende:

- Circa -0 tot - 6cm bij een vast hoog peil (afhankelijk van drainafstand en perceel)
- Circa -0 tot -12 bij een dynamisch hoog peil (afhankelijk van drainafstand en perceel)
- Circa -1 tot -10cm bij een dynamisch peil (afhankelijk van drainafstand en perceel)
- Circa -0.5 tot -3cm bij een vast laag peil (afhankelijk van drainafstand en perceel)

In het onderzoek wordt geconcludeerd dat een kleinere drainafstand leidt tot een groter effect op de grondwaterstand, en dat onderwaterdrainage minder goed tot niet functioneerden op percelen met een vast hoog of laag peil. De oorzaak hiervan is onbekend.

Hydrologische en landbouwkundige effecten van gebruik 'onderwaterdrains' op veengrond (Hoving et al. 2008)

In Hoving et al. (2008) is het effect van onderwaterdrainage onderzocht te KTC Zegveld. Behandelingen waren (i): type drainage (buisdrains of moldrains); (ii) slootpeil (hoog slootpeil van 15-20cm -mv of een laag slootpeil van 55cm -mv) en (iii) drainafstand (4, 8 en 12 meter). Er werden metingen gedaan van 2004-2007, waarbij de grondwaterstanden vanaf 2006 niet meer bij de moldrains werden gemeten omdat deze landbouwkundig niet interessant bleken (grondwaterstanden werden gedurende het hele jaar verhoogd). In dit onderzoek werd gebruik gemaakt van de LG3 en HG3 (gemiddelde van de drie laagste of laagste grondwaterstanden uit een bepaald jaar). Gemiddeld over 2004-2007 was het effect van buisdrainage op de LG3 het volgende:

- Perceel 2 (slootpeil referentieperceel van 52cm -mv)
 - Drainafstand van 4m: +4cm
 - Drainafstand van 8m: +4cm
 - Drainafstand van 12m: +2cm
- Perceel 3 (slootpeil referentieperceel van 53cm -mv)
 - Drainafstand van 4m: +4cm
 - Drainafstand van 8m: +4cm
 - Drainafstand van 12m: +0cm
- Perceel 11 (drooglegging referentieperceel van 21cm -mv)
 - Drainafstand van 4m: +6cm
 - Drainafstand van 8m: +8cm
 - Drainafstand van 12m: +7cm
- Perceel 14 (drooglegging referentieperceel van 12cm -mv)
 - Drainafstand van 4m: +10cm
 - Drainafstand van 8m: 9cm
 - Drainafstand van 12m: + 6cm

Het effect van buisdrainage op de HG3 was het volgende:

- Perceel 2 (slootpeil referentieperceel van 52cm -mv)
 - Drainafstand van 4m: -8cm
 - Drainafstand van 8m: -4cm
 - Drainafstand van 12m: -4cm
- Perceel 3 (slootpeil referentieperceel van 53cm -mv)
 - Drainafstand van 4m: -2cm
 - Drainafstand van 8m: -6cm
 - Drainafstand van 12m: +1cm

- Perceel 11 (drooglegging referentieperceel van 21cm -mv)
 - Drainafstand van 4m: +0cm
 - Drainafstand van 8m: +4cm
 - Drainafstand van 12m: +2cm
- Perceel 14 (drooglegging referentieperceel van 12cm -mv)
 - Drainafstand van 4m: +5cm
 - Drainafstand van 8m: +6cm
 - Drainafstand van 12m: +5cm

Dit onderzoek concludeert dat het lage peil de drainerende werking bevordert en dat het hoge peil de infiltrerende werking bevordert, en dat over het algemeen effecten van OWD groter zijn bij een kleinere drainafstand.

Wormer- en Jisperveld

Praktijkproef onderwaterdrains Wormer- en Jisperveld (van den Akker et al. 2016)

In van den Akker et al. (2016) zijn onderzoeksresultaten besproken voor traditionele onderwaterdrainage in Wormer- en Jisperveld (tijdspanne 2013-2015). De infiltrerende werking van onderwaterdrains viel hier tegen, waarschijnlijk door baggerproblematiek. Verder leek het erop dat de drains in het voorjaar meer water draineerden dan dat er werd geïnfilteerd in de zomer, waardoor de grondwaterstanden verder uitzakten op percelen met drains.

Demmeriksekade (polder Groot-Wilnis), de Keulevaart (Lopikerwaard) en Krimpenerwaard

Pilot onderwaterdrains Utrecht (Hendriks et al. 2013)

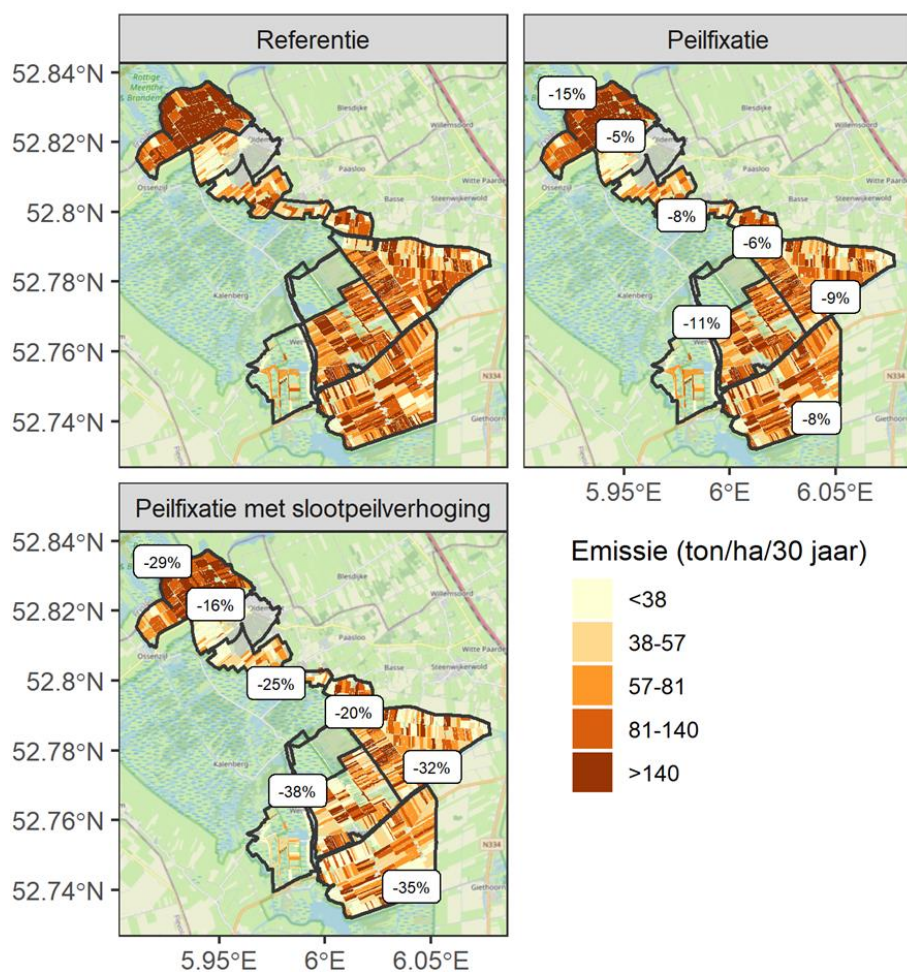
In Hendriks et al. (2013) zijn onderzoeksresultaten voor traditionele onderwaterdrainage in de Demmeriksekade (meetjaren 2010-2012), de Keulevaart (meetjaren 2011-2012) en de Krimpenerwaard (meetjaren 2011-2012) besproken. De Demmeriksekade en de Keulevaart zijn gelegen in de provincie Utrecht, de Krimpenerwaard in de provincie Zuid-Holland. Gemiddelde verhogingen van de grondwaterstand in droge perioden waren 20-30cm in de Demmeriksekade en 10-15cm in de Keulevaart en Krimpenerwaard. Gemiddelde verlagingen van de grondwaterstand in natte perioden waren tot 30cm in de Demmeriksekade en 20-30cm in de Keulevaart en Krimpenerwaard. In de Demmeriksekade was sprake van de meeste wegzijging (infiltratie) en grotere drainage- en infiltratieweerstanden van de sloot, waardoor de grondwaterstand daar zonder drains verder uitzakten. Om deze reden was de effectiviteit van onderwaterdrainage hier groter. Ter referentie is de pilot bij de Krimpenerwaard in meer detail besproken in van den Akker et al. 2013.

