

Subsurface Organic Matter Emission Registration System (SOMERS)

SOMERS: Subsurface Organic Matter Emission Registration System

Beschrijving SOMERS 1.0, onderliggende modellen en veenweidenrekenregels.

Gilles Erkens, Roel Melman, Simon Jansen, Jim Boonman, Mariet Hefting, Joost Keuskamp, Huize Bootsma, Laura Nougues, Merit van den Berg, Ype van der Velde

Met medewerking van:

Jan van den Akker, Rudi Hessel, Christian Fritz, Ralf Aben, Bart Kruyt, Ronald Hutjes, Sarah Faye Harpenslager, Sanneke van Asselen, Saskia Hommes, Henk Kooi

Reviewers:

Jaco van der Gaast (Deltares), Perry de Louw (Deltares | WUR), Rens van Beek (UU), Bart van den Hurk (Deltares | VU)

Definitief rapport

Versie 4
d.d. 21 december 2022

Inhoudsopgave

1	Inleiding	5
1.1	Aanleiding	5
1.2	Monitoring- en registratiedoelstelling	6
1.3	Opzet en aanpak monitoring	6
1.4	Toepassingsmogelijkheden	8
1.5	Gebiedsafbakening	9
1.6	SOMERS, SOMERS 1.0 en de rekenregels	9
2	Opzet SOMERS	10
2.1	Aanpak van SOMERS	10
2.2	Eisen aan SOMERS	10
2.3	Procesmodellen als basis voor SOMERS	11
2.3.1	De rol van broeikasgasfluxmetingen en data-assimilatie	12
2.3.2	SOMERS als multi-model ensemble	12
2.4	Relaties met bestaande monitoringsystemen en belangrijkste verschillen	13
2.4.1	De LULUCF-rapportage methode en verschillen met SOMERS	14
2.4.2	Uitstootbepalingen op basis van empirische relaties	15
2.5	Procesmodellen om broeikasgasuitstoot uit organische bodems te berekenen	18
2.6	SOMERS 1.0	19
2.6.1	eisen aan SOMERS 1.0	19
2.6.2	SOMERS 1.0 op basis van hydrologisch model en koolstofmodel	20
3	Beschrijving SOMERS 1.0	23
3.1	Bodemarchetypen	23
3.2	Configuratie van PeatParcel2D	26
3.2.1	Parameters	27
3.2.2	Modeldiscretisatie en randvoorwaarden	27
3.2.3	Bodemparameters	29
3.2.4	Waterhuishoudkundige maatregelen	29
3.2.5	Bodemvocht	31
3.2.6	Bodemtemperatuur	32
3.3	AAP	32
4	Regionale aanpak bij inzet model	34
4.1	Kalibreren op grondwaterstanden	34
4.1.1	Geohydrologische parameters	34
4.1.2	Kalibratie drainweerstand waterhuishoudkundige maatregel	36
4.2	Regionale indeling	37
5	Resultaten SOMERS 1.0	40

5.1 Toepassing SOMERS 1.0 ten behoeve van de uitstootregistratie	40
5.1.1 Grondwaterdynamiek (PeatParcel2D)	41
5.1.2 Afbraakcondities (PeatParcel2D)	42
5.1.3 CO ₂ -uitstoot (AAP-module)	43
5.1.4 Invloed van het weer	44
5.2 Eerste resultaten rekenregels	45
5.2.1 Effect maatregelen op hoofdlijnen	46
5.2.2 Effect bodemarchetypen	48
5.2.3 Effect slootafstand/perceelbreedte op de maatregel	49
5.2.4 Effect regionale hydrologie	51
6 Onzekerheden en aandachtspunten bij SOMERS 1.0	52
6.1 Voorspellend vermogen SOMERS 1.0	52
6.1.1 Grondwaterstanden	52
6.1.2 CO ₂ -uitstoot	58
6.2 Niet-gekwantificeerde onzekerheden en beperkingen in SOMERS 1.0	60
6.3 Doorwerking van onzekerheden en aandachtspunten bij gebruik	64
6.3.1 Doorwerking van onzekerheden	64
6.3.2 Aandachtspunten voor gebruik	64
7 Aanpassingen op weg naar SOMERS 2.0	66
7.1 Meetreeksen	66
7.2 SOMERS als multi-model ensemble	67
7.3 Structurele modelverbeteringen	67
7.3.1 Verbeteringen en aanpassingen op korte termijn	68
7.3.2 Verbeteringen en aanpassingen op lange termijn	69
8 Benodigde meetreeksen en validatiedata	71
Referenties	73
Bijlage A SOMERS 1.0 technical description	78
A.1. PeatParcel2D module	78
A.1.1 Model setup	78
A.1.2 2D MODFLOW groundwater model	79
A.1.3 Discretization	80
A.1.4 Boundary conditions	82
A.1.5 Parameterization	82
A.1.6 Regional groundwater model approach	87
A.1.7 Water management measures	87
A.1.8 Soil moisture	88
A.1.9 Soil temperature	88
A.2. Peat decomposition model (AAP-module)	90
A.2.1 Model set-up	90
A.2.2 Aerobic decomposition potential	90
A.2.3 Relative aerobic respiration activity – soil moisture	91
A.2.4 Relative aerobic respiration activity – soil temperature	91
A.2.5 Uncertainty in relative aerobic respiration activity-curves	92
A.2.6 CO ₂ -emission	93

A.3. References	95
B. Tabel kalibratielocaties	97
C. Figuren Rekenregels SOMERS 1.0	98
West-Nederland, winterpeil = zomerpeil, slootafstand 40 m	99
West-Nederland, winterpeil = -10 cm zomerpeil, slootafstand 40 m	100
West-Nederland, winterpeil = zomerpeil, slootafstand 60 m	101
West-Nederland, winterpeil = -10 cm zomerpeil, slootafstand 60 m	102
West-Nederland, winterpeil = zomerpeil, slootafstand 80 m	103
West-Nederland, winterpeil = -10 cm zomerpeil, slootafstand 80 m	104
Overijssel, lichte kwel, winterpeil = zomerpeil, slootafstand 40	105
Overijssel, lichte kwel, winterpeil = -10 cm zomerpeil, slootafstand 40	106
Overijssel, lichte wegzijing, winterpeil = zomerpeil, slootafstand 40	107
Overijssel, lichte wegzijing, winterpeil = -10 cm zomerpeil, slootafstand 40	108
Overijssel, lichte kwel, winterpeil = zomerpeil, slootafstand 60	109
Overijssel, lichte kwel, winterpeil = -10 cm zomerpeil, slootafstand 60	110
Overijssel, lichte wegzijing, winterpeil = zomerpeil, slootafstand 60	111
Overijssel, lichte wegzijing, winterpeil = -10 cm zomerpeil, slootafstand 60	112
Overijssel, lichte kwel, winterpeil = zomerpeil, slootafstand 80	113
Overijssel, lichte kwel, winterpeil = -10 cm zomerpeil, slootafstand 80	114
Overijssel, lichte wegzijing, winterpeil = zomerpeil, slootafstand 80	115
Overijssel, lichte wegzijing, winterpeil = -10 cm zomerpeil, slootafstand 80	116
Friesland/Groningen, winterpeil = zomerpeil, slootafstand 60 m	117
Friesland/Groningen, winterpeil = -20 cm zomerpeil, slootafstand 60 m	118
Friesland/Groningen, winterpeil = zomerpeil, slootafstand 80 m	119
Friesland/Groningen, winterpeil = -20 cm zomerpeil, slootafstand 80 m	120
Friesland/Groningen, winterpeil = zomerpeil, slootafstand 100 m	121
Friesland/Groningen, winterpeil = -20 cm zomerpeil, slootafstand 100 m	122
Friesland/Groningen, winterpeil = zomerpeil, slootafstand 120 m	123
Friesland/Groningen, winterpeil = -20 cm zomerpeil, slootafstand 120 m	124
Friesland/Groningen, winterpeil = zomerpeil, slootafstand 140 m	125
Friesland/Groningen, winterpeil = -20 cm zomerpeil, slootafstand 140 m	126

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

De verhoogde concentratie van de broeikasgassen koolstofdioxide (CO_2), methaan (CH_4) en lachgas (N_2O) in de atmosfeer draagt bij aan het opwarmen van het klimaat. Het Verdrag van Parijs (2015) heeft als doelstelling om de opwarming van het klimaat te beperken door de broeikasgasuitstoot te reduceren. In Nederland zijn deze doelstellingen vastgelegd in de Klimaatwet (2019; BWBR0042394) met een reductiedoelstelling van 49% van de broeikasgasuitstoot ten opzichte van 1990 in 2030 en een reductiedoelstelling van 95% in 2050. In het Klimaatakkoord (2019) is door overheden en maatschappelijke partijen vastgelegd hoe Nederland aan deze doelstellingen gaat voldoen per sector.

De Nederlandse organische gronden¹ zijn momenteel een bron van broeikasgassen. Deze broeikasgasuitstoot valt binnen de sector landbouw en landgebruik van het Klimaatakkoord. In het Klimaatakkoord is overeengekomen dat in 2030 de broeikasgasuitstoot uit de veenweidegebieden in Nederland met 1 megaton ($\text{CO}_{2\text{eq}}$) per jaar moet zijn gereduceerd en dat het bereiken van deze doelstelling zal worden gemonitord. Dit is verder uitgewerkt in het Veenplan Eerste Fase (Kamerstuk 32 813, nr. 562, 2020), waarin wordt aangegeven dat er een monitoringssystematiek wordt ontwikkeld.

Als onderdeel van het Veenplan Eerste Fase is een Subwerkgroep Monitoring² opgericht die sinds september 2020 heeft gewerkt aan een monitoringssystematiek (Concept monitoringssystematiek Subwerkgroep Monitoring, 21-10-2021). Een centraal onderdeel van de monitoringssystematiek is de manier waarop wordt geregistreerd hoeveel broeikasgas er wordt uitgestoten vanuit de Nederlandse organische gronden per jaar en de bepaling hoeveel reductie per jaar is behaald door het uitvoeren van maatregelen. Ten behoeve van deze monitoring is het registratiesysteem SOMERS (Subsurface Organic Matter Emission Registration System; in het Nederlands: Ondergrond Organische Stof Emissie Registratie Systeem) opgezet door het Nationaal Onderzoeksprogramma Broeikasgassen Veenweiden (NOBV) in opdracht van de Subwerkgroep Monitoring.

Dit rapport documenteert de opzet van SOMERS en de onderliggende rekenmodellen. Het doel van deze rapportage is om i) SOMERS als registratiesysteem te introduceren en de aanpak en opzet toe te lichten, ii) de eerste resultaten die binnen SOMERS zijn behaald (o.a. de rekenregels) te onderbouwen, iii) de gehanteerde methode zodanig te documenteren dat de resultaten reproduceerbaar zijn, iv) te documenteren wat de aandachtspunten zijn bij het gebruik van de uitkomsten van de eerste inzet van SOMERS (SOMERS 1.0). Tenslotte wordt er vooruitgekeken naar verbeteringen die in de komende versies zullen worden doorgevoerd.

¹ Met organische gronden wordt bedoeld alle gronden in Nederland waar in de bovenste 120 cm cumulatief tenminste 10 cm aan organische materiaal voorkomt. Dit zijn over het algemeen de moerige en venige gronden volgens de bodemclassificatie. Zie verder Erkens & Melman (2020a) voor een beschrijving van de omvang en spreiding van de Nederlandse organische gronden. In dit document wordt verder voornamelijk gesproken over de veenweidegebieden, dat zijn de gebieden zoals gekarteerd in Erkens & Melman (2020a) onder niveau 3b.

² De Subwerkgroep Monitoring is onderdeel van werkgroep Veenweide, de ambtelijke ondersteuning van de Regiegroep Veenweiden. Deelnemers aan de subwerkgroep zijn: Marieke de Groot (ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, voorzitter), Chris van Naarden (LNV), Fokke Fennema (Rijksdienst voor Ondernemend Nederland); Bert Moonen (Waterschap Drents-Overijsselse Delta; namens de waterschappen); Hans Mankor (Provincie Utrecht; namens de provincies); Erik Jansen (STOWA/VIC, namens NOBV); Jan Peter Lesschen (WEnR; namens LULUCF-werkgroep); Wiebe Borren (Natuurmonumenten; namens de natuurorganisaties); Auke Jan Veenstra (LTO; namens de landbouworganisaties); Gilles Erkens (Deltares | Universiteit Utrecht, namens NOBV onderzoeksconsortium). Technische ondersteuning door Roel Melman (Deltares/NOBV), Siem Jansen (Deltares/VU/NOBV) en Laura Nouges (Deltares/NOBV)

Deze rapportage is de eerste in een langere reeks waarin nieuwe ontwikkelingen in SOMERS zullen worden besproken. De rapportages vormen daarmee een momentopname van een doorgaande ontwikkeling.

Deze rapportage is in concept (versie 1) eind januari 2022 opgeleverd aan STOWA (Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer) als gedelegeerd opdrachtgever van het NOBV namens het Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit en de Subwerkgroep Monitoring. De leden van de Subwerkgroep Monitoring en de leden van de begeleidingscommissie van het NOBV (bestaande uit medewerkers van provincies en waterschappen) hebben een conceptversie van dit document van commentaar voorzien. De rapportage (versie 2) is vervolgens wetenschappelijk gereviewd door onafhankelijke onderzoekers binnen het NOBV. Versie 3 is gereviewd door onderzoekers van buiten het NOBV. In maart 2022 is versie 3 opgeleverd aan de Regiegroep Veenweiden. Eind 2022 is versie 4 (deze versie), waarin al het reviewcommentaar is verwerkt, online gepubliceerd op de website van het NOBV.

1.2 Monitoring- en registratiedoelstelling

De doelstelling van de voorgestelde monitoring binnen het Klimaatakkoord is het volgen van de broeikasgasuitstootreductie in Nederlandse veenweidegebieden zodat deze kan worden gerelateerd aan de uitstootreductiedoelstellingen. Ten behoeve hiervan wordt de uitstootreductie geregistreerd met SOMERS. SOMERS is daarmee een registratiesysteem om de voortgang van de reductie van de broeikasgasuitstoot uit veengronden en moerige gronden in Nederland te volgen ten behoeve van het Klimaatakkoord. Hierbij gaat het om het registreren (vastleggen en ontsluiten op een uniforme manier) van een uitstoot- of reductiegetal.

SOMERS is gebaseerd op uitkomsten van instrumenten die de broeikasgasuitstoot kwantitatief bepalen. Vooralsnog wordt ingezet op het registreren van de uitstoot van koolstofdioxide (CO_2), de andere broeikasgassen methaan (CH_4) en lachgas (N_2O) kunnen in een later stadium worden toegevoegd. In het Klimaatakkoord ligt de focus op de beperking van de uitstoot van koolstof die bijdraagt aan de opwarming van het klimaat. Dit betekent dat alleen lang-cyclisch koolstof wordt geregistreerd. In het geval van veen is dit ‘fossiel’ koolstof (honderden tot duizenden jaren oud) dat tot dit moment voor langere termijn opgeslagen was in het veen, maar door menselijke handelen weer wordt teruggebracht in de atmosfeer, waardoor de atmosferische concentratie van CO_2 stijgt.

De registratie van de (reductie van) broeikasgasuitstoot zal ieder jaar plaatsvinden voor het voorafgaande jaar. Daarvoor wordt jaarlijks een inventarisatie gemaakt van genomen maatregelen in het voorgaande jaar (alleen afgeronde maatregelen of aanpassingen in maatregelen). Dit wordt met terugwerkende kracht gedaan voor alle maatregelen die na 31 december 2016 zijn genomen (cf. Concept monitoringsystematiek Subwerkgroep Monitoring, 21-10-2021).

1.3 Opzet en aanpak monitoring

In de monitoringssystematiek, opgesteld door de Subwerkgroep Monitoring, is uitgewerkt hoe de monitoring binnen het Klimaatakkoord zal plaatsvinden (Concept monitoringsystematiek Subwerkgroep Monitoring, 21-10-2021). Hierbij is een afweging gemaakt tussen wat technisch/wetenschappelijk gezien de meest informatieve manier is van monitoring en de pragmatische haalbaarheid om snel tot een werkend systeem te komen. In deze paragraaf worden de relevante besluiten toegelicht.

Het bepalen van de reductie in uitstoot³ kan op verschillende manieren. Hierbij moet in ieder geval rekening worden gehouden met het feit dat de uitstoot van broeikasgassen uit Nederlandse organische gronden niet alleen verandert door genomen maatregelen, maar tevens afhankelijk is van weersomstandigheden. Door invloeden van het weer varieert daarbij ook het effect van de genomen maatregelen van jaar tot jaar (bijvoorbeeld droge versus natte jaren, zie Erkens et al., 2021; Boonman et al., 2022). Hierdoor varieert ook de voortgang van het behalen van de reductiedoelstelling. Hoewel deze jaarlijkse variatie inzicht biedt in de daadwerkelijk uitstoot van broeikasgassen uit de organische gronden naar de atmosfeer, kunnen de effecten van de maatregelen alleen en daarmee de voortgang van de reductiedoelstellingen niet meer bepaald worden, of alleen op lange termijn. Dat kan wel als er gebruik gemaakt kan worden van een referentieverperiode.

Om de invloed van het weer op de uitstoot en de effectiviteit van maatregelen van elkaar te isoleren moeten er per kalenderjaar vier bepalingen van de broeikasgasuitstoot voor een bepaald kalenderjaar gedaan worden:

- a. bij **kalenderjaarweeromstandigheden**⁴ (en kwel/wegwijzing) **zonder** maatregelen voor het hele gebied.
- b. bij **kalenderjaarweeromstandigheden** (en kwel/wegwijzing) **met** maatregelen voor gebieden waar een maatregel is getroffen.
- c. bij **referentie-weersomstandigheden**⁵ (en kwel/wegwijzing) **zonder** maatregelen voor het hele gebied (kan eenmalig gedaan worden).
- d. bij **referentie-weersomstandigheden** (en kwel/wegwijzing) **met** maatregelen voor gebieden waar een maatregel is getroffen (alleen bij nieuwe maatregelen).

Door combinaties te maken tussen deze verschillende bepalingen kan het effect van het nemen van de maatregel worden bepaald per jaar (a vs. b), of onder referentiecondities (c vs. d). Ook kan de invloed van het weer op de totale uitstoot worden bepaald (a vs. c) en de invloed van het weer op de werking van de maatregelen (b vs. d). Tenslotte kan de daadwerkelijke performance (inclusief weerinvloeden) van de maatregelen per kalenderjaar worden bepaald (b vs. c). De uitkomsten van bepaling ‘b’, aangevuld met de bepalingen onder ‘a’ daar waar b niet is berekend, geven daarbij de daadwerkelijke broeikasgasuitstoot vanuit de Nederlandse organische gronden naar de atmosfeer.

Op termijn wordt geambieerd om binnen SOMERS alle vier de bovenstaande bepalingen uit te voeren. Om SOMERS op korte termijn operationeel te krijgen is door de Subwerkgroep Monitoring besloten om voorlopig alleen de bepalingen behorende bij d) uit te voeren en voor die gebieden waar maatregelen zijn genomen dan ook de bepalingen onder c) uit te voeren. Op deze wijze kan in ieder geval vastgesteld worden wat, onder referentie-weersomstandigheden, de *relatieve* reductie is in broeikasgasuitstoot als gevolg van de genomen maatregelen (cf. Concept monitoringsystematiek Subwerkgroep Monitoring, 21-10-2021). Hiermee wordt de behaalde reductie onder referentie-weeromstandigheden gebruikt, die kan afwijken van de actuele weersinvloeden. De invloed van het weer kan vooralsnog dus niet worden vastgesteld. Deze manier van werken geldt tenminste voor de looptijd van het Veenplan Eerste Fase en het NOBV (tot 2024), en mogelijk kan dit daarna veranderen. Het NOBV-onderzoek is erop gericht om na 2024 in ieder geval de vier genoemde bepalingen op jaarbasis te kunnen uitvoeren.

Een belangrijke voorwaarde voor SOMERS is dat het systeem landelijk overal inzetbaar is (op organische gronden). Inmiddels is sinds 2020 een meetsysteem in opbouw binnen het NOBV. Het aantal meetpunten is sterk uitgebreid en wordt ook nog verder uitgebreid, desalniettemin moeten er

³ In dit document wordt gesproken over de uitstoot van broeikasgassen, maar in principe kan SOMERS in de toekomst ook de opname van broeikasgassen bepalen en registreren.

⁴ kalenderjaarweeromstandigheden: het weer van een bepaald (kalender)jaar

⁵ Referentie-weersomstandigheden: de weeromstandigheden voor een heel jaar, dat gemiddeld is voor een referentieperiode. Kan een daadwerkelijk jaar zijn dat gemiddeld is verlopen, of in rekenmodellen een hypothetisch jaar waarvoor referentieomstandigheden zijn gecreëerd.

voor de landelijke registratie ook uitspraken gedaan worden op plekken waar geen metingen zijn uitgevoerd. Om vlakdekende resultaten te krijgen kan er gebruik worden gemaakt van interpolatie tussen verschillende meetpunten, of er kan gebruik worden gemaakt van voorspellingen uit een rekenmodel dat gebaseerd is op wetmatigheden. Gezien de heterogeniteit van het veenweidegebied, zowel van de ondergrond, als ook van de hydrologie en het watermanagement is interpolatie tussen meetpunten een forse versimpeling van dit daadwerkelijke situatie. Een rekenmodel biedt de mogelijkheid om gebied-specifieke kenmerken mee te nemen in het bepalen van de uitstoot op plekken waar niet gemeten is. Daarnaast is gebruik maken van een rekenmodel onontbeerlijk als er met een referentieweerperiode moet worden gewerkt. Omdat de maatregelen genomen sinds 2016 meetellen (zie hierboven), zou een referentieweerperiode tenminste grotendeels voor 2017 moeten vallen. Het aantal uitgevoerde metingen en beschikbare lange meetreeksen was destijds zeer beperkt, waardoor er alleen door gebruik te maken van een rekenmodel met een referentieweerperiode gewerkt kan worden voor het bepalen van de referentie-uitstoot. Op basis van bovenstaande redenen is SOMERS als een registratiesysteem opgezet dat gevoed wordt door meerdere rekenmodellen, dit wordt verder in Hoofdstuk 2 toegelicht.

Samenvattend wordt SOMERS op voorlopig elk kalenderjaar ingezet voor het bepalen van de broeikasgasuitstoot voor alle gebiedseenheden waar in het voorafgaande jaar één of meerdere maatregelen of aanvullende maatregelen zijn genomen. Voor deze gebieden wordt de uitstoot bepaald voor een situatie met de meest recente maatregel en daarnaast ook voor de situatie zoals die bestond op 31 december 2016 (voordat de maatregel is genomen). Dit wordt beiden gedaan voor de referentieweerperiode. Per jaar wordt met SOMERS daarmee bepaald en geregistreerd wat de (referentie) uitstootreductie van dat kalenderjaar is, behaald door de maatregelen in dat kalenderjaar. Om de totale bereikte reductie in de Nederlandse veenweidegebieden te bepalen wordt de geregistreerde uitstootreductie per jaar opgeteld bij de uitstootreductie in alle voorgaande kalenderjaren na 2016, waarbij dus eerder behaalde reductie blijft meetellen.

Als referentieweerperiode is een periode van 10 jaar gekozen die het referentiemoment van 1 januari 2017 omvat, namelijk de kalenderjaren 2010 tot en met 2019. Hierin zitten veelal gemiddelde jaren, maar ook enkele droge (2018, 2019) en natte (2012) jaren.

1.4 Toepassingsmogelijkheden

Naast de monitoring⁶ van de voortgang van de uitstootreductie kan SOMERS aanvullend op twee andere manieren gebruikt worden: voor het bepalen van de totale broeikasgasuitstoot, en voor de a-priori bepaling van effecten van maatregelen.

Als de bepalingen onder c) en d) in Paragraaf 1.3 worden gedaan kan SOMERS aanvullend ingezet worden om de totale broeikasgasuitstoot van alle organische gronden in Nederland te bepalen. Hiervoor moet de uitstoot per gebied bepaald worden en daarna gesommeerd.

De bepalingen onder c) en d) zijn gedaan voor gestandaardiseerde omstandigheden (de referentie-weersomstandigheden), en daarmee kan het reductiepotentieel van een maatregel worden bepaald zonder weersinvloeden. Een eerste (beperkte) set van reductiepotentieelgetallen (genoemd ‘rekenregels’) wordt in dit document beschreven en meegeleverd. Dit valt niet onder de hoofddoelstelling monitoring, maar deze getallen kunnen direct gebruikt kunnen worden bij het opstellen van de Regionale Veenweiden Strategieën door de veenweideprovincies zoals genoemd in het Veenplan Eerste Fase (Kamerstuk 32 813, nr. 562, 2020). Omdat de getallen verkregen zijn op basis van uniforme uitgangspunten zijn de strategieën onderling te vergelijken. Daarnaast wordt zo

⁶ Het is belangrijk om op te merken dat in dit document de term ‘monitoring’ op twee manieren wordt gebruikt: i) om de beleidsmatige monitoring van de voortgang van de reductiedoelstelling te bepalen (beleidsmonitoring), en ii) om de technische monitoring van de broeikasgasuitstoot te beschrijven voor de beleidsmatige monitoring.

gewaarborgd dat de berekeningen voor beleidsstrategieën aansluiten bij de registratie en monitoring die achteraf wordt uitgevoerd.

1.5 Gebiedsafbakening

Het Klimaatakkoord spreekt van het ‘Nederlands veenweidegebied’ waarin aan de uitstootreductiedoelstellingen moet worden voldaan. Er zijn verschillende definities van het veenweidegebied en de ruimtelijke afbakening van het gebied verschilt per definitie. Erkens & Melman (2020a) beschrijven zes mogelijke afbakeningen van het veenweidegebied en geven de bijbehorende omvang (areaal). In het Klimaatakkoord is met de voorgestelde maatregelen vooral ingezet op hydrologische maatregelen. Daarom wordt binnen het Veenplan gekozen om vooralsnog de maatregelen uit het Klimaatakkoord te richten op het gebied met veenbodem en moerige gronden in de kustvlakte van Nederland. De nadruk ligt tevens hiermee op het peilbeheerst gebied (min of meer het gebied van de polders) en het gebied dat in agrarisch gebruik is (in de breedste zin), omschreven als gebied 3b in Erkens & Melman (2020a). SOMERS wordt in eerste instantie ontwikkeld voor inzet in dit gebied, later kan dit uitgebreid worden naar organische gronden buiten de kustvlakte of naar ander landgebruik.

1.6 SOMERS, SOMERS 1.0 en de rekenregels

In dit document zal worden gesproken over SOMERS, SOMERS 1.0 en ‘de rekenregels’. Deze terminologie is veelal gebruikt in de communicatie over de monitoring. Er is een duidelijk onderscheid tussen de drie termen.

SOMERS is het registratiesysteem, en het registratiesysteem is in principe onafhankelijk van de manier waarop de geregistreerde getallen zijn verkregen (zie Hoofdstuk 2).

SOMERS 1.0 is de eerste invulling van het registratiesysteem gebaseerd op twee gekoppelde numerieke modellen: PeatParcel2D en de Aerobe Afbraak Potentie (AAP) module (Hoofdstuk 2). In Hoofdstuk 3 en in de bijlagen wordt toegelicht hoe deze twee modellen zijn opgebouwd. De twee technische bijlagen zijn opgesteld in het Engels, zodat deze voor een bredere groep geïnteresseerden toegankelijk zijn. Een eis aan SOMERS 1.0 is inzetbaarheid op landelijke schaal (Hoofdstuk 2). In Hoofdstuk 4 wordt toegelicht hoe de invoerdata op landelijke schaal worden verkregen.

SOMERS 1.0 is in eerste instantie bedoeld voor de jaarlijkse registratie van de behaalde broeikasgasuitstootreductie. De manier waarop dit wordt uitgevoerd wordt met een voorbeeld geïllustreerd in Hoofdstuk 5.

‘Rekenregels’ zijn kengetallen voor (veelvoorkomende) gestandaardiseerde situaties die met SOMERS 1.0 zijn bepaald. Deze kunnen gebruikt worden om indicatief inzicht te krijgen in de effecten van maatregelen, bijvoorbeeld bij het opstellen en doorrekenen van Regionale Veenweide Strategieën. In Hoofdstuk 5 worden de rekenregels toegelicht en in de bijlagen zijn alle uitkomsten die de rekenregels vormen opgenomen.

In Hoofdstuk 6 wordt aandacht besteed aan de onzekerheden en aandachtspunten bij gebruik van SOMERS 1.0 in algemene zin en de rekenregels in het bijzonder.

SOMERS 1.0 is de eerste uitwerking van SOMERS. In de nabije (komend jaar) en verre toekomst zullen de onderliggende modellen verder worden verbeterd en meer in samenhang met andere modellen en data worden ingezet. Indien er substantiële veranderingen worden doorgevoerd zal het versienummer worden aangepast. In Hoofdstuk 7 wordt opgenoemd welke aanpassingen in het komend jaar zullen worden aangebracht in de onderliggende modellen op weg naar SOMERS 2.0. In Hoofdstuk 8 wordt beschreven op welke manier velddata worden ingezet voor SOMERS 1.0 en hoe dit op korte termijn kan worden verbeterd.

2 Opzet SOMERS

2.1 Aanpak van SOMERS

SOMERS is een registratiesysteem om de voortgang van de reductie van de broeikasgasuitstoot uit veengronden en moerige gronden in Nederland te volgen ten behoeve van het Klimaatakkoord.

Hierbij gaat het om het registreren (vastleggen en ontsluiten op een uniforme manier) van een uitstoot- of reductiegetal.

In Hoofdstuk 1 is beargumenteerd dat, vanwege het ontbreken van meetgegevens van broeikasgasuitstoot uit de veenweidegebieden voor de referentie(weer)periode, er gebruik gemaakt zal moeten worden van een rekenmodel. Ook voor het bepalen van de uitstoot op plekken waar niet gemeten is zal er gebruik gemaakt moeten worden van een numeriek model. Het veenweidegebied is te divers in hydrologie, opbouw van de ondergrond en beheer om hiervoor alleen gebruik te maken van interpolatie tussen de meetpunten.

Op basis van bovenstaande gronden is een keuze gemaakt voor het gebruik maken van numerieke modellen om waardes te genereren binnen SOMERS, die vervolgens de registratie vormen.

2.2 Eisen aan SOMERS

Er zijn drie toepassingsmogelijkheden te onderscheiden voor SOMERS (Hoofdstuk 1):

- Registratie van de effecten van genomen maatregelen op de broeikasgasuitstoot (en op termijn broeikasgasopname) in het veenweidegebied ten behoeve van het bepalen van de voortgang van het behalen van de reductiedoelstellingen zoals afgesproken in het Klimaatakkoord (hoofddoelstelling).
- Het maken van landelijke doorrekeningen van broeikasgasuitstoot (en op termijn broeikasgasopname) in het Nederlandse veenweidegebied.
- A-priori bepalingen van de mogelijke theoretische reductie die behaald kan worden bij verschillende maatregelen onder gestandaardiseerde omstandigheden ('rekenregels').

Op basis van deze drie toepassingsmogelijkheden en de doelstellingen worden een aantal eisen gesteld worden aan SOMERS en de onderliggende numerieke modellen:

- De methodiek moet overal in Nederland inzetbaar zijn met een fijnmazige ruimtelijke resolutie (kleiner dan polderniveau).
- De methodiek moet op procesniveau in overeenstemming zijn met het bestaande procesbegrip.
- De uitstootbepalingen moeten traceerbaar en reproduceerbaar elk jaar opnieuw uit te voeren zijn.
- Het systeem moet snel inzetbaar zijn: de registratie moet starten in 2021/2022.
- Onzekerheidsmarges van de resulterende cijfers en verklaringen daarvan moeten beschikbaar zijn.
- De effecten van mogelijke maatregelen moeten kunnen worden bepaald. Het gaat hierbij in ieder geval om:
 - hydrologische maatregelen zoals slootwaterpeilaanpassingen en grondwaterstandverhogingen (door middel van actieve of passieve waterinfiltratiesystemen of bijvoorbeeld greppelinfiltratie).
 - En op termijn moeten de effecten van veranderingen in de bodemsamenstelling (klei-in-veen) en (mogelijk) veranderingen in beheer (o.a. bemesting) of teelt (o.a. alternatieve gewassen) kunnen worden bepaald.
- De methode om tot uitstootgetallen te komen moet toekomstbestendig zijn: keuzes die op korte termijn vanuit een pragmatisch oogpunt gemaakt worden, moeten op lange termijn niet leiden tot het reduceren van opties voor aanpassingen (no-regret). Hieronder vallen het

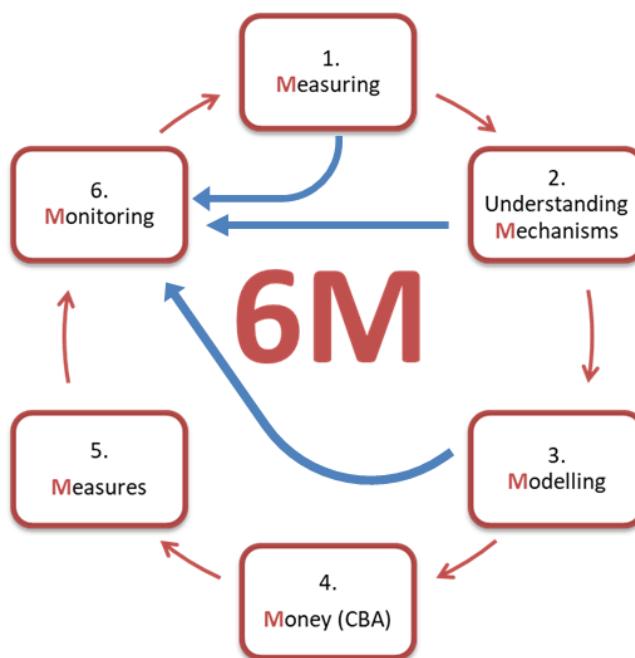
in staat kunnen zijn om de effecten van nieuwe maatregelen of ook andere broeikasgassen te kunnen registreren.

2.3 Procesmodellen als basis voor SOMERS

Om aan de eisen te voldoen die aan SOMERS gesteld worden is gekozen voor een opzet waarbij numerieke procesmodellen centraal staan. Procesmodellen maken gebruik van het mechanistisch begrip om de gevolgen van veranderingen van het systeem te voorspellen. Dit kan zowel terugkijkend (*hind sight*) ten behoeve van de daadwerkelijke registratie en monitoring (of modelevaluatie), of vooruitkijkend (*foresight*) ten behoeve van de voorspelling van effecten van maatregelen.

De keuze voor inzet van procesmodellen is ook een robuuste keuze: bij verdere ontwikkeling van de proceskennis kan het model steeds verder verbeterd worden. Langere meetreeksen dragen bij aan betere parametrisatie en kalibratie. Daarnaast past het goed in de samenhang van het NOBV: de procesmodellen in SOMERS kan het ontvangststation worden van nieuwe kennis, ervaringen en informatie uit het NOBV en het bredere werkveld. Dit stimuleert en stuurt de focus en activiteiten in het NOBV.

SOMERS is daarmee een registratiesysteem dat gevoed wordt door informatie op basis van procesmodellen, gebaseerd op het mechanistisch begrip dat wordt ontwikkeld binnen het NOBV en daarbuiten (Figuur 2.1). De procesmodellen worden gevoed, gekalibreerd en gevalideerd met meetdata uit het NOBV-meetnetwerk en daarbuiten. Hiermee maakt SOMERS gebruik van de volledige breedte aan onderzoeksinformatie die beschikbaar is.



Figuur 2.1: Samenhang tussen verschillende onderzoeksonderdelen en SOMERS in de 6M methodiek (Erkens & Stouthamer, 2020). SOMERS (M6, monitoring), maakt gebruik van procesmodellen (M3) die gebaseerd zijn op het mechanistisch begrip (M2). Meetdata is afkomstig uit het meetnetwerk (M1).

Er zijn ook nadelen van deze aanpak. Indien niet al het mechanistisch begrip aanwezig is, is het mogelijk dat belangrijke processen worden gemist, waardoor de voorspellingen vanuit de modellen onbetrouwbaar zijn. Nieuwverworven procesbegrip zal met enige vertraging worden verwerkt in de operationele modellen, omdat het schrijven van de code, de testen en de kwaliteitscontrole tijd kost. SOMERS zal daarom altijd iets achterlopen op het meest recente onderzoek in het NOBV. Dit vergt

operationeel (a) een goed versiebeheer, en (b) een strategie om verschillen in resultaten tussen oude en nieuwe systemen of versies te interpreteren in termen van continuïteit. En her-analyse van eerder opgeleverde gegevens zal hier ook een onderdeel van moeten vormen, ook als die mogelijk beleidmatige consequenties kunnen hebben.

