

## Verkenning koolstofvastlegging en broeikasgas-emissiereductie in veenweiden door grasland- en slootbeheer

A&W-rapport 22-303



in opdracht van

provinsje fryslân  
provincie fryslân 



# **Verkenning koolstofvastlegging en broeikasgas-emissiereductie in veenweiden door grasland- en slootbeheer**

A&W-rapport 22-303

---

E.B. Oosterveld (A&W)  
O. Galama (Galama Sustainable Solutions)  
L.F.A. Mathu (Witteveen en Bos)

## Foto Voorplaat

Veenweidegebied Fryslân, Foto A&W

## E.B. Oosterveld (A&W), O. Galama (Galama Sustainable Solutions) & L.F.A. Mathu 2023.

Verkenning koolstofvastlegging en broeikasgas-emissiereductie in veenweiden door grasland- en slootbeheer. A&W / Galama Sustainable Solutions / Witteveen + Bos. A&W-rapport 22-303. Altenburg & Wymenga ecologisch onderzoek, Feanwâlden

## Opdrachtgever

### Provincie Fryslân

Tweebaksmarkt 52  
8911 KZ Leeuwarden  
Telefoon 058 29 25 925

## Uitvoerders

**Altenburg & Wymenga  
ecologisch onderzoek bv**  
Suderwei 2  
9269 TZ Feanwâlden  
Science Park 400, Matrix II,  
k1.08/1.09  
1098 XH Amsterdam  
Telefoon 0511 47 47 64  
info@altwym.nl  
[www.altwym.nl](http://www.altwym.nl)

**Witteveen + Bos**  
Postbus 233  
7400 AE Deventer  
Telefoon 0570 69 79 11  
info@witteveenbos.nl  
[www.witteveen.bos.nl](http://www.witteveen.bos.nl)

**Galama Sustainable Solutions**  
Hoptilsterdyk 38  
9027 BE Hilaard  
Telefoon 06 22 33 50 89  
info@galamasolutions.com  
[www.galamasolutions.com](http://www.galamasolutions.com)

© Altenburg & Wymenga ecologisch onderzoek bv. Overname van gegevens uit dit rapport is toegestaan met bronvermelding.

---

**Projectnummer**  
22-303

**Projectleider**  
E.B. Oosterveld

**Status**  
Eindrapport

---

**Autorisatie**  
M. Koopmans

**Paraaf**



**Datum**  
29 augustus 2023

---

**Kwaliteitscontrole**  
E. Wymenga

**Paraaf**



# Inhoud

---

## Samenvatting

<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Koolstofhuishouding in minerale en veenbodems</b>	<b>2</b>
2.1	Inleiding	2
2.2	Bodems, organische stofgehalte en koolstof	3
2.3	Koolstofhuishouding van bodems	3
<b>3</b>	<b>Emissiereductie en koolstofvastlegging door graslandbeheer</b>	<b>7</b>
3.1	Inleiding	7
3.2	Scheuren en leeftijd grasland	7
3.3	Beweiden en maaien	8
3.4	Bemesting	10
3.5	Toepasbaarheid maatregelen in veenweiden	11
<b>4</b>	<b>Betekenis regeneratieve landbouw voor C-vastlegging</b>	<b>17</b>
4.1	Wat is regeneratieve landbouw?	17
4.2	Emissiereductie en C-vastlegging door regeneratieve landbouw	17
<b>5</b>	<b>Emissiereductie en C-vastlegging door slootbeheer</b>	<b>19</b>
5.1	Inleiding	19
5.2	Proces van broeikasgasemissies uit en rondom sloten	19
5.3	Beïnvloeden van broeikasgasemissie via de waterkwaliteit	22
5.4	Beïnvloeden van broeikasgasemissie door slootschonen	24
5.5	Broeikasgasemissie door grondwerkzaamheden	25
<b>6</b>	<b>Kennishiaten en onzekerheden</b>	<b>26</b>
6.1	Graslanden in veenweiden	26
6.2	Sloten in veenweiden	26
<b>7</b>	<b>Literatuur</b>	<b>27</b>

## Dankwoord

*We danken een groep van experts voor toetsing van onze eerste bevindingen. De experts waren M. Hanegraaf (WUR), J. van den Akker (WUR), N. Hoekstra (LBI), T. Troost (Deltares), C. Fritz (RUU). We hebben dankbaar gebruik gemaakt van hun commentaren en aanvullingen. Ook vanuit het Innovatieteam Feangreide (M. Gosen, N. Hartong) en het Coördinatieteam ADD zijn welkome opmerkingen en aanscherpingen geleverd. Alle interpretaties en conclusies in dit rapport zijn voor rekening van de auteurs.*

## Leeswijzer

Het voorliggende rapport is bedoeld voor deelnemers in het gebiedsproces ADD en andere betrokkenen in het Friese veenweidegebied. Het biedt een overzicht van mogelijke maatregelen – anders dan waterpeilverhoging – voor koolstofvastlegging en CO<sub>2</sub>-emissiereductie via grasland- en bodembeheer. De maatregelen zijn uitsluitend vanuit dat perspectief bekeken.