Zeevang

Hydrologische en landbouwkundige effecten toepassing onderwaterdrains in polder Zeevang (Hoving et al. 2011)

In Hoving et al. (2011) is het effect van onderwaterdrainage op de grondwaterstand beschreven voor een bedrijf waar het slootpeil was verhoogd van 80cm -mv tot 60cm -mv, waarna onderwaterdrainage was aangelegd (meetjaren 2007-2010). De laagste grondwaterstand was 3cm hoger bij het perceel met onderwaterdrainage in vergelijking met de referentie (geen onderwaterdrainage). De hoogste grondwaterstand was 10cm lager. Er was echter een probleem met het referentieperceel, omdat die onvoldoende representatief was (breder en natter).

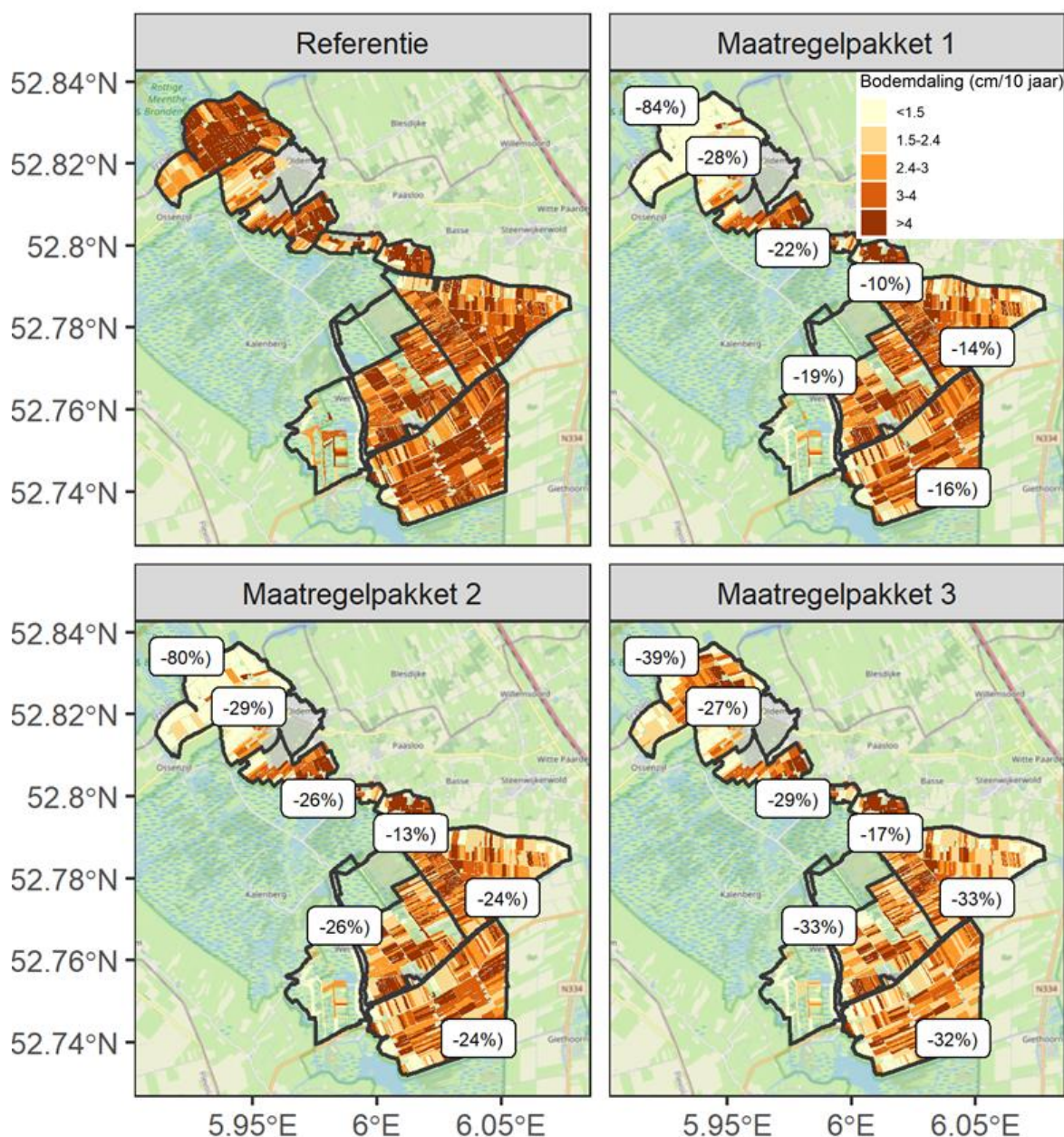
Bijlage IV: Effecten peilfixatie CO₂



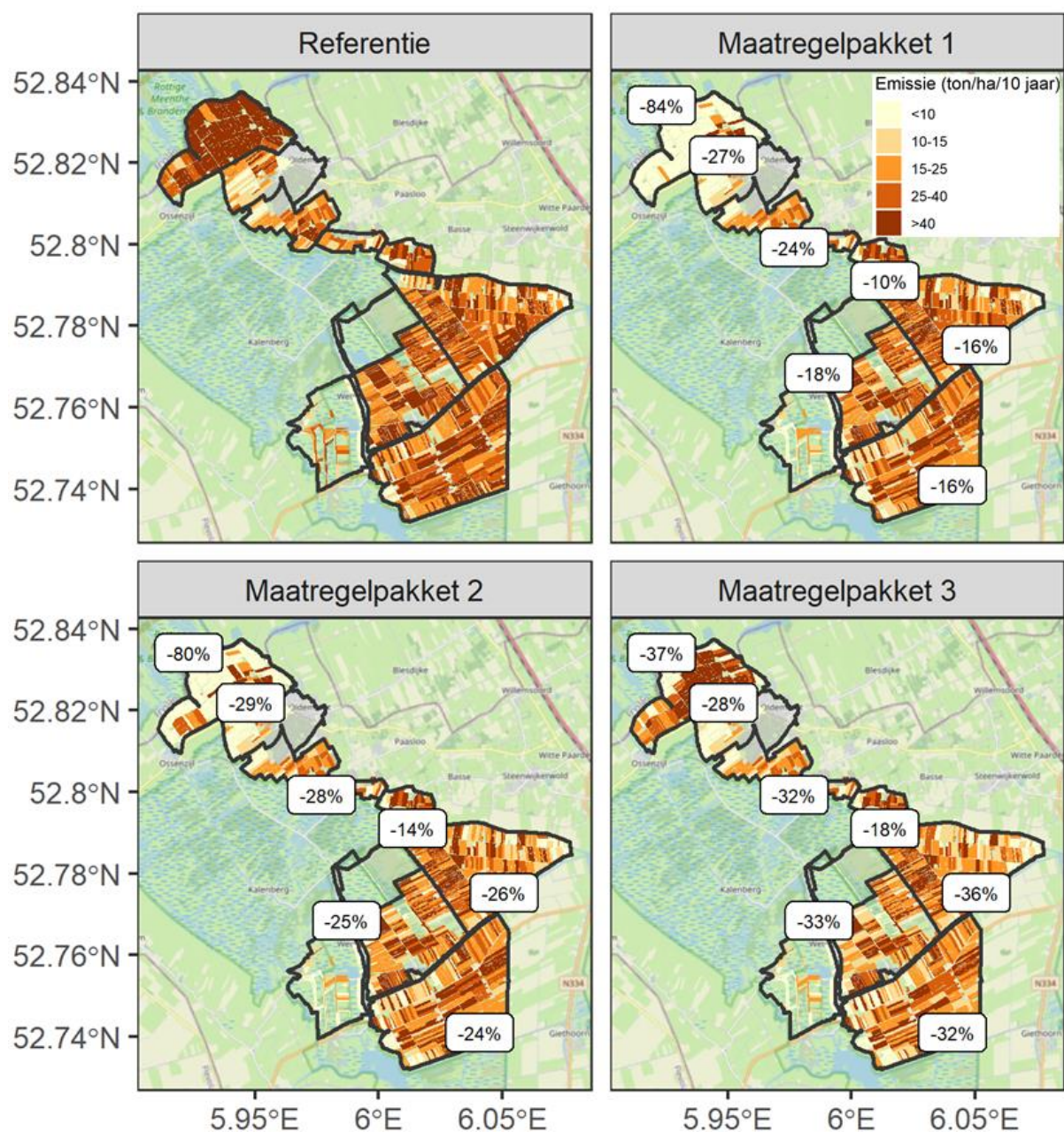
Figuur S4-1 Gemodelleerde effecten van peilfixatie op broeikasgasemissie (tot 2050). Het getal in de label geeft aan hoeveel bodemdaling is geremd ten opzichte van het referentiescenario (e.g. -10% is 10% minder bodemdaling).

Bijlage V: Effecten maatregelen op bodemdaling en CO₂-emissie

Scenario 'remmen'

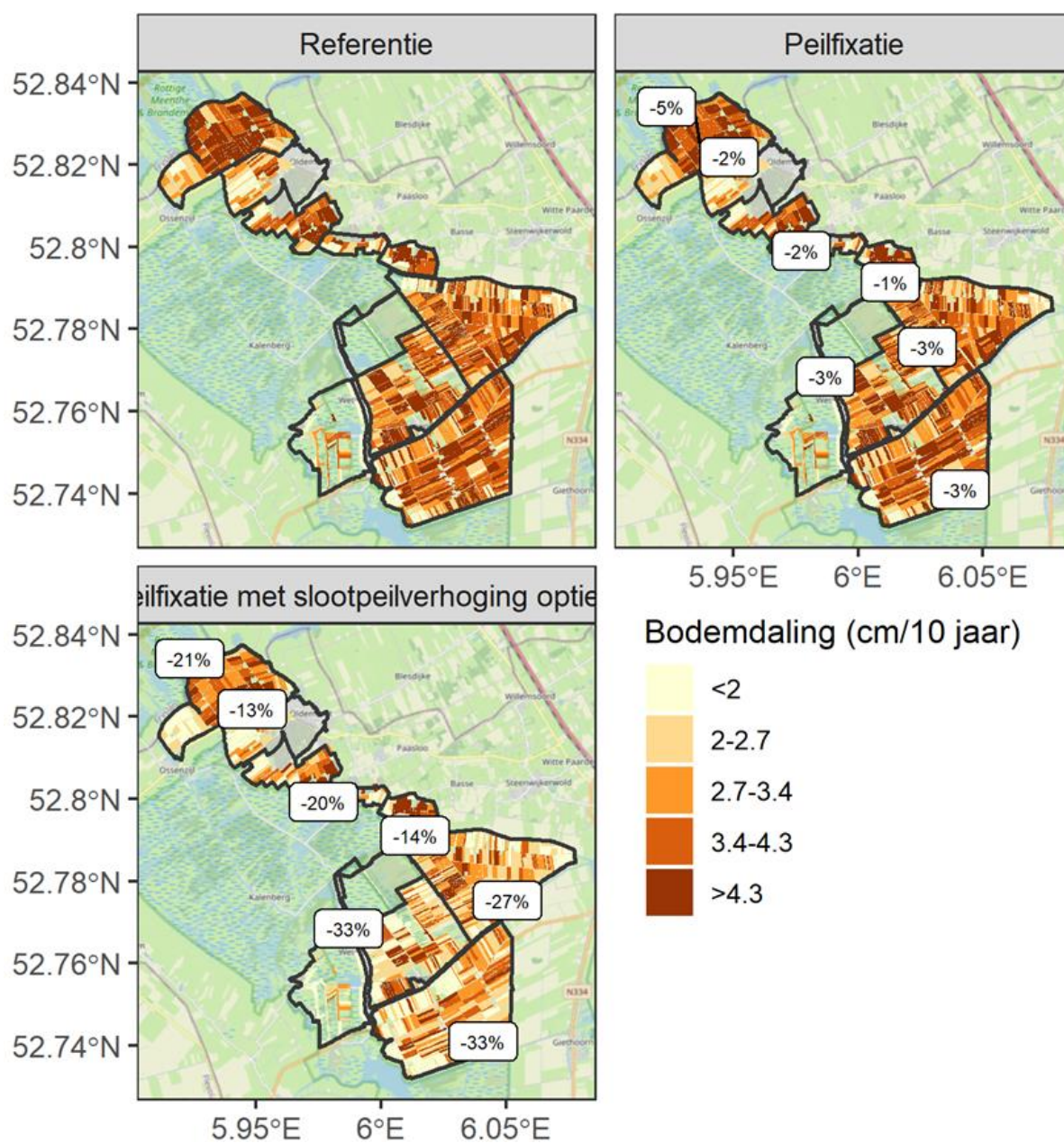


Figuur S5-1 Gemodelleerd effect van de diverse maatregelpakketten op bodemdaling in 2030