In algemene zin geldt dat procesmodellen reken-intensiever zijn dan eenvoudigere modellen die gebruik maken van bijvoorbeeld opzoektabellen of empirische relaties. Het uitvoeren van de registratie op basis van procesmodellen zal dus meer tijd in beslag nemen. Tenslotte zijn procesmodellen data-intensief: de processen kunnen uitstekend omschreven zijn, maar zonder de juiste invoerdata, kalibratiedata en validatiedata kennen de uitkomsten zeer grote onzekerheden. De keuze voor procesmodellen moet daarom altijd hand-in-hand gaan met investeringen in modelgebruik toegespitste veldmetingen die langdurig worden voortgezet. SOMERS kan alleen gebaseerd worden op uitkomsten van procesmodellen als data en informatie blijvend en verbeterd wordt aangeleverd.

2.3.1 De rol van broeikasgasfluxmetingen en data-assimilatie

Binnen het Nationaal Onderzoeksprogramma Broeikasgassen Veenweiden (NOBV) worden metingen uitgevoerd aan broeikasgasuitstoot (en -opname) en bodemdaling. Dit gebeurt zowel door middel van in-situ metingen en observaties aan het maaiveld, alsmede met vliegtuigen, drones of satellieten. De opbouw van het NOBV-meetsysteem vindt stap voor stap plaats, waarbij in eerste instantie vooral is ingezet op een meetsysteem ten behoeve van het verkrijgen van mechanistisch begrip en het bepalen van effecten van maatregelen (zie o.a. Erkens et al., concept). De metingen ten behoeve van een landschappelijk beeld of met een karterend karakter (mobiele metingen en metingen vanuit de lucht of ruimte) zijn voorlopig nog voornamelijk in toepassing experimenteel van aard en beperkt in aantal. In de komende jaren wordt hier veel ontwikkeling in voorzien, met name om voldoende representatief te meten en de resultaten in de ruimte voldoende betrouwbaar zijn.

Voor procesmodellen in SOMERS zijn meetdata essentieel. Deze meetdata wordt gebruikt bij de initiële parametrisatie van de modellen (waardes toekennen aan de invoerparameters), bij de kalibratie van de modellen (de parameterwaardes en -bandbreedtes optimaliseren) en de validatie van de modellen (het toetsen van de modeluitkomsten aan onafhankelijke metingen). Nog een stap verder is het gebruikmaken van data-assimilatie technieken. De verdere ontwikkeling van de procesmodellen binnen het NOBV (en dus binnen SOMERS) en de ontwikkelingen in de meetinfrastructuur en -methoden staan toe dat in de toekomst data-assimilatie een onderdeel wordt van SOMERS. Bij data-assimilatie worden de processimulaties en parameters niet alleen geijkt aan de metingen van het NOBV, maar wordt tevens het hele systeem regelmatig geijkt – dus geassimileerd – aan doorlopende metingen uit het meetnetwerk.

2.3.2 SOMERS als multi-model ensemble

In plaats van te kiezen voor de ontwikkeling van één nieuw model, waarin alles wordt geïntegreerd, is er bij SOMERS voor gekozen om gebruik te blijven maken van meerdere bestaande modellen en onderdelen of uitkomsten daarvan (Figuur 2.2). Zo kan bijvoorbeeld dezelfde situatie met de verschillende modellen worden doorgerekend. Dit geeft inzicht in de gevoeligheid van de verschillende modellen, de onderlinge performance en de bandbreedte in de uitkomsten (“modelonzekerheid”). Deze manier van werken met meerdere modellen is een multi-model ensemble (e.g. Tebaldi & Knutti, 2007) en wordt bijvoorbeeld veel gebruikt in het klimaatonderzoek om inzicht te krijgen in de bandbreedte bij klimaatvoorspellingen.

SOMERS

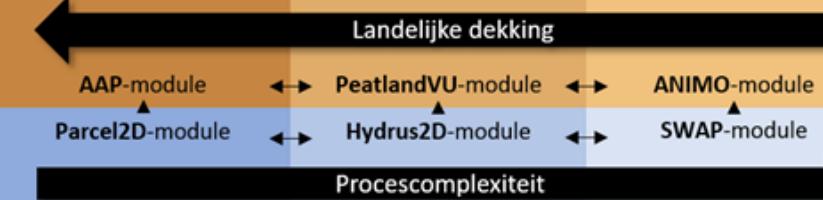
Landelijk registratiesysteem voor broeikasgasemissie uit het veenweidegebied:

1. Jaarlijkse registratie van landelijke CO₂-uitstoot
2. Vergroten begrip en monitoren van voortgang maatregelen
3. Begrijpen van koolstofbalans op perceelsniveau

Resultaat per perceel

- | | | |
|---|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Jaaruitstoot CO₂ • Inschatting effect maatregelen | <ul style="list-style-type: none"> • Jaaruitstoot CO₂ + CH₄ • Inschatting effect maatregel • Volledige koolstofbalans | <ul style="list-style-type: none"> • Effecten gewas en landgebruik • Effect nutriënten • Validatie jaarbalans • Proces gevoelighed |
|---|--|--|

Rekenmodellen



Invoervariabelen

Perceelbreedte, archetype bodemprofiel, kenmerken maatregel, klimaatdata, regionale stijghoogte dynamiek, landgebruik, etc.

Figuur 2.2: SOMERS is een registratiesysteem gevoerd door verschillende procesrekenmodellen. De onderliggende rekenmodellen nemen toe in complexiteit van de procesbeschrijving naar rechts in het diagram, en in landelijke inzetbaarheid naar links in het diagram.

2.4 Relaties met bestaande monitoringsystemen en belangrijkste verschillen

Al jaren wordt de broeikasgasuitstoot uit de veenbodem en moerige bodems in Nederland bepaald ten behoeve van de Nederlandse rapportages die verplicht zijn binnen internationale klimaatverdragen (Kyoto-protocol, Akkoord van Parijs, Europese Unie klimaatmonitoring). De uitstoot van broeikasgassen uit veenbodem en moerige gronden valt in de sector LULUCF (Land-Use and Land-Use Change and Forestry), waarin wordt vastgelegd wat de invloed is van landgebruik en landgebruiksveranderingen op de uitstoot van broeikasgassen. Voor Nederland wordt dit gedaan door de LULUCF-werkgroep. De gehanteerde methode om die uitstoot te bepalen is gedocumenteerd door Kuikman et al. (2005) en Van den Akker et al. (2008), en jaarlijks wordt er voor de periode van twee jaar ervoor een berekening gemaakt (zie onder andere Ruyssenaars et al., 2021 voor de meest recente getallen). Deze getallen worden ook gebruikt in bijvoorbeeld de Klimaat en Energieverkenning (KEV) die elk jaar wordt gemaakt om de voortgang en resultaten van het Nederlandse klimaatbeleid te rapporteren (KEV, 2021). In de LULUCF-sector wordt voor Nederland voor het jaar 2019 5,6 megaton CO₂-uitstoot uit veenbodem en moerige gronden gerapporteerd (Ruyssenaars et al., 2021).

Binnen de internationale standaarden voor rapportage van het IPCC (IPCC, 2006) wordt een onderscheid gemaakt in verschillende niveaus (*tiers*) van complexiteit en daarbij zekerheid in het bepalen van broeikasgasuitstoot getallen. Tier 1 is rapporteren van getallen op basis van standaard kengetallen die wereldwijd gelden. Tier 2 is het rapporteren van emissiefactoren die zijn verkregen op basis van kengetallen die specifiek zijn ontwikkeld voor het betreffende gebied op basis van

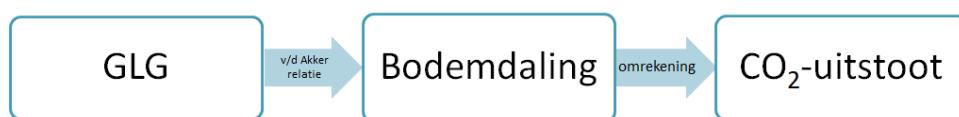
meetreeksen. Nederland gebruikt voor de rapportage van emissies uit organische gronden een tier 2 methodiek. In tier 3 wordt gerapporteerd op basis van getallen die variëren in tijd en ruimte, waarbij gebruik gemaakt wordt van modelberekeningen en/of meetdata. SOMERS past in deze laatste categorie.

SOMERS is niet bedoeld om de huidige methodiek voor emissies uit veengronden voor de LULUCF-rapportage te vervangen. De opzet van de twee systemen is dan ook anders en de nationale uitstootgetallen zoals bepaald met de twee methoden zijn op dit moment niet 1-op-1 vergelijkbaar. Op termijn kan bepaald worden of de SOMERS-methodiek en uitkomsten bruikbaar zijn voor toepassing in de nationale LULUCF-rapportage.

2.4.1 De LULUCF-rapportage methode en verschillen met SOMERS

De berekeningen van de landelijke broeikasgasuitstoot door de LULUCF-werkgroep (Kuikman et al., 2005; Van den Akker et al., 2008) maken gebruik van empirische relaties, gebaseerd op data die in Nederland is ingewonnen. Hierdoor is de representativiteit van de meetpunten wat betreft landschappelijke context en klimaatomstandigheden beter dan meetsets uit het buitenland die in de Nederlandse context worden ingezet. Wel is het zo dat de geografische spreiding van de meetpunten beperkt is vanwege het ontbreken van een structurele financiële basis voor het uitvoeren van de metingen.

De LULUCF-getallen worden ruimtelijk bepaald voor verschillende bodemtypes in Nederland (cf. Kuikman et al., 2005). In de methodiek wordt de bodemkaart gecombineerd met de grondwatertrapkaart de langjarige grondwaterdynamiek beschrijft. Op basis van bestaande meetreeksen van bodemdaling (Van den Akker et al., 2008) en de gevonden (empirische) lineaire relatie tussen bodemdaling en de Gemiddeld Laagste Grondwaterstand (GLG van de grondwatertrap) wordt voor een aantal hoofdbodemklasse de bodemdaling in mm/jaar bepaald. Dit wordt samengevat in een 7-tal mogelijke bodemdalingsklassen (Arets et al., 2021). Vervolgens wordt de bodemdaling op basis van een omrekening (een maaivelddaling(snelheid) van 1 mm per jaar staat gelijk aan 2259 kg CO₂-uitstoot per ha per jaar, cf. Van den Akker et al., 2008) omgezet in een CO₂-uitstoot (zie Figuur 2.3). Op basis van de totale Nederlandse uitstoot worden vervolgens twee emissiefactoren (een vaste hoeveelheid CO₂ uitstoot per oppervlaktemaat gedraaineerde organische bodemsoort) voor de veenbodems en voor de moerige gronden van Nederland bepaald. Deze worden gebruikt om de totale uitstoot van de Nederlandse organische gronden te bepalen met ruimtelijke resolutie van 25x25 meter. In de LULUCF-rapportage wordt vervolgens nog bepaald welke veranderingen in landgebruik er zijn geweest en hoe dat heeft doorgewerkt op de CO₂ en N₂O uitstoot. Voor de uitstoot van lachgas (N₂O) uit organische gronden wordt gewerkt met een apart emissiefactor, afkomstig uit een eerdere meetcampagne (Kuikman et al., 2005). Methaan (CH₄) uitstoot wordt nog niet gerapporteerd.



Figuur 2.3: De opbouw van de relaties die leiden tot een bepaling van de CO₂-uitstoot per gridcel ten behoeve van de LULUCF-rapportage. Op basis van een grondwaterkarakteristiek (de GLG uit de grondwatertrappenkaart) wordt met behulp van de relaties tussen deze karakteristiek en de bodemdaling ('Van den Akker-relaties'), de bodemdaling per gridcel bepaald. De CO₂-uitstoot wordt met een omrekeningsfactor vervolgens daaruit afgeleid.

Deze aanpak kent een aantal voordelen: de bodemkaart en de grondwatertrappenkaart zijn op landelijke schaal uniform gekarteerd (e.g. Van der Gaast et al., 2015), waardoor waarden onderling te vergelijken zijn. Ook is er een redelijke correlatie gevonden tussen de Gemiddeld Laagste

Grondwaterstand en gemeten bodemdaling (Van den Akker et al., 2008) op langere tijdschalen (jaren-decennia). Tenslotte is de methode robuust vanwege de eenvoud.

De LULUCF-methodiek heeft beperkingen waardoor deze niet gebruikt kan worden voor een jaarlijkse registratie, zoals de bedoeling is ten behoeve van het Klimaatakkoord. De onderliggende aannames houden niet stand in een van jaar tot jaar vergelijking en zijn bedoeld om op langere tijdschalen te monitoren. Daarbij maakt het systeem gebruik van statische parameters die niet eenvoudig kunnen worden gebruikt voor een jaarlijkse registratie.

Om de empirische relaties van Van den Akker et al. (2008) te gebruiken voor een jaar-op-jaar registraties zijn er twee belangrijke onderliggende impliciete randvoorwaarden (of aannames): i) de relatie tussen de GLG (diepte) en de bodemdaling/CO₂-uitstoot veronderstelt dat het uitstootprofiel lineair schaalt met de diepte, en ii) dat bodemdaling een 1:1 proxy is voor broeikasgasuitstoot doordat de bijdrage van andere bodemdalingsprocessen constant is in tijd en ruimte.

Met betrekking tot de eerste randvoorwaarde is bekend dat de beschikbaarheid van organische stof in de bodem, het aandeel makkelijk afbreekbaar organische stof in de bodem en het aandeel jong versus oud koolstof in de bodem alle drie niet lineair verdeeld is in de diepte (zie o.a. Erkens et al., 2021). Ook de beschikbaarheid, aanvoer en consumptie van zuurstof als elektronenacceptor voor de omzetting van organische stof is niet lineair verdeeld over de diepte en in de tijd.

Bij de tweede randvoorwaarde wordt ervan uitgegaan dat a) een groot deel van de bodemdaling op de tijdschaal van decennia het gevolg is van de afbraak van veen, en b) dat de verhouding tussen de permanente bodemdaling door de afbraak van veen versus het aandeel als gevolg van mechanische processen in de tijd gelijk blijft. Permanente bodemdaling zoals in de meetreeks is aangetroffen wordt veroorzaakt door de afbraak van veen door microben (veenoxidatie), permanente krimp van de onverzadigde zone door zuigspanningen, en (in-elastische) consolidatie en kruip in de verzadigde zone (e.g. Van Asselen et al., 2020). Permanente bodemdaling door genoemde mechanische processen vindt plaats als er veranderingen zijn in het grondwatersysteem (oppervlaktewaterpeilaanpassingen of langdurig diep uitzakkende grondwaterstanden). Van jaar tot jaar is daarom een wisselende bijdrage van mechanische bodemdaling te verwachten.

De gebruikte karterende parameter GLG is een toestandsparameter, die een statische situatie beschrijft. Voor het bepalen van de GLG moet tenminste acht jaar de grondwaterstand worden gemeten. De GLG kan ook bepaald worden op basis van hydromorfe kenmerken in de bodem, maar deze kenmerken zijn het resultaat van decennialange ontwikkelingen en dynamiek in het grondwater. Deze parameter kan daarom niet gebruikt worden voor monitoring van een jaarlijkse variërende toestand. Ook effecten van maatregelen op deze langjarige toestandsparameters zijn moeilijk te kwantificeren. Hiervoor is een meetreeks nodig waarin jaar-tot-jaar variatie door bijvoorbeeld weervariatie is uitgemiddeld, maar het systeem als geheel niet verandert. Aan deze voorwaarden zal doorgaans niet worden voldaan, gezien de verandering die bijvoorbeeld in het klimaat plaatsvinden.

2.4.2 Uitstootbepalingen op basis van empirische relaties

In een aantal andere landen binnen de Europese Unie en daarbuiten wordt gewerkt met empirische relaties tussen een bepaalde ruimtelijk te karteren parameter en een gemeten CO₂-uitstoot. Voorbeelden (Figuur 2.4) zijn de empirische relaties van Tiemeyer et al. (2020), Jurasicinski et al. (2016) en Evans et al. (2021) waarbij emissies worden gekoppeld aan gemiddelde grondwaterstand.

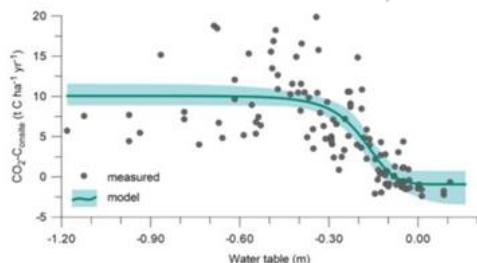
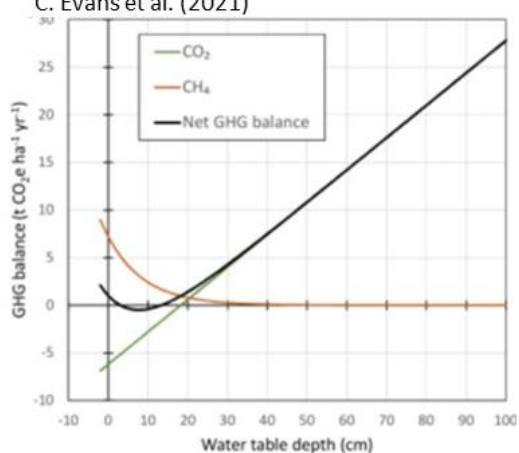
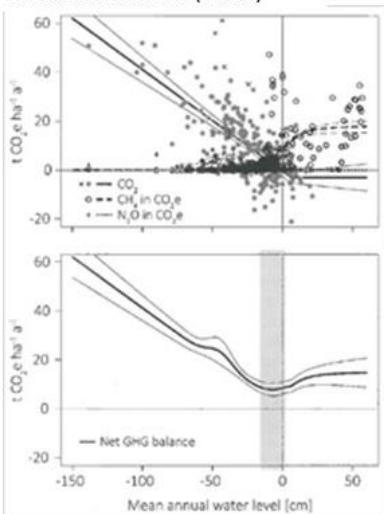


Fig. 4. Response of on-site CO_2 -C emissions from organic soils to mean annual water table and coefficients of the fitted Gompertz function (Eq. (3)) with $\text{CO}_2\text{-C}_{\min} = -0.93 \text{ t C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, $\text{CO}_2\text{-C}_{\text{diff}} = 11.00 \text{ t C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, $a = 7.52$ and $b = 12.97 \text{ m}^{-1}$.



Figuur 2.4: Voorbeelden van empirische relaties tussen een karterende parameter en een gemeten CO_2 -uitstoot. A) Tiemeyer et al. (2020); B) Jurasinski et al. (2016), C. Evans et al. (2021).

Als karterende parameter wordt vaak (jaargemiddelde) grondwaterstand ten opzichte van maaiveld genomen, gebaseerd op empirisch bewijs dat een lage grondwaterstand in veengebieden leidt tot veenafbraak en CO_2 -uitstoot (e.g. Hendriks, 2009). Ook is er een relatie tussen grondwaterstand en CH_4 uitstoot in veengebieden.

Empirische relaties tussen een karterende parameter en broeikasgasuitstoot worden veel gebruikt, maar kennen wel beperkingen:

- De kwaliteit van de uitkomsten zijn afhankelijk van de representativiteit van de (veld)metingen. Als de metingen niet uitgevoerd zijn op representatieve locaties, dan is de voorspellende waarde van de relaties voor locaties waar niet is gemeten beperkt. Als bijvoorbeeld metingen op moerige gronden ontbreken, dan is het de vraag of de relatie op basis van die metingen voor moerige gronden ingezet kan worden. Vanwege bovenstaande redenen zijn de curves ook niet in alle gevallen één-op-één op andere locaties of situaties van toepassing. Dit geldt voor:
 - relaties uit metingen onder bepaalde klimaatomstandigheden kunnen waarschijnlijk niet 1-op-1 worden gebruikt voor andere omstandigheden. Dit geldt bijvoorbeeld voor relaties die verkregen zijn uit het buitenland, waar klimaatomstandigheden en de fysisch geografische setting afwijken van de Nederlandse omstandigheden. Dit wordt nog bemoeilijkt omdat de karterende parameter een toestandsparameter is (*gemiddelde* grondwaterstand) en binnen-jaarlijkse of tussen-jaarlijkse tijdsdynamiek hier slechts impliciet in zit. Hierdoor is het onduidelijk wat de invloed is van bijvoorbeeld een droog of een nat jaar op de uitkomsten en dus hoe de

- relatie gebruikt moet worden voor een droog of nat jaar. Het is ook mogelijk dat de relatie minder eenduidig is en dat andere factoren (bijvoorbeeld bodemtemperatuur en –vocht) ook invloed hebben op de uitkomsten. Ook kan er na-ijiling optreden in effecten, bijvoorbeeld bij systeemveranderingen of droge of natte perioden. Als gevolg is de relatie alleen toepasbaar op de tijdschaal waarop de metingen zijn uitgevoerd (vaak een aantal jaar), bij dezelfde gemiddelde weercondities.
- de landschappelijke omstandigheden waar de metingen zijn uitgevoerd: bij het gebruik van verschillende landschappelijke omstandigheden wordt de uitkomst nog verder gemiddeld, dan als er relaties voor verschillende subgroepen worden bepaald. In dat geval is het aantal metingen per subgroep meestal limiterend (te laag).
 - de situatie als er een maatregel genomen is. Boonman et al. (2022) laat zien dat de relatie zoals die is afgeleid uit de metingen op plekken waar geen maatregelen zijn genomen niet noodzakelijkerwijs ook gebruikt kunnen worden voor situaties waar maatregelen zijn genomen.
 - In Figuren 2.4a en 2.4b is te zien dat voor bepaalde grondwaterstanden een grote bandbreedte aan gemeten CO_{2eq}-uitstoot is af te lezen. Deze bandbreedte wordt waarschijnlijk veroorzaakt door variatie in bodemopbouw, weersomstandigheden of zelfs klimaat tijdens de metingen of variatie in hydrologische omstandigheden. Deels is de onzekerheidsbandbreedte het gevolg van het uitvoeren van de metingen zelf (bijvoorbeeld apparatuuronzekerheden of gebrek aan uniformiteit bij de uitvoering van de metingen). Bij het gebruik van de afgeleide relaties (op basis van gemiddelde of mediaan) verdwijnt deze bandbreedte voor een groot deel, terwijl die er in de werkelijkheid wel is. De onzekerheid in de uitkomsten is moeilijk te kwantificeren als de volledige theoretische breedte van de uitkomsten niet bekend is. Daarnaast zijn de onderliggende sturende processen die zorgen voor bijvoorbeeld de bandbreedte of de vormen in de curves zijn onduidelijk. Hierdoor is het moeilijker om bijvoorbeeld op basis van deze relaties maatregelen te optimaliseren.

SOMERS had ook gebaseerd kunnen worden op empirische relaties, maar kan dan niet voldoen aan de gestelde eisen en voorziene toepassingsmogelijkheden. De grote meetdatasets die nodig zijn voor de opbouw van empirische relaties (ook voor situaties met maatregelen) ontbreken momenteel in Nederland. Voor Nederland zou dat niet alleen betekenen dat ruimtelijk een groot aantal meetlocaties moet worden opgebouwd, maar ook dat nog jaren gewacht moet worden voordat voldoende lange meetreeksen zijn opgebouwd om uitspraken te kunnen doen (om bijvoorbeeld een brede range aan weer- en klimaatvariaties af te dekken). Het gebruik van empirische relaties zou daarmee zowel in ruimte en tijd een enorm groot aantal metingen vragen. Daarbij komt dat het bepalen van de effecten van maatregelen is een van de hoofddoelstellingen van SOMERS en dit is juist een van de beperkingen bij het gebruik van empirische relaties. Ook is de kwantificering van de onzekerheden van de uitkomsten is moeilijk. Op basis van bovenstaande argumenten wordt SOMERS niet gebaseerd op empirische relaties, maar nemen procesmodellen de rol over van de vele metingen die anders nodig zouden zijn. Op basis van mechanistisch (proces) begrip, gebaseerd op actuele metingen en oudere studies, wordt met procesmodellen een zo goed mogelijke uitspraak gedaan in de ruimte (alle veenweidegebieden van Nederland, ook tussen de metingen) en de tijd (voor droge en natte jaren, voor het verleden, het heden en in de toekomst).

Hierbij is de keuze om geen gebruik te maken van empirische relaties in SOMERS ook het gevolg van de situatie waarin Nederland zich bevindt ten opzichte van andere (Europese) landen. Nederland heeft een fijnmazig waterbeheer en variabele ondergrond als gevolg van de fysisch geografische en historische ontwikkeling. Nederland werkt daarnaast met nauwkeurige tussendoelstellingen in het Klimaatakkoord op weg naar invulling van het behalen van de doelstelling in de Klimaatwet (Klimaatwet, 2019) in 2050. In Nederland wordt tot nu toe ingezet op ruimtelijk variabele maatwerkmaatregelen op polderniveau of net iets groter. Juist deze keuzes leiden tot de behoeftte voor een heel nauwkeurige monitoringssystematiek ten opzichte van andere landen en de

eerdergenoemde lijst van eisen. Hierdoor ligt de inzet van empirische relaties in Nederland niet voor de hand.

Empirische relaties bieden wel inzicht in de absolute uitstoot die verwacht kan worden onder verschillende omstandigheden. Daarnaast zijn meetdata, die de basis vormen van empirische relaties, essentieel voor bijvoorbeeld het valideren van procesmodellen, en zijn de meetgegevens cruciaal bij ‘ground-truthing’ van airborne of remote ingewonnen meetdata. Hierbij moet nog opgemerkt worden dat er schijnbaar een strikt onderscheid is tussen procesmodellen en empirische relaties, terwijl in de realiteit dit onderscheid niet zo scherp is. Veel procesmodellen maken ook gebruik van empirische relaties in de algoritmes, bijvoorbeeld om de rekentijd te kunnen reduceren, of omdat het precieze proces niet voldoende bekend en uitgewerkt is, of omdat er een hele sterke correlatie bestaat tussen twee factoren (gebruik maken van een proxy).

2.5 Procesmodellen om broeikasgasuitstoot uit organische bodems te berekenen

SOMERS registreert de broeikasgasuitstoot van locaties waar wel en geen maatregel is genomen, onder verschillende omgevingsomstandigheden (Hoofdstuk 1). Broeikasgasuitstoot is het gevolg van omzetting van organische stof door microben (het proces). De procesmodellen die toeleveren aan SOMERS moeten dus in staat zijn de snelheid en intensiteit van het omzettingsproces te benaderen. Vervolgens moet deze omzettingssnelheid en –intensiteit worden omgezet naar een hoeveelheid broeikasgas.

De microbiële omzetting(snelheid) van organisch materiaal in de bodem hangt af van veel verschillende factoren.

Ten eerste is de aanwezigheid en toestand van organisch materiaal. De aanwezigheid wordt beschreven in het bodemtype en de grondclassificatie. De toestand hangt af van de vorming van het organisch materiaal (gyttja, dy, hout of veen), de botanische samenstelling (rietveen, zeggeveen, veenmosveen, etc.), de labilitet van het organisch materiaal (hout, wortels, bladeren, stengelresten, etc), en de geschiedenis van afbraak (amorfiteit).

Een tweede belangrijke factor is dat er agenten zijn die het organisch materiaal afbreken. Hierbij gaat het om micro-organismen (microben) zoals Archaea en bacteriën (eencelligen) en schimmels. De samenstelling en toestand van deze microbiële gemeenschap heeft een invloed op de afbraak van het organisch materiaal.

De derde bepalende factor is dat de omstandigheid voor de microben juist moet zijn om organisch materiaal af te breken. Hiervoor zijn de aanwezigheid van nutriënten belangrijk (bijvoorbeeld afkomstig uit mest), de pH (zuurgraad), en de aanwezigheid van een bepaalde elektronenacceptor (bijvoorbeeld zuurstof).

Het NOBV doet onderzoek naar de invloed van deze factoren op de afbraak(snelheid) van organische stof in de bodem. In veel gevallen is dit onderzoek nog fundamenteel van aard en ontbreekt het precieze mechanistisch begrip van de processen. Maar soms ontbreekt van deze factoren het inzicht in het belang van het proces op grotere schaal (de schaal van een perceel, regio of Nederland).

Daarnaast is voor een heel aantal van deze factoren niet bekend hoe zij variëren in de ruimte, ze zijn met andere woorden (op dit moment) niet karteerbaar.

Maar een aantal hoofdlijnen zijn wel duidelijk, met name op het terrein van het voorkomen van organisch materiaal, de hydrologie, de fysische toestand van de bodem (vochtigheid en temperatuur) en het belang en de beschikbaarheid van zuurstof. De aanwezigheid en toestand van het organische materiaal is bekend of af te leiden uit de bodemkaart (Brouwer et al., 2021). Dat er agenten (micro-organismen) aanwezig zijn en in evenwicht zijn met hun omgeving kan worden aangenomen op landelijke schaal. Wat dan nog ontbreekt is de bepaling van de omstandigheden die bepalen hoe snel het organisch materiaal wordt afgebroken. Op basis van mechanistische kennis kan op hoofdlijnen worden gesteld dat de microbiële omzettingssnelheid van organisch materiaal in de bodem afhankelijk is van: i) de aanwezigheid van een oxidator (bijvoorbeeld zuurstof als meest dominante oxidator), ii) het bodemvochtgehalte, iii) en de bodemtemperatuur.

Op basis van de toestand in de bodem met betrekking tot deze variabelen kan voor een bepaalde locatie de ‘afbraakpotentie’ (cf. Erkens & Melman, 2020b) bepaald worden. Deze afbraakpotentie geeft weer in hoeverre de mate waarin de *omstandigheden* voor veenomzetting naar broeikasgassen optimaal zijn (cf. Boonman et al., 2022). Bij optimale omstandigheden is de omzetting van veen naar broeikasgassen, in dit geval in eerste instantie CO₂, maximaal.

Om de afbraakpotentie te bepalen moet dus voor elke locatie (diepte) in de bodem, voor elk moment in de tijd, de aanwezigheid van organische stof bekend zijn, de mate waarin een oxidator (tijdsafhankelijk) aanwezig is, het bodemvochtgehalte en de bodemtemperatuur. Hiervoor is nodig per locatie het bodemprofiel en de eigenschappen van het veen, en daarnaast de grondwaterstand. De grondwaterstand vormt een randvoorwaarde voor het bodemvochtprofiel en bodemtemperatuurprofiel in de onverzadigde zone, maar de grondwaterstand is ook belangrijk voor de beschikbaarheid van bijvoorbeeld zuurstof in de bodem. De bodemopbouw is belangrijk voor de hydrologische eigenschappen van de bodem (doorlatendheid, porositeit, etc.) en daarmee voor de grondwaterstand(dynamiek).

Een oxidator wordt in SOMERS als aanwezig verondersteld boven de grondwaterspiegel, en onder de grondwaterspiegel, onder verzadigde condities, wordt deze afwezig verondersteld. Er vindt in SOMERS onder de grondwaterspiegel geen CO₂-uitstoot plaatsvindt door organische stof afbraak onder invloed van zuurstof of andere oxidatoren.

In de simpelste vorm bestaat het procesmodel hiermee uit een hydrologisch model dat grondwaterstand simuleert, waarvoor de bodemopbouw (één van de) invoergegevens is. De grondwaterstand wordt gebruikt om het bodemvocht- en bodemtemperatuurprofiel te bepalen. Daarnaast is er een koolstofmodel, dat de afbraakpotentie berekent op basis van het bodemvocht en de bodemtemperatuur (en eventueel andere omgevingsparameters) die variëren in tijd en ruimte. Vanuit de afbraakpotentie wordt vervolgens de CO₂-uitstoot bepaald.

2.6 SOMERS 1.0

2.6.1 eisen aan SOMERS 1.0

Omdat SOMERS ingezet wordt voor het bepalen van de voortgang van de broeikasgasreductie als gevolg van genomen maatregelen, zijn er in aanvulling op de eisen die gesteld zijn voor de aanpak (Paragraaf 2.2), ook eisen gesteld aan de operationele inzet van SOMERS:

- SOMERS moet landelijk dekkend (voor veenweidegronden in de kustvlakte) kunnen werken.
- Een landelijke modelrun moet binnen een werkweek uitgevoerd kunnen worden.
- Invoerparameters moeten landelijk beschikbaar zijn, een openbaar karakter hebben en op een uniforme manier verzameld zijn.
- SOMERS moet, zo goed als mogelijk, gebruik maken van de laatste stand van zaken van het mechanistisch begrip (binnen het NOBV) en SOMERS moet in staat zijn inzichten uit het onderzoek te benutten en reproduceren.
- SOMERS moet ondersteund worden door meetdata via (geïntegreerde) kalibratie en validatie. Het systeem moet zo ontworpen zijn dat aanvullende data (langere meetreeksen) eenvoudig gebruikt kunnen worden.
- Als kleinste eenheid is het veenweideperceel vastgesteld. Gemiddeld is een veenweideperceel in Nederland één tot enkele ha groot: er zijn in Nederland ca 100.000 veenweidepercelen bij een veenweide areaal van ca 350.000 ha. Deze keuze betekent dat de variatie binnen een perceel niet wordt meegenomen in de registratie. Rekenen op perceelschaal kent ook een duidelijk voordeel: de sloten die percelen omgeven fungeren als hydrologische randvoorwaarde die gebruikt kan worden in de hydrologische modellering. Dit betekent overigens ook dat SOMERS voorlopig nog niet kan worden toegepast voor modellering van percelen die geen sloten kennen als randen (bijvoorbeeld aan de randen van het veenweidegebied) of veengebieden die niet onderverdeeld zijn in percelen (sommige natuurgebieden). In het kustvlakteveengebied kennen de meeste percelen wel

sloten aan randen, maar in hoger gelegen Nederland is dit minder. Daar zal een andere aanpak gekozen moeten worden. Daarnaast is deze keuze deels het gevolg van de schaal waarop sommige invoerdata beschikbaar is. Het ondergrondmodel GeoTOP is beschikbaar op een schaal van 100 x 100 meter, de bodemkaart op ca 25 x 25 meter en het stijghoogtemodel van Landelijk Hydrologisch Model (LHM) op 250 x 250 meter. Met de keuze voor een perceel wordt op een schaal hoger gewerkt dan de schaal van veel invoerparameter, waarmee voorkomen wordt dat gewicht wordt gehangen aan uitkomsten op de kleinste mogelijke ruimtelijke schaal. Bij doorrekeningen op schalen kleiner dan een perceel neemt de onzekerheid in de uitkomsten sterk toe.

In Nederland en daarbuiten zijn verschillende hydrologische en koolstofmodellen beschikbaar, die gebruikt kunnen worden om SOMERS te voeden (Figuur 2.2). De gekoppelde modellen SWAP (Kroes et al., 2017; onverzadigde zone hydrologie model) en ANIMO (Renaud et al., 2005; stoffentransportmodel) zijn in staat om gedetailleerd de processen die leiden tot broeikasgasuitstoot te modelleren. PEATLAND-VU is een koolstofmodel dat de uitstoot van CO₂ en CH₄ berekent (Van Huissteden et al., 2006).

Deze huidige beschikbare procesmodellen binnen SOMERS zijn niet direct inzetbaar voor een landelijke berekeningen binnen een werkweek op perceelsschaal. Voor deze inzet zijn deze modellen nooit ontwikkeld en daarmee ook niet toereikend.

2.6.2 SOMERS 1.0 op basis van hydrologisch model en koolstofmodel

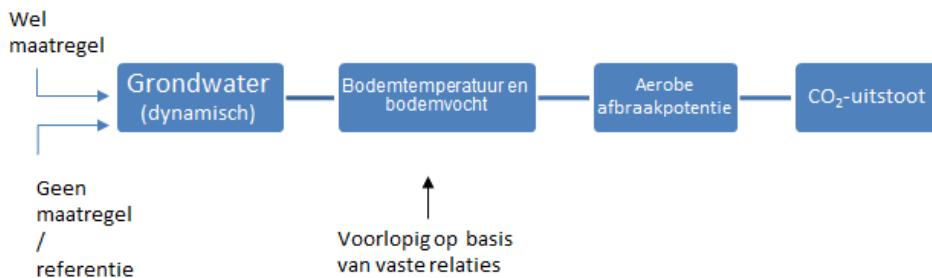
Om toch snel van start te kunnen gaan met de registratie (zie eerdere eisen aan het registratiesysteem) zijn twee snelwerkende rekenmodellen ontwikkeld en toegevoegd als bouwstenen aan het multi-model ensemble van SOMERS.