De koolstofhuishouding in bodems en daarop inwerkende processen is een complexe materie. Het rapport bevat dan ook veel gedetailleerde informatie. Om die reden is een uitgebreide samenvatting opgenomen, waarin de belangrijkste bevindingen op een rij zijn gezet.

## Samenvatting

---

Naast peilverhoging in veenweiden is het zinvol ook andere mogelijkheden te bekijken om koolstof vast te leggen of de emissie van broeikasgassen te reduceren. Daarbij wordt vooral gedacht aan het beheer van bodem, graslanden en sloten. Of dergelijke maatregelen perspectief hebben, kan pas goed beoordeeld worden wanneer duidelijk is wat de bijdrage van dergelijke maatregelen zou kunnen zijn. Dat was de aanleiding om de onderhavige verkenning uit te voeren: wat is de stand van kennis in de wetenschappelijke en grijze literatuur over de reductie van broeikasgasemissie en koolstof (C-) vastlegging in veenweidegebieden door middel van maatregelen in grasland, bodem en sloten, en wat zijn de onzekerheden en kennishiaten.

De verkenning richt zich op maatregelen anders dan waterpeilverhoging. De maatregelen zijn in deze verkenning uitsluitend bekeken vanuit het perspectief van koolstofvastlegging en emissiereductie. Benadrukt moet worden dat grasland- en bodemmaatregelen ook andere doelen kunnen dienen zoals versterking van de bodemvitaliteit en/of biodiversiteit.

### **Koolstofhuishouding in minerale en veenbodems**

Van oudsher is de bodem voor een boer het kapitaal van de onderneming. Dat heeft voor een belangrijk deel te maken met de productiviteit van de bodem die samenhangt met de aard van de bodem (type, structuur), gezondheid van het bodemecosysteem, de waterhuishouding en de bemesting. Het organische stofgehalte in de bovenste bodemlaag speelt daarbij een grote rol. Organische stof bestaat voor de helft of meer uit koolstof. De koolstofhuishouding van landbouwbodems is complex en recent aan veel nieuwe inzichten onderhevig. Er blijken essentiële verschillen te zijn tussen minerale en organische bodems. De koolstofkringloop kent een korte cyclus in de bovengrond en trage cyclus met vastlegging van C in de ondergrond. Met het oog op maatregelen in grasland voor C-vastlegging en broeikasgasemissiereductie is het belangrijk daar rekening mee te houden.

Minerale bodems bestaan uit klei of zand, en hebben een laag teelaarde met meer of minder organische stof. In de Friese veenweiden is vooral aan de westkant sprake van een mineraal kleidek tot 40 cm dik (deels ook de teelaardelaag). In de toplaag van grasland is gemiddeld 50% van het organische koolstof afkomstig van micro-organismen, vooral schimmels. Voor het vastleggen van een deel van de organische stof is de wisselwerking tussen wortels en micro-organismen daarom essentieel.

Op minerale gronden worden vaak (bodem)maatregelen getroffen om de activiteit van micro-organismen te stimuleren en daarmee de bodemstructuur en de afbraak van organische stof. Dat kan zorgen voor een grotere productie van biomassa doordat meer voedingsstoffen beschikbaar komen voor plantengroei. Als dat leidt tot meer wortelbiomassa, en vervolgens meer rhizodepositie (aanvoer van C uit de wortels), kan dat leiden tot vastlegging van organische koolstof. Een deel van deze organische stof wordt in de wisselwerking tussen plantenwortels en micro-organismen omgezet tot mineraal-gebonden organische stof. Een deel daarvan zakt uit naar de ondergrond (>30 cm) waar het voor lange tijd kan worden vastgelegd. Regenwormen kunnen materiaal ook weer naar boven transporteren.

Veengrond bestaat vrij geheel uit organische stof, hoewel vaak kleideeltjes aanwezig zijn. Organische bodems zijn ontstaan door ophoping van biomassa, in veengronden vaak onder zeer natte omstandigheden (zuurstofloos) in een ver verleden. Veenbodems hebben al een maximale hoeveelheid aan organische stof. Elke 'verstoring' van de veenbodem – zoals ontwatering, bodemberoering, e.d. - leidt tot het meer toegankelijk maken van de bodem voor microbiële

activiteit, en daarmee tot afbraak van organische stof en vervolgens emissie van CO<sub>2</sub>. Veenbodems zijn daarmee niet geschikt voor extra C-opname in de grond.