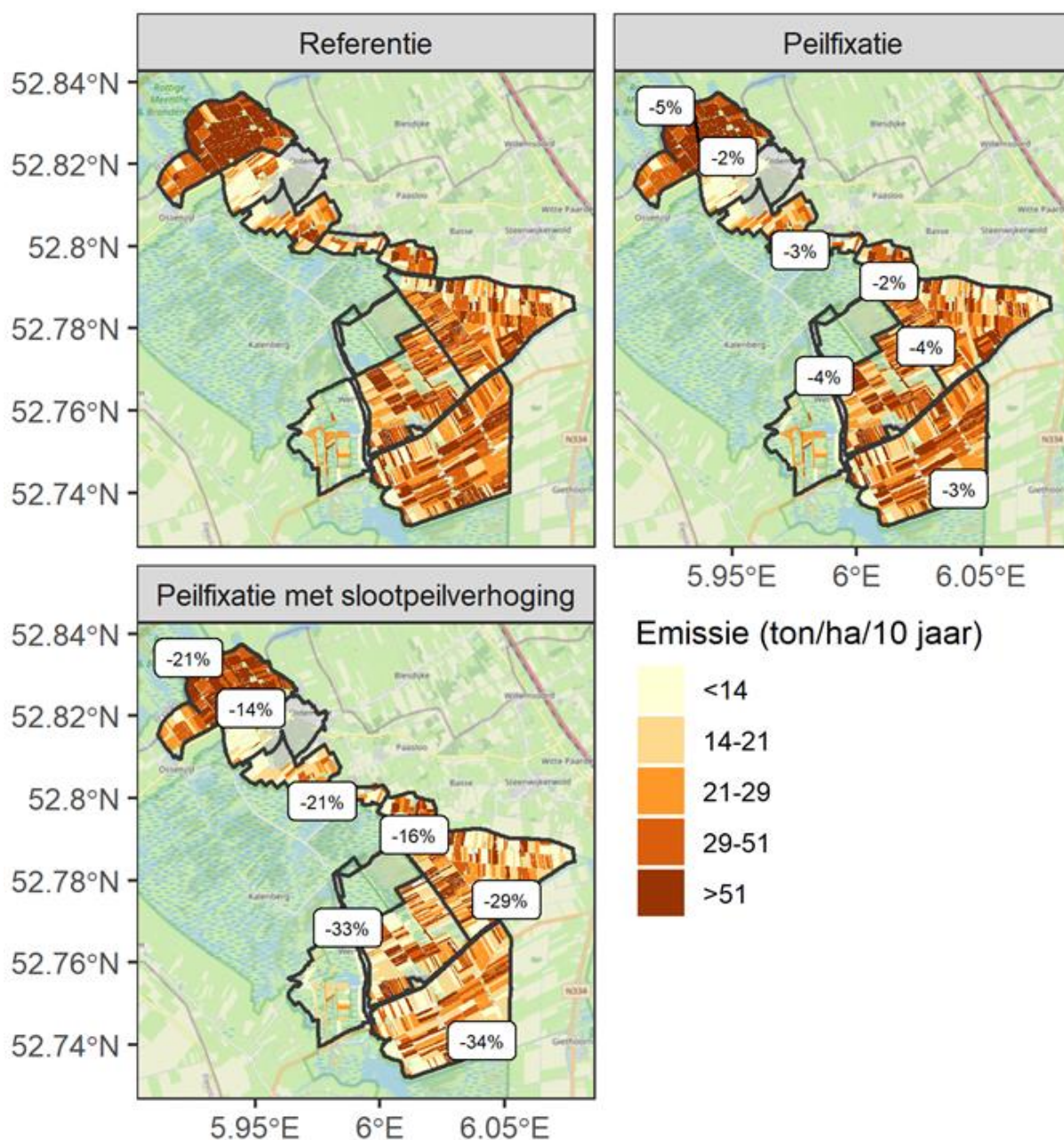


Figuur S5-2 Gemodelleerd effect van de diverse maatregelpakketten op CO₂ emissie in 2030

Scenario 'stoppen'



Figuur S5-3: Gemodelleerd effect van peilfixatie op bodemdaling in 2030



Figuur S5-4 Gemodelleerd effect van peilfixatie op CO₂ emissie in 2030

Bijlage VI: Gebruikte modellen

In deze bijlage is de globale werking van de modellen beschreven, inclusief gemaakte aannames. De modelberekeningen zijn onder te verdelen in de volgende stappen:

- Inladen van data
- Toepassen van klimaatmaatregelen
- Berekenen van bodemdaling en CO₂ emissie
- Berekenen van de waterflux van landbouwpercelen naar oppervlaktewater in de polder
- Bepalen van fosfaatconcentraties die bij de waterfluxen horen
- Berekenen van de P-vracht naar oppervlaktewater in de polder
- Berekenen van de opbrengstderving

Deze stappen zijn hieronder uitgelegd.

Inladen van data

Selecteren van relevante landbouwpercelen

Data van BasisRegistratie Gewaspercelen 2019 is gebruikt om de locatie van gewaspercelen en het gewas te verkrijgen. Percelen zijn vervolgens geselecteerd die binnen het huidig onderzoeksgebied liggen. In welke polder percelen lagen is bepaald door een overlay van de polderkaart en de gewaspercelen shapefile. Als een perceel in twee polders lag (net op de grens) kreeg het perceel de polder toegewezen waar het perceel voor het grootste deel in lag.

Inladen van neerslagdata

Neerslaggegevens van het station Marknesse (tijdspad 01-01-1994 tot 05-07-2020) zijn van het KNMI gedownload. Dit betreft dagelijkse metingen. In dit onderzoek is de etmaalsom van de neerslag (RH), de hoogste uursom van de neerslag (RHX) en Makkink referentiegewasverdamping (EV24) gebruikt. Vervolgens zijn de volgende aannamen gemaakt:

- KNMI geeft waarden van -1 op wanneer de RH of de RHX <0.05mm is. In deze gevallen is de RH en de RHX op 0 gezet (geen neerslag)
- Op 7 dagen (van de 9683) was er een NA waarde in de tabel aanwezig. In deze gevallen is de neerslag op 0 gezet.

Verder is de 5-dagelijkse neerslagsom bepaald (RH5days) door voor een bepaalde dag de neerslag som door te rekenen van 5 dagen voor de betreffende dag.

Toekennen van data aan landbouwpercelen

De volgende rasterdata is toegekend aan de gewaspercelen:

- GHG, GLG, kwel/infiltratie (MIPWA)
- Buisdraindiepte (NHI dataportaal)
- Veen -en kleidikte (data van WDODelta aangevuld met data van Infram)
- Hoogte van het perceel ten opzichte van maaiveld (AHN)

Voor de gewaspercelen zijn op een 50x50 meter resolutie de waarden van de raster bepaald. Vervolgens zijn deze waarden per perceel gemiddeld om tot één getal te komen per perceel.

De volgende puntdata is toegekend aan de gewaspercelen:

- Data van agrarische meetnetten. Dit betreft data van PAL, P-CaCl₂ en organische stof.
- Als er op een perceel geen metingen waren verricht in voormalige agrarische meetnetten, is middels een machine learning model die op data voor heel Nederland is getraind data toegevoegd van de bovenstaande variabelen.