De eerste configuratie van SOMERS is gebaseerd op het rekenwerk van deze twee numerieke modellen. Om duidelijk te maken dat de rest van de modellen onderliggend aan SOMERS voorlopig nog minder ingezet worden en om duidelijk te maken dat dit moet worden gezien als eerste versie, wordt dit SOMERS 1.0 genoemd. In de toekomst zullen de nieuwe rekenmodellen verder doorontwikkeld worden en zal er in sterke mate gebruik gemaakt worden van de andere onderliggende modellen. Deze volgende versies krijgen dan ook een hoger volgnummer. De rest van dit document gaat over de eerste resultaten van SOMERS 1.0.

Deze twee nieuwe rekenmodellen, speciaal voor gebruik binnen SOMERS ontwikkeld, zijn het hydrologisch model **PeatParcel2D** (berekenen van ruimtelijk variërende grondwaterstanden in veenweidepercelen) en het koolstofmodel **AAP-module** (Aerobe AfbraakPotentie module), zie ook Figuur 2.2. Beide modellen zijn direct aan elkaar gekoppeld, zonder pre-/postprocessing ertussen.

PeatParcel2D berekent op basis van de perceeleigenschappen het freatisch grondwaterstandverloop (vrije grondwaterstand, meestal de stand van het grondwater in de bodem) in een 2D profiel op dagbasis. Input hiervoor zijn onder andere neerslag- en verdampingsgegevens en kwel/wegwijziging als dynamische parameters en perceelsopbouw, bodemopbouw, locatie van drainerende/infiltrerende elementen als statische parameters (zie verder Hoofdstuk 3). Vervolgens worden in PeatParcel2D op basis van de gemodelleerde grondwaterstand een bodemvocht- en bodemtemperatuurprofiel voor de onverzadigde zone bepaald. In de AAP-module wordt op basis van deze profielen de aerobe afbraakpotentie per 5 cm diepteinterval uitgerekend voor een rekenpunt op 1/3 van de perceelbreedte. Voor elke 5 cm diepteinterval wordt de aerobe afbraakpotentie vervolgens omgezet naar een CO₂-uitstoot met een vaste waarde (Figuur 2.5). De afstandsmaat 1/3 van de perceelbreedte wordt vaker toegepast als zijnde een representatief punt voor de gemiddelde grondwaterdynamiek in een perceel. Aan de randen van een perceel beïnvloedt de voeding vanuit de sloot/watergang het grondwaterstandverloop, terwijl in het midden de invloed van de sloot/watergang zeer beperkt is. Hierbij is overigens geen rekening gehouden met het voorkomen van greppels die ook draineren of infiltrerend kunnen werken.

PeatParcel2D bevat het dynamische deel van de modellering: de freatische grondwaterstand op dagbasis. De stappen erna, het bepalen van de bodemvocht- en bodemtemperatuurprofielen, worden voorlopig gedaan op basis van vaste diepte profielen. In de AAP-module wordt de aerobe afbraakpotentie bepaald op basis van uit de literatuur bekende relaties (zie verder in Hoofdstuk 3) met bodemvochtgehalte en bodemtemperatuur. In de AAP-module wordt daarna de CO₂-uitstoot berekend op basis van de afbraakpotentie (Figuur 2.5) in combinatie met bodemkoolstofgehalte, gebruikmakend van basisrespiratiemetingen vanuit het NOBV (zie verder Hoofdstuk 3). Dit betekent dat de gehele tijdsdynamiek wordt bepaald door de berekende grondwaterstanden.



Figuur 2.5: Stap voor stap berekening van de CO₂-uitstoot in SOMERS 1.0 met behulp van PeatParcel2D (grondwatermodel) en de AAP-module (koolstofmodel).

PeatParcel2D en de AAP-module beginnen niet bij nul: zo maakt PeatParcel2D gebruik van het verzadigde zone algoritmes van MODFLOW (Langevin et al., 2017) dat al decennia over de hele wereld wordt gebruikt. MODFLOW is ontwikkeld door de Amerikaanse Geologische Dienst (USGS). De AAP-module, maar ook PeatParcel2D maken gebruik van concepten en denkwijzen die bijvoorbeeld ook in PEATLAND-VU, HYDRUS, SWAP en ANIMO gebruikt worden. In die zin wordt er al gebruik gemaakt van de verschillende onderliggende modellen. In een beperkt aantal gevallen leveren de andere modellen met gedetailleerde modellering ook daadwerkelijk data aan die weer wordt gebruikt in PeatParcel2D (bijvoorbeeld bodemvochtprofielen).

Er is ook bekeken of SOMERS voor de grondwatermodellering geen gebruik kon worden gemaakt van SWAP, dat ook in staat is om snel 1D berekeningen te maken. Hier is uiteindelijk niet voor gekozen vanwege de reden dat de berekeningen dan er dan geen 2D berekeningen kunnen worden gemaakt. In SWAP wordt dit ondervangen door 1D te rekenen op een punt op 1/3 van de perceelbreedte, maar in sommige gevallen zal dit niet altijd representatief zijn voor de grondwaterhydrologie van het perceel. Dit is met name belangrijk indien er bijvoorbeeld waardes zijn die een ruimtelijke component hebben, zoals het uitzakken en opbollen van grondwaterstanden tussen sloten, greppels en drainagebuizen. PeatParcel2D is een verzadigde zonder grondwatermodel, terwijl SWAP een onverzadigde zone model is. Veel van de maatregelen die worden voorgesteld binnen het Klimaatakkoord hebben een werking via de grondwaterstand. Dit wordt het best benaderd met een verzadigde zone model. SWAP aan de andere kant kan wel relevante informatie leveren over bijvoorbeeld het bodemvochtprofiel in de onverzadigde zone. Voor alle relatief complexere modellen geldt dat voor landelijke inzet parametrisatie wordt beperkt door de beschikbare data. Peatparcel2D is geoptimaliseerd om alleen gebruik te maken van parameters die uniform beschikbaar zijn op landelijke schaal.

Een pragmatische keuze is dat (in eerste instantie) CH₄ en N₂O in SOMERS nog buiten beschouwing worden gelaten vanwege de procescomplexiteit en het nog te ontwikkelen mechanistisch begrip. Ook is CH₄ uitstoot minder relevant bij lagere grondwaterstanden die nu het meest voorkomen in het veenweidegebied. Tenslotte wordt CH₄ op dit moment ook nog niet meegenomen in de Nederlandse LULUCF-rapportage en staat er geen expliciete reductiedoelstelling voor CH₄ uitstoot in de veenweidegebieden in het Klimaatakkoord. Dit heeft uiteraard consequenties voor de inzetbaarheid

van SOMERS 1.0: bij situaties met hoge grondwaterstanden (minder dan 20 cm onder maaiveld) kan geen volledig broeikasgasuitstootbeeld verkregen worden.

Tegelijkertijd met de ontwikkeling van SOMERS 1.0 wordt er gewerkt aan een lange termijn modelstrategie. Deze strategie beweegt mee met nieuwe eisen, mogelijkheden en inzichten die aan SOMERS in de toekomst worden gesteld of beschikbaar zijn. Ten alle tijden zal een optimale modelconfiguratie gezocht worden die die rekening houdt met deze eisen, inzichten en mogelijkheden.

3 Beschrijving SOMERS 1.0

PeatParcel2D en de AAP-module vormen samen SOMERS 1.0. PeatParcel2D heeft als doel het dynamisch simuleren van de freatische grondwaterstand, het bodemvochtprofiel en het bodemtemperatuurprofiel. De AAP-module heeft als doel het berekenen van de CO₂-uitstoot op basis van de uitkomsten van PeatParcel2D. Deze modules kunnen los van elkaar worden gebruikt, maar zijn in samenhang ontwikkeld.

In Paragraaf 3.2 en 3.3 van dit hoofdstuk wordt op hoofdlijnen de werking van beide rekenmodelmodules besproken. Een gedetailleerdere en technische beschrijving van de modellen is te vinden in Bijlage A (Engelstalig). In beide modules worden onder andere bodemparameters gebruikt als inputwaardes. Ten behoeve van de landelijke monitoring is gewerkt met bodemarchetypen die karakteristiek zijn voor veelvoorkomende (organische) bodemopbouw in Nederland. Deze worden beschreven in Paragraaf 3.1.

3.1 Bodemarchetypen

De BRO bodemkaart v2018 (Brouwer et al., 2021) maakt onderscheid tussen 60 typen organische bodems: 49 veenbodems en 11 moerige bodems. Deze indeling is gemaakt op basis van de samenstelling en opbouw van de bodem, maar ook op basis van de veensoort (rietveen, bosveen, etc.). Het bodemtype beïnvloedt in grote mate de afbraakcondities via de grondwaterdynamiek. Daarnaast bepaalt het bodemtype de beschikbaarheid en samenstelling van organisch materiaal. Het onderscheid in Nederlandse veenbodems en moerige bodems is gemaakt vanwege verschillen in opbouw, samenstelling en ontwikkelingsgeschiedenis. Dit zijn niet noodzakelijkerwijs allemaal sturende factoren voor de broeikasgasuitstoot. Ook is het op dit moment niet altijd duidelijk op welke manier bepaalde bodemeigenschappen doorwerken in bijvoorbeeld de grondwaterdynamiek of in de uitstoot van broeikasgassen. Daarom is ervoor gekozen om alleen onderscheid maken tussen bodemtypes als dit helpt de fractie verklarde variantie te vergroten. Nieuwe inzichten kunnen deze fractie vergroten door nieuwe relaties expliciet mee te nemen in de berekeningen. De doorrekening in 60 verschillende organische bodems in de landelijke modellering geeft een zeer groot aantal mogelijke combinaties, wat veel tijd en rekencapaciteit kost. Daarom is besloten een beperkt aantal unieke combinaties, ook in relatie tot andere modelparameters, door te rekenen. Hiertoe zijn bodemtypes gegroepeerd in archetype veenbodems (Tabel 3.1).

Sterk verwante bodemtypes zijn samengevoegd tot in totaal 19 archetype veenbodems (Tabel 3.1). De indeling in archetypen is gemaakt op basis van de indeling in sub-orden en samenstelling en dikte van de bodemhorizonten. Bij de archetypen indeling is vooral gelet op:

- Het voorkomen van bodemtypen in Nederland en in het veenweidegebied in het bijzonder. Bodems waarvan minder dan 100 ha aanwezig is zijn samengevoegd met de meest vergelijkbare klasse.
- Het effect van verschillende veensoorten (bosveen, veenmosveen, etc.) op de hydrologie (bijvoorbeeld doorlatendheid) en de broeikasgasuitstoot (bijvoorbeeld met andere basisrespiraties). Het is nog onvoldoende duidelijk in welke mate dit geldt en of, en zo ja hoe, dit in de modellering meegenomen zou kunnen worden. Concreet betekent dit dat de bodems waarbij alleen het veentype varieert, maar de opbouw niet, samen zijn gevoegd tot één categorie. Als er meer inzicht komt over het effect van veentype op één van beide componenten, kan deze aanpak worden herzien.
- Tenslotte zijn bodemtypen bij elkaar gevoegd die uitsluitend op deelaspecten van elkaar verschillen door variatie in de lagen onder de veenlagen, wat niet of nauwelijks relevant is in grondwatermodellering.

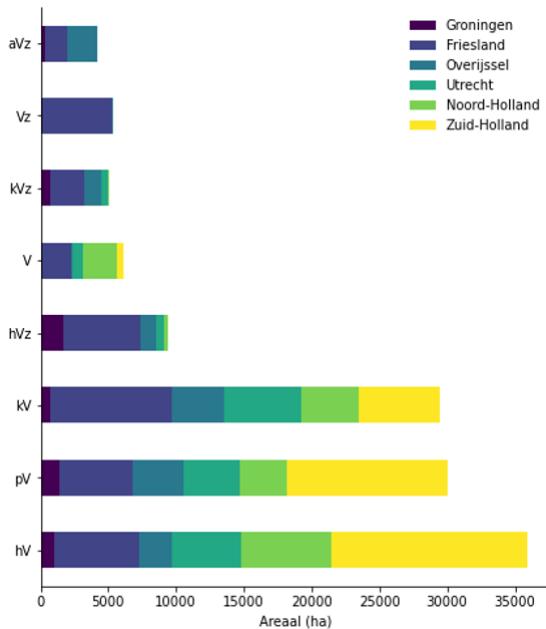
De Vries (1999) heeft voor een groot aantal bodems standaard bodemprofielen beschreven, waarin naast de samenstelling en dikte ook het massa percentage organische stof is vastgelegd. Ieder

archetype wordt beschreven volgens één bodemprofiel van De Vries (1999). Vaak is dit het bodemtype dat het meest voorkomt binnen de groep van bodems in de bodemarchetype, of waarvan er veel informatie beschikbaar is (Tabel 3.1). In Tabel 3.1 zijn ook de moerige gronden geclassificeerd. Deze zijn nog niet in beeld voor het nemen van maatregelen, onder andere omdat het effect van de voorgestelde maatregelen nog onduidelijk is. Wanneer dit wel zo is kunnen ze op eenzelfde manier worden meegenomen in de monitoring, maar SOMERS 1.0 richt zich vooralsnog op de veenbodem.

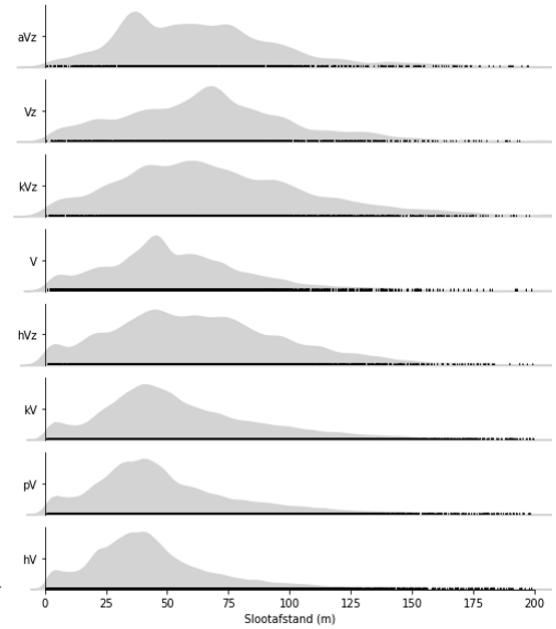
Tabel 3.1: Standaard bodemeenheden voor verschillende bodemarchetypes (De Vries, 1999). De diktegedrukte bodemeenheden zijn de bodemtypes die gebruikt om het bodemarchetype te beschrijven.

Bodemarchetype	Afkring	Omvat bodemeenheden	Bodembeschrijving
Eerdveengronden	Koopveengronden	hV	hVb, hVs, hVc , hVr, hVd
	Koopveengrond op klei of zavel	hVk	hVk
	Koopveengrond op zand	hVz	hVz
	Madeveengronden	aV	aVs, aVc
	Madeveengrond op zand zonder humus-podzol	aVz	aVz
	Madeveengrond op zand met humus-podzol	aVp	aVp
Rauweveengronden	Weideveengronden	pV	pVb, pVs, pVc , pVr, pVd
	Weideveengrond op klei of zavel	pVk	pVk
	Weideveengrond op zand	pVz	pVz
	Waardveengronden	kV	kVb, kVz, kVc , kVr, kVd
	Waardveengrond op klei of zavel	kVk	kVk
	Waardveengrond op zand	kVz	kVz
	Meerveengronden	zV	zVs, zVc
	Meerveengronden op zand	zVz	zVz, zVp
	Vlierveengronden	V	Vb, Vs, Vc , Vr, Vd
	Vlierveengronden op klei of zavel	Vk	Vk
	Vlierveengronden op zand	Vz	Vz, Vp
Overig	Veengronden met veenkolonial dek op zand	iVz	iVz , iVp
	Veengronden met veenkolonial dek	iV	iVs, iVc
Moerige gronden	Podzolgrond met zavel- of kleidek	kWp	kWp
	Podzolgrond met moerige bovengrond	vWp	vWp
	Podzolgrond met zanddek	zWp	zWp , uWP
	Broekeerdgrond	Wg	Wg , Wp
	Eerdgrond met zavel- of kleidek	kWz	kWz
	Eerdgrond met zanddek	zWz	uWz, zWz
	Eerdgrond met moerige bovengrond	vWz	vWz
	Eerdgrond met veenkolonial dek	iWz	iWz

Acht archetypes beslaan meer dan 80% van het landbouwareaal in het veenweidegebied: hV, pV, kV, hVz, V, kVz, Vz en aVz. In Figuur 3.1 is het areaal van deze acht archetypes per provincie weergegeven. De provinciale archetype verdeling is in Tabel 3.2 verder toegelicht. De figuur laat ook zien dat de verdeling van archetypes niet evenredig is over de verschillende provincies. Zo bestaat het grootste areaal van veengronden in West-Nederland uit koopveen- (hV), weideveen- (pV), waardveen- (kV) en vlierveengronden (V), maar komen vlierveengronden op zand (Vz) bijna uitsluitend voor in de provincie Friesland.



Figuur 3.1: Verdeling van de 8 meest voorkomende archetypes (x-as) qua oppervlak (ha) (y-as), verdeeld over de provincies.



Figuur 3.2: Relatie tussen het bodemarchetype (x-as) en de slootafstand (y-as). Verschillende archetypes worden anders gedraaineerd, afhankelijk van de dikte en bodemeigenschappen.

Tabel 3.2: Provinciale verdeling van het kustvlakteveen. Er wordt een onderscheid gemaakt tussen het totale aanwezige kustvlakteveen (exclusief moerige gronden), het kustvlakteveen in de 8 meest voorkomende archetypes en van het kustvlakteveen in de individuele archetypes per provincie.

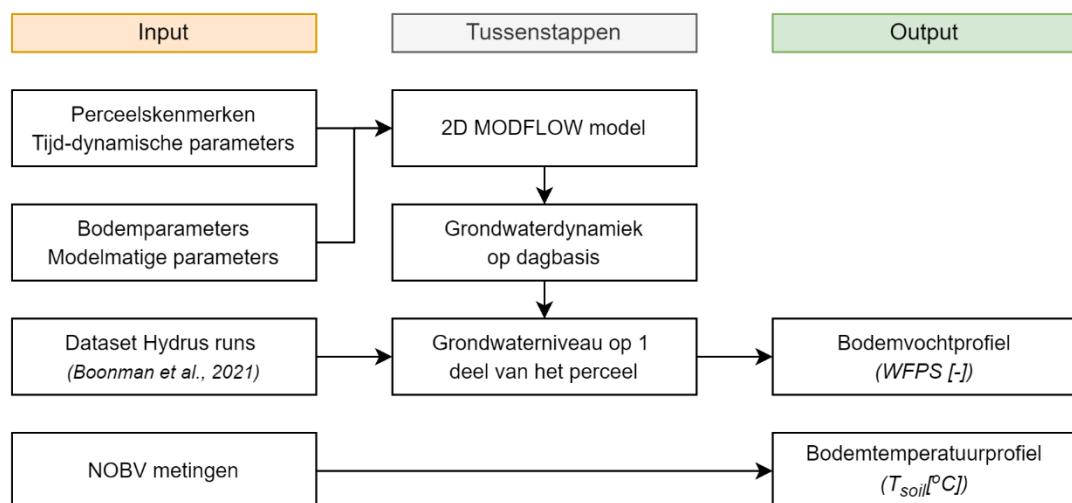
Provincie	Oppervlakte kustvlakteveen – zonder moerige gronden [ha]	Oppervlakte kustvlakteveen – 8 meest voorkomende archetypes [ha]	Oppervlakte 8 meest voorkomende archetypes per provincie [ha]							
			aVz	Vz	kVz	V	hVz	kV	pV	hV
Groningen	18.591	5.878 (32%)	294	83	611	0	1635	833	1436	986
Friesland	57.322	38.054 (66%)	1701	5022	2406	2335	5753	8968	5436	6434
Overijssel	22.010	15.247 (69%)	2498	30	1315	75	1280	3816	3836	2397
Utrecht	22.022	16.590 (75%)	0	23	495	711	542	5737	3889	5194
Noord Holland	20.652	17.408 (84%)	0	24	89	2537	308	4272	3429	6750
Zuid Holland	37.875	32.778 (87%)	14	0	0	527	0	5929	11746	14562

Figuur 3.2 toont de relatie tussen de slootafstand (perceelbreedte) en bodemarchetype. De perceelsbreedte varieert aanzienlijk binnen één bodemtypen, maar ook tussen bodemtypen. Het verkavelingspatroon (bepalend voor de perceelbreedte) is historisch gezien gebaseerd op de

ontwateringssnelheid van de bodem. Dit is ook terug te zien in Figuur 3.2: bredere percelen komen vaker voor in bodems waar meer zand aanwezig is, en/of met dunnere veenlagen, bijvoorbeeld aVz en Vz bodems.

3.2 Configuratie van PeatParcel2D

Met PeatParcel2D kunnen op basis van landelijk gekarteerde informatie de belangrijkste twee factoren voor de aerobe microbiële afbraak van bodemkoolstof tot CO₂ op perceelschaal worden berekend: bodemvocht en bodemtemperatuur (Figuur 3.3). De kern van de module is een 2D-grondwatermodel, waarmee de freatische grondwaterstand dynamisch wordt berekend. Grondwaterstanden worden met vaste relaties vertaald naar een bodemvochtprofiel. Een bodemtemperatuurprofiel wordt op basis van gemiddelden uit bodemtemperatuurmetingen toegewezen.



Figuur 3.3: schematische opzet van PeatParcel2D. Hydrus is een meer gedetailleerd grondwatermodel. WFPS is ‘water-filled pore space’ ook wel de verzagingsgraad

De grondwaterdynamiek wordt met een 2D MODFLOW6 model (Langevin et al., 2017) op perceelschaal gesimuleerd, en de verkregen grondwaterdynamiek vormt de basis van de verdere berekeningen met PeatParcel2D en de AAP-module. Het gebruik van een 2D grondwatermodel heeft een aantal voordelen:

1. De grondwaterdynamiek is een cruciale randvoorwaarden voor de processen die aerobe veenafbraak beïnvloeden. Met een dynamische grondwaterstand en bodemvocht- en bodemtemperatuurprofiel kan gewerkt worden met een niet lineair uitstootprofiel in de tijd.
2. In tegenstelling tot niet-dynamische modellen, kan het effect van maatregelen die grondwaterstanden beïnvloeden, zoals infiltratiesystemen of peilverhoging, worden berekend.
3. In Nederland zijn relatief veel grondwaterstandmetingen beschikbaar voor kalibratie en validatie, in tegenstelling tot bijvoorbeeld CO₂-uitstoot of bodemvocht. Het is relatief eenvoudig deze metingen uit te breiden en te verbeteren. Hieroor is het wel van belang rekening te houden met de representativiteit van de beschikbare metingen.
4. De grondwaterdynamiek varieert over de breedte van het perceel. Door 2D te modelleren kan er worden gekalibreerd op een grondwatermeting op iedere locatie binnen het perceel. Ook kan de CO₂-uitstoot worden berekend voor de hele breedte van het perceel, rekening houdend met verschillen in grondwaterstand aan de randen en in het midden van het perceel.

5. De modelcomplexiteit is lager dan bijvoorbeeld een volledig bodemvochtmodel, dus zijn de rekentijden relatief kort.

3.2.1 Parameters

PeatParcel2D simuleert de (freatische) grondwaterstand op dagbasis, voor een gespecificeerde periode, voor de kortste zijde van het perceel tussen twee sloten (slootafstand, Figuur 3.4) met deze vier type parameters:

1. *Perceelkenmerken*: de afstand tussen twee sloten (slootafstand), slootdiepte, maaiveldniveau, winter- en zomerpeil en indien van toepassing de eigenschappen van de waterhuishoudkundige maatregel;
2. *Tijd-dynamische parameters*: neerslag, verdamping, kwel/wegzetting;
3. *Bodemparameters*: bodemopbouw, doorlatendheid, vochtkarakteristiek en freatische bergingscoëfficiënt;
4. *Modelmatige parameters*: drainageweeringstand van onderwater- en drukdrainagesystemen.

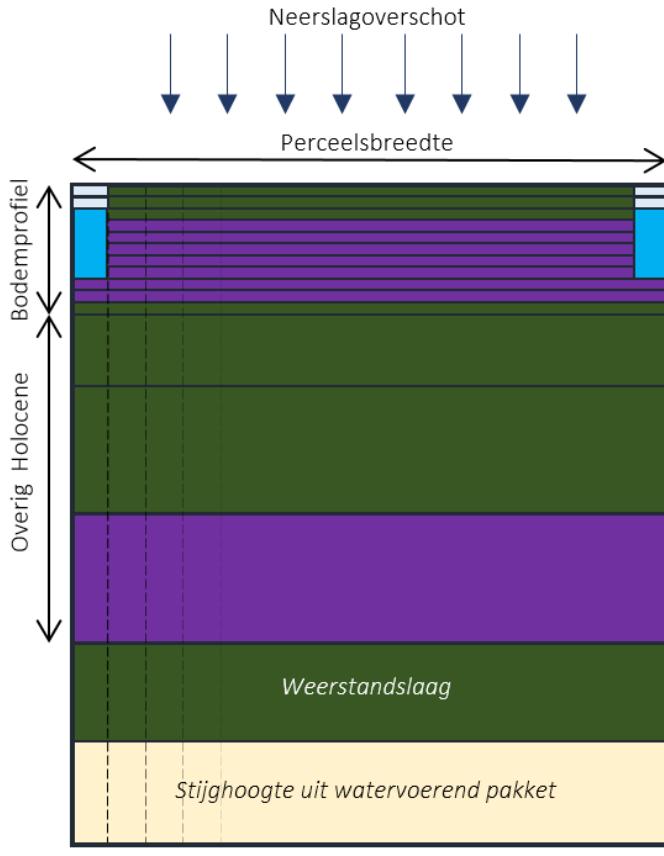
De module is zo opgezet dat er slechts enkele perceelkenmerken als invoer nodig zijn om een perceel te kunnen simuleren. Overige perceelkenmerken en de tijd-dynamische kenmerken voor een perceel kunnen worden verkregen uit landelijk gekarteerde datasets op basis van de coördinaten van het middelpunt van het perceel.

Ook een aantal bodem- en modelmatige parameters worden op basis van landelijk gekarteerde modellen toegewezen, of geschat met vaste aannames. Sommige van deze parameters zijn niet landsdekkend op perceelschaal gekarteerd en kunnen ruimtelijk sterk variëren. Om toch op landelijke schaal te kunnen simuleren is daarom een kalibratie analyse opgezet waarbij een aantal van de parameters worden geschat op basis van grondwaterstandsmeetingen (zie Paragraaf 3.2.3).

De eigenschappen van waterhuishoudkundige maatregelen (drainafstand, draindiepte) (Paragraaf 3.2.4) zijn op dit moment nog niet landelijk vastgelegd en moeten worden opgevraagd bij de bronhouder (waterschappen of vergunningverleners). Op dit moment wordt er gewerkt aan de infrastructuur om deze informatie in de toekomst landelijk bij te kunnen houden.

3.2.2 Modeldiscretisatie en randvoorwaarden

Voor een simulatie wordt een 2D modelgrid gecreëerd met een horizontale dimensie parallel aan het dwarsprofiel van het perceel tussen twee sloten (Figuur 3.4), met een vaste gridresolutie van 0,5 m. De verticale discretisatie van het model kan worden onderverdeeld in drie onderdelen: 1) het bodemprofiel tot 1,2 m onder het maaiveld, 2) het resterende Holocene pakket (inclusief weerstandslaag), en 3) het onderliggende 1^e watervoerende pakket (Figuur 3.4). Binnen deze discretisatie wordt voor eigenschappen van de cellen onderscheid gemaakt in 3 categorieën: veen, klei of zand. De verticale discretisatie wordt horizontaal aan het hele profiel toegekend (Figuur 3.4).



Figuur 3.4: Voorbeeld van de opzet van een modelgrid van PeatParcel2D, dat wordt gediscreetieerd aan de hand van de perceelkenmerken en de bodemopbouw. Voor alle cellen waar de sloot ligt, worden cellen boven het slootpeil uitgeschakeld. De cellen krijgen een van 3 categorieën toegewezen: veen (paars), klei (groen) of zand (geel), die de bergingscoëfficiënt en het massa percentage organische stof bepaalt. De doorlatendheid wordt uniform aan het hele freatische pakket toegewezen. De bovenste cellen zijn fijn gediscreetieerd (5cm dikte), omdat daar het grootste deel van de grondwaterfluctuatie en aerobe afbraak plaatsvindt. De weerstandslaag vertegenwoordigt de verticale weerstand van de Holocene laag op de kwel/wegzetting van het 1e watervoerende pakket. De afmetingen van beide lagen komen uit het LHM (Hunink et al., 2020), evenals de weerstand en de stijghoogte.

1. *Bodemprofiel tot 1,2 m onder maaiveld*: De bovenste laag bestaat uit een fijne discretisatie met cellen met een dikte van 5 centimeter (Figuur 3.4), omdat hier het overgrote deel van de grondwaterfluctuatie plaatsvindt. Daarnaast speelt zich in dit deel van de bodem het grootste deel van de aerobe afbraak af. De opbouw van de bodem is gebaseerd op de bodemarchetypen (Paragraaf 3.1).
2. *Overig Holoceen*: Het overige deel van het Holocene pakket wordt in lagen van 0,5 m dikte toegewezen op basis van GeoTOP gebruikmakend van de meest waarschijnlijke lithologie (Stafleu et al., 2012).
3. *Watervoerend pakket*: Om de kwel- of wegzettingssituatie te simuleren worden onder het *Overig Holoceen* twee extra lagen (cellen) toegevoegd. De eerste laag van 0,5 m krijgt een weerstand van de eerste weerstandslaag uit het Landelijk Hydrologisch Model (LHM), het geïntegreerd landsdekkend grond- en oppervlaktewater model van Nederland (Hunink et al., 2020). Deze cel simuleert het effect van de opgetelde weerstand van het Holocene pakket, en de invloed daarvan op de kwel- of wegzettingsflux. De tweede laag daaronder krijgt een dikte en stijghoogte op dagbasis van het eerste watervoerende pakket toegekend, beiden zoals in het LHM.

Het neerslagoverschot (neerslag min verdamping), wordt op dagbasis ingevoerd in de bovenste cellen van het model op basis van het neerslagoverschot op basis van landsdekkende neerslag- en gewasverdampingskaart. Deze kaarten zijn ontwikkeld door het KNMI voor het LHM op basis van geïnterpolateerde neerslag en verdampingsmetingen, en hebben een resolutie van 1000 m x 1000 m (Janssen et al., 2020). De verdamping is gebaseerd is op de potentiële referentie gewasverdamping, die niet afhankelijk is van de grondwaterstand. Voor de sloten kan een winter- en zomerpeil worden opgelegd, of een variabel peil waar bijvoorbeeld een gemeten slootpeilreeks die op dagbasis varieert als input wordt gebruikt. Hierbij wordt de bodem van de sloot vastgesteld op 50 centimeter onder

het winterpeil, gebaseerd op het werk van Massop et al. (2006). Het slootwaterpeil kan worden gevarieerd met stappen van 5 centimeter. In numerieke modellen represeneert de slootweerstand de verschillende weerstanden die het water ondervindt als het van de rand van de cel naar de sloot in de cel stroomt. In PeatParcel2D komt de slootweerstand overeen met een weerstand van 1 dag. Dit is aannemelijk gezien de fijne discretisatie, waardoor de sloot meerdere cellen bezet en dus de grondwaterstroming naar de sloot explicet wordt gemodelleerd. Hierdoor omvat de weerstand van 1 dag uitsluitend de intreeweerstand.

3.2.3 Bodemparameters

Het is niet doenlijk om landsdekkend op perceelschaal hydrogeologische bodemkenmerken te meten, zoals de doorlatendheid (K) en de freatische bergingscoëfficient (Sy). Grondwatermetingen tonen aan dat percelen met vergelijkbare kenmerken zeer verschillend grondwaterstandverloop kunnen hebben. Dit kan worden verklaard door verschillen in de hydrologische eigenschappen van de bodem, maar ook door de wijze waarop meetpunten worden ingericht of bijvoorbeeld het management van het perceel met de meetlocatie. Voor SOMERS 1.0 is daarom een kalibratiemethode opgezet om, op basis van grondwaterstandsmeetingen, een representatieve set van hydrologische bodemparameterwaarden te verkrijgen voor het modelleren van de percelen in het Nederlandse veenweidegebied. De kalibratiemethode wordt verder toegelicht in Hoofdstuk 4. Hieronder wordt de aannames voor de verschillende parameters verder toegelicht.

De verzadigde horizontale doorlatendheid (Kh) is één van de belangrijkste hydrogeologische parameters (Hooghoudt, 1940; Ernst, 1983). Aangezien voor de kalibratie vaak één grondwaterstandsметing per perceel beschikbaar is, is het niet mogelijk om variaties in de doorlatendheid in de diepte te kwantificeren. In PeatParcel2D wordt daarom een constante Kh gedefinieerd voor de gehele doorstroomde dikte (D) van het Holocene pakket. Dit is een gangbare aanname in hydrologische modellen (Bruggeman, 1999; Van der Gaast et al., 2015). Dit betekent dat Kh een integrale parameter is die de fysische eigenschappen van de ondergrond op een grotere schaal representeert. Deze aanpak maakt het mogelijk landelijk te kalibreren op een enkele grondwaterstandsметing. Wanneer meer metingen beschikbaar zijn en de proceskennis is vergroot kan er mogelijk wel een onderscheid worden gemaakt in doorlatendheid in de diepte.

De verticale doorlatendheid (Kv) wordt met een vaste verhouding van 20% van de Kh gevarieerd. Uit een gevoeligheidsanalyse bleek dat de invloed van variaties in deze verhouding gering was. Het effect van de totale verticale weerstand van het Holocene pakket op de kwel/wegwijging wordt gesimuleerd door de weerstand uit het LHM (Paragraaf 3.2.2).

Een andere belangrijke parameter in freatische grondwatermodellen is de freatische bergingscoëfficiënt (Sy). Voor de parametrisatie hiervan in PeatParcel2D wordt aangenomen dat Sy afhankelijk is van de bodemopbouw. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen de Sy van veen en die van klei (Figuur 3.4), omdat deze grondsoorten voornamelijk voorkomen in het veenweidegebied.

3.2.4 Waterhuishoudkundige maatregelen

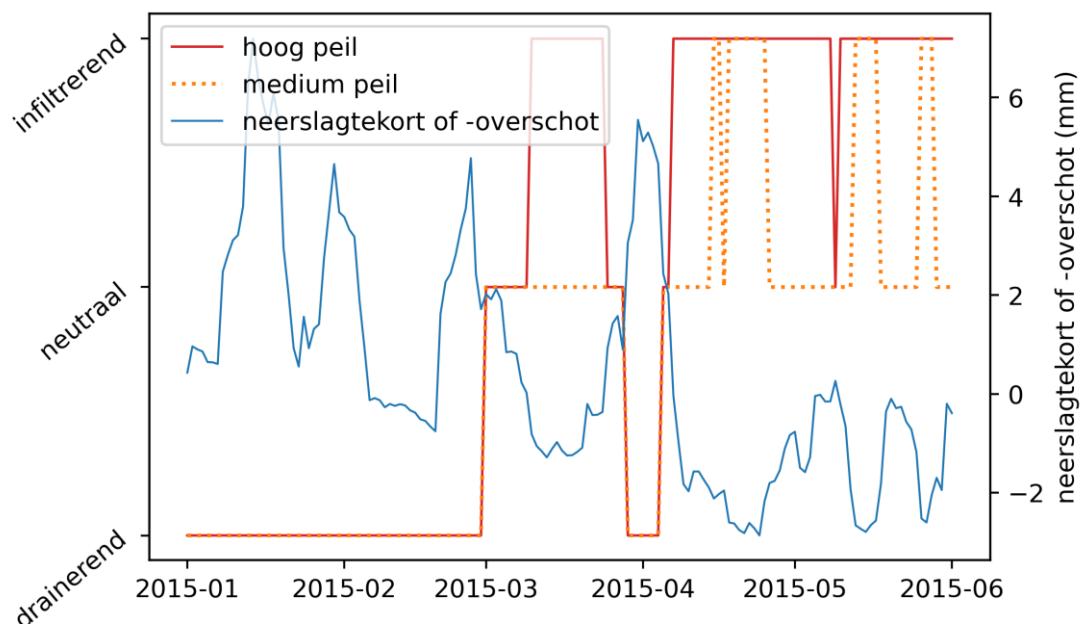
Er kunnen in PeatParcel2D de effecten van drie verschillende waterhuishoudkundige maatregelen worden berekend, al dan niet gecombineerd: een slootwaterpeilverhoging, passieve waterinfiltratiesystemen (onderwaterdrainage) of actieve waterinfiltratiesystemen (drukdrainage).

Bij een slootwaterpeilverhoging worden modelmatig de slootpeilen verhoogd naar een aangepast niveau, voor beide sloten in het modeldomein. Voor het toepassen van onderwaterdrainage worden modelmatig drainagebuizen op een gegeven diepte en met een gegeven afstand tussen de drains in de lengte van het perceel geplaatst. De stijghoogte in de drains is gelijk aan die in de sloot, om te simuleren dat zij hiermee verbonden zijn. De mate van infiltratie of drainage wordt ook bepaald door de drainageweerstand, een modelmatige parameter die de weerstand van de stroming van grondwater naar de drains representeert. Wanneer het freatische grondwaterniveau hoger is dan het

drukniveau in de drains komt wordt grondwater afgevoerd. Als het freatische grondwater niveau lager is dan het drukniveau in de drains, wordt oppervlaktewater geïnfiltreerd.

Bij drukdrainage worden de drains op dezelfde manier als bij onderwaterdrainage in het model ingevoerd. Uit pilots met deze maatregel wordt duidelijk dat het beheer van de waterpeilen in de drukvaten van het drukdrainagesysteem verschilt van locatie tot locatie. In sommige gevallen wordt handmatig het drukpeil aangepast, in andere gevallen wordt gestuurd op een specifiek gewenst grondwater niveau. Deze adaptieve sturing van het drukpeil is op dit moment nog niet ingebouwd in het model.

Daarom zijn voor drukdrainage twee scenario's ontwikkeld, genaamd *medium grondwaterstand* en *hoge grondwaterstand*, die representatief zijn voor een neutrale en actieve sturing. Beide scenario's kennen drie mogelijke infiltratieputpeilen, die in tijd worden ingesteld. De infiltratieputpeilen die in de modellering zijn gebruikt zijn stijghoogtes van 1) 10 centimeter onder maaiveld ('infiltrerend'), 2) gelijk aan slootpeil ('neutraal') of 3) 50 centimeter onder maaiveld ('drainerend') (Figuur 3.5). In het geval van 'actieve sturing' wordt eerder ingegrepen en gewisseld naar een drainerend of infiltrerend peil dan in het scenario met neutrale sturing. Het moment van sturing en wisseling wordt bepaald op basis van het lopende 7-daags gemiddelde van het neerslagoverschot. Globaal gezien komt deze aanpak erop neer dat bij veel neerslag gedraineerd wordt met put-/drukpeil 3, en bij een drogere periode geïnfiltreerd op drukpeil 1 (Figuur 3.5).



Figuur 3.5: Een voorbeeld van de implementatie van de scenario van drukdrainage voor het gemiddelde weer in Noord Nederland voor een deel van 2015. De sturing is op basis van het neerslagoverschot of -tekort, waarbij er gestuurd wordt op 1) 10 centimeter onder maaiveld ('infiltrerend'), 2) gelijk aan slootpeil ('neutraal') of 3) 50 centimeter onder maaiveld ('drainerend'). De mate van sturing wordt bepaald door het scenario, genaamd *medium grondwaterstand* en *hoge grondwaterstand*, die representatief zijn voor een neutrale en actieve sturing.

Op basis van gemeten grondwaterreeksen van maatregelenpercelen wordt de drainageweerstand van het buisdrainagesysteem gekalibreerd met de geselecteerde hydraulische parameter combinaties, die gebaseerd zijn op de grondwaterreeksen van de referentiepercelen (zie verder Paragraaf 3.2.3 en 4.2.1).

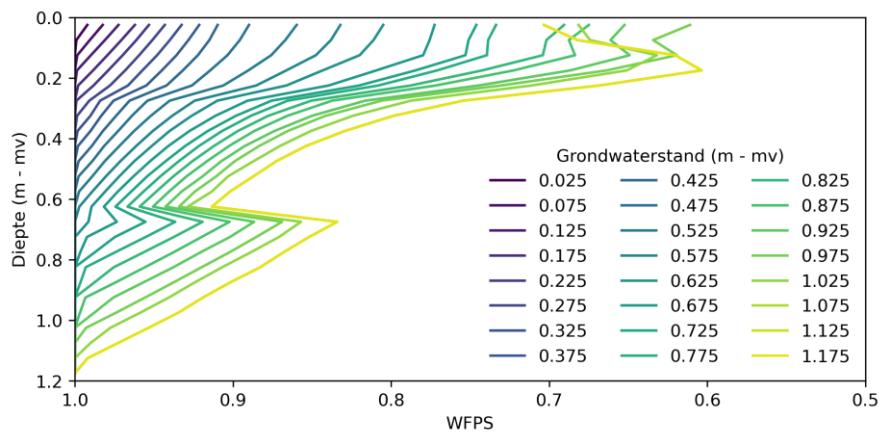
3.2.5 Bodemvocht

De voorgestelde maatregelen grijpen via de grondwaterstand in op de het bodemvochtprofiel. Het gekoppeld berekenen van bodemvocht- en grondwatermodellen op landelijke schaal is gezien de lange rekentijden en vereiste inputparameters nog niet haalbaar. Daarom wordt als nabewerking van de grondwatermodellering bodemvochtprofielen toegewezen op basis van de gemodelleerde grondwaterstand. Figuur 3.6 toont gestandaardiseerde bodemvochtprofielen in relatie tot de grondwaterstand.

Water-filled pore space (WFPS) geeft de verzadigingsgraad van de bodem aan: bij een WFPS van 1.0 is de bodem volledig verzadigd, bij een waarde van 0.0 is de bodem volledig uitgedroogd. In de praktijk varieert het bodemvocht in een veengrond tussen een WFPS van 0.6 en 1.0 (Boonman et al., 2022).

De profielen in Figuur 3.6 zijn gebaseerd op de gemiddelde relatie tussen de grondwaterstand en bodemvocht uit 75 simulaties met het bodemvochtmodel HYDRUS voor verschillende randvoorwaarden (Boonman et al., 2022). De simulaties worden per 5 cm toegewezen aan de modelcellen. De simulaties zijn gemaakt voor een perceel met een slootafstand van 35 m met een typische veenweidebodem zonder kleilaag met veraard veen tot 60 cm onder maaiveld. De gebruikte vochtprofielen zijn gemeten op 2/5 van de perceelbreedte, wat als representatief wordt gezien voor de situatie op 1/3 van de slootafstand of op 1/3 afstand tussen de drains in het geval van drainage.

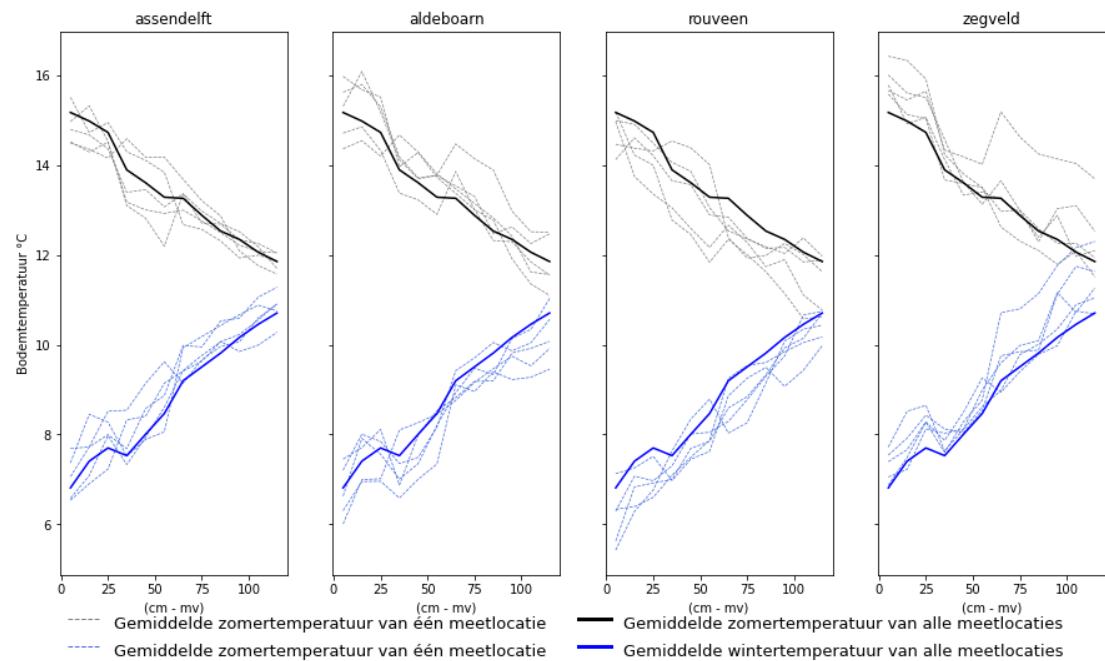
De profielen van Boonman et al. (2022) zijn gebaseerd op het gemiddelde van een simulatie van één jaar, gebaseerd op 2 meetlocaties. Naast de grondwaterstand wordt het bodemvochtprofiel beïnvloed door bodemeigenschappen zoals de onverzadigde doorlatendheid, de retentie eigenschappen van de bodem en de porositeit, door de ontwateringssituatie en door neerslag en (gewas)verdamping, die op dit moment niet of sterk geschematiseerd in het model zijn verwerkt. Ook wordt er op dit moment nog geen rekening gehouden met verschillende bodemarchetypen, de aanwezigheid van maatregelen en hysterese. Dit heeft allemaal mogelijk wel een significant effect op het bodemvochtprofiel.



Figuur 3.6: Bodemvochtprofiel uit Boonman et al. (2022). Voor iedere grondwaterstand wordt een specifiek bodemvochtprofiel (water filled pore space, of WFPS) bepaald, representatief voor de situatie op 1/3 van de slootafstand, met een typisch veenweidebodem zonder kleilaag met veraard veen tot 60 cm onder maaiveld. In volgende versies van PeatParcel2D zal dit worden uitgebreid om verschillende bodems te vertegenwoordigen. Bodemvochtprofielen bij grondwaterstand van 1.075, 1.125 en 1.175 m-mv zijn identiek, aangezien deze niet zijn afzonderlijk zijn bepaald met het Hydrus-model.

3.2.6 Bodemtemperatuur

Bodemtemperatuur wordt op alle NOBV-meetlocaties ($n=20$) gemeten. In deze versie van PeatParcel2D wordt gewerkt op basis van de temperatuurmetingen op 4 locaties op de referentie- en maatregelenpercelen tussen 01-05-2020 en 01-02-2022 (Figuur 3.7). Deze metingen tonen relatief weinig verschil tussen de verschillende locaties. Er is daarom gekozen om een landelijk gemiddeld zomerbodemtemperatuurprofiel en een landelijk gemiddeld wintertemperatuurprofiel te gebruiken op basis van deze metingen. Dit betekent dat er een abrupte overgang is van zomer- naar wintertemperatuurprofiel, wat in de realiteit een langzame overgang is, afhankelijk van de buitentemperatuur. Hierdoor is de invloed van de bodemopbouw en grondwaterstand niet meegenomen in de temperatuurberekeningen. Ook wordt er nog niet meegenomen dat warm oppervlaktewater dat infiltrert via de drains de bodemtemperatuur kunnen verhogen (Boonman et al., 2022).



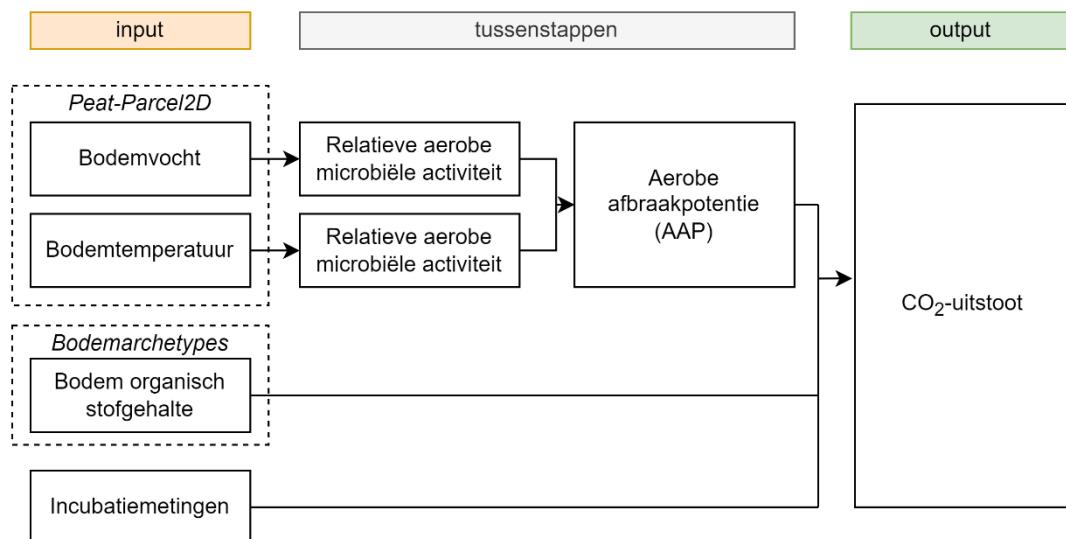
Figuur 3.7: Bodemtemperatuurprofielen in diepte uit metingen op NOBV-locaties tussen 01-05-2020 & 01-02-2022. De blauwe lijnen tonen het gemiddelde temperatuurprofiel zoals gebruikt in AAP voor de winter, zwart voor de zomer. Voor de locaties zijn metingen verricht op referentie- en maatregelenpercelen, zichtbaar als de stippeellijnen.

3.3 AAP

Met de AAP-module (*Aeroobe AfbraakPotentie*-module) wordt de CO_2 -uitstoot door microbiële omzetting van bodemkoolstof tot CO_2 in de onverzadigde zone berekend. Figuur 3.8 geeft schematisch de opzet van de AAP-module weer.

Eerst wordt op basis van de uit PeatParcel2D afkomstige bodemvocht- en bodemtemperatuurprofielen wordt de aerobe afbraakpotentie (AAP) berekend (*potential respiration rate* uit Boonman et al. (2022)). Hiervoor wordt gebruikt gemaakt van de door Boonman et al. (2022) geschikt gemaakte relaties voor het Nederlandse veenweidegebied. Deze relaties beschrijven hoe bodemvocht en bodemtemperatuur onafhankelijk van elkaar de microbiële activiteit beïnvloeden ten opzichte referentie afbraakcondities. Voor bodemvocht is de relatieve microbiële activiteit maximaal (relatieve microbiële activiteit = 1) bij een bodemvochtgehalte gelijk aan 70% van de veldcapaciteit: een hoger of lager bodemvochtgehalte leidt tot lagere microbiële activiteit, zie Figuur A.6a in Bijlage A.2.3. Voor de bodemtemperatuur is de relatieve aerobe microbiële activiteit gelijk aan 1 bij een

(bodem)temperatuur van 20 graden en een lagere temperatuur leidt tot minder afbraak. Bodemtemperaturen hoger dan 20 graden komen niet voor (Figuur 3.7). De relatieve aerobe microbiële activiteit op basis van het bodemvocht en bodemtemperatuur bepalen *samen* de AAP.



Figuur 3.8: Schematische weergave van de AAP-module.

De AAP geeft aan in welke mate de afbraakcondities afwijken van de referentiecondities. Indien de gemodelleerde condities exact overeenkomen met de referentiecondities (bodemtemperatuur is 20 °C en het fractie bodemvocht is 70% van de veldcapaciteit) is de aerobe afbraakpotentie gelijk aan 1. Via bovenstaande werkwijze wordt op basis van bodemvocht en bodemtemperatuur wordt de AAP berekend op dagbasis per 5 cm bodeminterval.

De CO₂-uitstoot voor de referentiecondities (AAP=1) is bepaald op basis van laboratorium incubatiemetingen op veenmonsters uit de oxidatie-reductie zone afkomstig uit de verschillende NOBV-sites (Erkens et al., 2021). Deze incubatiemetingen laten zien dat de CO₂-uitstoot uit de verschillende monsters behoorlijk vergelijkbaar zijn indien gecorrigeerd wordt voor de fractie organische stof in het monster. Alleen de CO₂-uitstoot uit veenmonster afkomstig van het NOBV-perceel in Assendelft is duidelijk hoger. Hier speelt mogelijk de aanwezigheid van sulfaat een rol. Aangezien deze metingen nog niet goed verklaard kunnen worden, wordt hier nu geen rekening mee gehouden in SOMERS 1.0. Het gemiddelde uit de incubatiemetingen is gebruikt als waarde voor de omstandigheden dat AAP 1 is 313.83 µg CO₂ gOM⁻¹ d⁻¹ (zie verder Bijlage A).

Door de berekende AAP op dagbasis per 5cm bodemprofiel te vermenigvuldigen met de CO₂-uitstoot bij referentieomstandigheden en vervolgens te sommeren, is de CO₂-productie uit de bodem verkregen. Hierbij is de uitstoot gecorrigeerd voor het organisch stofgehalte zoals dat bepaald is in de archetypen bodemprofielen (zie Paragraaf 3.1).

4 Regionale aanpak bij inzet model

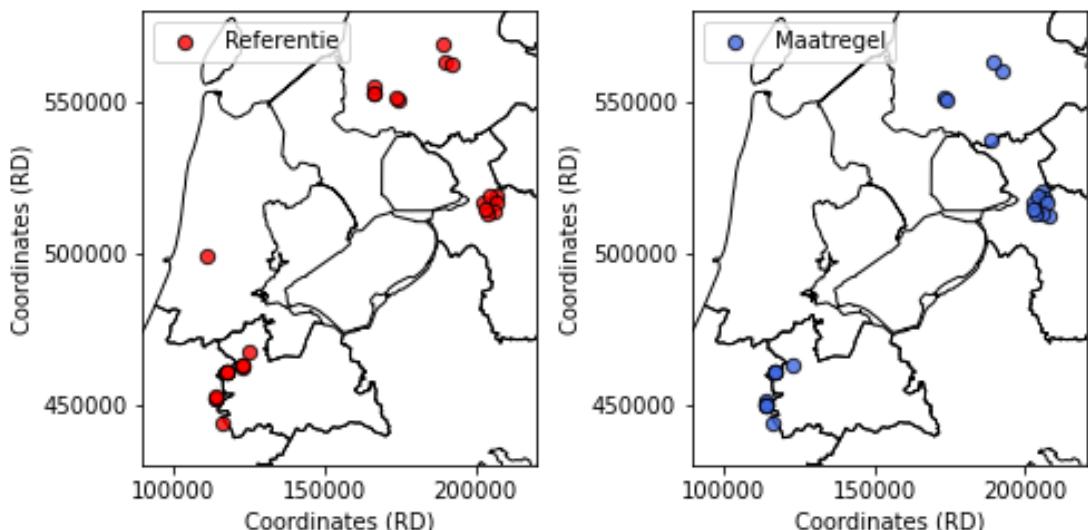
4.1 Kalibreren op grondwaterstanden

De registratie van de broeikasgasuitstoot en -reductie moet landelijk en op perceelniveau uitgevoerd kunnen worden (Hoofdstuk 2). Dit betekent dat voor elk perceel in Nederland parameters beschikbaar moeten zijn voor het model. In dit hoofdstuk wordt beschreven hoe die verkregen zijn.

4.1.1 Geohydrologische parameters

In het veenweidegebied liggen rond de 100.000 gewaspercelen met peilbeheer (Agrarisch Areal Nederland, of AAN (PDOK, 2022)). Ieder perceel kent unieke geohydrologische kenmerken (Holden et al., 2006). Deze zijn afhankelijk van de bodemopbouw, maar ook van de opbouw van de diepere ondergrond, oorsprong van het veen, de regionale geohydrologische context en menselijk invloed. Op dit moment zijn er niet genoeg directe of indirecte metingen beschikbaar om deze geohydrologische eigenschappen op perceelschaal af te kunnen leiden.

Om toch realistische aannames te kunnen maken voor de belangrijkste geohydrologische parameters; de doorlatendheid en de freatische bergingscoëfficiënt van veen en klei, is een kalibratie-analyse opgezet. De representativiteit van de uitkomsten wordt vergroot indien zoveel mogelijk data wordt gebruikt voor de parametrisatie. Uiteindelijk doel is om zoveel mogelijk van de relevante variantie te vangen en verklaren. Hiervoor zijn in totaal grondwaterstanden van 28 (referentie) veenweidepercelen zonder waterhuishoudkundige maatregel gebruikt (Figuur 4.1 & Bijlage B). In totaal zijn 640 parametercombinaties getoetst aan de hand van gemeten grondwaterstanden uit 2020 op deze locaties. Tabel 4.1 toont de geteste parameterwaarden die zijn bepaald aan de hand van in literatuur gerapporteerde parameterbandbreedes voor klei en veen. De kalibratie van de drainageweerstand wordt in Paragraaf 4.1.2 toegelicht.



Figuur 4.1: Ruimtelijke verdeling van de metingen op referentie- en maatregelenpercelen, gebruikt voor de kalibratie. Over het algemeen kennen beide soorten percelen een vergelijkbare ruimtelijke verdeling, maar bijvoorbeeld het drukdrainageperceel in Assendelft (Noord-Holland) is niet meegenomen bij de kalibratie.

De prestatie van iedere parametercombinatie is bepaald aan de hand van de Kling-Gupta Efficiency index (KGE) (Gupta et al., 2009; Kling et al., 2012). Deze index is telkens berekend op basis van de gemiddelde prestatie van de desbetreffende parametercombinatie op alle kalibratiepercelen. Vervolgens wordt aangenomen dat niet één unieke parametercombinatie, maar de 30 best presterende parametercombinaties representatief zijn. Deze aanpak is gebaseerd op de *generalized likelihood uncertainty estimation* methode van Beven en Binley (1992). Aangezien alle 30 geselecteerde parametercombinaties even waarschijnlijk zijn, geeft de eventuele bandbreedte in de modelresultaten informatie over de onzekerheid van de voorspellingen.

Een voordeel van deze methode is ook dat nieuwe freatische grondwatermeetreeksen (bijvoorbeeld bij het verstrijken van de tijd) de parametrisatie kunnen verbeteren. Deze aanpak is daarmee een robuuste keuze voor de toekomst. Daarnaast kan er onderscheid worden gemaakt tussen verschillende bodemarchetypes, regio's of hydrologische situaties, door de parametercombinaties te vergelijken. Hierin kan worden gezocht naar onderlinge relaties tussen parameters.

Tabel 4.1: Bandbreedtes parameters in kalibratie-analyse.

Type	Geteste parameterwaarden
Horizontale doorlatendheid (m/d)	0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.7, 0.9, 1.1, 1.5, 2.5, 5.0
Freatische bergingscoëfficient veen (-)	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8
Freatische bergingscoëfficient klei (-)	0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6
Drainweerstand (d) <i>Dit zijn geen afgeronde waarden omdat ze zijn afgeleid op basis van de diameter van een drain van 6 cm (Nationale kennisprogramma bodemdaling, 2019)</i>	0.19, 0.38, 0.57, 0.75, 0.94, 1.13, 1.32, 1.51, 1.7, 1.88, 2.26, 2.64, 3.02, 3.39, 3.77, 4.15, 4.52, 4.9, 5.28, 5.65, 7.54, 9.42, 14.14, 18.85, 188.5

De gekalibreerde parameterwaarden zullen de meest representatieve fysieke eigenschappen van de bodem het best benaderen indien belangrijke randvoorwaarden, zoals slootwaterstanden, neerslag en kwelsituatie, ook nauwkeurig bekend zijn en zijn opgenomen in het model. Door de aanpak van PeatParcel2D zal echter lokaal de modelinvoer soms fouten bevatten, zoals een te hoge stijghoogte of ontbreken van een slecht doorlatende laag. Verschillen tussen de gesimuleerde en gemeten grondwaterstand grondwatermeting worden gecompenseerd in de gekalibreerde parametercombinaties. De parametercombinaties wijken in dat geval af van de fysieke geohydrologische eigenschappen van de bodem, maar kunnen alsnog representatief zijn voor het simuleren van de grondwaterstanden.

PeatParcel2D is hiermee niet een puur mechanistisch model dat gemeten waarden als invoer gebruikt. Het doel is het zo goed mogelijk simuleren van de grondwaterstanden en niet het gebruik van zo realistisch mogelijke veldwaarden. Een bijkomend voordeel van deze aanpak is dat de parametercombinaties ook compenseren voor fouten in de data die op grote schaal kunnen voorkomen, zoals afwijkingen tussen geregistreerde en geïmplementeerde slootpeilen. Wel geven afwijkende parameterwaarden dus aan dat er voor onderdelen van een simulatie moet worden gecompenseerd, wat aanleiding kan geven tot verdere ontwikkeling van het model. Daarnaast moet bij een systeemverandering, zoals het toevoegen van een maatregel als onderwaterdrainage, opnieuw worden gekalibreerd (zie ook Paragraaf 4.1.2).

4.1.2 Kalibratie drainweerstand waterhuishoudkundige maatregel

Om het effect van infiltratiemaatregelen te bepalen, zoals onderwaterdrainage en drukdrainage, is een soortgelijke kalibratie-analyse uitgevoerd op de drainweerstand. De drainweerstand is de weerstand die de grondwaterstroming naar of weg van de drains ondervindt.

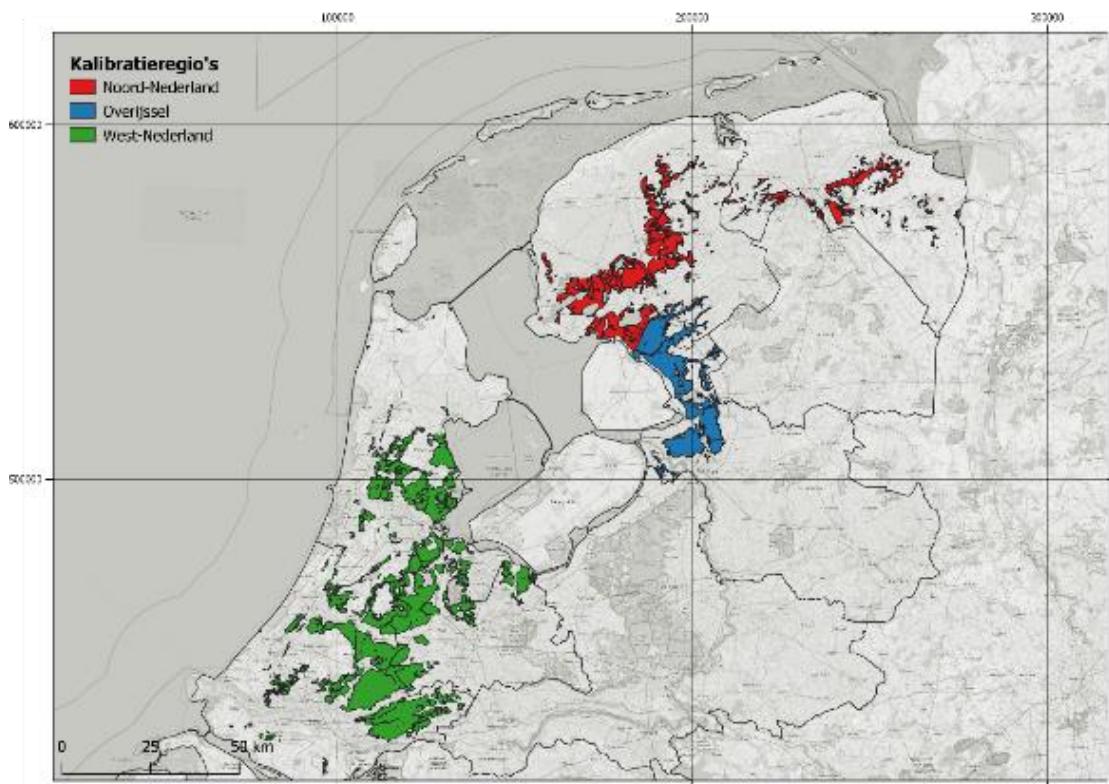
Op basis van 24 gemeten grondwaterreeksen van maatregelenpercelen uit West-Nederland (Figuur 4.1 & Bijlage B), Overijssel en Friesland, is de drainweerstand van het buisdrainagesysteem gekalibreerd. Deze kalibratie is gedaan in relatie tot de gekalibreerde geohydrologische parameter combinaties (de reeds gekalibreerde waarden; Paragraaf 4.1.1). Voor iedere hydrogeologische parametercombinatie zijn twee drainweerstanden bepaald. In totaal zijn er dus 60 representatieve parametercombinaties voor percelen met onderwater- of drukdrainage. Tabel 4.1 geeft de drainweerstanden die in de kalibratie-analyse zijn beschouwd weer. Deze waarden zijn afgeleid op basis van de diameter van een drain van 6 cm, de standaard gebruikte draindiameter (Nationaal kennisprogramma bodemdaling, 2019).

Er is geen aparte kalibratie gedaan voor de drainweerstand van druk- en onderwaterdrainage, dus er wordt aangenomen dat deze maatregelen door dezelfde parameter worden gerepresenteerd. Ook wordt op dit moment geen onderscheid gemaakt tussen drainage- en infiltratieweerstand, om het aantal kalibratieparameters te beperken.

4.2 Regionale indeling

In eerste instantie is gezocht naar een relatie tussen de bodemopbouw (archetypen) en geohydrologische parameters. Een verband tussen de bodemarchetypen en geohydrologische parameters is aannemelijk, zeker gelet op de bestaande relatie tussen bodemopbouw en slootafstand (Paragraaf 3.1). Op dit moment is het aantal metingen van de freatische grondwaterstand echter dermate beperkt dat geen onderscheid kan worden gemaakt in parametersets voor verschillende bodemarchetypen. Het is echter aannemelijk dat er vanwege de variatie in de geohydrologische omstandigheden wel andere parameters voor verschillende kalibratiepercelen in Nederland gevonden zullen worden. Om toch dit onderscheid te kunnen maken in de parametrisatie van verschillende percelen is een indeling op basis van hydrologische regio's gemaakt.

Er wordt onderscheid gemaakt in drie kalibratieregio's binnen het domein waar het Klimaatakkoord een uitwerking heeft (niveau 3b in Erkens & Melman, 2020a): veengronden West Nederland (Zuid-Holland, Noord-Holland en Utrecht), Overijssel (de veengronden in Overijssel en Friesland ten zuiden van de Tjonger) en Noord-Nederland (de veengronden in Groningen en Friesland ten noorden van de Tjonger) (Figuur 4.2). Dit onderscheid wordt gemaakt vanwege de hydrologische verschillen tussen deze regio's. West-Nederland wordt gekenmerkt door relatief dikke veenpakketten en weinig interactie met het 1^e watervoerende pakket. Overijssel kent juist hele dunne veenpakketten, waardoor er relatief veel interactie is met het 1^e watervoerend pakket. Ook wordt de hydrologische situatie gedomineerd door de Noordoostpolder en wat dieper gelegen polders waardoor er regionaalwegzetting plaatsvindt. In Noord-Nederland is het Holocene pakket iets dikker, maar is de interactie met het 1^e watervoerende pakket nog steeds relatief groot. Hier ontbreken grote droogmakerijen en zijn relatief meer kwelomstandigheden.



Figuur 4.2: De drie kalibratieregio's gebruikt om een onderscheid te maken in de parametrisatie van verschillende Nederlandse percelen.

Aangezien niet bekend is in welke mate de gekalibreerde parameters representatief zijn voor willekeurige percelen binnen de kalibratieregio's, is aangenomen dat een representatieve set van parametercombinaties geldig is in plaats van één unieke parametercombinatie (Paragraaf 4.1.1). Op

dezemanier is het mogelijk om deonzekerheid die de geohydrologische parametrisatie introduceert te kwantificeren per regio. Deze onzekerheid is ook afhankelijk van de gebruikte modelopzet en hieraan gekoppelde aannames, en eventuele fouten in de metingen.

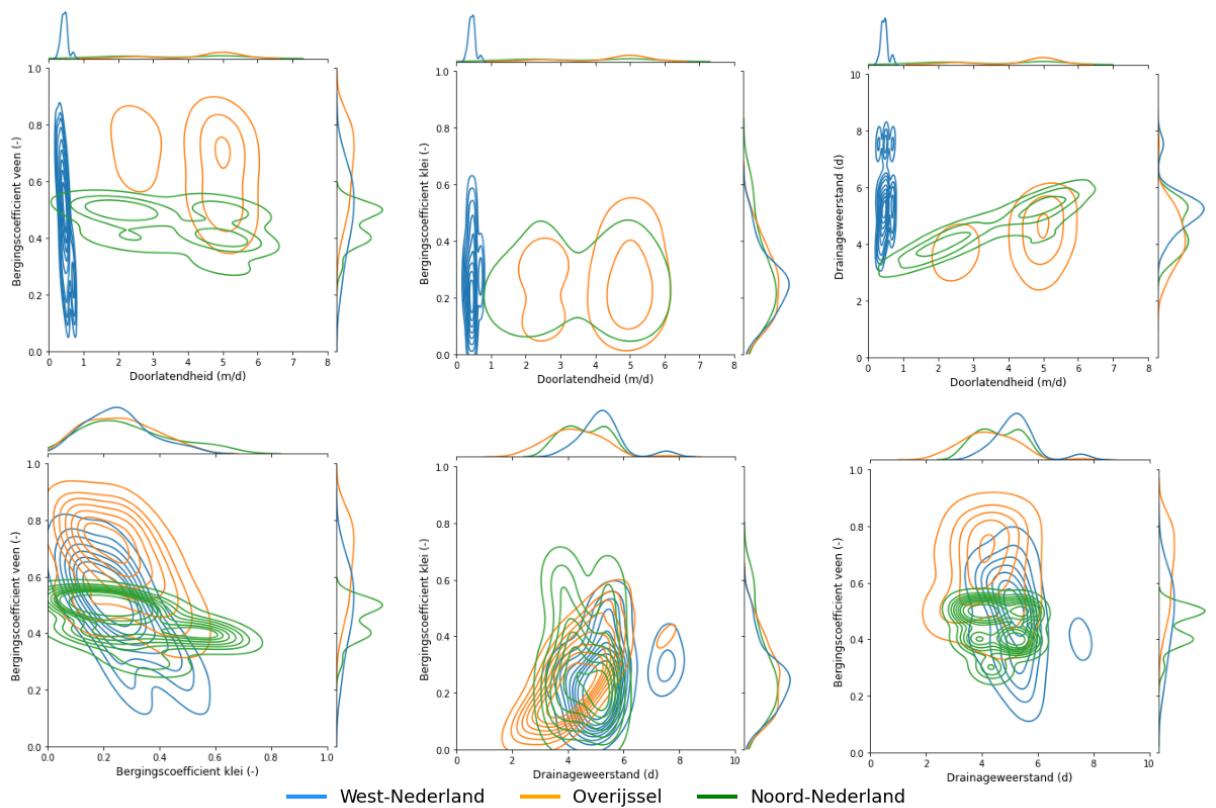
Op basis van alle grondwaterstands metingen binnen een kalibratieregio, zijn de 30 best presenteerde parametercombinaties geselecteerd. De gemiddelde prestatie van de set van representatieve parametercombinaties verschilt per regio's (Tabel 4.2). De geselecteerde parametercombinaties voor West-Nederland hebben gemiddeld de hoogste KGE-index. Dit wil zeggen dat de West-Nederlandse kalibratieslocaties zich over het algemeen goed laten beschrijven door dezelfde parametercombinaties. De lagere waarden voor Noord-Nederland en Overijssel komen overeen met de grotere variatie aan kwel- en wegzigingssituaties in deze regio's, welke meer onzekerheid introduceren en hier zijn de uitkomsten gevoeliger voor het aantal kalibratielocaties. Hierdoor zijn de simulaties minder goed, én is er een bredere bandbreedte aan parameters nodig. Een KGE van meer dan 0,7 is overigens nog steeds acceptabel.

Tabel 4.2: Gemiddelde KGE-index van de representatieve parametercombinaties per regio. De KGE wordt uitgedrukt in een waarde van 0 tot 1, waarbij 1 de beste fit geeft.