De volgende vectordata is toegekend aan de gewaspercelen:

- Bodemtype (1:50.000 kaart Alterra)
- Peilgebieden (met corresponderende slootpeilen, data van WDOdelta open data portaal)

Met behulp van bovenstaande data zijn de volgende berekeningen uitgevoerd:

- Slootpeilen zijn met behulp van de AHN hoogte aangepast van m – NAP naar m- mv
- Op basis van de AHN hoogteverschillen binnen een perceel is de helling van het perceel bepaald
- De ligging van de percelen is vergeleken met een bestand die op basis van o.a. luchtfoto's aangeeft waar sloten gelegen zijn (TOP10NL). Vervolgens is bepaald wat de natte omtrek is van het perceel (omtrek van het perceel waar sloten aan grenzen gedeeld door de totale omtrek van het perceel)
- Op basis van bodemtype zijn effectieve poreusiteitswaarden aan de percelen toegekend
- Op basis van het gewastype is aan waarde aan het perceel toegewezen voor de verdampingssnelheid (hoog voor maïs, tarwe en aardappelen, laag voor de overige gewassen, gras heeft een eigen waarde)

Aanpassingen na data verkenning

Na data verkenning zijn de volgende aanpassingen gemaakt:

- Twee percelen in de Halfweg polder horen volgens WDOdelta niet tot een peilgebied (deze percelen doen waarschijnlijk niet mee met het huidige peilbesluit). Voor deze percelen is het gemiddelde slootpeil van de polder toegekend.
- Voor sommige percelen was geen data beschikbaar voor de veendikte. Na bestudering van het kaartmateriaal bleek dat dit percelen zijn waar waarschijnlijk geen veen ligt (bijvoorbeeld percelen op het hoger gelegen deel van Meenthebrug). Voor deze percelen is daarom aangenomen dat de veendikte 0 is (en dat daarom er daar ook geen kartering is uitgevoerd)
- MIPWA kwelfluxen zijn (op basis van voormalig uitgevoerde onderzoeken van o.a. Witteveen + Bos) veel te laag in de laag gelegen polders. Voor deze polders is de kwelflux aangepast (waarden bepaald door Witteveen + Bos, zie Mandemakers, 2019:
 - Gelderingen: 5mm/dag
 - Halfweg: 2.3mm/dag
 - Wetering: 4.5mm/dag
- Voor Marker- en Tussenbroek bleek het machine learning model organische stofgehalten te onderschatten (gefit op R² heeft ertoe geleid dat het model het goed doet bij waarden die veel voorkomen, organische stofgehalten in Marker- en Tussenbroek zijn hoger). Daarom is in deze polder het gemiddelde organische stofgehalte van de polder toegekend aan een perceel wanneer die niet eerder is meegenomen in een agrarisch meetnet

Toepassen van klimaatmaatregelen

In het model werd gekozen welke maatregelen doorgerekend werden:

- Verkleinen peilgebieden: "Ja" of "Nee"
- Slootpeilverhoging: "Optie 1", "Optie 2" of "Optie 3"
- Onderwaterdrainage: "Ja" of "Nee"
- Peilfixatie: "Nee", "Ja, zonder slootpeilverhoging" of "Ja, met slootpeilverhoging"

Verkleinen peilgebieden

Als hiervoor is gekozen werden de huidige peilgebieden van Gelderingen en Wetering opgedeeld in meerder kleinere peilgebieden (zie Figuur 4.7). Wetering werd opgedeeld in Wetering-West en Wetering-Oost, en Gelderingen werd opgedeeld in drie peilgebieden.

Slootpeilverhoging

Voor elk peilgebied (inclusief de opgedeelde peilgebieden als hiervoor was gekozen) werd bepaal hoeveel het slootpeil verhoogd kon worden totdat 10% van de percelen binnen een peilgebied:

- Een drooglegging in de zomer kregen van <60cm -mv (slootpeilverhoging optie 1)
- Een drooglegging in de zomer kregen van <40cm -mv (slootpeilverhoging optie 2)
- Een drooglegging in de zomer kregen van <20cm -mv (slootpeilverhoging optie 3)

Afhankelijk van de gekozen optie van slootpeilverhoging werden de slootpeilen aangepast.

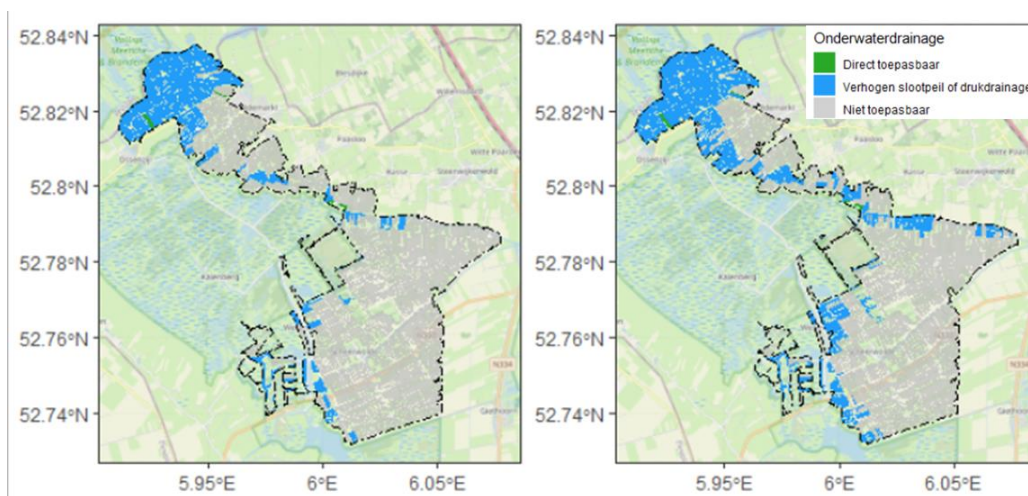
Onderwaterdrainage

Traditionele onderwaterdrainage wordt als toepasbaar gezien wanneer:

- De veenlaag dikker is dan 60cm
- Het slootpeil tussen de 25cm -mv en 40cm -mv inligt
- De kweldruk lager ligt dan 100mm/jaar
- Er een sloot grenst aan het perceel
- De GLG boven de veenlaag uitkomt

Voor drukdrainage zijn de uitgangspunten gelijk, met uitzondering dat het slootpeil lager mag liggen dan 40cm -mv. Hiervoor is gekozen omdat er onafhankelijk van het slootpeil gestuurd kan worden op de grondwaterstand. Door het uitgangspunt 'de GLG moet boven de veenlaag uitkomen' zijn enkele percelen waar onderwaterdrainage mogelijk toepasbaar (maar minder effectief) is uitgesloten. Ter indicatie is hieronder (geen slootpeilverhoging aangenomen) weergegeven (i) welke percelen in aanmerking komen voor onderwaterdrainage (als in huidig model) (ii) welke percelen in aanmerking zouden komen wanneer het uitgangspunt niet zou worden gehanteerd.

Traditionele onderwaterdrainage is modelmatig aangelegd op 20cm onder het slootpeil. Drukdrainage is aangelegd op een diepte van 75cm -mv en kan onafhankelijk van slootpeil met een pomp worden gestuurd. Deze waarden zijn gekozen op basis van Nationaal Kennisprogramma Bodemdaling (2020) en Rozemeijer et al. (2019).



Figuur S6-1 Percelen die in het huidig model in aanmerking komen voor onderwaterdrainage (links) en percelen die in aanmerking zouden komen voor onderwaterdrainage wanneer het uitgangspunt niet zou worden gehanteerd dat

de GLG tot de veenlaag moet komen (rechts). Dit plaatje geldt voor de huidige situatie (zonder additionele vernattende maatregelen).

Aanpassen van de grondwaterstand

Het effect van het verhogen van het slootpeil op de grondwaterstand is doorgerekend middels een lineair model die is getraind op data van het huidig onderzoeksgebied (Formule 8 in Hoofdstuk 4.3.2). Het effect van onderwaterdrainage op de grondwaterstand is doorgerekend op basis van de resultaten van pilotonderzoeken:

- Traditionele onderwaterdrainage:
 - Verhoogt de GLG met 7.5cm
 - Verlaagt de GHG met 15cm
- Drukdrainage
 - Verhoogt de GLG tot een bepaald streefpeil (in het huidig onderzoek is een streefpeil van 40cm -mv aangehouden)
 - Verlaagt de GHG met 16cm

Aangenomen is dat de drooglegging bij de remmende maatregelen wordt aangepast naarmate er bodemdaling optreedt (en daarmee constant blijft). Dit is anders voor de maatregel peilfixatie. Hier is doorgerekend dat door bodemdaling grondwaterstanden steeds dichterbij maaiveld komen te liggen. De mate van bodemdaling is daarmee de mate waarmee de GLG en GHG worden verhoogd (ten opzichte van maaiveld).

Berekenen van bodemdaling en CO₂-emissie

Bodemdaling

Voor een specifieke tijdsperiode (2030 of 2050) is met behulp van al dan niet aangepaste van den Akker functies bodemdaling berekent. Bij organische stofgehalten >50% zijn geen aanpassen gedaan en gelden Formules 1 (geen kleidek) en 2 (dun kleidek) in Hoofdstuk 4.2. Bij organische stofgehalten <50% (vrijwel het gehele onderzoeksgebied) zijn de formules aangepast om rekening te houden met verschillen tussen de percelen van het huidig onderzoek en de percelen op Zegveld. In dit geval is bodemdaling berekent met Formules 3 (geen kleidek) en 4 (dun kleidek). Aangezien Marker- en Tussenbroek de enige polder is met een dun kleidek is hier met name Formule 4 toegepast en in de overige polders Formule 3.

CO₂-emissie

De snelheid van bodemdaling is gekoppeld aan een CO₂ flux met behulp van Formule 5 in Hoofdstuk 4.2. Hierbij zijn verschillen tussen percelen meegenomen door verschillen in organische stofgehalten mee te nemen in de berekening (hogere organische stofgehalten (als in Marker- en Tussenbroek) leidt daarmee tot hogere CO₂ fluxen).

Berekenen van de waterflux (water wat het perceel verlaat via oppervlakkige uitspoeling, ondiepe uitspoeling, drains, infiltratie en kwel)

De waterflux is berekend door een combinatie van meerdere stappen:

1 Bepalen van het neerslagoverschot

Eerst zijn de neerslaggegevens van station Marknesse toegevoegd aan de gewaspercelen. Neerslagdata is geaggregeerd van dagelijkse naar maandelijkse neerslagwaarden. Makking referentie gewasverdampingswaarden zijn gewijzigd op basis van gewasstype (

Tabel S9-1).

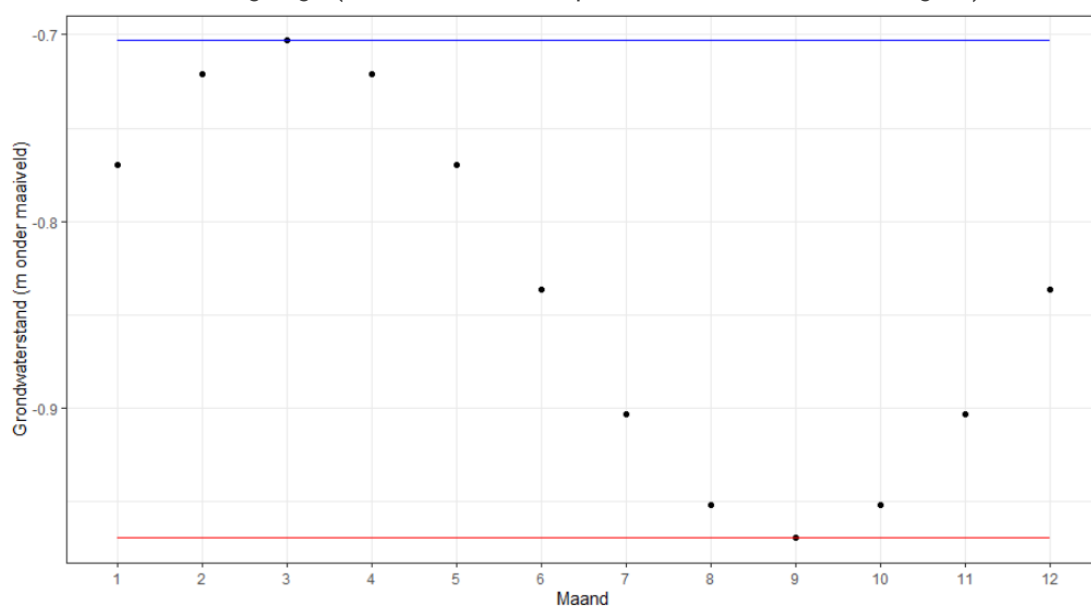
Tabel S9-1 Waarden waarmee de Makking referentie gewasverdampingswaarden mee zijn vermenigvuldigd

	Jan	Feb	Ma	Apr	Mei	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dec
Gras	0.8	0.9	1	1	1	1	1	0.98	0.9	0.82	0.75	0.65
Mais, tarwe en aardappel	0.36	0.36	0.36	0.75	0.88	1.1	1.2	1.2	1.1	0.36	0.36	0.36
Overig bouwland	0.36	0.36	0.36	0.62	0.80	1	1.02	1.1	1.1	0.36	0.36	0.36

Op basis van de aangepaste verdampingswaarden is per perceel de maandelijkse verdamping bepaald. Aan de hand daarvan is het neerslagoverschot bepaald (neerslag – verdamping). Het neerslagoverschot is bepaald voor elke maand voor elk jaar. Dit neerslagoverschot is geaggregeerd naar een gemiddeld maandelijks neerslagoverschot.

2 Bepalen van de wateropslag capaciteit van de bodem

MIPWA geeft een gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG) en een gemiddeld hoogste grondwaterstand (GHG), en geen variatie over de maanden heen. Deze variatie is modelmatig middels een sinusfunctie aangelegd (voorbeeld voor een perceel in de onderstaande figuur):



Figuur S6-2 Sinusfunctie die op basis van de GLG (rood) en GHG (blauw) de grondwaterstand over de maanden bepaald.

Een soortgelijke sinusfunctie is gecreëerd voor de kweldruk. Op van het verloop van de grondwaterstanden over de maanden is berekend hoeveel water de bodem in een bepaalde maand meer of minder heeft opgeslagen (een hogere grondwaterstand in oktober in vergelijking met september betekent bijvoorbeeld dat de bodem meer water in oktober heeft opgeslagen). Op basis van de verschillen in wateropslag van de bodem is het neerslagoverschot aangepast. In totaal is het neerslag daarmee berekent volgens 'neerslagoverschot = neerslag – verdamping - Δ opslag

3 Berekenen oppervlakkige uitspoeling

Runoff is in het model berekend als een opsomming van twee vormen van runoff. De eerste vorm is runoff via peak events; tijden waarin er in een korte tijd heel veel neerslag is (Horton runoff)

Hierbij is gebruik gemaakt van kwel/infiltratie data. Wanneer de hoeveelheid neerslag de infiltratiecapaciteit van de bodem overstijgt (tijden van hevige neerslag) is er een bepaalde hoeveelheid

neerslag die niet direct kan infiltreren `neerslagflux – infiltratieflux`. Hoeveel water daadwerkelijk via runoff van het veld naar het oppervlaktewater gaat hangt af van de volgende factoren

- Gewas
- Runoff is makkelijker wanneer er geen gewas op het veld staat. Dit verschilt voor grasland (altijd gras) en bouwland (staat niet altijd een gewas op het veld). De waterflux moet daarom vermenigvuldigd worden met een gewasfactor. Deze zijn opgenomen in de onderstaande tabel.