Locatie	Referentie	Onderwater- en drukdrainage
West-Nederland	0.93	0.81
Overijssel	0.74	0.82
Noord-Nederland	0.86	0.81

Figuur 4.3 toont de verdeling van parameters voor de verschillende regio's. De 30 gebruikte parametercombinaties per regio is terug te vinden in Bijlage A.1.5. Elke parametercombinatie wordt behandeld als even waarschijnlijk. De figuur laat sterke regionale verschillen zien. Zo is de verdeling voor de horizontale doorlatendheid voor West-Nederland erg nauw en zijn de waardes relatief laag, terwijl voor Overijssel en Noord-Nederland de verdeling relatief breed is en de waardes een stuk hoger liggen. Het is op dit moment niet duidelijk of deze verschillen daadwerkelijk duiden op fysieke verschillen in bijvoorbeeld de doorlatendheid van het veen tussen de regio's of dat de verschillen het gevolg zijn van fouten in de randvoorwaarden van het grondwatermodel (effectieve kalibratie). Mogelijk speelt hier de relatief grote onzekerheid in de gebruikte randvoorwaarde voor de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket een rol (Paragraaf 6.2). Vanwege de relatief dunne deklaag in Overijssel en Noord-Nederland, is de invloed van de stijghoogte in dit gebied groter dan in West-Nederland. Een foutieve stijghoogte heeft in Overijssel en Noord-Nederland dus meer invloed op de met PeatParcel2D gesimuleerde grondwaterstand, waardoor de basis van kalibratie niet juist is. Verschillen tussen de andere parameters zijn minder groot, al toont de bergingscoëfficiënt van veen in Friesland een nauwer bereik.

De drainageweerstand voor de regio's zijn relatief goed identificeerbaar en zijn redelijk gelijk voor de regio's. De lokale hydrologie is al gekalibreerd in de referentieparameters, en speelt dus een minder grote rol speelt in de kalibratie met drainage. Ook haalt een drainagemaatregel de fluctuaties uit de grondwaterstand en geeft een relatief vergelijkbaar effect voor iedere regio, wat een verklaring kan zijn voor de geringe verschillen tussen de KGE's van de regio's bij onderwater- en drukdrainage (Tabel 4.2). In twee gevallen zijn de KGE's bij de onderwater- en drukdrainagesituatie lager dan bij de referentiesituatie. Dit betekent dat de maatregelenlocaties zich minder goed laten beschrijven door de parametercombinaties afkomstig uit de referentiepercelen. Dit kan bijvoorbeeld worden veroorzaakt door een grotere spreiding in de drainageweerstandwaarde door verschillen in ouderdom en dus effectiviteit van een drainagemaatregel.



Figuur 4.3: Relaties van de 30 beste combinaties tussen de doorlatendheid, de freatische bergingscoëfficient van veen, de bergingscoëfficient van klei en de drainageweerstand voor verschillende kalibratieregio's. De parametercombinaties van west-Nederland tonen relatief lage doorlatenheden, terwijl Friesland/Groningen en Overijssel juist hogere doorlatenheden tonen. Tussen de overige parameters zijn minder grote verschillen zichtbaar.

5 Resultaten SOMERS 1.0

SOMERS 1.0 is in eerste instantie ontworpen voor het berekenen en registreren van de reductie in de landelijk CO₂-uitstoot in het veenweidegebied die is bereikt met (waterhuishoudkundige) maatregelen. Paragraaf 5.1 licht toe hoe SOMERS 1.0 op dit moment kan worden ingezet voor deze registratie. Daarnaast zijn met SOMERS 1.0 rekenregels bepaald die als indicatieve ondersteuning kunnen dienen bij het bepalen van de effecten van voorgestelde (toekomstige) maatregelen op de CO₂-uitstoot in het veenweidegebied. Paragraaf 5.2 beschrijft de totstandkoming van deze rekenregels en de hieruit volgende inzichten op hoofdlijnen over het effect van maatregelen.

5.1 Toepassing SOMERS 1.0 ten behoeve van de uitstootregistratie

Zoals beschreven in Hoofdstuk 3 en 4 is het met SOMERS 1.0 mogelijk om op basis van enkele perceelkenmerken de CO₂-uitstoot van een willekeurig perceel in het veenweidegebied te berekenen en te registreren. SOMERS 1.0 is daarmee opgezet voor twee toepassingen op landelijke schaal:

- i. de berekening van het effect van CO₂-reducerende maatregelen op plekken waar die zijn geïmplementeerd;
- ii. de berekening van de totale jaarlijkse CO₂-uitstoot uit het veenweidegebied (op termijn).

In Hoofdstuk 1 is beschreven dat dit gedaan wordt voor een referentieweerperiode (2010-2019).

Idealiter zou SOMERS 1.0 worden gebruikt om voor ieder perceel in het veenweidegebied, sommige met en andere zonder maatregel, jaarlijks de CO₂-uitstoot te berekenen. De cumulatieve berekende uitstoot van alle individuele percelen levert in dat geval een compleet overzicht op van de jaarlijkse CO₂-uitstoot vanuit het veenweidegebied. De berekeningen moeten in dat geval met de variatie van de ongeveer 100.000 percelen zoveel mogelijk om kunnen gaan.

Hoewel SOMERS 1.0 is ontworpen om relatief snel berekeningen te kunnen maken, is het op dit moment (2022) niet mogelijk om deze berekening voor *ieder* individueel perceel te maken (de tweede toepassing). Daarom wordt gewerkt met veelvoorkomende groepen van in bepaalde mate vergelijkbare percelen. Tussen vergelijkbare percelen is de variabiliteit in uitstoot naar verwachting beperkt. Een inventarisatie van de kenmerken van gewaspercelen (slootafstand en bodemopbouw) in relatie tot de drooglegging (BRP, BRO bodemkaart en LHM-slootpeilen) laat zien dat 90% van het totale areaal van gewaspercelen in het veenweidegebied wordt beschreven door ruim 2000 unieke combinaties. Deze combinaties maken onderscheid tussen bodemarchetypes, de slootafstand in stappen van 5 meter, en slootpeilverschillen in stappen van 5 centimeter. Een kleinere resolutie voor deze parameters zorgt waarschijnlijk niet voor significant andere uitstootwaarden tussen de verschillende stappen. Het is een aanname dat met deze 2000 unieke combinaties de ruimtelijke variabiliteit in uitstoot als gevolg van bodemopbouw en watermanagement zich voldoende laat vatten.

Indien ook rekening wordt gehouden met regionale hydrologie en neerslagpatronen zal het aantal combinaties nog wat toenemen, maar nog steeds ruimschoots onder de 100.000 blijven (+/- 10.000 unieke combinaties). In eerste instantie zou de registratie daarom uitgevoerd kunnen worden aan de hand van een uitgebreide opzoektabel met een representatieve CO₂-uitstoot voor 90% van de percelen in het veenweidegebied. Gesommeerd geven de uitkomsten uit de opzoektabel een totale uitstoot van Nederland die vergeleken kan worden met de uitstoot zoals gerapporteerd in de LULUCF.

Wat betreft het berekenen en registreren van effecten van maatregelen: op dit moment (begin 2022) zijn er nog maar beperkt maatregelen uitgevoerd in het veenweidegebied ten behoeve van het reduceren van de broeikasgasuitstoot. Een grove schatting is dat het om 500 percelen gaat. Gezien dit beperkte aantal is het vooralsnog mogelijk om dit op perceelbasis uit te voeren. Hiervoor moet

voor elk perceel waar een maatregel is genomen SOMERS 1.0 tweemaal worden doorlopen: eerst wordt de CO₂-uitstoot berekend zonder implementatie van de maatregel (de situatie zoals die bestond op 31 december 2016), vervolgens wordt de CO₂-uitstoot berekend met de genomen maatregel. Het verschil in CO₂-uitstoot tussen beide modelberekeningen geeft een inschatting van het effect van de maatregel. Dit effect wordt geregistreerd in SOMERS en wordt toegevoegd aan de cumulatieve uitstootreductie sinds 1 januari 2017 (zie verder Hoofdstuk 2).

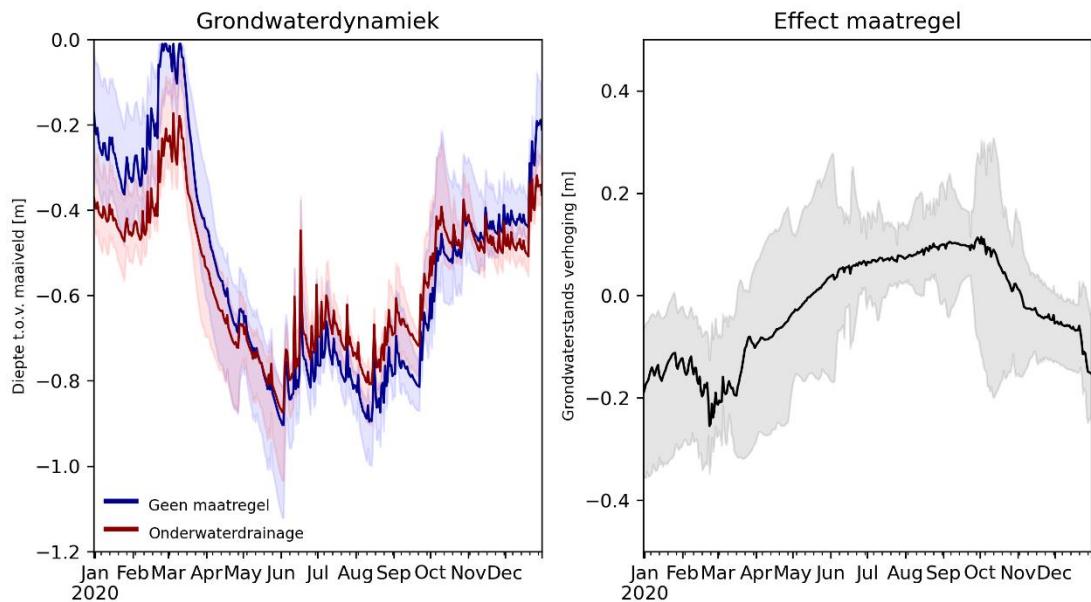
Om meer inzicht te geven in hoe SOMERS 1.0 het effect van waterhuishoudkundige maatregelen berekent ten behoeve van de registratie, zal ter illustratie stapsgewijs het effect van de maatregel op de grondwaterdynamiek, afbraakcondities en CO₂-uitstoot worden getoond voor het NOBV-meetperceel in Vlist. Belangrijk is dat in dit voorbeeld de metingen in Vlist worden uitgevoerd op 1 perceel waarin deels een maatregel is geïmplementeerd, terwijl het bij deze voorbeeldregistratie gaat om een perceel dat eerst geen maatregel kende, en daarna wel (dus tijdsafhankelijk). Dit hoofdstuk gaat niet in op de werking van SOMERS 1.0 in relatie tot metingen. Dit wordt in Paragraaf 6.1 besproken, waar op basis van metingen een indruk wordt verkregen van het voorspellend vermogen van SOMERS 1.0.

Vlist ligt midden in het Groene Hart in de polder Keulevaart (kalibratieregio West-Nederland, zie Hoofdstuk 4). Op de locatie van de NOBV-meetplots is de bodem is opgebouwd uit een humusrijk kleidek van ca. 35 cm dik en een verweerde kleiige veenlaag tot ca. 40-55 cm diep, eutroof broekveen met herkenbare plantenresten tot 50-70 cm en hieronder bosveen (Erkens et al., 2020). Overeenstemmend met de classificatie van de BRO bodemkaart (Brouwer et al., 2021), is deze bodem geklassificeerd als een Weideveeengrond. Circa 10 jaar geleden is op een perceel een onderwaterdrainagesysteem aangelegd op ongeveer 70 cm onder maaiveld met een drainafstand van 6 meter. De drooglegging is ruim 50 centimeter.

5.1.1 Grondwaterdynamiek (PeatParcel2D)

Figuur 5.1 (links) toont de gemodelleerde grondwaterstanden op 1/3 van de slootafstand voor het referentie- en onderwaterdrainageperceel van de NOBV-meetlocatie Vlist. Voor het maatregelenperceel wordt de grondwaterstand op 2.0 m van de dichtstbijzijnde drain (1/3 van de drainafstand) getoond. De berekeningen zijn gemaakt met de gekalibreerde parameterset voor West-Nederland. De modelresultaten laten zien dat onderwaterdrainage op deze locatie de grondwaterstand in de zomer tot maximaal ca. 10 cm verhoogt en in de winter tot maximaal ca. 20 cm verlaagt kijkend naar het gemiddelde. Het effect van de maatregel is voornamelijk verdrogend in de winter, terwijl de vernatting in de zomer relatief beperkt is. Dit heeft waarschijnlijk te maken met het de relatief grote drooglegging op deze locatie, waardoor de infiltratiedruk in de zomer onvoldoende is om de grondwaterstand substantieel te verhogen.

De onzekerheidsmarges die zijn aangegeven in Figuur 5.1 (rechts) worden volledig bepaald door de onzekerheid in de geohydrologische parametrisatie en de onzekerheid in het effect van de drainage-infiltratiemaatregel op de grondwaterstand. Hieruit blijkt dat de infiltrerende werking in de zomer nog net binnen de onzekerheidsmarges valt, terwijl de drainerende werking in de winter er net buiten valt.

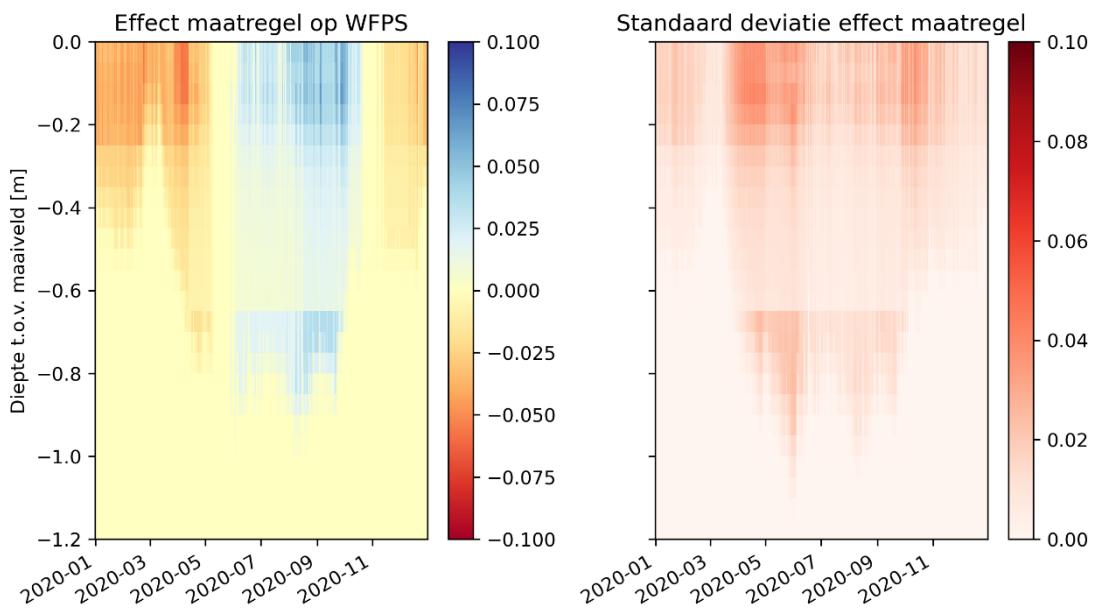


Figuur 5.1: Links) gemodelleerde grondwaterstand voor NOBV-percelen Vlist met (rood) en zonder (blauw) onderwaterdrainage. Rechts) effect van onderwaterdrainage op de grondwaterstand. Dikgedrukte lijnen tonen de gemodelleerde mediaan, de gekleurde gebieden geven de onzekerheidsbandbreedte (min, max) aan. Deze onzekerheid wordt volledig geïntroduceerd door de geohydrologische parametrisatie. De grondwaterstanden zijn representatief voor de situatie op 1/3 van de slootafstand van het perceel.

5.1.2 Afbraakcondities (PeatParcel2D)

Figuur 5.2 (links) toont het effect van onderwaterdrainage op het bodemvochtgehalte, uitgedrukt in water-filled pore space (WFPS). De 1D bodemvochtprofielen zijn opgesteld op basis van de grondwaterstanden uit Figuur 5.1. Dit betekent dat profielen representatief zijn voor de bodemvochtsituatie op 1/3 van de slootafstand van het perceel. De figuur laat zien dat als gevolg van de aanleg van het onderwaterdrainage systeem, analoog met het gemodelleerde effect op grondwaterstand, het bodemvochtgehalte in de zomer bovenin het bodemprofiel zal toenemen. In de winter neemt het bodemvochtgehalte juist wat af als gevolg van de maatregelen.

Figuur 5.2 (rechts) toont ook hoe de onzekerheid in de gemodelleerde grondwaterdynamiek wordt doorgegeven in het bodemvochtgehalte. Voor Vlist is de onzekerheid in het effect van onderwaterdrainage voornamelijk groot in de zomer aan de bovenkant van het bodemprofiel. Hierbij is het belangrijk om te realiseren dat dit alleen de onzekerheid vanuit de gesimuleerde grondwaterstand is en niet eventuele aanvullende onzekerheden door onderliggende aannames (zie Paragraaf 6.2).

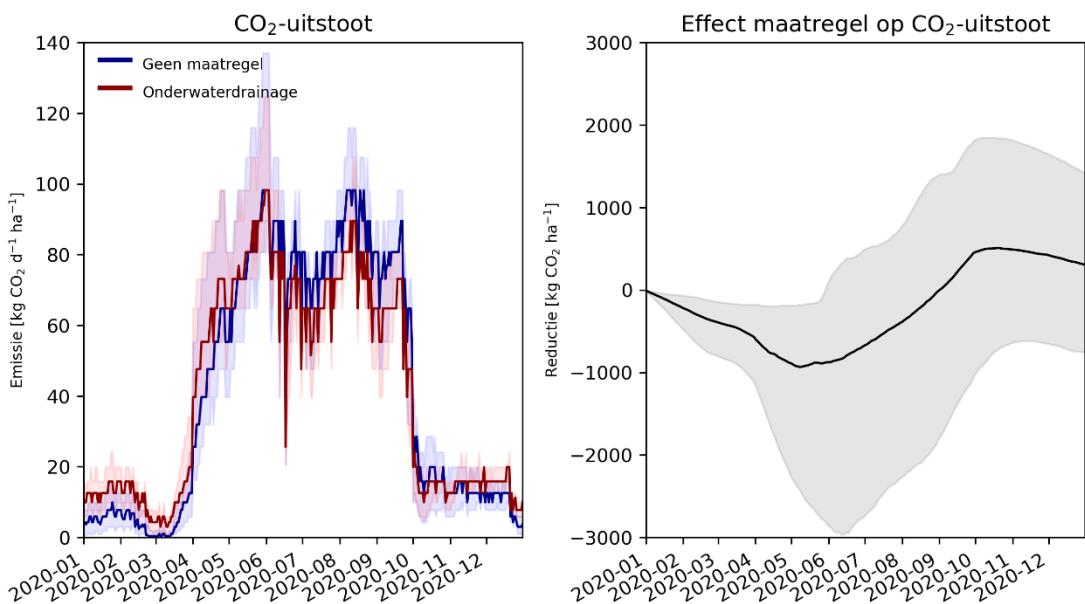


Figuur 5.2: Links) Effect van onderwaterdrainage op de bodemvochtgehalte uitgedrukt in water-filled pore space (WFPS). De schaal varieert tussen -0.1 en 0.1. Op deze schaal komt 0.1 overeen met een toename van 10% van de verzadigingsgraad als gevolg van onderwaterdrainage. -0.1 komt overeen met een afname van 10% van de verzadigingsgraad. Rechts) de standaarddeviatie van de WFPS, die bepaald wordt door de onzekerheid in de gesimuleerde grondwaterstand, zoals in Figuur 5.1 (rechts).

De bodemtemperatuur wordt op dit moment op basis van gestandaardiseerde zomer- en winterprofielen toegevoegd. Deze stap is niet afhankelijk van de gemodelleerde grondwaterstand. Hierdoor heeft een maatregel als onderwaterdrainage geen effect op de bodemtemperatuur. Of dit in de praktijk wel het geval is wordt onder andere in het Nationaal Onderzoeksprogramma Broekgasgassen Veenweiden onderzocht. Ook de onzekerheid met betrekking tot de bodemtemperatuur wordt op dit moment niet gekwantificeerd.

5.1.3 CO₂-uitstoot (AAP-module)

Figuur 5.3 (links) toont de gemodelleerde CO₂-uitstoot voor het perceel in Vlist met en zonder onderwaterdrainage. De figuur laat zien dat het grootste deel van de uitstoot plaatsvindt tussen april en oktober. De figuur laat ook zien dat onderwaterdrainage de CO₂-uitstoot in de zomer iets verlaagt en in de winter iets verhoogt. Dit is in lijn met het verwachte en gemodelleerde effect van het onderwaterdrainage-systeem op de grondwaterstand en het bodemvochtprofiel.



Figuur 5.3: Links) gemodelleerde CO₂-uitstoot voor NOBV-percelen Vlist met (rood) en zonder (blauw) onderwaterdrainage. Rechts) effect van onderwaterdrainage op de CO₂-uitstoot. Dikgedrukte lijnen tonen de gemodelleerde mediaan, de gekleurde gebieden geven de onzekerheidsbandbreedte (min, max) aan. De getoonde onzekerheid wordt volledig geïntroduceerd door de geohydrologische parametrisatie.

De gemodelleerde CO₂-uitstoot voor de situatie zonder onderwaterdrainage is 15385 (min. 14364; max. 16402) kg CO₂ per jaar per hectare, voor de situatie met onderwaterdrainage is dat 15066 (min. 14456; max. 16239) kg CO₂ per jaar per hectare. Het effect van een maatregel kan worden uitgedrukt als absolute reductie van CO₂-uitstoot of als reductiepercentage ten opzichte van de referentiesituatie. In dit geval het onderwaterdrainage-systeem een absolute reductie heeft van 304 (min. -759; max. 1416) kg CO₂ per jaar per hectare. Dit komt overeen met een reductiepercentage van 2.0% (min. -5.3%; max 9.0%). De beperkte gemodelleerde reductie is het gevolg van het geringe gemodelleerde hydrologische effect, wat overigens overeenkomt met de waarnemingen. In dit specifieke geval is het slootwaterpeil te laag om voor substantiële infiltratiedruk in de zomer te zorgen.

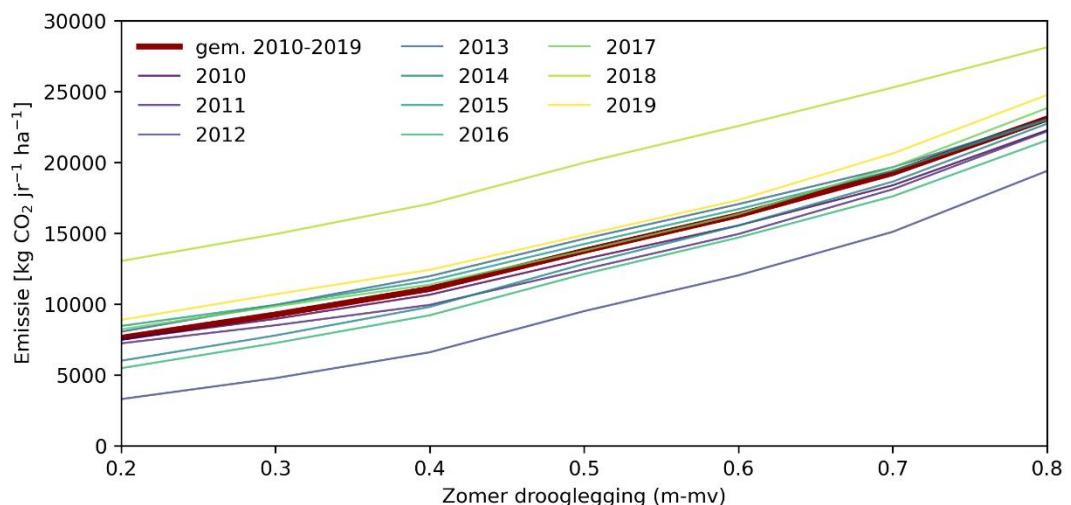
Dit voorbeeld laat zien dat een waterhuishoudkundige maatregel, zoals onderwaterdrainage, in SOMERS nu alleen via de hydrologie ingrijpt. Het zou kunnen dat onderwaterdrainage ook via andere processen de CO₂-uitstoot beïnvloedt, bijvoorbeeld via de waterkwaliteit of de aanvoer van relatief warm slootwater (e.g. Boonman et al, 2022). Of dit het geval is en hoe dit mogelijk de CO₂-uitstoot beïnvloedt moet eerst verder worden onderzocht binnen het Nationaal Onderzoeksprogramma Broekgasgassen Veenweiden, voordat het in SOMERS kan worden opgenomen.

5.1.4 Invloed van het weer

Het gebruik van procesmodellen zorgt voor een uitkomst die afhankelijk is van omgevingsvariabelen (zie ook Hoofdstuk 2), wat overigens ook in de metingen naar voren komt (zie bijvoorbeeld Erkens et al., 2021). In de resultaten van SOMERS 1.0 is dit al zichtbaar. Zo heeft het weer (neerslag en verdamping) invloed op de hydrologie (grondwaterstanden en bodemvocht) en daarmee op de CO₂-uitstoot. Ook de bodemtemperatuur varieert, maar omdat er wordt gewerkt met een standaard winter- en zomertemperatuurprofiel in SOMERS 1.0, komt dit niet terug in de resultaten.

Uit Figuur 5.4 wordt duidelijk dat de jaar tot jaar variatie in CO₂-uitstoot voor een standaard veenweideperceel behoorlijk groot kan zijn. Zo is de uitstoot in het relatief natte jaar 2012 een stuk lager dan de uitstoot gedurende een grote groep jaren met gemiddeld weer. De uitstoot in het relatief droge jaar 2018 ligt veel hoger. De CO₂-uitstoot uit het Nederlandse veenweidegebied zal dus van jaar tot jaar wisselen en als er gesproken wordt over ‘de uitstoot uit de Nederlandse

veenweidegebieden' dan kan dat alleen maar slaan op een gemiddelde over meerdere jaren. Dit onderstreept het belang van het jaarlijks uitvoeren van de registratie om deze wisselingen te volgen en betrouwbaar beeld te krijgen van de uitstoot bij veranderingen in het klimaat in de toekomst.



Figuur 5.4: Met SOMERS 1.0 gemodelleerde jaar-tot-jaar variatie in jaarlijkse CO₂-uitstoot tussen 2010 en 2019. De bodemtemperatuur varieert in deze berekeningen niet van jaar tot jaar, omdat in deze versie is gewerkt met een standaard winter en zomertemperatuurprofiel. Dit betekent dat in de praktijk de jaar-tot-jaar variatie mogelijk nog groter zal zijn indien de bodemtemperatuur op dagbasis wordt meegenomen. De uitstoot in het relatief natte jaar 2012 is aanzienlijk lager dan de uitstoot in het relatief droge jaar 2018. Dit figuur geeft geen informatie over de lokale variatie in het weer. De waarden op de horizontale as is de drooglegging (verschil slootwaterstand tot landoppervlak) in de zomer. Nattere percelen staan meer naar links in dit figuur, drogere meer naar rechts.

In de Monitoringssystematiek is vastgelegd dat de effecten van maatregelen worden bepaald voor een referentieverperiode van 2010-2019 (zie Hoofdstuk 1). Aangezien het wat betreft rekentijden op dit moment niet doenlijk is om SOMERS 1.0 voor ieder perceel voor een periode van 10 jaar te berekenen, is er voor iedere kalibratieregio (Paragraaf 4.2) één karakteristiek weerjaar gekozen dat het meest lijkt op het gemiddelde van de referentieverperiode. Hierbij is zowel rekening gehouden met de grootte en verdeling van het jaarlijkse neerslagtekort, als met de jaarlijkse CO₂-uitstoot. Dit laatste is gedaan door voor een aantal situaties (één archetype, één slootafstand en meerdere droogleggingsituaties) proefberekeningen te maken voor alle individuele jaren tussen 2010 en 2019. Het resultaat van deze berekeningen wordt getoond in Figuur 5.4. Ondanks de variatie zijn wel een aantal jaren aan te wijzen waarvoor de CO₂-uitstoot behoorlijk dicht bij het 10-jarige gemiddelde ligt. Voor West-Nederland wordt het weer in het jaar 2015 het meest karakteristiek en representatief geacht voor de referentieperiode. Voor Overijssel en Noord-Nederland is dit het jaar 2013. Deze regionale onderverdeling is gemaakt, omdat het ook per regio verschilt in welke mate een jaar droog of nat is. Deze aanpak is ook gebruikt om de regenregels voor de verschillende regio's op te stellen, zie Paragraaf 5.2.

5.2 Eerste resultaten rekenregels

SOMERS 1.0 is gebruikt voor het opstellen van 'rekenregels'. Deze rekenregels kunnen als indicatieve ondersteuning dienen bij het bepalen van de effecten van voorgestelde maatregelen op de CO₂-uitstoot in het veenweidegebied. Het zijn berekeningen van de CO₂-uitstoot die met SOMERS 1.0 gemaakt worden voor 'karakteristieke' gestandaardiseerde situaties in drie verschillende gebieden in Nederland. De rekenregels zijn opgesteld voor West-Nederland (Noord-Holland, Zuid-Holland en Utrecht), het gebied ten zuiden van de Tjonger in Overijssel en Friesland en het gebied ten noorden van de Tjonger in Friesland en Groningen (Paragraaf 4.2). De rekenregels zijn te vinden in Bijlage C.

Het zou ook mogelijk zijn om deze rekenregels op te stellen met behulp van andere modellen. Echter, gezien het groot aantal gestandaardiseerde combinaties (meer dan 5000) dat is doorgerekend en de sterke focus op waterhuiskundige maatregelen, is ervoor gekozen om hiervoor SOMERS 1.0 te gebruiken, omdat dat hiervoor bij uitstek geschikt is.

De rekenregels tonen de gemodelleerde CO₂-uitstoot per hectare per jaar bij verschillende slootwaterpeilen, slootafstanden (perceelbreedte) en de archetypen veengronden. De berekeningen gaan uit van een representatieve regionale hydrologie voor ieder van de regio's en zijn uitgevoerd voor een karakteristiek gemiddeld weerjaar binnen de referentieweerperiode. In het algemeen wordt West-Nederland gekenmerkt door relatief dikke veenpakketten en weinig interactie met het 1^e watervoerende pakket. In Noord-Nederland is het Holocene pakket dunner, maar is de interactie met het 1^e watervoerende pakket nog steeds relatief klein. Voor het gebied ten zuiden van de Tjonger in Friesland en Overijssel speelt door de geringe veendikte de regionale hydrologie een grotere rol dan in de andere regio's. Daarom zijn hier de rekenregels opgesteld voor zowel een lichte kwel als een lichte wegziggingssituatie. Natuurlijk zijn er binnen deze regio's ook plekken aan te wijzen waar de interactie met het 1^e watervoerende pakket (sterk) afwijkt van de representatieve regionale hydrologie, zoals veengronden in droogmakerijen of aan de flanken van de Utrechtse Heuvelrug en het Drents Plateau. Hier zal de kwelsituatie sterker zijn dan de gemiddelde situatie en zijn de rekenregels mogelijk minder representatief. Ook is het belangrijk om te beseffen dat als maatregelen grootschalig worden toegepast in een regio, dit ook de regionale hydrologie zelf zal beïnvloeden. Hier is geen rekening mee gehouden bij het opstellen van de rekenregels.

De rekenregels kunnen worden gebruikt om inzicht te krijgen in het effect van een slootpeilverhoging, onderwaterdrainage en drukdrainage in een gemiddeld jaar (het jaar 2015 is gemiddeld voor West-Nederland en het jaar 2013 voor Friesland en Overijssel voor de periode 2010-2019, zie Paragraaf 5.1.4). Het drainagesysteem ligt in deze berekeningen steeds op 70 cm onder maaiveld en de drainafstand bedraagt 4 m. Voor drukdrainage wordt onderscheid gemaakt tussen twee scenario's met een verschillende drainage-infiltratie intensiteit: *hoge grondwaterstand* en *medium grondwaterstand* (zie ook Paragraaf 3.2.4). In het scenario *hoge grondwaterstand* wordt al bij een relatief klein neerslagtekort de waterdruk op het systeem verhoogd om infiltratie te bevorderen. Dit systeem stuurt dus op een relatief hoge grondwaterstand. In het scenario *medium grondwaterstand* mag het neerslagtekort iets meer oplopen. De gemiddelde grondwaterstand zal dus iets lager liggen. De rekenregels voor drukdrainage zijn alleen opgesteld voor een drooglegging tot 0.5 m. De aanleg bij grotere droogleggingen is niet realistisch, omdat het geïnfiltrerde water dan te snel terugstroomt richting de sloot en de maatregel zijn effectiviteit verliest.

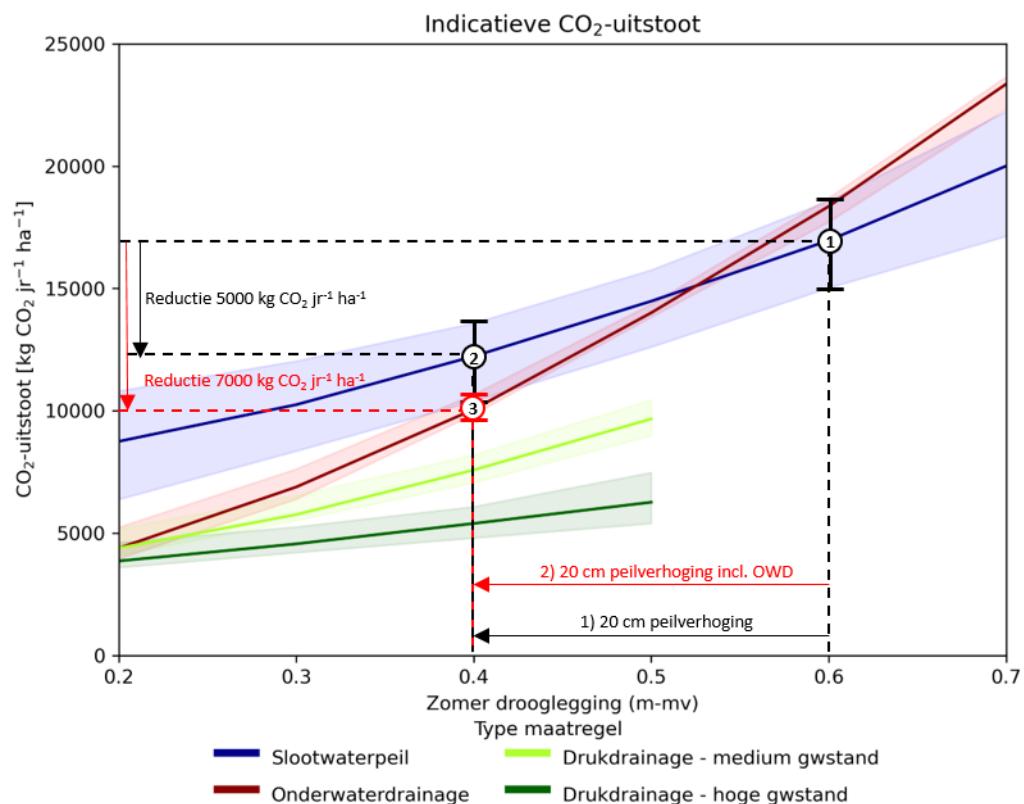
De rekenregels geven inzicht in het functioneren van maatregelen onder verschillende gestandaardiseerde omstandigheden. Hieronder wordt een aantal inzichten uit de rekenregels besproken, die generiek terugkomen in alle rekenregels. Door het gebrek aan lange meetreeksen zijn deze inzichten echter op dit moment moeilijk te toetsen. Een aantal conclusies komen overeen met ervaringen uit lokale veldstudies of andere modelstudies (e.g. Boonman et al., 2022), maar sommige inzichten zijn in tegenspraak met die van andere studies (van den Berg et al., 2019). Voor verregaande uitspraken zal daarom gewacht moeten worden op de inzichten die volgen uit onder andere de metingen van het NOBV-meetnet.

5.2.1 Effect maatregelen op hoofdlijnen

Figuur 5.5 toont de indicatieve CO₂-uitstoot van het hypothetisch perceel in West-Nederland voor verschillende maatregel-scenario's. De CO₂-uitstoot is berekend voor een perceel zonder maatregelen, een perceel met onderwaterdrainage en een perceel met drukdrainage (*medium grondwaterstand* en *hoge grondwaterstand*) bij verschillende slootwaterpeilen. Door de verschillende scenario's met elkaar te vergelijken kan een inschatting worden gemaakt van het effect van een maatregelen.

In de figuur zijn ter illustratie drie verschillende situaties aangegeven. Door deze situaties met elkaar te vergelijken kan het effect van een maatregel worden berekend. Situatie (1) geeft aan dat een theoretisch perceel met een drooglegging van 60 cm (x-as) ca. 17000 kg CO₂ per hectare per jaar (y-as) uitstoot. Bij deze CO₂-uitstoot hoort een bepaalde onzekerheid die ook is aangegeven in de figuur. Op dit moment betreft dit alleen de onzekerheid die wordt geïntroduceerd door de onzekerheid in de geohydrologische parametrisatie (Paragraaf 6.2 gaat hier verder op in). Als ten opzichte van situatie (1) een slootwaterpeilverhoging van 20 cm wordt doorgevoerd, komt men via de blauwe lijn uit bij situatie (2): bij een drooglegging van 40 cm heeft dit perceel een uitstoot van ca. 12000 kg CO₂ per hectare per jaar. Door een vergelijking te maken met situatie (1) kan er een relatieve uitstootreductie worden bepaald, $\left(\frac{17000-12000}{17000}\right) = 29.4\%$. De absolute uitstootreductie is ongeveer 5000 kg CO₂ per hectare per jaar.