Tabel S9-2 Gewasfactoren voor het aanpassen van de runoff-flux

	Jan	Feb	Ma	Apr	Mei	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dec
Gras	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Bouwland	1	1	1	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	1	1	1

- De helling van het perceel. Bij een grotere helling wordt runoff makkelijker. Als uitgangspunt is in het model afhankelijk van de helling (minimaal risico bij 1% helling, maximaal risico bij een (niet voorkomende) helling van 20%) de runoff aangepast.
- Aanwezigheid van sloten. Als er geen sloten aanwezig zijn is er geen runoff naar het oppervlaktewater in de polder.

Op basis van de bovenstaande punten is de runoff door peak events doorgerekend als `(neerslagflux – infiltratieflux) · Gewasfactor · Hellingseffect`. De tweede vorm van runoff is runoff omdat de opslagcapaciteit van de bodem is bereikt (CN runoff). De CN runoff methode betreft een empirische formule die de runoff beschrijft op basis van CN coëfficiënten en neerslaggegevens. De CN coëfficiënten zijn afhankelijk van bodemtype en gewas. Deze methode is in het huidig onderzoek gebruikt om de runoff te kwantificeren wat een gevolg is van het vollopen van de opslagcapaciteit van de bodem. Voor details wordt verwezen naar (Mishra & Singh, 2003).

De totale runoff is in het model de optelling van de runoff door peak events (Horton runoff) en runoff door het vollopen van de opslagcapaciteit van de bodem (CN methode).

4 Berekenen drainageflux

Omdat de grondwaterstanden in het huidig onderzoek zijn aangepast op basis van klimaatmaatregelen, en omdat er afhankelijk van het maatregelpakket en de locatie onderwaterdrainage is toegepast is de invloed van huidige buisdrains niet meegenomen. Wel is de drainflux van onderwaterdrainage bepaald. Voor traditionele onderwaterdrainage is aangenomen dat de drain water draineert wanneer de grondwaterstand boven de draindiepte uitkomt. In dit geval is de aanname dat 30% van de hoeveelheid grondwater wat boven de drain uitkomt draineert:

$$\text{Drainflux} = 0.3 * (\text{grondwaterstand} - \text{draindiepte}) * \text{Porositeit}$$

Voor drukdrainage geldt dat er gestuurd kan worden op drainage/infiltratie door het water in de put te verhogen of verlagen. Daarom is voor drukdrainage aangenomen dat er alleen water wordt gedraineerd wanneer de grondwaterstand uitkomt boven de gemiddelde grondwaterstand (dus dichterbij de GHG ligt dan de GLG). In dit geval geldt dezelfde formule als voor traditionele onderwaterdrainage.

5 Berekenen ondiepe uitspoeling en infiltratie

Verschillen in de “natheid” van percelen leidt tot verschillen in hoeveel water naar het oppervlaktewater in de polder stroomt via ondiepe uitspoeling en hoeveel water infiltreert. Om hier grip op te krijgen zijn “natheids-indicatoren” voor de percelen opgesteld:

- Voor alle gewaspercelen in het bereik van het MIPWA model (296.059 percelen) is de GLG en GHG bepaald.
- Deze waarden zijn gecombineerd tot een natheidsindicator, waarbij hogere grondwaterstanden leiden tot een hogere indicatorwaarde

Voor de indicatorwaarde is aangenomen dat bij een waarde van 1 er geen infiltratie is. Bij een waarde van 0 is er geen ondiepe uitspoeling. De verhouding van infiltratie versus ondiepe uitspoeling is lineair tussen 0 en 1 (e.g. een waarde van 0.5 is een 1:1 verhouding tussen infiltratie en ondiepe uitspoeling).

Wanneer er nog water over is van het neerslagoverschot na de water die verlaten is via runoff (Qrunoff) en drains (Qdrain) is het restant verdeeld over ondiepe uitspoeling en infiltratie.

Ondiepe uitspoeling = (Neerslagoverschot – Qrunoff – Qdrain) · natheidsindicator

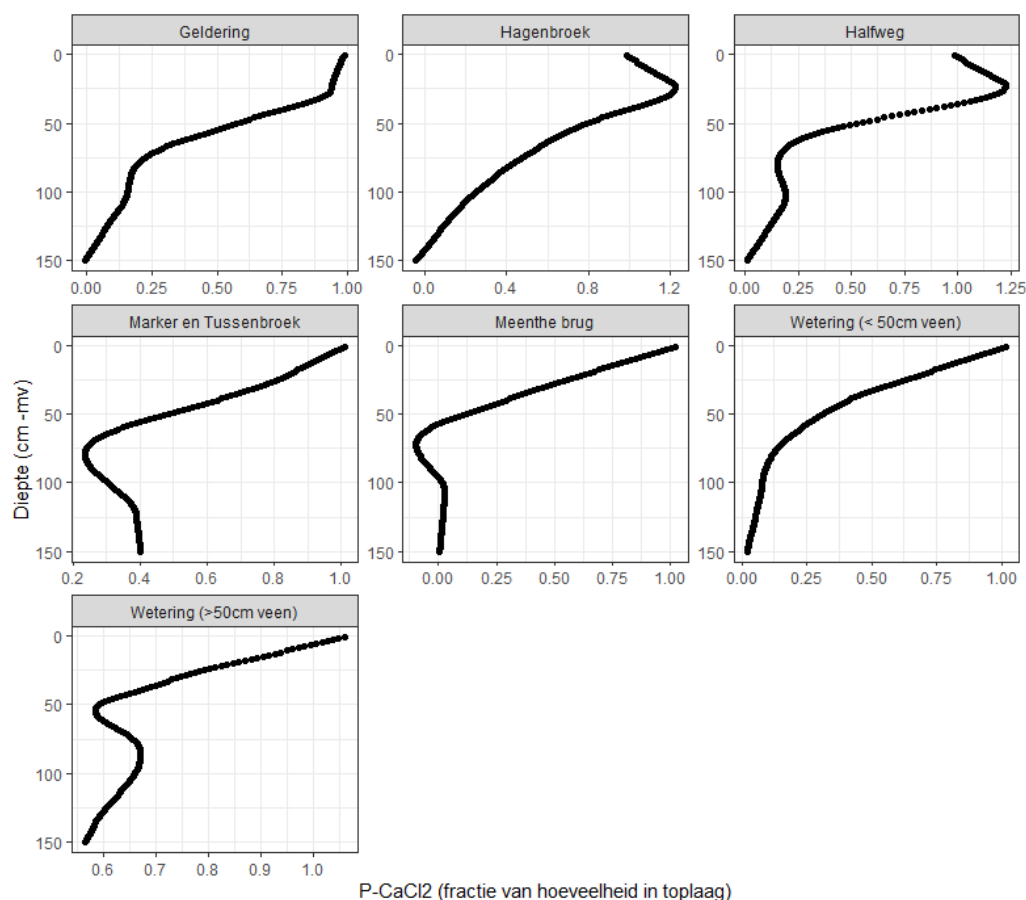
Infiltratie = (Neerslagoverschot – Qrunoff – Qdrain) · (1- natheidsindicator)

6 Berekenen kwelflux

De kwelfluxen van het MIPWA model zijn gebruikt voor het berekenen van de kweldruk. Voor de lager gelegen polders zijn de aangepaste waarden gebruikt van Mandemakers, 2019.