Indien naast de slootpeilverhoging van 20 cm ook onderwaterdrainage wordt aangelegd, komt men uit bij situatie (3) door over te stappen van de blauwe lijn naar de rode lijn. De relatieve reductie ten opzichte van situatie (1) bedraagt dan ca. $\left(\frac{17000-10000}{17000}\right) = 41.2\%$. De absolute afname is ca. 7000 kg CO₂ per hectare per jaar. Op dezelfde manier kan het effect van het aanleggen en het gebruik van drukdrainage worden bepaald (niet als voorbeeld in figuur).



Figuur 5.5: De indicatieve CO₂-uitstoot van een perceel in West-Nederland met een slootafstand van 60 m, drainafstand van 4 m en het bodemarchetypen koopveen. De CO₂-uitstoot in kg per ha per jaar is berekend voor een perceel zonder technische maatregelen (blauw), een perceel met onderwaterdrainage (rood) en een perceel met drukdrainage (medium grondwaterstand (licht groen) en hoge grondwaterstand (donkergroen)) bij verschillende slootwaterpeilen. De gekleurde gebieden geven de onzekerheidsbandbreedte (min, max) aan. Deze onzekerheid wordt volledig geïntroduceerd door de geohydrologische parametrisatie. Ter illustratie zijn drie situaties explicet aangegeven. Door situatie 2 en 3 (na uitvoeren maatregel) ter vergelijken met situatie 1 (voor uitvoeren maatregel), kan een inschatting van het effect van de maatregel worden gemaakt.

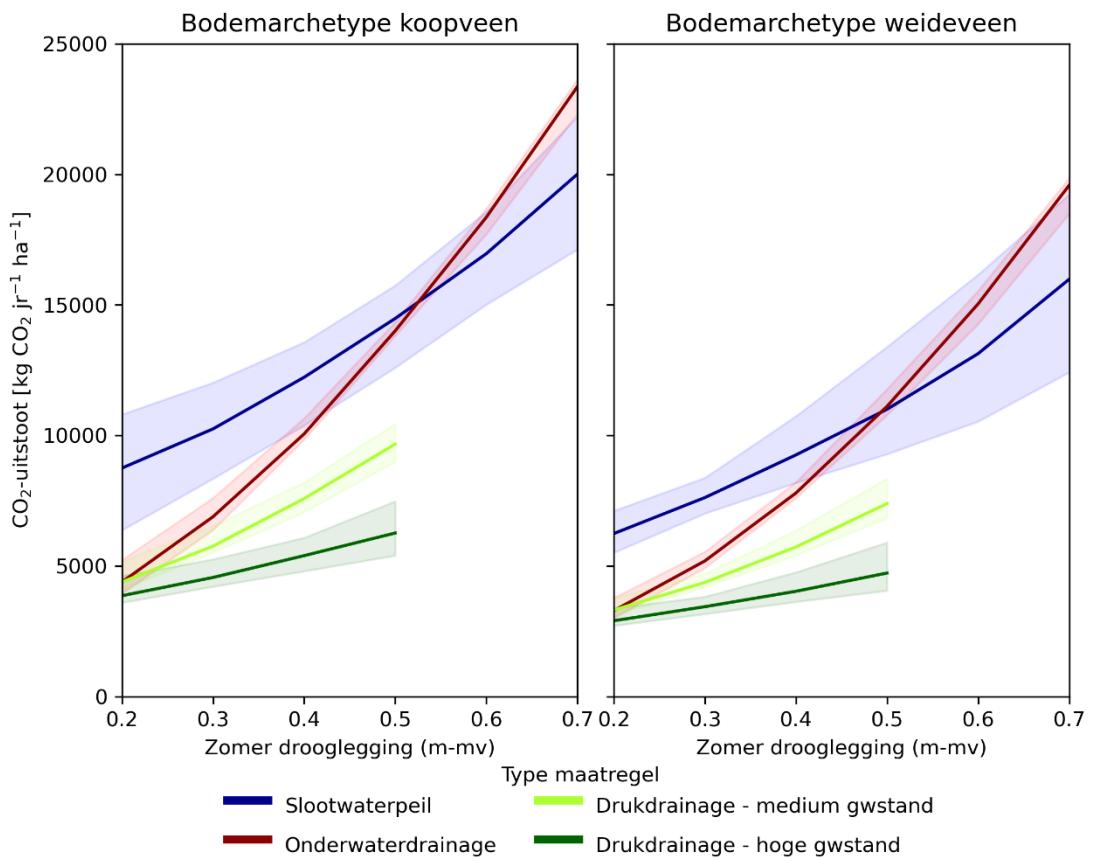
Op basis van Figuur 5.5 en de rest van de rekenregels kunnen een aantal conclusies op hoofdlijnen worden getrokken:

- **Bij een drooglegging van ca. 40-60 cm of minder vermindert onderwaterdrainage de CO₂-uitstoot, bij grotere droogleggingen heeft het geen effect of zorgt het voor meer CO₂-uitstoot.** Dit kan worden afgeleid van het kruispunt van de blauwe (geen technische maatregel) en rode lijn (onderwaterdrainage) rond een drooglegging van 40-60 cm. Voor drooglegging groter dan 40-60 centimeter zal de drainerende werking van onderwaterdrainage, die vooral in de winter vooral optreedt, een grotere netto bijdrage leveren dan de infiltrerende werking in de zomer. Bij dergelijke grotere droogleggingen is de infiltratie overigens ook minder door een kleiner verschil tussen het oppervlaktewaterpeil en de grondwaterstand (minder overdruk).
- **Het CO₂-reducerende effect van onderwaterdrainage wordt groter in combinatie met een slootwaterpeilverhoging bij droogleggingen kleiner dan 50 cm.** Slootwaterpeilverhoging bij een perceel met onderwaterdrainage heeft een groter positief effect op de reductie van de CO₂-uitstoot dan een slootwaterpeilverhoging zonder onderwaterdrainage (bij droogleggingen kleiner dan 50 cm). Dit is te zien aan de grotere helling van de rode lijn in Figuur 5.5 dan de blauwe lijn.
- **Drukdrainage vermindert de CO₂-uitstoot sterker dan onderwaterdrainage of een slootwaterpeilverhoging.** Bij een gelijkblijvende drooglegging heeft drukdrainage – indien goed aangelegd en beheerd – altijd een CO₂-reducerend effect. In Figuur 5.5 is dit te zien aan de twee drukdrainage-lijnen die ver onder de blauwe (geen technische maatregel) en rode lijn (onderwaterdrainage) lopen.

5.2.2 Effect bodemarchetypen

Door de uitkomsten van de rekenregels voor verschillende bodemsoorten (bodemarchetypen) met elkaar te vergelijken kan een inschatting worden gemaakt van de invloed van de bodemopbouw op CO₂-uitstoot. De verschillen tussen (archetype) bodems worden op dit moment alleen bepaald door verschillen in de bodemopbouw en organisch stofgehalte. Zoals in Hoofdstuk 4 is beschreven kan op dit moment geen relatie worden vastgesteld tussen bodemarchetypen en geohydrologische parameters. De bodemopbouw beïnvloedt in de berekening wel de verdeling van de bergingscoëfficiënt.

Figuur 5.6 toont de indicatieve CO₂-uitstoot met en zonder maatregelen voor een koopveengrond (links) en een weideveengrond (rechts). Een koopveengrond is opgebouwd uit een veraarde veenlaag met daaronder een relatief weinig afgebroken veenlaag. Een weideveengrond heeft een kleidek van enkele tientallen centimeters bovenop de veenlaag. Het organisch stofgehalte en daarmee de uitstootpotentie in de bovenste bodemhorizonten is lager dan dat van een koopveengrond. Dit is terug te zien in de absolute uitstoot in Figuur 5.6. In algemene zin geldt dat bodems met een laag organisch stofgehalte in de bovengrond (bijvoorbeeld archetypes pV, kV, kVz en aVz) een lagere CO₂-uitstoot hebben.



Figuur 5.6: Links: de indicatieve CO₂-uitstoot voor een koopveergrond. Rechts: de indicatieve CO₂-uitstoot voor een weideveergrond. De slootafstand is in beide gevallen 60 m, de drainafstand is 4 m. De CO₂-uitstoot is telkens berekend van een perceel zonder technische maatregelen (blauw), een perceel met onderwaterdrainage (rood) en een perceel met drukdrainage (medium grondwaterstand (licht groen) en hoge grondwaterstand (donkergroen)) bij verschillende slootwaterpeilen. De gekleurde gebieden geven de onzekerheidsbandbreedte (min, max) aan. Deze onzekerheid wordt volledig geïntroduceerd door de geohydrologische parametrisatie.

5.2.3 Effect slootafstand/perceelbreedte op de maatregel

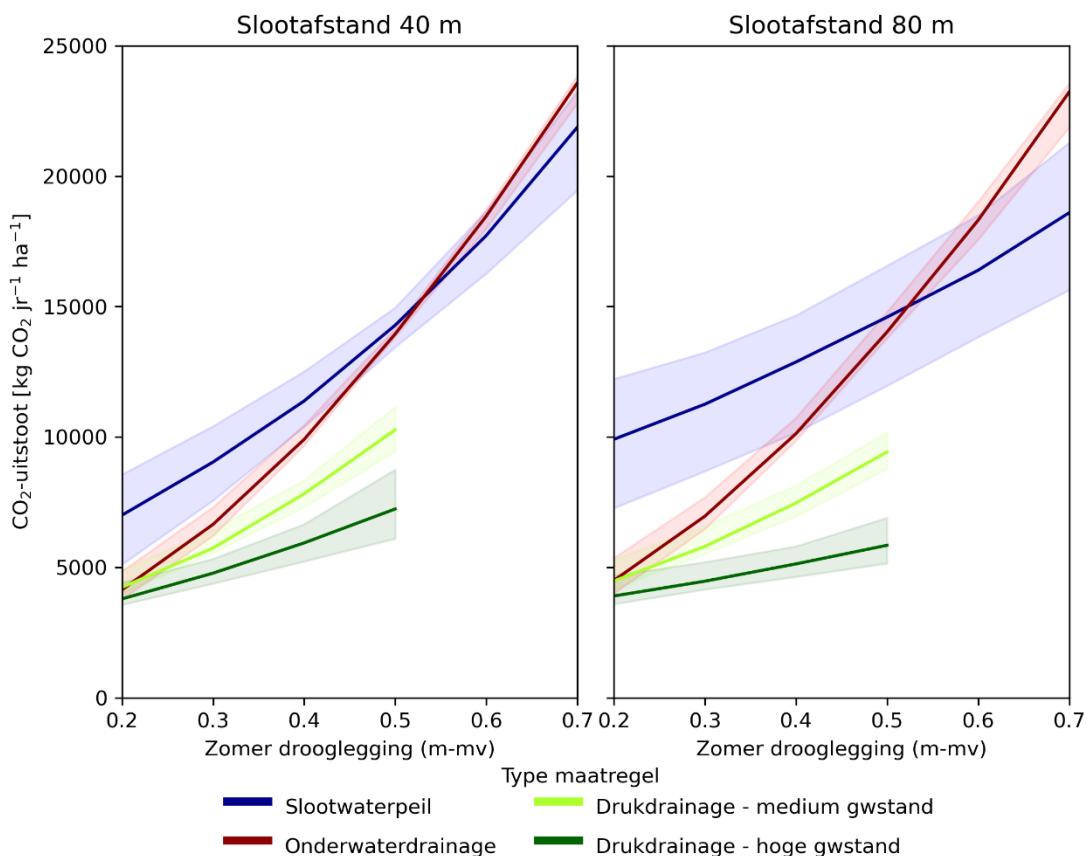
Figuur 5.7 toont de indicatieve CO₂-uitstoot voor een hypothetisch perceel in West-Nederland met een slootafstand van 40 meter (linker paneel) en 80 meter (rechterpaneel).

Bij een kortere slootafstand (smaller perceel) hebben slootwaterpeilaanpassingen een groter effect op de CO₂ uitstoot. Dit is te zien in Figuur 5.7: de helling van de blauwe lijn bij het smallere perceel van 40 m breed steiler is dan die van de blauwe lijn behorende tot het perceel van 80 meter. Bij brede percelen is zowel het uitzakken van de grondwaterstand tussen de sloten in de zomer, als de opbolling van de grondwaterstand in de winter groter dan bij smalle percelen (zie ook de formule uit Hooghoudt (1940)). De sloten (en slootwaterstanden) van een smal perceel hebben een grotere invloed op de grondwaterdynamiek. Dit betekent dat slootwaterpeilverhogingen in smallere percelen een groter reducerend effect hebben dan dezelfde maatregel op bredere percelen.

Bij een grote drooglegging (> 60 cm) is de uitstoot van het brede perceel lager dan van het smalle perceel (Figuur 5.7). Hoewel de holle grondwaterspiegel door uitzakking op een breed perceel uiteindelijk dieper komt dan bij een smal perceel, is de uitgangssituatie aan het begin van de zomer voor het smalle perceel bij een relatief grote drooglegging slechter: de opbolling van de grondwaterstand is in de winter bij een smal perceel kleiner dan bij een breed perceel, waardoor aan

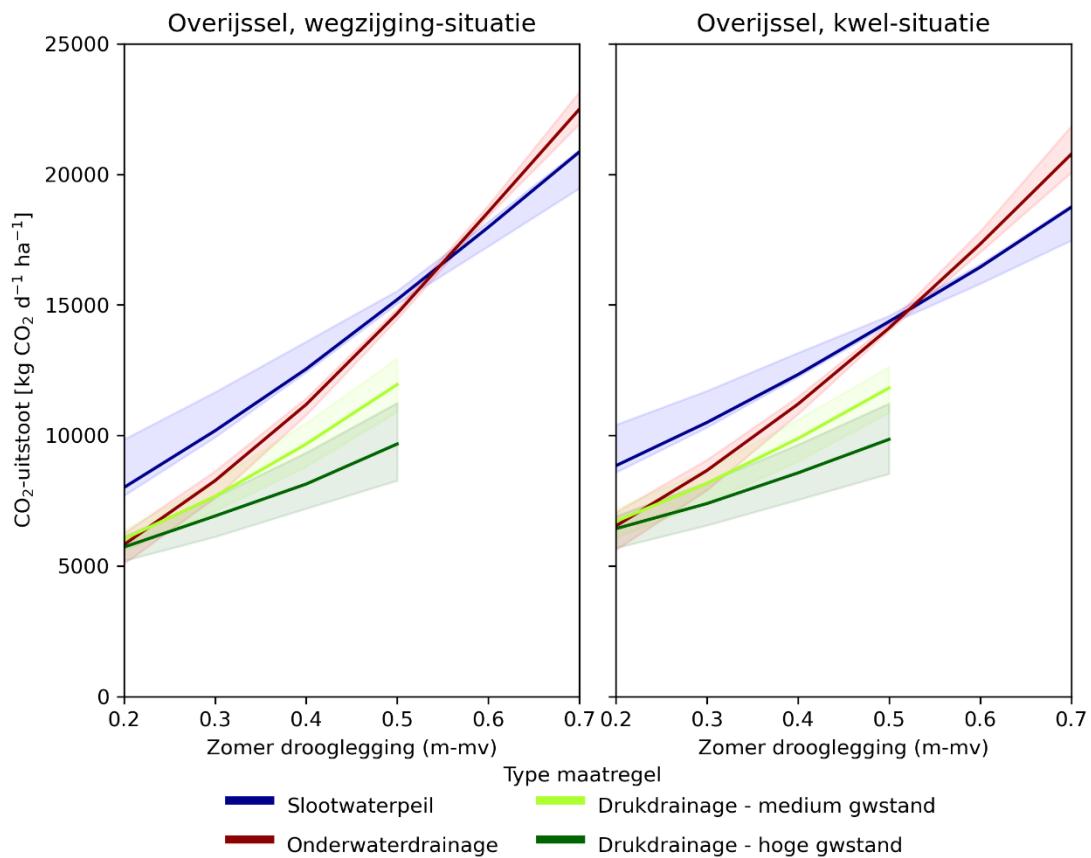
het begin van de zomer het smalle perceel naar verhouding droger is en er meer veenafbraak plaats kan vinden.

In Figuur 5.7 is verder te zien dat onderwaterdrainage het verschil tussen bredere en smallere percelen reduceert (wat ook de verwachting is). Het aanleggen van onderwaterdrainage, bij droogleggingen kleiner dan 50-60 cm, in combinatie met het verhogen van het slootwaterpeil reduceert de uitstoot van CO₂ sterker bij bredere percelen dan alleen het verhogen van het slootwaterpeil. Bij grotere droogleggingen neemt de CO₂-uitstoot bij onderwaterdrainage aanleg juist meer toe bij bredere percelen. Dit is het gevolg van de relatieve ongevoeligheid van bredere percelen voor slootwaterstandaanpassingen (de helling in de blauwe lijn is flauwer bij bredere percelen in Figuur 5.7).



Figuur 5.7: De indicatieve CO₂-uitstoot voor verschillende omstandigheden in West-Nederland voor een perceel met een slootafstand van 40 meter (links) en 80 meter (rechts). Het bodemarchetyp is in beide een koopveengrond en de drainafstand is 4 m. De CO₂-uitstoot is telkens berekend van een perceel zonder technische maatregelen (blauw), een perceel met onderwaterdrainage (rood) en een perceel met drukdrainage (medium grondwaterstand (licht groen) en hoge grondwaterstand (donkergroen)) bij verschillende slootwaterpeilen. De gekleurde gebieden geven de onzekerheidsbandbreedte (min, max) aan. Deze onzekerheid wordt volledig geïntroduceerd door de geohydrologische parametrisatie.

5.2.4 Effect regionale hydrologie



Figuur 5.8: De indicatieve CO₂-uitstoot voor verschillende omstandigheden in Overijssel voor een perceel met een lichte wegzettingssituatie (links) en een lichte kwelsituatie (rechts). Het bodemarchetypen is koopveen, de slootafstand is 60 m, de drainafstand is 4 m. De CO₂-uitstoot is telkens berekend van een perceel zonder technische maatregelen (blauw), een perceel met onderwaterdrainage (rood) en een perceel met drukdrainage (medium grondwaterstand (licht groen) en hoge grondwaterstand (donkergroen)) bij verschillende slootwaterpeilen. De gekleurde gebieden geven de onzekerheidsbandbreedte (min, max) aan. Deze onzekerheid wordt volledig geïntroduceerd door de geohydrologische parametrisatie.

In Figuur 5.8 zijn de uitkomsten van de rekenregels voor twee hydrologische situaties weergegeven: links in het figuur voor een lichte wegzettingssituatie en rechts voor een lichte kwelsituatie. In deze berekening is een vaste stijghoede aangenomen die gemiddeld past bij een kwel- of wegzettingssituatie. Echter, door het aanpassen van de drooglegging verandert ook de kwelflux enigszins.

Bij dezelfde drooglegging is de uitstoot voor de kwelsituatie iets lager (de blauwe lijn in Figuur 5.8 heeft een flauwere helling en ligt lager voor de kwelsituatie dan voor de wegzettingssituatie). Door de kwelsituatie zal in de zomervaanden de grondwaterstand gemiddeld wat hoger liggen, waardoor er minder veenoxidatie plaats kan vinden. Daarnaast laat Figuur 5.8 zien (alhoewel niet heel duidelijk) dat onderwaterdrainage minder efficiënt is voor het reduceren van de CO₂-uitstoot bij een kwelsituatie dan bij een wegzettingssituatie (rode lijn ligt dichter bij de blauwe lijn in het rechterpaneel dan in het linkerpaneel). De hogere grondwaterstanden bij een kwelsituatie zorgen voor een relatief groot drainerend effect bij onderwaterdrainage. Dit limiterende effect op de efficiëntie van de maatregel zal naar verwachting toenemen bij een sterkere kwelsituatie. Deze conclusies worden ook bevestigd door een recente modelleerstudie binnen het Nationaal Onderzoeksprogramma Broekgasgassen Veenweiden van Boonman et al. (2022), maar zijn ook al eerder geconstateerd op basis van veldinzicht.

Onzekerheden en aandachtspunten bij SOMERS 1.0

SOMERS is een modelsysteem opgezet op basis van beschikbare inzichten en waarnemingen van grondwater- en afbraakprocessen, en is geschikt om mee te groeien met nieuwe eisen, technologie en proceskennis. Dit hoofdstuk gaat in op de performance van SOMERS 1.0 en de onzekerheden van de uitkomsten. Voor gebruik van de uitkomsten en conclusies van SOMERS 1.0 is het belangrijk om hiervan een beeld te hebben. SOMERS 1.0 geeft een eerste indruk van de effectiviteit van een aantal hydrologische maatregelen voor standaardsituaties die veel worden toegepast in het Nederlandse veenweidegebied. In deze versie zijn er ook nog aanzienlijke onzekerheden rondom de uitkomsten van SOMERS 1.0 en de conclusies die daaraan zijn verbonden.

Hierbij is het zo dat bij modelleren het altijd een afweging is tussen generalisatie en specialisatie, en dit geldt in het bijzonder bij modelleren op landelijke schaal en generieke rekenregels. Deze afweging is beschreven in voorgaande hoofdstukken en heeft invloed op de resultaten. Het is een bewuste keuze om te generaliseren: om redenen van vergelijkbaarheid, signaal/ruis verhouding, beschikbare data, rekentijd, en ook in de toepassingssfeer. Rekenregels zijn bedoeld om op generieke schaal inzicht te bieden en biedt juist niet inzicht voor specifieke gevallen. Een belangrijk discussiepunt hierbij is welke aggregatie-schaal is het meest doelmatig en wanneer heeft verdere specialisatie zin? In SOMERS 1.0 zijn hier keuzes voor gemaakt, maar dezelfde keuzes zullen ook gemaakt moeten worden de komende tijd bij nieuwere versies van SOMERS.

Een algemene onzekerheid hierbij is de mate waarin het model de complexe realiteit vertegenwoordigt. Het is niet uit te sluiten dat i) van niet alle relevante processen het mechanistisch begrip aanwezig is, ii) alle processen even goed getuned op de feitelijke dynamiek en randvoorwaarden zijn. De onzekerheid zijn vooralsnog slechts indirect te kwantificeren, door confrontatie tussen modeluitkomsten en waarnemingen, die op hun beurt ook niet perfect zijn. Daarom is deze onzekerheid niet nauwkeurig te bepalen. Adequate waarnemingen voor alle procesonderdelen van het SOMERS-model zullen deze onzekerheid gaandeweg verkleinen.

6.1 Voorspellend vermogen SOMERS 1.0

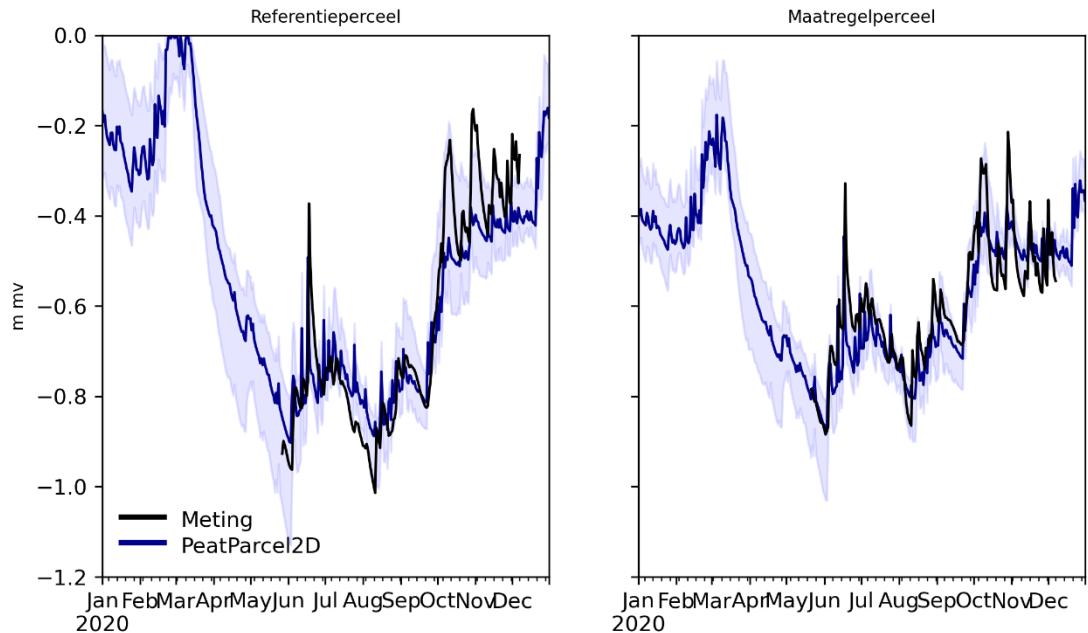
Gezien het beperkte aantal metingen van grondwaterstanden, bodemvocht, bodemtemperatuur en CO₂-uitstoot zijn beschikbare metingen hoofdzakelijk gebruikt voor parametrisatie van het grondwatermodel en koolstofmodel (zie Hoofdstuk 3 en 4). Het is daarom op dit moment niet mogelijk om de modelconcepten van SOMERS 1.0 onafhankelijk te valideren. Daarom zal in deze paragraaf alleen worden ingaan op het voorspellend vermogen van losse onderdelen van SOMERS 1.0 en een vergelijking worden gemaakt met waarnemingen en bestaande (empirische) modellen.

6.1.1 Grondwaterstanden

De kalibratie van geohydrologische parameters met representatieve grondwaterstands metingen vindt plaats op regionale schaal (zie Hoofdstuk 4) op basis van algehele prestatie binnen een kalibratieregio en gebruikmakend van gegevens van meerdere grondwatermeetpunten. Het is echter alsnog inzichtelijk om uitkomsten van het grondwatermodel op individuele meetlocaties te vergelijken met metingen om zo een indruk te krijgen van het (ruimtelijk) voorspellend vermogen van het model. De meetgegevens van de individuele locaties zijn niet volledig onafhankelijk omdat deze geaggregeerd ook gebruikt zijn voor de kalibratie van de geohydrologische parameters. Hieronder worden de gemodelleerde grondwaterstanden vergeleken met gemeten grondwaterstanden van de NOBV-meetlocaties bij Vlist, Assendelft, Rouveen, Zegveld en Aldeboarn.

Vlist

Op het maatregelenperceel in Vlist wordt onderwaterdrainage toegepast. Zowel voor het referentieperceel als voor het maatregelperceel wordt de grondwaterstand goed gesimuleerd (Figuur 6.1). De gemeten grondwaterstanden vallen grotendeels binnen de bandbreedte van de gesimuleerde waarden. De mediane gesimuleerde grondwaterstand van het referentieperceel is gemiddeld ca. 4 cm hoger in de zomer (juni t/m september) dan de gemeten grondwaterstand. Dit kan verschillende oorzaken hebben, onder andere dat de streefslootwaterpeilen in de zomer niet gehandhaafd zijn terwijl het model hier wel vanuit gaat.



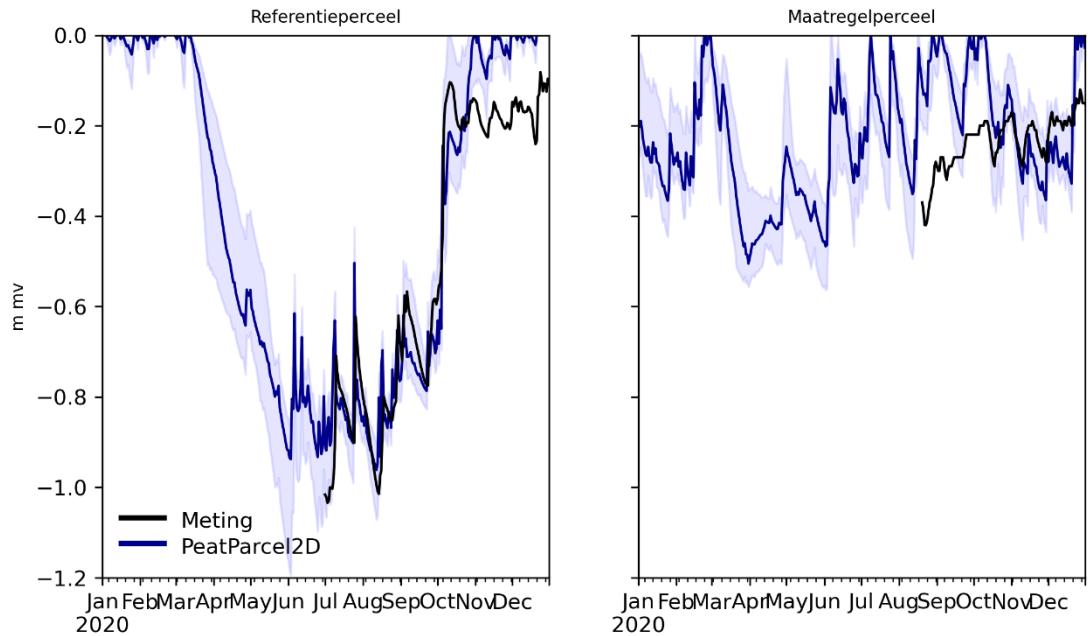
Figuur 6.1: De gemodelleerde (blauw) en gemeten (zwart) grondwaterstanden voor het referentie- en onderwaterdrainageperceel bij de NOBV-site in Vlist. Voor de gemodelleerde grondwaterstand wordt ook de onzekerheidsbandbreedte getoond. Deze onzekerheid wordt op dit moment volledig geïntroduceerd door de onzekerheid in de geohydrologische parametrisatie.

Assendelft

Op het maatregelenperceel bij Assendelft wordt drukdrainagesysteem is in 2017 aangelegd en werkt met een drukvat waarin een putpeil wordt ingesteld. In Assendelft komt de dynamiek in de gemeten grondwaterstanden in het referentieperceel (Figuur 6.2) goed terug in de modeluitkomsten. De gemeten grondwaterstand ligt over het algemeen in de onzekerheidsbandbreedte van de modeluitkomsten. Alleen in de winter ligt de gesimuleerde grondwaterstand ongeveer 15 cm hoger dan de gemeten grondwaterstand. Dit komt vaker voor in veengebieden en kan ook gerelateerd zijn aan de wijze waarop de peilbuis is geïnstalleerd in combinatie met de bodemkundige omstandigheden.

Voor het drukdrainageperceel in Assendelft kent de gesimuleerde grondwaterstand een ander verloop dan de gemeten standen (Figuur 6.2). Hoewel de range van de gemodelleerde grondwaterstand voor het maatregelenperceel in Assendelft overeenkomt met de metingen, verschilt de dynamiek sterk. Dit wordt veroorzaakt doordat het putpeil dat in Assendelft wordt gehanteerd, afwijkt van wat er als input is gebruikt in het model. In deze simulatie is uitgegaan van een vast zomer (niveau maaiveld) en winter (ca. 50 cm-mv) putpeil, maar in de praktijk varieert het putpeil jaarrond door keuzes in het beheer van de drukdrains of door operationele problemen. Wanneer het daadwerkelijk gehanteerde putpeil expliciet wordt meegenomen in het model, zijn de resultaten beter (niet weergegeven in de figuur). Deze gegevens zijn echter niet altijd beschikbaar. Dit onderstreept het belang van betrouwbare inputdata voor de uitkomsten van de berekeningen en dat bij het gebruik van de uitkomsten rekening gehouden moet worden dat bij de berekeningen

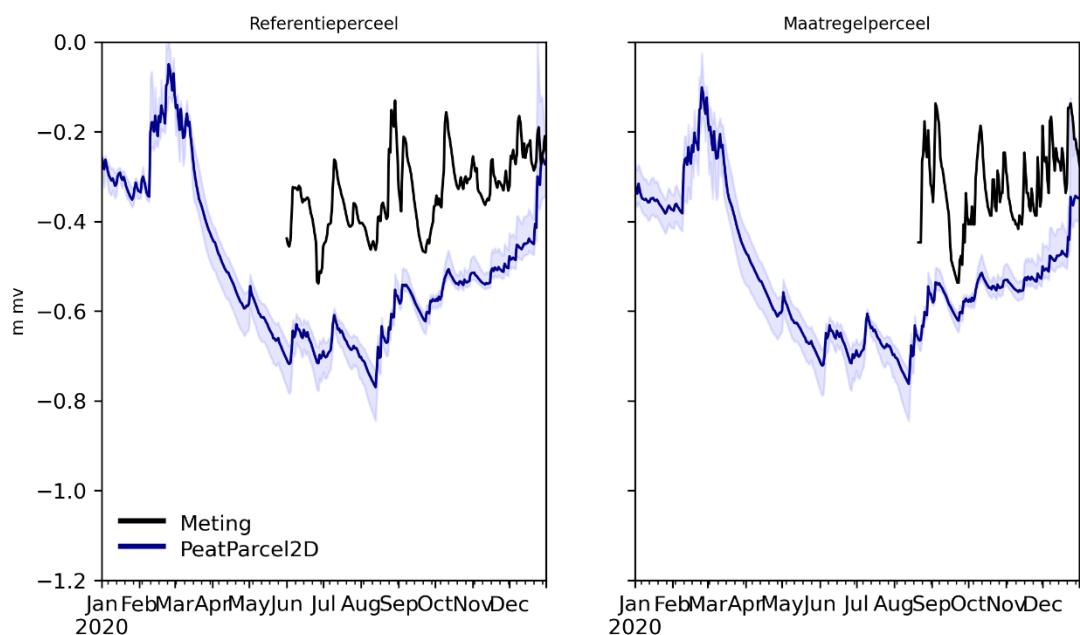
uitgegaan is van bijvoorbeeld goed functioneren van de systemen en een bepaald gebruik. In de realiteit kan dit afwijken.



Figuur 6.2: De gemodelleerde en gemeten grondwaterstanden voor het referentie- en drukdrainageperceel bij de NOBV-site in Assendelft. Voor de gemodelleerde grondwaterstand wordt ook de onzekerheidsbandbreedte getoond. Deze onzekerheid wordt op dit moment volledig geïntroduceerd door de onzekerheid in de geohydrologische parametrisatie.

Rouveen

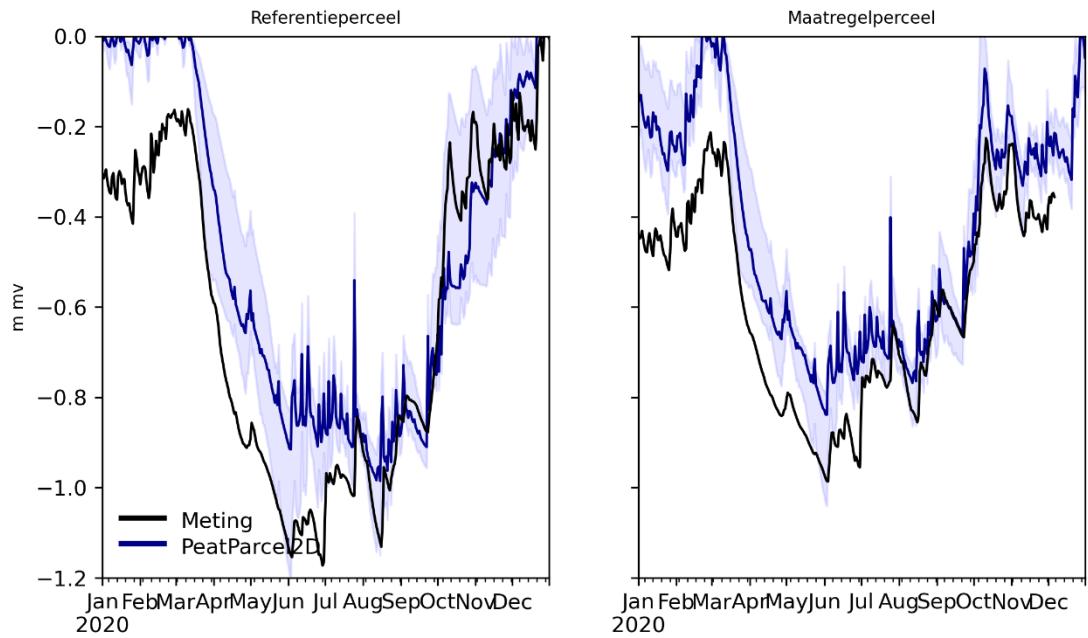
In Rouveen wordt onderwaterdrainage toegepast op het maatregelenperceel. Zowel voor het referentie- als maatregelenperceel wordt de gemeten grondwaterstand niet goed gesimuleerd door het model (Figuur 6.3). Het lijkt erop dat de belangrijke invoerdata uit het LHM, zoals de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket en weerstand in de deklaag, niet goed overeenkomen met de daadwerkelijke situatie. De gemeten freatische grondwaterstand tonen een sterke correlatie met de gemeten stijghoogte in het 1^e watervoerende pakket. Dit betekent dat – indien de meting correct is uitgevoerd – of er bijna geen weerstand in de deklaag zit of dat de peilbuis kortsleutende maakt met het watervoerende pakket. Het gebrek aan weerstand is opmerkelijk gezien de ruim 3 meter dikke veenlaag terplekke. Het is echter niet onmogelijk dat lokaal bijvoorbeeld door de constante kweldruk in het gebied de eigenschappen van het veen (bijvoorbeeld de doorlatendheid) zijn aangetast. Dergelijke lokale omstandigheden, waarvan het onduidelijk is of en in welke mate die spelen, kunnen niet worden meegenomen in landelijke berekeningen. De rekenmodellen onderliggend aan SOMERS zijn wel in staat dit in een detailstudie mee te nemen in de berekeningen, indien het vereiste inzicht aanwezig is.



Figuur 6.3: De gemodelleerde en gemeten grondwaterstanden voor het referentie- en onderwaterdrainageperceel bij de NOBV-site in Rouveen. Voor de gemodelleerde grondwaterstand wordt ook de onzekerheidsbandbreedte getoond. Deze onzekerheid wordt op dit moment volledig geïntroduceerd door de onzekerheid in de geohydrologische parametrisatie. Het effect van de stijghoogte in het watervoerende pakket op de freatische grondwaterstand verklaart het verschil tussen de gemeten en gemodelleerde grondwaterstanden.

Zegveld

In Zegveld wordt onderwaterdrainage toegepast op het maatregelperceel. Over het algemeen wordt het verloop van de grondwaterstand goed gesimuleerd voor beide percelen (Figuur 6.4). Echter, de mediane gemodelleerde grondwaterstand ligt voornamelijk in de winter en aan het begin van het groeiseizoen wel structureel hoger dan de gemeten grondwaterstand. Op sommige plekken vallen de metingen ook buiten de onzekerheidsbandbreedte van het model. Het lijkt er in ieder geval op dat de startcondities van het model te nat zijn. Mogelijk komt dit doordat het model wordt gedigitaliseerd met het gemiddelde winterweer, terwijl deze de periode in de aanloop naar 2020 niet voldoende representeren. Door het ontbreken van metingen voor deze periode in de overige NOBV-meetsites, kan niet worden beoordeeld of het probleem zich daar ook voordoet.

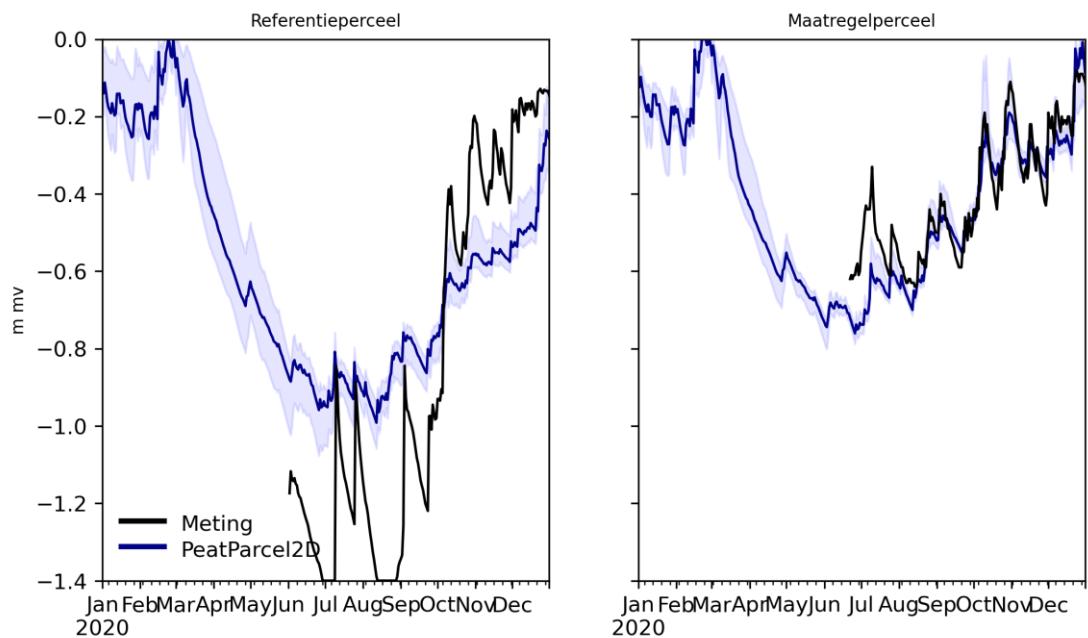


Figuur 6.4: De gemodelleerde en gemeten grondwaterstanden voor het referentie- en onderwaterdrainageperceel bij de NOBV-site in Zegveld (Perceel 16). Voor de gemodelleerde grondwaterstand wordt ook de onzekerheidsbandbreedte getoond. Deze onzekerheid wordt op dit moment volledig geïntroduceerd door de onzekerheid in de geohydrologische parametrisatie.

Aldeboarn

In Aldeboarn wordt op het maatregelperceel onderwaterdrainage toegepast. Hoewel de grondwaterstand van het maatregelperceel goed wordt gesimuleerd door PeatParcel2D, presteert PeatParcel2D duidelijk minder goed op het referentieperceel (Figuur 6.5). De gemeten uitzakking van de grondwaterstand is hier veel groter dan de met PeatParcel2D gemodelleerde uitzakking van de grondwaterstand.

Een aantal individuele runs uit de kalibratieprocedure laten zien dat een goede match (KGE-index tot 0.95) met de gemeten grondwaterstand op het referentieperceel wel mogelijk is met PeatParcel2D. Deze parametercombinaties presenteren echter niet goed voor de kalibratieregio in zijn geheel, zodat deze ook geen onderdeel uitmaken van de geselecteerde parametercombinaties voor de kalibratieregio Noord-Nederland. De situatie in Aldeboarn wordt dus niet goed gerepresenteerd door de gemiddelde situatie in de kalibratieregio. Dit kan bijvoorbeeld komen doordat het de bodemopbouw lokaal hele andere hydrologische eigenschappen heeft. Met behulp van meer metingen is het hopelijk mogelijk om in de toekomst voor de geohydrologische parametrisatie ook onderscheid te maken op andere of aanvullende criteria, waardoor dit soort locaties nauwkeuriger kunnen worden gemodelleerd.



Figuur 6.5: De gemodelleerde en gemeten grondwaterstanden voor het referentie- en drukdrainageperceel bij de NOBV-site in Aldeboarn. Voor de gemodelleerde grondwaterstand wordt ook de onzekerheidsbandbreedte getoond. Deze onzekerheid wordt op dit moment volledig geïntroduceerd door de onzekerheid in de geohydrologische parametrisatie.

6.1.2 CO₂-uitstoot

In combinatie met PeatParcel-2D geeft de AAP-module voorspellingen van CO₂-uitstoot voor percelen. Deze kunnen worden vergeleken met onafhankelijke schattingen van uitstoot op basis van metingen. Dit geeft een eerste indruk van betrouwbaarheid. Op de meeste locaties van het NOBV wordt wel de CO₂-uitstoot gemeten, maar door operationele problemen zijn alleen voor Assendelft en Vlist op dit moment jaarbudgetten beschikbaar. In Tabel 6.1 wordt voor deze locaties de gemeten en gemodelleerde uitstoot vergeleken.

Tabel 6.1: Gemeten uitstoot voor het referentie- en maatregelperceel in Assendelft en Vlist (NOBV, 2021) en de gemodelleerde uitstoot vanuit SOMERS 1.0 (deze rapportage).

Assendelft

	Gemeten uitstoot [tCO ₂ jr ⁻¹ ha ⁻¹]	Gemodelleerde uitstoot, mediaan [tCO ₂ jr ⁻¹ ha ⁻¹]	Gemodelleerde uitstoot, min [tCO ₂ jr ⁻¹ ha ⁻¹]	Gemodelleerde uitstoot, max [tCO ₂ jr ⁻¹ ha ⁻¹]
Assendelft geen maatregel	8,5 – 15,6	17,7	15,5	19,5
Assendelft drukdrainage	0,3 – 6,6	4,4	3,7	5,4

Vlist

	Gemeten uitstoot [tCO ₂ jr ⁻¹ ha ⁻¹]	Gemodelleerde uitstoot, mediaan [tCO ₂ jr ⁻¹ ha ⁻¹]	Gemodelleerde uitstoot, min [tCO ₂ jr ⁻¹ ha ⁻¹]	Gemodelleerde uitstoot, max [tCO ₂ jr ⁻¹ ha ⁻¹]
Vlist geen maatregel	20,2 – 27,0	14,4	13,3	15,4
Vlist onderwaterdrainage	11,4 – 17,6	14,0	13,4	15,1

Een vergelijking tussen de gemeten en gemodelleerde waarden laat zien dat de uitkomsten van SOMERS 1.0 binnen of vlak buiten de onzekerheidsmarges van de uitstootmetingen vallen. Alleen de uitstoot uit het referentieperceel in Vlist wordt flink onderschat door SOMERS 1.0. De tabellen laten zien dat ook de bandbreedte bij de gemeten uitstoot aanzienlijk is door onzekerheden in de metingen en de *processing* van de metingen. Door de uitstoot met en zonder maatregel met elkaar te vergelijken, kan het reductiepercentage worden verkregen. Het gemodelleerde reductiepercentage voor Assendelft ligt tussen de 68,5% en 79,0% en komt goed overeen met het gemeten reductiepercentage dat tussen de 57,6% en 96,5% ligt. Voor Vlist ligt het gemodelleerde reductiepercentage tussen de -6,7% en 9,0%. Dit is aanzienlijk lager dan het gemeten reductiepercentage dat tussen 34,8% en de 43,6% ligt. Dit verschil komt doordat de uitstoot uit het referentieperceel van de Vlist flink wordt onderschat door SOMERS 1.0. Uit Figuur 6.1 blijkt dat met PeatParcel2D de gemeten grondwaterstanden goed kunnen worden gereproduceerd. Dit betekent dus dat de onderschatting van de reductie voortkomt uit het gedeelte waar de grondwaterstanden worden omgerekend in bodemvochtprofielen of in de AAP-module.

Metingen van de broeikasgasuitstoot zoals gebruikt in dit rapport zijn geen directe metingen van de afbraak van veen en de lang-cyclische koolstof uitstoot in de vorm van CO₂. De metingen bestaan uit alle fluxen van CO₂: de opname in en uitstoot uit het gewas en de bodem gedurende het hele jaar. Samen met de grasopbrengst en eventuele andere bronnen en putten van koolstof, wordt uiteindelijk de bodemrespiratie door veenafbraak geïsoleerd (Erkens et al., 2021). Een belangrijke aanname hierbij is dat er netto geen verschuivingen optreden in de kort-cyclische koolstofdynamiek (gerelateerd aan gewasgroei). Het is echter niet uitgesloten dat er toch enige netto kort-cyclische

koolstof fluxen worden gemeten. SOMERS 1.0 daarentegen modelleert de blootstelling van organische stof in de ondergrond aan microben. Dit zal hoofdzakelijk lang-cyclische koolstof zijn maar mogelijk niet uitsluitend. Dus zowel bij de meetwaardes, als bij de modeluitkomsten, bestaan onzekerheden in hoeverre de waardes precies de lang-cyclische koolstof dynamiek uit de bodem representeren. De modeluitkomsten en metingen voor één meetjaar voor een bepaalde locatie (perceel) hoeven daarmee niet noodzakelijkerwijs exact dezelfde waarde te hebben. Op langere termijn en op meerdere vergelijkbare locaties moeten berekeningen en metingen natuurlijk welorde grootte in overeenstemming zijn. Binnen het Nationaal Onderzoeksprogramma Broeikasgassen Veenweiden wordt de komende jaren meer inzicht verkregen in de verhouding van kort- en lang-cyclisch koolstof in de Nederlandse veenbodem.

In het algemeen levert SOMERS 1.0 wat lagere uitstootgetallen op dan oudere metingen in Nederland (Schrier-Uijl et al. 2014) of uit Duitsland (Tiemeyer et al., 2020) en wereldwijd (Jurasinski et al., 2016), maar vallen wel binnen de brede bandbreedte van alle gemeten waarden. De uitkomsten liggen dichter bij de lagere uitstoot die door Evans et al. (2021) wordt gerapporteerd. Het is op dit moment niet duidelijk of de omstandigheden (veentypen, drooglegging, klimaat, beheer) vergelijkbaar zijn met die van de gemodelleerde percelen en dus of deze vergelijking één-op-één gemaakt kan worden. Deze vergelijking laat daarom alleen zien dat de verkregen getallen uit SOMERS 1.0 binnen de totale gerapporteerde bandbreedte van meetwaardes vallen.

De uitstoot berekent met SOMERS 1.0 is vergelijkbaar met de emissiefactoren uit de LULUCF-rapportage voor Nederland (Ruyssenaars et al., 2021). De waardes uit SOMERS 1.0 liggen ca 15% lager dan de LULUCF-waardes, terwijl beiden lager liggen dan de mediaan van de hierboven genoemde meetwaarden.

De vraag is of de uitstoot uit landbouwkundig gebruikt veen in Vlist en Assendelft daadwerkelijk lager dan elders en/of dit het gevolg is van verschillen in benadering bijvoorbeeld in kort- en lang-cyclische koolstof, en/of dat er een belangrijk proces ontbreekt in de modellering. De komende tijd zal een meer systematische vergelijking worden gemaakt tussen emissiewaarden uit literatuur voor Nederlandse venen en de uitkomsten van SOMERS 1.0. Tot die tijd beperkt de (deels onbekende) onzekerheid het gebruik van de absolute uitstootgetallen van SOMERS 1.0 (zie ook Paragraaf 6.2).

In vergelijking tot eerder uitgevoerde studies (bijv. Schrier-Uijl et al. 2014, onderzoek VIC Zegveld) lijkt het effect van een slootwaterpeilverhoging op de grondwaterstand in de uitkomsten van SOMERS 1.0 relatief groot te zijn. PeatParcel2D is gekalibreerd op basis van metingen op locaties met verschillende statische slootwaterpeilcondities. Op basis hiervan heeft de intreeweerstand vanuit de sloten een bepaalde waarde gekregen, die past bij de gebruikte kalibratieset. Er wordt vervolgens aangenomen dat een procesmodel, zoals PeatParcel2D, ook een voorspellende waarde heeft buiten situaties die expliciet deel uitmaken van de kalibratielocaties. Het is mogelijk dat de beperkte beschikbare waarnemingen op dit moment tot een parameterwaarde leiden die niet onder alle omstandigheden geldig is. Met het uitbreiden van de meetreeksen en -locaties zal bij SOMERS 2.0 expliciet aandacht worden besteed aan het valideren van de invloed een veranderend slootwaterpeil.

6.2 Niet-gekwantificeerde onzekerheden en beperkingen in SOMERS 1.0

In Paragraaf 6.1 is beschreven hoe wordt omgegaan met de onzekerheid in de geohydrologische parameters en is de CO₂-uitstoot vergeleken met metingen. Er zijn echter ook een aantal onzekerheden die niet explicet zijn gekwantificeerd. Deze paragraaf geeft een overzicht van deze (nog) niet-gekwantificeerde onzekerheden.

- **Bodemopbouw – archetype-aanpak**

Nederland kent een sterk variabele ondergrond als gevolg van de fysisch geografische ontwikkeling. De stapeling van verschillende bodemlagen heeft een sterk effect op de grondwaterstand. Daarnaast bepaalt de bodemopbouw, bodemsamenstelling en het veentype de beschikbaarheid van bodemkoolstof. De bodemopbouw is geschematiseerd in de bodemkaart, wat voor een bepaalde onzekerheid zorgt. De bodemopbouw van een perceel, die ook binnen de grenzen van het perceel zal variëren, wordt in SOMERS 1.0 gereduceerd tot een representatief-geacht bodemprofiel. Door gebruik te maken van de bodemarchetype-indeling (Paragraaf 3.1) vervalt vervolgens het onderscheid in veentype. De bodemopbouw in het rekenmodel wijkt dus mogelijk af van de daadwerkelijke bodemopbouw. Daardoor introduceert deze stap zowel een onzekerheid in de (ruimtelijke variatie van de) gemodelleerde grondwaterstand, als in de gemodelleerde CO₂-uitstoot. De grootte van deze onzekerheid is niet te kwantificeren zonder met zeer hoge resolutie de bodemopbouw in kaart te brengen. Maar omdat SOMERS 1.0 op landelijke schaal wordt ingezet, wordt deze onzekerheid niet bepalend geacht voor de betrouwbaarheid van de uitkomsten. Wel beperkt dit het gebruik van de uitkomsten van SOMERS (1.0) in de zin dat de uitkomsten op individueel perceel beperkt waarde hebben.

- **Gekalibreerde geohydrologische parameters – fouten in grondwaterstandsmetingen**

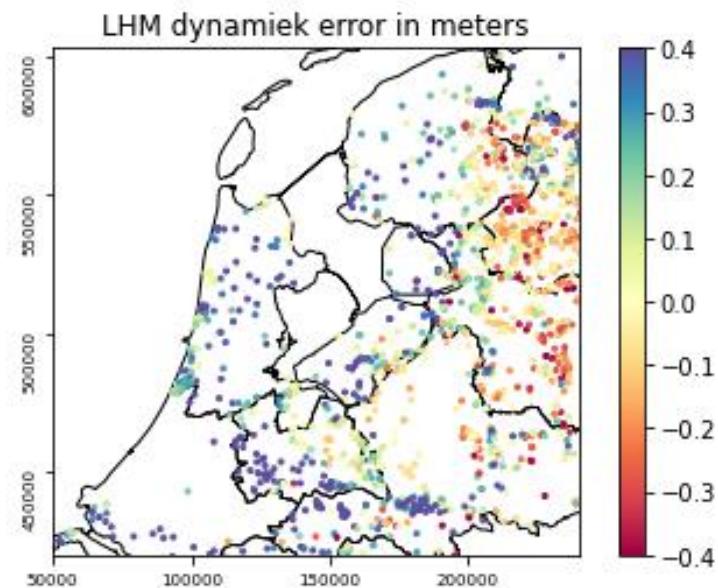
De gekalibreerde parametercombinaties per regio zijn berekend op basis van grondwaterstandsmetingen van ongeveer 50 unieke percelen in het veenweidegebied (Hoofdstuk 4). Er wordt vanuit gegaan dat deze metingen de daadwerkelijke positie van het freatisch grondwatervlak door de tijd hebben vastgelegd. Grondwatermetingen kunnen echter ook fouten bevatten. Zo kan de aanwezigheid van een peilbuis zelf de grondwaterstand verstoren (preferente stromingen), wordt de positie van het freatisch vlak niet goed gemeten doordat de filterstelling te diep is, of beweegt een peilbuis ongecontroleerd mee met de dynamiek van maaiveld. Dit introduceert dan vervolgens ook een fout in de parameter-kalibratie. Bijvoorbeeld een te diepe filterstelling kan tot gevolg hebben dat de peilbuisinformatie onjuist wordt geïnterpreteerd en kan derhalve tot misleidende informatie leiden.

- **Gekalibreerde geohydrologische parameters – Invloed van onbekende ontwateringselementen**

Er wordt aangenomen dat op de kalibratiepercelen voor het bepalen van de geohydrologisch parameters geen (oude) ontwateringselementen, zoals drainagebuizen, greppels of opgevulde oude sloten, aanwezig zijn. Dit soort ontwateringselementen zijn niet landelijk gekarteerd. Het niet modelleren van dit soort ontwateringselementen heeft mogelijk invloed op de gekalibreerde geohydrologische parameters. Alhoewel de grondwatermeetpunten in het algemeen niet direct naast een greppel staan en deze ontwateringselementen vooral de grondwaterstand in de winter beïnvloeden, kan het niet meenemen van greppels van invloed zijn op de kalibratie. In het model zal namelijk gedurende natte perioden het water tot in maaiveld stijgen waarna het oppervlakkig wordt afgevoerd. In de praktijk wordt een deel van dit water geborgen in greppels en lage delen van percelen. Vervolgens zal dit geborgen water na een regenrijke periode geleidelijk infiltreren.

- **Invloed 1^e watervoerende pakket - LHM**

In sommige delen van het veenweidegebied is er sprake van een relatief sterke interactie met het 1^e watervoerende pakket. Dit kan worden veroorzaakt door dunne veenpakketten en deklagen met weinig weerstand, of een grote gradiënt tussen de grondwaterstand en de stijghoogte. Om deze interactie te simuleren wordt in PeatParcel2D de stijghoogte van het eerste watervoerende pakket uit het Landelijk Hydrologisch Model (LHM; Janssen et al., 2020) opgelegd. Een validatiestudie van het LHM (Berendrecht consultancy, 2021) laat zien dat de voorspelde stijghoogtedynamiek in het veenweidegebied systematisch te groot is (Figuur 6.6). Voor locaties die een sterke invloed van het 1^e watervoerende pakket kennen werkt deze fout uit het LHM door in de resultaten van SOMERS 1.0.



Figuur 6.6: Voorspelfout dynamiek stijghoogte van het eerste watervoerende pakket door het Landelijk Hydrologisch Model (Berendrecht consultancy, 2021). Dit geeft aan hoe goed het LHM in staat is om de mate van stijging en daling van de stijghoogte te voorspellen. In het veenweidegebied wordt de stijghoogtedynamiek veelal overschat door het LHM.

- **Onzekerheden relatie tussen grondwaterstand en bodemvocht**

De vertaling van de grondwaterstand naar de bodemvochtprofielen is gebaseerd op de aannname dat het bodemvochtprofiel zich voldoende laat beschrijven met een unieke relatie met de grondwaterstand. Deze relatie is verkregen door een gemiddeld bodemvochtprofiel per grondwaterstand te berekenen uit de modelgegevens van Boonman et al. (2022). Hoewel er sprake is van een sterk verband tussen grondwaterstand en bodemvocht, is er in de realiteit geen sprake van een unieke relatie. Naast de grondwaterstand worden de bodemvochtprofielen ook beïnvloed door bodemeigenschappen (zoals de omvang en schakeling van poriën), gewasverdamping, neerslagverloop, en de voorgeschiedenis en de hiermee samenhangende waterflux (hysterese) ook de bodemvochtcondities. De sterk vereenvoudigde SOMERS 1.0 benadering introduceert dus een onzekerheid in de bodemvochtprofielen die doorwerkt in de afbraakcondities. Door de beperkte beschikbaarheid van bodemvochtmetingen is niet duidelijk hoe groot de onzekerheid is die deze benadering introduceert.

- **Bodemtemperatuur**
De gebruikte bodemtemperatuurprofielen zijn gestandaardiseerde zomer- en winterprofielen gebaseerd op metingen uit het jaar 2020-2021 op NOBV-locaties. Het effect van de gemodelleerde grondwaterstand en bodemvocht op bodemtemperatuur wordt niet meegenomen. Hoewel de bodemtemperatuur minder extreem schommelt dan de luchttemperatuur, is de huidige benadering duidelijk beperkend. Gevoeligheids-studies met beschikbare dagelijkse temperatuurprofielen op NOBV-locaties gaven aan dat de totale CO₂-uitstoot op jaarbasis slechts in geringe mate beïnvloed wordt door deze temperatuurrepresentatie, maar de fout op een willekeurige locatie is onduidelijk, en is dus niet gekwantificeerd.
- **Invloed zuurstofbeschikbaarheid**
Naast bodemvocht en bodemtemperatuur beïnvloedt ook de zuurstofbeschikbaarheid (als oxidator) de aerobe microbiële activiteit. De (1) verzadingsgraad, (2) zuurstofconsumptie bovenin het bodemprofiel en (3) beperkte diffusie van zuurstof naar diepere lagen kunnen hierdoor een beperkend effect hebben de aerobe microbiële activiteit. Enerzijds bepaalt de verzadingsgraad de potentiele blootstelling van koolstof aan zuurstof (Skopp et al., 1990). Anderzijds kan er worden verondersteld dat er een exponentiële afname is van zuurstofbeschikbaarheid over een bodemprofiel door zuurstofconsumptie bovenin het bodemprofiel en beperkte diffusie naar dieper gelegen bodemlagen (Davidson et al., 2012). Dit vertaalt zich waarschijnlijk niet direct in een exponentiële afname in de afbraakcapaciteit, omdat zuurstof bij hoge concentraties bovenin het bodemprofiel niet limiterend is. Wanneer er een zuurstofbeperking begint op te treden is op dit moment nog niet duidelijk.
- Het effect van de verzadingsgraad op de zuurstofbeschikbaarheid maakt direct onderdeel uit van de gebruikte relatie tussen relatieve aerobe microbiële activiteit en bodemvocht (Boonman et al., 2022). Dit geldt niet voor het beperkende effect van zuurstofconsumptie en diffusie op de aerobe microbiële activiteit. Aangezien de relatie van Boonman et al. (2022) is gekalibreerd op basis van respiratiemetingen uit het veld, wordt aangenomen dat deze relatie ook impliciet rekening houdt met de zuurstofbeschikbaarheid in dieper lagen die mede afhankelijk is van het bodemvochtgehalte. Bij zuurstoffdiffusie kan ook scheurvorming als gevolg van zwel- en krimpprocessen een belangrijke rol spelen. Voor een procesmodel waarmee ook sterk afwijkende situaties ten opzichte van de kalibratiepercelen moeten worden gesimuleerd, zou het echter beter zijn om het effect van zuurstof op de microbiële activiteit explicet te kwantificeren.
- **Onderscheid tussen kort- en lang-cyclisch koolstof**
In het Klimaatakkoord ligt de focus op de beperking van de uitstoot van koolstof die bijdraagt aan de opwarming van het klimaat. Dit betreft lang-cyclisch koolstof. In het geval van veen is dit ‘fossiel’ koolstof (honderden tot duizenden jaren oud) dat op dit moment voor langere termijn opgeslagen is in het veen, maar door menselijke handelen weer wordt teruggebracht in de atmosfeer, waardoor de atmosferische concentratie van CO₂ (en CH₄) stijgt. Kort-cyclische koolstof wordt opgenomen door de plant, maar binnen één jaar, of enkele jaren tot decennia, ook weer uitgestoten, waardoor netto de atmosferische concentratie niet veranderd. De verhouding tussen lang- en kort-cyclisch koolstof verandert in de bodem: bovenin zit veel kort-cyclisch koolstof van bijvoorbeeld gewasgroei en wortels, maar er zit ook lang cyclisch koolstof afkomstig uit het veen. Dieper in de bodem neemt het aandeel kort-cyclisch koolstof af (want planten wortelen tot een bepaalde diepte) en het aandeel lang cyclisch koolstof toe (aandeel veen neemt toe). De verhouding tussen die twee is niet goed bekend, maar is van belang om de respiratie (en dus afbraak) van de fossiele koolstof in het veenpakket te kunnen bepalen. Dit heeft ook gevolgen voor het bepalen van het effect van een maatregel. Indien een maatregel vooral een effect heeft op de koolstofafbraak op grotere diepte in het profiel, waar een grotere fractie van de aanwezige organische stof lang-cyclisch koolstof (veen) is, dan is het klimatologische effect groter (per eenheid koolstof) dan wanneer een maatregel bovenin het profiel ingrijpt. Op dit moment wordt in SOMERS 1.0 alle gerapporteerde organische stof en

koolstof in de bodemkaart verondersteld lang-cyclisch te zijn. Hierdoor wordt het effect van een maatregel bovenin het profiel nu mogelijk overschat. Anderzijds is de afbraaksnelheid van kort-cyclisch koolstof (recente wortels en plantenresten) vaak hoger, dus zal er vergeleken met de totale bodemrespiratie weer een onderschatting zijn. Het is duidelijk dat inzicht krijgen in de verdeling tussen lang en kort-cyclisch koolstof in het profiel en ruimtelijk variaties hierin belangrijk is en daarom is dit een van de onderzoeksfoci van het Nationaal Onderzoeksprogramma Broeikasgassen Veenweiden de komende jaren. Dit is overigens ook relevant voor de onderbouwing van de onderliggende aanname in het analyseren van de broeikasgasuitstootmetingen dat de kort-cyclische koolstof dynamiek niet grootschalig verschuift.

6.3 Doorwerking van onzekerheden en aandachtspunten bij gebruik

De onzekerheden die van toepassing zijn op de uitkomsten van SOMERS 1.0 werken door in de uitkomsten en geven aanleiding tot aandachtspunten bij het gebruik van bijvoorbeeld de rekenregels.

6.3.1 Doorwerking van onzekerheden

Op dit moment wordt alleen de onzekerheid in de geohydrologische parametrisatie van het grondwatermodel gekwantificeerd. Er zijn echter tal van factoren, zie Paragraaf 6.2, waarvan de onzekerheid op dit moment niet gekwantificeerd kan worden of waarvan de onzekerheid onbekend is doordat het proces nog ontbreekt in de huidige modelopzet.

Doordat de oorsprong van het PeatParcel2D model is gestoeld op decennialange ontwikkelingen in grondwatermodellering (van de verzagde zone) in Nederland en daarbuiten, is de systematische fout in PeatParcel2D relatief beperkt. De ontwikkeling van de AAP-module is in vergelijking daarmee veel recenter. Bovendien is kalibratie en validatie van de AAP-module op dit moment nog onmogelijk, omdat de benodigde data ontbreekt. De systematische fout in de uitkomsten van de AAP-module is hierdoor waarschijnlijk groter dan van PeatParcel2D.

Aangezien de modules sequentieel worden toegepast in SOMERS 1.0 is ook nog sprake van doorwerking van fouten (stapeling van onzekerheid). De gebruikte methode om op basis van afbraakpotentie basisrespiratiemetingen om te zetten in een CO₂-uitstoot voor verschillende condities is een relatief nieuwe aanpak en introduceert mogelijk een relatieve grote (toevallige en of systematische) fout. Naar verwachting is de onzekerheid in reductiepercentages van maatregelen hierdoor kleiner dan van absolute waarden van CO₂-uitstoot. Voor gebiedsschaal zijn door middelingseffect van (toevallige) fouten de onzekerheden waarschijnlijk kleiner dan voor individuele percelen.

6.3.2 Aandachtspunten voor gebruik

Voor het gebruik van de resultaten van SOMERS 1.0 gelden de volgende aandachtspunten:

- Op basis van de eisen die aan SOMERS 1.0 zijn gesteld (Hoofdstuk 2) is de opzet van de onderliggende modellen van SOMERS 1.0 zo gekozen dat ze inzetbaar zijn op landelijke of regionale schaal. De opzet van de modellen zelf, de manier waarop berekeningen worden gedaan, en de benodigde inputdata zijn allemaal geoptimaliseerd om ingezet te worden op deze grotere ruimtelijke schaal. Het gebruik van SOMERS 1.0 voor lokale schaal (een polder, een boerderij/natuurgebied, een specifiek perceel) introduceert grotere onzekerheden in de uitkomst. Op grote ruimtelijke schaal worden toevallige fouten uitgemiddeld, maar dit gebeurt niet bij inzet op kleinere ruimtelijk schaal. Dit geldt niet voor systematische fouten in het model.
- Voor de rekenregels geldt dat de uitkomsten zijn bepaald voor een gestandaardiseerde set omstandigheden, zodat de uitkomsten gebruikt kunnen worden voor vergelijkbare percelen. Bij de registratie en monitoring moet de uitkomst van een enkel perceel in de context van alle andere percelen in dat gebied worden gezien. Indien er berekeningen moeten worden gedaan op kleinere ruimtelijke schaal is het aanbevolen om lokaal specifieke invoer-, kalibratie- en validatiedata te verzamelen en meten. Hierdoor wordt de afhankelijkheid van de resultaten van kalibratie op andere percelen kleiner, en daarmee worden de uitkomsten representatiever voor het onderzochte gebied. Voor inzet op dit soort kleine ruimtelijke schalen zijn verschillende numerieke procesmodellen beschikbaar, zoals PEATLAND-VU en SWAP-ANIMO, die deels een onderdeel zijn van de multi-model ensemble aanpak van SOMERS.
- Voor SOMERS 1.0 wordt er onderscheid gemaakt tussen drie kalibratieregio's (Hoofdstuk 4) die onder andere zijn gebruikt voor het opstellen van de rekenregels. Deze regio's onderscheiden zich in de regionale hydrologie (interactie met eerste watervoerend pakket) en op fysieke eigenschappen van de ondergrond. Door het beperkt aantal geschikte metingen kon geen nader

of scherper onderscheid gemaakt worden op basis van bijvoorbeeld archetype of hydrologische situatie. Door deze aanpak worden hydrologisch afwijkende gebieden onder dezelfde regio geschaard. Een voorbeeld hiervan zijn de relatief dunne veenpakketten in een kwelgebied aan de flanken van de Utrechtse heuvelrug of de veenpakketten in droogmakerijen met een sterke kwelsituatie in West-Nederland. Voor dit soort situaties, waarbij de hydrologische omstandigheden sterk afwijken van het gemiddelde van de kalibratieregio, zijn de huidige set aan rekenregels beperkt of niet bruikbaar.

- SOMERS 1.0 simuleert vooralsnog alleen de uitstoot van CO₂. In het veenweidegebied vindt ook uitstoot plaats van andere broeikasgassen die bijdragen aan de opwarming van de atmosfeer en aarde. Hierbij gaat het om methaan (CH₄) en lachgas (N₂O). Methaanemissies spelen een rol van betekenis bij grondwaterstanden van 20 cm onder maaiveld en minder. Uit de NOBV-metingen blijkt tot nu toe dat de methaanuitstoot verwaarloosbaar is bij een grondwaterstand dieper dan 20 cm. In sommige gevallen is er dan sprake van een beetje methaan-opname (Erkens et al., 2021). Door het ontbreken van methaanuitstoot geeft SOMERS 1.0 geen volledig beeld van de broeikasgasuitstoot voor deze situatie onder dergelijk natte omstandigheden. Mogelijk valt de broeikasgasbalans bijvoorbeeld negatiever uit als methaan wel zou worden meegegenomen. De uitstoot van methaan is ook nog niet opgenomen in de LULUCF-rapportage van Nederland. De uitstoot van lachgas vindt met name plaats direct na bemesting en onder natte (net niet verzadigde omstandigheden in de bodem (Erkens et al., 2021)). Dit wordt niet meegegenomen in SOMERS 1.0.
- De eventuele opname van *lang-cyclische* koolstof in de bodem (dus op langere termijn vastgelegd, bijvoorbeeld door veengroei) maakt geen onderdeel uit van SOMERS 1.0. Koolstofopname kan op dit moment niet worden gekwantificeerd. Koolstofopname zal voornamelijk een rol spelen bij zeer kleine droogleggingen, of bij gebieden die geen drooglegging kennen (grondwaterstand aan maaiveld) en dan met name als er veenvormende vegetatie groeit. In opnemen van koolstof in de bodem kan alleen worden gemodelleerd als in SOMERS ook wordt bijgehouden hoeveel koolstof er in de tijd in de bodem aanwezig is. Op dit moment is dit nog niet mogelijk. Het ontbreken van een koolstofboekhouding zorgt er ook voor dat de CO₂ uitstoot op de termijn van meerdere zich opeenvolgende jaren tot decennia, die gelimiteerd kan worden door de aanwezigheid van bodemkoolstof, niet met SOMERS bepaald kan worden. Met andere beschikbare modellen, zoals het bodemdalingsmodel Atlantis (Bootsma et al., 2020), kan dit overigens wel.

7 Aanpassingen op weg naar SOMERS 2.0

Zoals beschreven in Hoofdstuk 3 vormen PeatParcel2D en de AAP-module samen SOMERS 1.0, wat een eerste uitwerking van het registratiesysteem SOMERS is. In de nabije (komend jaar) en verre toekomst zullen de modellen en de registratie worden verbeterd. Met SOMERS 2.0 wordt de eerstvolgende versie bedoeld waar op korte termijn aan gewerkt wordt. Er zijn drie niveaus waarop verbeteringen worden voorzien: i) het verwerken van nieuwe en lange meetreeksen die met de tijd beschikbaar komen, met speciale aandacht voor veenhydrologie en het effect van maatregelen, ii) meer gebruik maken van de multi-model aanpak, iii) het doorvoeren van structurele modelverbeteringen in PeatParcel2D en AAP.