Bepalen van fosfaatconcentraties die tot de waterfluxen behoren

Bij de hierboven beschreven waterfluxen is fosfaatconcentratie nodig om een P-vracht te berekenen. Agrarische meetnetten geven met name gehalten in de toplaag van het perceel (mg/kg). Mede hiervoor zijn in het veldwerk fosfaatmetingen over de diepte uitgevoerd. Hierdoor kon, per polder, een beeld verkregen worden over het verloop van de fosfaatgehalten (modellen in onderstaande figuur).



Figuur S6-3 Polder specifieke loess-modellen die de P-CaCl₂ concentratie in een bodemlaag berekenen op basis van de concentratie in de toplaag

De modellen in de bovenstaande figuur zijn gebruikt om op basis van de fosfaatgehalten in de toplaag het $P\text{-CaCl}_2$ gehalte in een gewenste diepte te berekenen. De $P\text{-CaCl}_2$ is gebruikt omdat dit gehalte het sterkst gecorreleerd is aan beschikbaar fosfaat (en daarmee het fosfaat wat makkelijker uitspoelt). De volgende aannames zijn gemaakt voor het bepalen van de fosfaatconcentraties:

- Het gehalte $P\text{-CaCl}_2$ (mg/kg) staat gelijk aan de fosfaatconcentratie in het water waarmee het in contact staat (mg/l)
- De concentratie P in ondiepe uitspoeling is gelijk aan het gehalte $P\text{-CaCl}_2$ in de toplaag (gemiddeld gehalte over de eerste 10cm bodem)
- De concentratie P in drains en ondiepe uitspoeling is gelijk aan het gehalte $P\text{-CaCl}_2$ op de diepte van de grondwaterstand

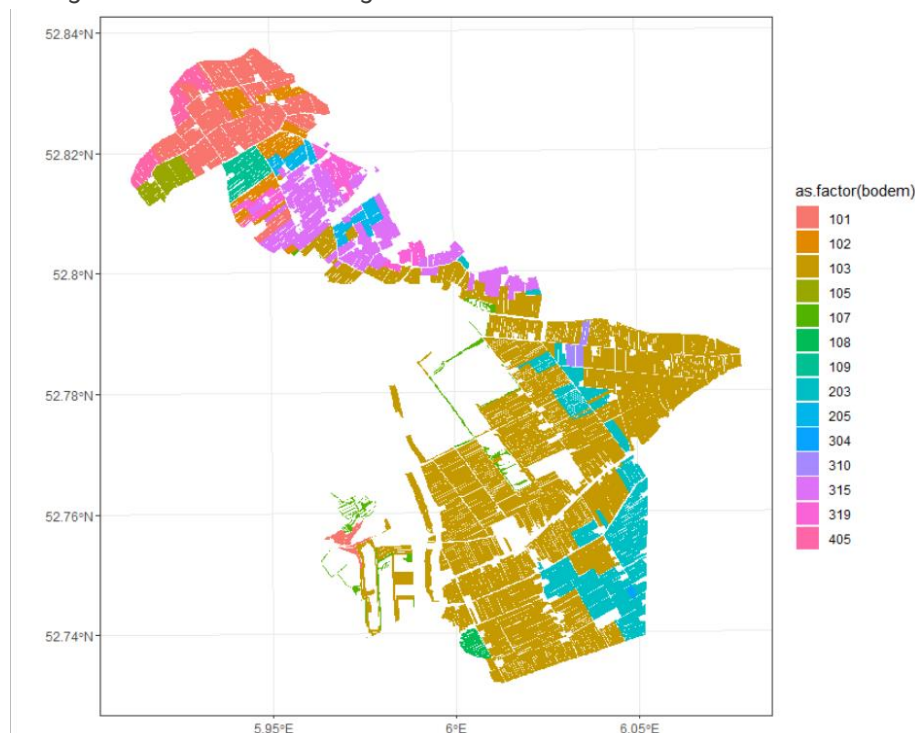
Voor de P concentratie van kwel zijn poldergemiddelde waarden gebruikt (eigen grondwateranalyses, zie Hoofdstuk 3.2.2). Hierbij is gebruik gemaakt van de gemeten P-totaal concentraties.

Bereken van de P-vracht naar oppervlaktewater in de polder

De P-vrachten zijn berekend door de waterfluxen van oppervlakkige uitspoeling, ondiepe uitspoeling, onderwaterdrains en kwel te vermenigvuldigen met de hierboven beschreven concentraties.

Berekenen van opbrengstderving

De opbrengstderving is berekend met behulp van de WWL-tabel (zie documentatie in Waterwijzer Landbouw, 2020). De WWL-tabel gebruikt bodemtype (bodemfysische eenheden van BOFEK2012) met grondwaterstanden (GLG en GHG), gewascategoriën en historische neerslagdata om indirecte en directe gewasderiving te kwantificeren. De bodemfysische eenheden volgens de BOFEK2012 kaart zijn weergegeven in onderstaande figuur.



Figuur S6-4 BOFEK2012 bodemeenheden

De BOFEK2012 kaart geeft een goed beeld van de bodemopbouw van de polders:

- In de laag gelegen polders komt met name nr. 103 voor (Kleiarme moerige bovengrond op veen met binnen 120cm -mv vaak een zandondergrond). In met name Halfweg komt 203 voor (Kleiarm veen op zandondergrond).

- In Marker- en Tussenbroek is veelal nr.101 aanwezig (kleig moerige bovengrond of kleidek op eutroof veen tot tenminste 120cm -mv).
- De zandgronden in met name het noordelijk deel van Meenthebrug, Grote polder en Hagenbroek worden ook herkend (nr. 310, zwak lemige zandgronden met een matig dik cultuurdek).

Binnen de WWL-tabel zijn de volgende aannames gemaakt:

- Geen irrigatie
- Neerslagdata is gebruikt van station Eelde (neerslagdata van 1981-2010)
- Er is geen rekening gehouden met klimaatverandering
- Het model is doorerekend voor de periode 1981-2010

Bronnen

Alle modellen zijn geschreven in R. (R Core Team, 2020). De volgende packages zijn gebruikt: data.table (Dowle & Srinivasan, 2020), dplyr (Wickham et al., 2020), tidyr (Wickham, 2020), Sf (Pebesma, 2018), raster (Hijmans, 2020), ncdf4 (Pierce, 2019), rgdal (Bivand et al., 2020), exactextractr (Baston, 2020), tmap (Tennekes, 2018), lme4 (Bates et al., 2015), doParallel (Microsoft Corporation, 2020), foreach (Microsoft Corporation, 2020), ggplot2 (Wickham, 2016), ggrepel (Slowikowski, 2020), ggspatial (Dunnington, 2020) en aspace (Bui, Buliung, & Remmel, 2012). De R packages voor de WaterWijzer Landbouw zijn verkregen via Waterwijzer Landbouw, 2020.



Nutriënten Management Instituut BV
Nieuwe Kanaal 7c
6709 PA Wageningen

tel: (06) 29 03 71 03
e-mail: <mailto:nmi@nmi-agro.nl>
website: www.nmi-agro.nl