De laatstgenoemde categorie zal op korte termijn worden uitgevoerd omdat hier de meeste verbetering is te verwachten. Verbeteringen van het gebruik van andere modellen in het multi-model ensemble zullen voornamelijk verder in de toekomst plaatsvinden. Verlengde meetreeksen zullen bij elke nieuwe versie beschikbaar zijn.

De korte termijn aanpassingen die hieronder worden toegelicht zullen waarschijnlijk grotendeels voor SOMERS 2.0 worden ontwikkeld. Het is de verwachting dat de verschillen tussen SOMERS 1.0 en SOMERS 2.0 nog aanzienlijk zullen zijn, terwijl de verschillen tussen toekomstige hogere versienummers waarschijnlijk kleiner worden. Juist in deze eerste fase hebben de toevoegingen nog veel gevolgen voor de uitkomsten. De uitkomsten zoals gepresenteerd in Hoofdstuk 5 zullen hierdoor in sommige gevallen (aanziendelijk) veranderen in de volgende versie(s).

7.1 Meetreeksen

Voor toekomstige versies van SOMERS zullen er meer en langere grondwaterstandreeksen beschikbaar zijn. Hiertoe is het noodzakelijk dat het huidige grondwatermeetstelsel in het veenweidegebied wordt uitgebreid zodat er *meer meetreeksen* beschikbaar komen ten behoeve van kalibratie en validatie van onderliggende modellen van SOMERS (Hoofdstuk 8). Er zullen ook, in de context van bijvoorbeeld het NOBV en het Veenweide Innovatie Programma Nederland (VIP-NL) aanvullende meetlocaties worden ingericht. Ook is er een toenemend aantal nieuwe peilbuizen, vanuit het NOBV, de waterschappen, provincies, maar ook van agrariërs en van andere collectieven.

SOMERS zal veel voordeel hebben van een uitgebreider meetnetwerk, omdat de grondwaterstanden aan de basis liggen van de uitstootberekeningen. Van belang is dat deze nieuwe meetlocaties aan de juiste voorwaarden voldoen (Hoofdstuk 8).

Langere meetreeksen worden verkregen wanneer bestaande metingen worden gecontinueerd. Veel van de bestaande peilbuizen zijn relatief recent geplaatst, vanwege het groeiende belang om inzicht te krijgen in de hydrologie in het veenweidegebied. Hierdoor zijn meetreeksen soms (zeer) kort, terwijl het enige tijd kan duren voordat gemeten grondwaterstanden in nieuw geplaatste peilbuizen in evenwicht zijn met de omringende grond en daardoor naar verloop van tijd pas bruikbaar zijn. Daarnaast zijn lange meetreeksen met verschillende weersomstandigheden juist belangrijk.

Naast hydrologische metingen is ook uitbreiding van andere metingen van belang, in tijd (langer) en ruimte (op meer plekken). Soms gaat het hier om meetreeksen die gebruikt worden in de modellen zelf (bijvoorbeeld de basisrespiratiemetingen in AAP), in andere gevallen gaat het om metingen die nodig zijn voor validatie of toetsing van de resultaten. Een van de belangrijkste uitkomsten uit SOMERS 1.0 zijn de uitstootgetallen van CO₂ bij verschillende maatregelen. De beschikbare metingen van CO₂-uitstoot om deze resultaten te toetsen zijn vooralsnog beperkt. CO₂-uitstoot metingen vereisen dure apparatuur met veel onderhoud. Het Nationaal Onderzoeksprogramma Broekasgassen

Veenweiden is hier begin 2020 mee gestart, maar uiteindelijk zijn pas voor 2 locaties jaurbudgetten beschikbaar (Erkens et al., 2021). Andere NOBV-locaties bieden overigens wel inzichten in de relatie tussen CO₂-uitstoot en omgevingsvariabelen. Komend jaar zal het aantal CO₂ metingen sterk toenemen door uitbreiding van het aantal meetlocaties door het NOBV.

Tenslotte zullen verdere metingen bijdragen aan de proceskennis bij het onderzoek in het veenweidegebied, wat kan bijdragen aan de modelontwikkeling. Hierbij kan worden opgemerkt dat het voor het vergroten van proceskennis van belang is naast de eerdergenoemde metingen op proeflocaties ook bredere inventarisaties uit te voeren. Hierbij kan gedacht worden aan gedetailleerde bodemopbouw, veentype en samenstelling, doorlatendheden en bodemkarakteristieken.

7.2 SOMERS als multi-model ensemble

Voor de ontwikkeling van PeatParcel2D en de AAP-module wordt gebruik gemaakt van andere modelconcepten (Figuur 2.5) binnen het multi-model ensemble (e.g. Tebaldi & Knutti, 2007 als voorbeeld van een toepassing in het klimaatdomein). Door de modelopzet kunnen PeatParcel2D en de AAP-module relatief snel landelijk CO₂-uitstoot en uitstootreductie berekenen. In de multi-model ensemble zitten ook complexere procesmodellen. Door verschillende procesmodellen naast elkaar te gebruiken (ensembles) wordt een betere onzekerheidskwantificering bereikt.

In toekomstige versies van SOMERS zal er meer gebruikt worden gemaakt van dit multi-model ensemble. Simulaties van gegeven situaties met meerdere modellen levert inzicht in de modelgevoeligheid, die een deel van de totale onzekerheid omvat. Daarnaast kan meer inzicht worden verkregen in onzekerheden en het onderscheid tussen toevallige en systematische fouten. Ook kunnen deze vergelijkingen procesinzicht opleveren die inspiratie vormt voor gerichte verbetering van componenten in SOMERS. Verschillende modelstrategieën zijn beschikbaar die zich richten op initialisatie, kalibratie, interne variabiliteit, ruimtelijke/temporele correlatiestructuren, data-assimilatie, scenario-keuze. Ook kunnen er kruisberekeningen worden gedaan. Hierbij kan een grondwaterberekening van het ene model in een andere worden ingevoerd, om met dezelfde input de broeikasgasberekeningen te vergelijken.

Tenslotte kunnen algoritmes van andere modellen dienen als inspiratie voor de algoritmes van PeatParcel2D en AAP, of eventueel kunnen stukken modelcode direct overgenomen worden. Op langere termijn is het de vraag of alle modellen een onderdeel blijven uitmaken van SOMERS, of dat er ook modellen kunnen worden samengevoegd. Ook de meerwaarde van de verschillende individuele modellen voor SOMERS moet nog blijken en kan ook veranderen in de toekomst.

7.3 Structurele modelverbeteringen

In deze paragraaf wordt een overzicht gegeven van modelverbeteringen op de korte en lange termijn, waarbij prioriteit wordt gegeven aan verbeteringen die een grote invloed hebben op de resultaten. De structurele modelverbeteringen zoals hieronder beschreven zijn van toepassing op PeatParcel2D en de AAP-module. Deze modellen zijn ontwikkeld als ontvangststation van nieuwe kennis van het NOBV.

Sommige aanpassingen zijn erg complex en kunnen beter worden berekend met een toegewijde module, of vereisen meer proceskennis voordat het op korte termijn kan worden opgenomen in SOMERS. Deze aanpassingen die in latere versies van SOMERS aan bod komen worden onder het kopje ‘Lange termijn’ genoemd.

7.3.1 Verbeteringen en aanpassingen op korte termijn

1. Onderscheid op basis van hydrologische situatie

Zoals in Paragraaf 6.1.2 genoemd, worden bij het onderscheid tussen de regio's hydrologisch afwijkende gebieden onder dezelfde regio geschaard. Bij de daadwerkelijke uitvoering van de uitstootregistratie en bij SOMERS 2.0 wordt er een andere aanpak en indeling gebruikt, waarbij gebruik gemaakt gaat worden van het onderscheid op basis van de regionale hydrologie (met name aanwezigheid van weerstandslaag en kwel/wegzijging situatie) en waarbij rekening wordt gehouden met de ontstaansgeschiedenis. Ook wordt gewerkt aan het vergelijken van de uitkomsten van het hydrologisch model met resultaten verkregen met andere technieken zoals fysische tijdsreeksanalyses, om zo de resultaten verder te verbeteren.

2. Verbeteren kalibratie op locaties met dunne deklaag

Bij de kalibratie ten behoeve van de parametrisatie in de huidige versie van SOMERS heeft de stijghoogte (vanuit het landelijk hydrologisch model LHM) veel invloed op de grondwaterstanden bij locaties met een dunne deklaag, en eventuele fouten in de stijghoogte worden gecompenseerd door het model met de parametercombinaties (Paragraaf 6.1.2). Bij SOMERS 2.0 is het belangrijk om zeker te zijn dat de gebruikte stijghoogtewaarden correct zijn en daartoe zullen aanvullende stijghoogtemetingen voor dit soort gebieden nodig zijn.

3. Dynamische bodemtemperatuur

Voor de bodemtemperatuur is reeds een methode verkend om de dagbasis temperatuurprofielen te generen op basis van de luchttemperatuur doormiddel van een fouriertransformatie. De eerste resultaten lijken veel belovend. Voor SOMERS 2.0 zal worden bepaald of dit in het model kan worden geïmplementeerd. Een nadeel van fouriertransformaties is echter dat het temperatuureffect van instromende water vanuit sloten en drains niet makkelijk mee wordt genomen. Daarom wordt er naast het gebruik van fouriertransformaties, ook inspiratie opgedaan op de manier waarop temperatuurprofielen in PEATLAND-VU en SWAP-ANIMO worden berekend.

4. 2D-profiel berekening uitstoot

In plaats van één punt op 1/3 van het perceel zullen in SOMERS 2.0 de berekeningen worden gemaakt voor het hele 2D-profiel. Deze informatie is nu al beschikbaar voor de grondwaterstand, maar moet in dat geval dus ook voor bodemvocht, bodemtemperatuur en CO₂-uitstoot worden uitgebreid. Naar verwachting zullen de berekeningen op deze manier beter rekeningen houden met verschillen binnen het perceel (belangrijk bij percelen met een grote slootafstand). Een uitbreiding van bodemtemperatuur over het 2D-profiel is niet mogelijk als er bij punt 3. *Dynamische bodemtemperatuur* alleen gebruik wordt gemaakt van fouriertransformaties. Bij het maken van de 2D-profiel berekeningen is de efficiëntie van het model natuurlijk van belang. Als blijkt dat continue berekeningen over de hele perceelbreedte veel rekenkracht vereisen, dan zal er in plaats daarvan bijvoorbeeld met een pseudo-2D model 10 berekeningen over de breedte van het halve perceel worden gedaan.

5. Bodemvocht dynamisch modelleren

Mogelijk kunnen bodemvochtprofielen ook dynamisch worden gemodelleerd op basis van de grondwaterstand. Aangezien bodemvochtmodellen over het hele 2D-profiel van een perceel veel rekenkracht vereisen, zal een pragmatische aanpak op basis van metingen of resultaten van andere modellen (meta-methode) nodig zijn.

6. Zuurstofindringing

Het effect van zuurstofconsumptie en -indringing is op dit moment niet expliciet meegenomen in de AAP-module. Mogelijk heeft een tekort aan zuurstof een beperkende rol op oxidatie bij diep ontwaterde percelen, waardoor SOMERS 1.0 de uitstoot van dit soort percelen overschat. Daarom wordt voor SOMERS 2.0 bepaald of dit effect expliciet kan worden opgenomen in de AAP-module.

Ook het proces van zwel en krimp met de hiermee samenhangende scheurvorming kan hierbij een belangrijke rol spelen.

7. Greppels

Greppels komen op veel percelen in het veenweidegebied voor. In west Nederland is dit vaak een enkele greppel in het midden van het perceel, in Noord-Nederland kunnen dit meerdere greppels zijn die helpen met de ontwatering van relatief brede percelen. De greppels dienen voornamelijk om in de winter de grondwaterstanden omlaag te brengen zodat de ondiepe wortels van grasland van lucht kunnen worden voorzien, al kan er ook via greppels worden geïnfiltreerd. Omdat greppels nog niet zijn meegenomen in deze versie van het model, liggen voornamelijk in de winter gemeten grondwaterstanden soms lager dan het model zou simuleren zonder de greppel, waarvoor de kalibratieparameters moeten compenseren. Daarom zal er in de volgende versie worden geprobeerd greppels toe te voegen aan PeatParcel2D. Dit kan dan in ieder geval worden gebruikt voor de kalibratie van de parameters. Ook kan er worden overwogen dit als variabele toe te voegen aan de rekenregels door bijvoorbeeld op basis van vastgestelde relaties tussen het aantal greppels en de perceelbreedte.

7.3.2 Verbeteringen en aanpassingen op lange termijn

1. Methaan (CH_4)

Momenteel wordt de vorming en uitstoot van CH_4 niet meegenomen in SOMERS waarmee de broeikasgasbalans voor nattere condities niet compleet is: een deel van de winst van het verminderen van de CO_2 -uitstoot kan tenietgedaan worden door een toename in de CH_4 -uitstoot (zie Hoofdstuk 1 en 6). Dit is ook de reden dat droogleggingen van kleiner dan 20 cm niet zijn opgenomen in de rekenregels.

De processen achter CH_4 -uitstoot zijn complex, vegetatie-afhankelijk en ook deels anders dan processen die leiden tot de CO_2 -uitstoot, met andere karterende parameters. In een van de volgende versies zal CH_4 worden opgenomen in de modelformulering, waarbij de komende tijd zal worden besteed aan het bepalen op welke manier dit zal worden gedaan. Een van de opties is om bijvoorbeeld met kengetallen te gaan werken, of met uitkomsten uit PEATLAND-VU dat wel methaan uitstoot kan berekenen. Voor PEATLAND-VU wordt gewerkt aan verdere verbetering van het effect van vegetatie op CH_4 -emissie, waarin ook het effect van vegetatie-successie gemodelleerd kan worden. Dit is vooral van belang voor het berekenen van CH_4 -emissies van natte teelten en natuurgebieden.

2. Natuurgebieden en natte teelten

Natuurgebieden in het veenweidegebied hebben vaak een kleinere drooglegging en hogere grondwaterstanden. Behalve dat het modelleren van zeer kleine droogleggingen nog niet gedaan is, bijvoorbeeld vanwege het ontbreken van berekeningen voor CH_4 , zijn er ook nog een aantal andere oorzaken waardoor natuurgebieden niet direct kunnen worden meegenomen door SOMERS. Indien er in natuurgebieden geen percelen omgeven door sloten aanwezig zijn werkt het concept van de hydrologische randvoorwaarden niet. Ook is de dynamiek van bijvoorbeeld de begroeiing heel anders, alsmede het beheer. Ook voor het berekenen van de gevolgen van ander landgebruik zoals natte teelten/paludicultuur geldt dat de dynamiek van het gewas en mogelijkheden tot het opslaan van koolstof moeten worden toegevoegd aan SOMERS. Daarnaast moeten deze omstandigheden nog vertaald worden naar invoer voor de onderliggende modellen van SOMERS. Er is ook nog maar kortgeleden gestart met metingen van broeikasgasuitstoot (en -opname) in natuurgebieden, waardoor een vergelijking op dit moment nog niet mogelijk is. Een belangrijke verdere aanpassing die noodzakelijk is om de broeikasgasdynamiek in natuurgebieden goed te kunnen bepalen is de mogelijkheid tot het opslaan van koolstof in de begroeiing en bij veenvorming. In natte natuurgebieden is dit een mogelijk cruciale bijdrage aan de broeikasgasbalans van de Nederlandse organische gronden. SOMERS moet hier nog voor worden aangepast. Hierbij kan nieuwe ontwikkeling van een vegetatiemodule in PEATLAND-VU een rol spelen.

3. Lachgas (N_2O)

N_2O is een derde broeikasgas dat vrijkomt in veengebieden, zowel uit het veen zelf (dit wordt ook gerapporteerd in de LULUCF-rapportages middels een kengetal), als uit de bemesting. Lachgasuitstoot is in tijd en ruimte zeer variabel en daarom moeilijker te modelleren. Het meten hieraan en de opbouw van mechanistisch begrip en een modelinstrumentarium staat nog in de kinderschoenen. Een mogelijkheid is om voor N_2O toch met kengetallen te gaan werken, net als bij de LULUCF. Of een ander gas als proxy te gebruiken, bijvoorbeeld de aanwezigheid van zuurstof die nodig is voor de lachgasvorming. Daarbij moet nog bepaald worden of dit inderdaad een onderdeel wordt van de monitoring binnen het Klimaatakkoord.

4. Verbeterde landelijke datasets voor modelinvoer

Op de lange termijn zullen ook delen van de invoer van SOMERS verbeteren. Dit kan naast langere meetreeksen ook door nieuwe versies van gebruikte landelijke invoerdata. Voorbeelden van modellen zijn: Het Landelijk Hydrologisch Model (kwel en wegzetting/neerslagoverschot), GeoTOP (ondergrondopbouw), de bodemkaart (archetypes). Deze acties liggen veelal buiten het NOBV en SOMERS maar kunnen zeer waardevol zijn bij het verder reduceren van de onzekerheden in de uitkomst. Daarom zal in de toekomst worden onderzocht of ook los van deze modellen verbeteringen van de invoer door het gebruik van bijvoorbeeld een andere schematisering en parameterisering mogelijk zijn.

5. Koppeling met bodemdaling

Waarbij de LULUCF-rapportage gebruik wordt gemaakt van bodemdaling als proxy voor de CO_2 -uitstoot (Hoofdstuk 2), is dit in SOMERS niet meer het geval. Maar het werken met de afbraakpotentie kan juist waardevolle inputdata zijn voor de bestaande bodemdalingmodellen (bijvoorbeeld het bodemdalingssmodel Atlantis, Bootsma et al., 2020). Indien de afbraakpotentie wordt omgerekend naar volumeverlies kan dit als bijdrage aan de totale bodemdaling worden meegerekend. Hierbij kan een onderscheid worden gemaakt tussen twee manieren waarop veenafbraak leidt tot volumeverlies. Ten eerste kan de afbraak zelf ertoe leiden dat zoveel massa verloren gaat, dat het volume van het veen daadwerkelijk afneemt. Maar eerder dan dat is er ook al volumeverlies omdat door de afbraak de sterkte en stijfheid van het veen veranderen, waardoor het zal gaan compacteren. Naar beide processen wordt nog onderzoek gedaan.

Ook de losse grondwaterstanden afkomstig uit PeatParcel2D kunnen waardevol zijn bij het modelleren van bodemdaling, bijvoorbeeld om processen die hierdoor worden beïnvloed te modelleren (bijvoorbeeld krimp/zwel gedrag). Zo wordt er gewerkt aan manieren om a-priori data en kennis te gebruiken bij het processen van radarsatelliet-informatie over deformatie van het aardoppervlak (InSAR, zie onder andere Conroy et al., 2022). Een van de a-priori parameters is de grondwaterstand. Ook hiervoor kan in de toekomst wellicht gebruik gemaakt worden van informatie berekend met PeatParcel2D.

6. Gewasverdamping en beheer/landgebruik

Gewasverdamping is een belangrijk proces voor het vochtgehalte in de bovengrond en daarmee voor de afbraakpotentie van organische stof en dus voor broeikasgasuitstoot. Veranderingen in het gewas (maaien) zorgen ook voor (tijdelijk) andere condities in verdamping. In sommige gedetailleerde procesmodellen is dit meegenomen. Voor SOMERS moet bepaald worden of dit een onderdeel wordt van de modellering of niet. Dit geldt ook voor veranderingen in beheer en landgebruik (maairegimes, bemesting) die invloed kunnen hebben op de broeikasgasuitstoot. Het is aannemelijk dat bij het verhogen van de slootwaterpeilen, de intensiteit van het landgebruik ook zal veranderen, wat ook een invloed heeft op de broeikasgasuitstoot. Ook hiervan moet nog worden bepaald of en op welke manier dit wordt meegenomen in toekomstige versies van SOMERS.

8 Benodigde meetreeksen en validatiedata

Metingen van grondwaterstanden, bodemvocht- en bodemtemperatuurmetingen, basisrespiratiemetingen en CO₂ jaarbudgetten zijn een aantal voorbeelden van metingen die cruciaal zijn voor het functioneren van SOMERS en de onderliggende modellen. Met de keuze voor SOMERS en de keuze voor het gebruik van procesmodellen worden er nieuwe eisen gesteld aan de metingen ten behoeve van kalibratie, validatie en toetsing.

Veel van de aanvullende metingen worden al in het Nationaal Onderzoeksprogramma Broeikasgassen Veenweiden uitgevoerd of opgezet. Wel is het huidige NOBV-meetnetwerk vooral geoptimaliseerd voor het opbouwen van mechanistisch begrip en het bepalen van het effect van maatregelen. Het opbouwen van mechanistisch begrip levert generieke kennis van het systeem die ook op plekken waar niet gemeten ingezet kan worden. Er wordt echter beperkt karterend gemeten: door middel van airborne metingen, mobiele broeikasgasmeetstelsystemen en door permanente metingen in referentielandschappen. Daarom is het nodig de komende tijd in te zetten op het uitbreiden van het meetnetwerk van NOBV om beter SOMERS en de onderliggende modellen te dienen. Bijvoorbeeld of het nodig is om op alle verschillende bodemarchetypen en hydrologische archetypen een continue grondwatermeting te hebben.

Op korte termijn is het vooral belangrijk om grondwaterstandmetingen (peilbuizen), bodemvochtmetingen en bodemtemperatuurmetingen uit te breiden. Aan de ene kant zijn dit direct verbeteringen voor de validatie en toetsing van PeatParcel2D. Aan de andere kant zijn dit ook relatief eenvoudige metingen en apparatuur om te installeren. Daarnaast kunnen deze metingen niet los worden gezien van gedegen veldinventarisaties van de laagopbouw van de bodem en karakterisering van de eigenschappen van het veen en het veentype, zoals de bepaling van doorlatendheden. Vervolgens kunnen deze nieuwe meetpunten eventueel uitgebreid worden met complexere meetsystemen zoals broeikasgasmetingen.

Op dit moment zijn voor SOMERS 1.0 ca 50 grondwaterstandmetingen beschikbaar en gebruikt voor de kalibratiestap. Deels is dit het gevolg van een zeer beperkt aantal freatische metingen in het veenweidegebied van Nederland. Dit is op z'n minst opvallend voor een gebied waar nauwkeurig waterbeheer belangrijk is en waar een aantal grote veranderopgaven liggen. Er zijn meer dan de 50 genoemde meetreeksen beschikbaar, maar vaak ontbreekt allerlei cruciale meta-data met betrekking tot de exacte locatie van de peilbuis, de filterdiepte, de aanwezigheid van een eventuele fundering en een beknopte omschrijving van de omgeving (afstand tot watergang, greppels). Deze informatie is belangrijk bij het gebruik van de data en hierdoor vallen veel datapunten af.

Er is een noodzaak tot sterk uitbreiden van het aantal geschikte peilbuizen in het veenweidegebied van Nederland, gericht op het meten van de freatisch grondwaterstand. Deze noodzaak is er tenminste voor SOMERS en PeatParcel2D, maar ook voor andere toepassingsgebieden kan dit nuttig zijn, bijvoorbeeld droogtestudies en waterbeschikbaarheid. De peilbuizen zouden in ieder geval in verschillende bodemarchetypen en hydrologische archetypen moeten worden gezet, en het liefst ook in verschillende veenweideprovincies.

De nieuw te plaatsen peilbuizen zouden, overeenkomstig met het handboek van STOWA (Bouma et al., 2012), aan de volgende voorwaarden moeten voldoen:

- De filterdiepte van de peilbuis moet bekend zijn en gericht op het meten van de freatische grondwaterstand (korte filters)
- De locatie van de peilbuis moet in ieder geval op tenminste 5 m afstand zitten van een greppel (indien aanwezig). Verder, is een afstand van 1/3 van de perceelbreedte tussen watergang en peilbuis aanbevolen, beide voor percelen met en zonder greppel. De peilbuis locatie moet bekend zijn en gedocumenteerd worden.
 - Indien een drainagebuis aanwezig is, wordt het aanbevolen om de peilbuis op een afstand van 1/3 van de drainafstand te zetten.
- De peilbuis moet weg staan van verstoringen zoals betonplatenpaden, of plekken waar materiaal wordt opgeslagen
- De filterstelling en laagopbouw moeten worden gedocumenteerd
- De peilbuis moet gefundeerd zijn
- Aanvullend is het waardevol om direct ook bodemvocht en bodemtemperatuur te meten naast de peilbuis
- In het geval van een dunne deklaag is het belangrijk dat de stijghoogte van het eerste watervoerend pakket ook wordt gemeten (dit hoeft niet op alle locaties). Dit mag niet in hetzelfde gat worden gemeten.
- Grondwaterstanden moeten automatische worden gemeten met een hoge meetfrequentie van minimaal één keer per dag aangezien er binnen SOMERS ook op dagbasis gemodelleerd wordt.

Referenties

AHN. (2022-26-01). *AHN Viewer*. AHN.nl. <https://www.ahn.nl/ahn-viewer>

Van den Akker, J.J.H., Kuikman, P.J., De Vries, F., Hoving, I., Pleijter, M., Hendriks, R.F.A., Wolleswinkel, R.J., Simões, R.T.L. & Kwakernaak, C. (2008). *Emission of CO₂ from agricultural peat soils in the Netherlands and ways to limit this emission*. In: Farrell, C and J. Feehan (eds.), 2008. Proceedings of the 13th International Peat Congress After Wise Use – The Future of Peatlands, Vol. 1 Oral Presentations, Tullamore, Ireland, 8 – 13 june 2008. International Peat Society, Jyväskylä, Finland. ISBN 0951489046. pp 645-648

Arets, E.J.M.M., van der Kolk, J.W.H., Hengeveld, G.M., Lesschen, J.P., Kramer, H., Kuikman, P.J. & Schelhaas, M.J. (2021). *Greenhouse gas reporting for the LULUCF sector in the Netherlands – methodological background, update 2021*. Wot-technical report 201, 132 pp.

Van Asselen, S., Erkens, G., & de Graaf, F. (2020). *Monitoring shallow subsidence in cultivated peatlands*, Proc. IAHS, 382, 189–194, <https://doi.org/10.5194/piahs-382-189-2020>, 2020.

Berendrecht Consultancy (2021). Validatie en toetsing LHM 4.1. Deelrapport 1: Grondwater, PR4313.10, 87 pp.

Van den Berg, M., Weideveld, S., Geurt, J. & Frits, C. (2019). *CO₂, N₂O en CH₄ emissies en bodemdaling in de Friese Veenweiden*. Radboud Universiteit

Beven, K., & Binley, A. (1992). *The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction*. Hydrological processes, 6(3), 279-298.

Boonman, J., Hefting, M. M., van Huissteden, C. J. A., van den Berg, M., van Huissteden, J., Erkens, G., Melman, R., & van der Velde, Y. (2022). *Cutting peatland CO₂ emissions with rewetting measures*, <https://doi.org/10.5194/bg-2021-276>, 2022.

Bootsma, H., Kooi, H., & Erkens, G. (2020). *Atlantis, a tool for producing national predictive land subsidence maps of the Netherlands*. Proc. IAHS, 382, 415–420, 2020.

Bouma, J., Maasbommel, M., & Schuurman, I. (2012). *Handboek meten van grondwaterstanden in peilbuizen*. Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA). ISBN- 978.90.5773.595.0.

Brouwer, F., Maas, G., Teuling, K., Harkema, T. & Verzandvoort, S. (2021). *Bodemkaart en Geomorfologische Kaart van Nederland: actualisatie 2020-2021 en toepassing; Deelgebieden Gelderse Vallei Zuid en -West en Veluwe-Zuid*. Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu, WOT-technical report 134.

Bruggeman, G. A. (Ed.) (1999). *Analytical solutions of geohydrological problems*. Elsevier.

Concept monitoringsystematiek Subwerkgroep Monitoring, 21-10-2021

Conroy, P., van Diepen, S.A.N., van Asselen, S., Erkens, G., van Leijen, F.J., Hanssen, R.F. (2022). *Probabilistic Estimation of InSAR Displacement Phase Guided by Contextual Information and Artificial Intelligence*. IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, VOL. 60, 2022

Davidson, E. A., Samanta, S., Caramori, S. S., & Savage, K. (2012). *The Dual Arrhenius and Michaelis-Menten kinetics model for decomposition of soil organic matter at hourly to seasonal time scales*. Global change biology, 18(1), 371-384.

Erkens, G. & Melman, R. (2020a). *Quickscan omvang Nederlands veenweidegebied*. NOBV-memo, 37 pp.

Erkens, G. & Melman, R. (2020b). *Concept aanpak van monitoring broeikasgasuitstoot veenweiden*, november 2020.

Erkens, G. & Stouthamer, E. (2020). *The 6M approach to land subsidence*, Proc. IAHS, 382, 733–740, <https://doi.org/10.5194/piahs-382-733-2020>.

Erkens, G. & het NOBV-consortium (in concept). *Onderzoeksstrategie Nationaal Onderzoeksprogramma Broeikasgassen Veenweiden* (in concept).

Erkens, G., van Asselen, S., Hommes, S., Melman, R., van Meerten, H., van Essen, ... & Smolders, F. (2020). *Nationaal Onderzoeksprogramma Broeikasgassen Veenweiden: (NOBV) jaarrapportage 2019-2020*. NOBV-rapport ref 11204108, 171 pp

Erkens, G., Hommes-Slag, S., Melman, R., Kooi, H., van Essen, H., van den Berg, M., ..., & Smolders, F. (2021). *Nationaal Onderzoeksprogramma Broeikasgassen Veenweiden (NOBV): Data-analyse 2020-2021*.

Ernst, L. F. (1983). *Wegzetting en kwel: de grondwaterstroming van hogere naar lagere gebieden*. ICW.

Evans, C.D., Peacock, M., Baird, A.J., Artz, R.E.E., Burden, A., Callaghan, N., Chapman, P.J., Cooper, H.M., Coyle, M., Craig, E., Cumming, A., Dixon, S., Gauci, V., Grayson, R.P., Helfter, C., Heppell, C.M., Holden, J., Jones, D.L., Kaduk, J., Levy, P., Matthews, R., McNamara, N.P., Misselbrook, T., Oakley, S., Page, S.E., Rayment, M., Ridley, L.M., Stanley, K.M., Williamson, J.L., Worrall, F., Morrison, R. (2021). *Overriding water table control on managed peatland greenhouse gas emissions*. Nature 593, 548–552. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03523-1>

Van der Gaast, J. W. J., Vroon, H. R. J., Massop, H. T. L., & Wesseling, J. G. (2015). *Landsdekkende schematisering en parametrisatie van het topsysteem ten behoeve van hydrologische modellering* (No. 2686). Alterra, Wageningen-UR.

Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). *Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling*. Journal of hydrology, 377(1-2), 80-91

Hendriks, D.M.D. (2009). *Integrated observations of greenhouse gas budgets at the ecosystem level: changing environment and management practices in peat meadows*. PhD-thesis Vrije Universiteit Amsterdam, ISBN-9789086593804, 203 pp.

Holden, J., Evans, M. G., Burt, T. P., & Horton, M. (2006). *Impact of land drainage on peatland hydrology*. Journal of Environmental Quality, 35(5), 1764-1778.

Hooghoudt, S.B. (1940). *Algemene beschouwing van het probleem van de detailontwatering en de infiltratie door middel van parallel loopende drains, greppels, slooten en kanalen*. No. 7 in de serie: Bijdragen tot de kennis van eenige natuurkundige grootheden van den grond. Bodemkundig Instituut te Groningen. Rijksuitgeverij Dienst van de Nederlandse Staatscourant. 's-Gravenhage, Algemeene Landsdrukkerij, 193 pp.

- Van Huissteden, J., Van den Bos, M., & Alvarez, M. (2006). *Modelling the effect of water-table management on CO₂ and CH₄ fluxes from peat soils*, Neth. J. Geosci., 85, 3–18
- Hunink, J., van Walsum, P., Vermeulen, P., Pouwels, J., Bootsma, H., Janssen, G., Swierstra, W., Prinsen, G., Meshgi, A., Veldhuizen, A., de Lange, W., Hummelman, J., Bos – Burgering, L. & Kroon, T., (2020). *Veranderingsrapportage LHM 4.0*. Deltares rapport nummer 11203718-000, 143 pp.
- IPCC (2006), *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 4 Agriculture, Forestry and Other Land Use*.
- Janssen, G., van Walsum, P., America, I., Pouwels, J., Hunink, J., Vermeulen, P., Meshgi, A., Prinsen, Mulder, N., Visser, M. & Kroon, T. (2020). *Veranderingsrapportage LHM 4.1*. Deltares rapport nummer .
- Jurasinki, G., Günther, A., Huth, Vytas., Couwenberg, J., & Glatzel, S. (2016). *Paludiculture – productive use of wet peatlands*. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung
- Kamerstuk 32 813, nr. 562 (2020). *Veenplan 1e fase*. Brief aan de Tweede Kamer met kenmerk DGNVLG / 20183975. 13 juli 2020; 11 pp.
- Klimaatakkoord (2019). Klimaatakkoord, Den Haag, 28 juni 2019, 250 pp.
- Klimaat- en Energieverkenning 2021, PBL-publicatienummer: 4681, Den Haag 2021, 240 pp.
- Kling, H., Fuchs, M., & Paulin, M. (2012). *Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios*. Journal of Hydrology, 424, 264-277.
- Kroes, J. G., Van Dam, J. C., Bartholomeus, R. P., Groenendijk, P., Heinen, M., Hendriks, R. F. A., ... & Van Walsum, P. E. V. (2017). *SWAP version 4* (No. 2780). Wageningen Environmental Research.
- Kuikman, P.J., J.J.H van den Akker & F. de Vries (2005). *Emission of N₂O and CO₂ from organic agricultural soils*. Alterra, Alterra-rapport 1035-2. 66 blz.; 1. fig.; 6. tab.; 48 ref.
- Langevin, C. D., Hughes, J. D., Banta, E. R., Niswonger, R. G., Panday, S., & Provost, A. M. (2017). *Documentation for the MODFLOW 6 groundwater flow model* (No. 6-A55). US Geological Survey.
- Massop, H. T. L., van der Gaast, J. W. J., & Hermans, A.G.M. (2006). *Kenmerken van het ontwateringstelsel in Nederland* (No. 1397). Alterra.
- Nationaal kennisprogramma bodemdaling (2019). *Richtlijnen toepassing "Onderwaterdrainage"*. <https://klimaat slimboeren op veen.nl/wp-content/uploads/2019/10/Richtlijnen-toepassing-OWD-me-2019.pdf>
- PDOk. (2022-26-01). *Agrarisch Areaal Nederland* (AAN). PDOk.nl. <https://www.pdok.nl/geo-services/-/article/agrarisch-areaal-nederland-aan->
- Renaud, L. V., Roelsma, J., & Groenendijk, P. (2005). *Animo 4.0; user's guide of the Animo 4.0 nutrient leaching model* (No. 224). Alterra.
- Ruyssenaars, P.G., Coenen, P.W.H.G., Rienstra, J.D., Zijlema, P.J., Arets, E.J.M.M., Baas, K., ..., & van Zanten, M.C. (2021). *Greenhouse gas emissions in the Netherlands 1990–2019 National Inventory Report 2021*. RIVM report 2021-0007, 433 pp. DOI 10.21945/RIVM-2021-0007

Schrier-Uijl, A.P., Kroon, P.S., Hendriks, D.M.D., Hensen, A., Van Huissteden, J., Berendse, F. & Veenendaal E.M. (2014). *Agricultural peatlands: towards a greenhouse gas sink – a synthesis of a Dutch landscape study*. Biogeosciences, 11, 4559–4576, 2014.

Skopp J., Jawson M.D., Doran, J.W. (1990). *Steady-state aerobic microbial activity as a function of soil water content*. Soil Science Society of America Journal, 54, 1619–1625.

Stafleu, J., Maljers, D., Busschers, F. S., Gunnink, J. L., Schokker, J., Dambrink, R. M., & Schijf, M. L. (2012). *GeoTop modellering*. TNO report, TNO internal report, Utrecht 10991.

Tebaldi, C. & Knutti, R. (2007). *The Use of the Multi-Model Ensemble in Probabilistic Climate Change Projections*. Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences. 365. 2053-75. 10.1098/rsta.2007.2076.

Tiemeyer, B., Freibauer, A., Borraz, E.A., Augustin, J., Bechtold, M., Beetz, S., ..., & Drösler, M. (2020). *A new methodology for organic soils in national greenhouse gas inventories: Data synthesis, derivation and application*. Ecological Indicators, Volume 109.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105838>.

De Vries, F. (1999). *Karakterisering van Nederlandse gronden naar fysisch-chemische kenmerken*. 125, DLO-Staring Centrum, Wageningen