Vanuit de invalshoek van alleen klimaat is de aandacht daarom vooral gericht zijn op het behoud van organisch koolstof (dus zoveel mogelijk voorkomen van afbraak). Maatregelen die zijn gericht op stimulering van bodemleven, structuurverbetering en beluchting in de bovenste grondlaag, werken in veenbodems - vanuit het oogpunt van alleen klimaat<sup>1</sup> – niet positief voor de veenafbraak. Immers, veenbodems hebben voor hun voortbestaan juist belang bij een slechte beluchting en zoveel mogelijk remming van micro-organismen. En dat gaat het meest effectief met behulp van een hoog waterpeil. Daarbij geldt de nuancering, dat voor ontwaterde veengronden met een kleidek structuurverbetering mogelijk wel leidt tot een betere waterinfiltratie, en beluchting voor een grotere berging (groter poriënvolume), en daarmee tot het minder uitzakken van de grondwaterstand. Hoe die balans precies uitpakt is nog niet duidelijk.

### **Emissiereductie en koolstofvastlegging door graslandbeheer**

Voor minerale gronden worden in de literatuur verschillende maatregelen beschreven die bijdragen aan emissiereductie en koolstofvastlegging. Deze worden hier benoemd, en aangegeven wordt in hoeverre deze ook toepasbaar zijn voor veengronden.

Leeftijd grasland verhogen. Als belangrijkste maatregel voor C-vastlegging (op minerale bodems) komt naar voren dat graslandbodems niet gescheurd, gekeerd of anderszins verstoord moeten worden. Hoe ouder het grasland, hoe meer koolstof het bevat. De C-vastlegging in grasland is eindig en het potentieel is o.a. afhankelijk van het silt- en kleigehalte en de mate van uitputting van de bodem (hoe lager het organische stofgehalte, hoe meer C-vastlegging per tijdseenheid).

Beweiding versus maaien. Er lijkt een positief effect van beweiden op de C-vastlegging in minerale bodems in vergelijking tot maaien, maar dat effect wordt niet altijd gevonden. Er zijn ook grote onderlinge verschillen binnen beweidingssystemen en binnen vormen van maaibeheer. Over het algemeen stimuleert beweiding de groei van meer diep wortelende soorten en de wortelgroei, belangrijke mechanismen voor C-vastlegging in minerale bodems.

Bemesting. Door een onvolledig begrip van het effect van bemesting op organische stof en N<sub>2</sub>O-vorming kan geen eenduidig beeld gegeven worden over effecten. Mest waarbij stikstof organisch gebonden is, en waaruit stikstof langzaam vrijkomt en de stikstofbenutting hoog is (vaste mest), lijkt voor zowel behoud van organische stof als N<sub>2</sub>O-emissie de beste resultaten te leveren. Wat ten allen tijde van belang lijkt, is dat de mate van bemesting in balans moet zijn met de capaciteit van de grond om de nutriënten op te nemen in biomassa van planten en bodemleven. Overbemesting werkt afbraak van organisch stof en N<sub>2</sub>O-emissie in de hand.

---

<sup>1</sup> Als deze maatregelen leiden tot een hogere biomassa-productie door de vegetatie en deze extra productie wordt gebruikt door het bodemleven dan wordt de extra biologische activiteit gevoed door een hogere plantproductie en hoeft geen extra veen te worden gebruikt. Het effect van stimulering en structuurverbetering op veengronden zal daarom soms positief, soms negatief zijn en per jaar en seizoen verschillen. Overigens kunnen dergelijke maatregelen vanuit het oogpunt van bodemvitaliteit en biodiversiteit positieve resultaten leveren, bijv. in veenweiden met een kleidek en in vergelijking met het reguliere agrarisch gebruik waar dergelijke maatregelen niet altijd worden genomen.

### **Toepasbaarheid maatregelen in veenweiden**

Ontwatering en bodembeheer, ook in de vorm van beheer als grasland, leiden op veenbodems per saldo tot C-afbraak en broeikasgasemissie. Om afbraak van veen te voorkomen en daarmee emissies van broeikasgassen, is vernatting het meest effectief. Reden waarom in het Veenweideprogramma wordt ingezet op peilverhoging. In het veenweidegebied wordt evenwel geboerd, en de realiteit is dat dat alleen mét ontwatering kan. Hoewel maatregelen die ingrijpen in het water- en bodemsysteem (algemeen of vanuit de regeneratieve landbouw) vanuit het oogpunt van alleen klimaat op veengronden derhalve niet bijdragen aan C-opslag is het toch belangrijk deze te bekijken. Ze kunnen ten opzichte van het reguliere agrarisch gebruik of op veengronden met een mineraal kleidek mogelijk wel nuttig zijn, ook voor andere doelen.

Hierna worden enkele relevante maatregelen beschouwd voor veengronden. Zoals aangegeven is de C-huishouding van organische veenbodems zo verschillend van minerale bodems, dat effecten van maatregelen op minerale bodems niet vertaald kunnen worden naar veenbodems. Er is op dit vlak weinig gerichte kennis over veenbodems, vooral in hoeverre deze maatregelen effectief zijn bij een mineraal kleidek op het veen. Het lopend onderzoek (NOBV 2023, Integrale bodemverbetering Feangreiden) naar emissiereductie en koolstofvastlegging dient met dat gegeven te worden voortgezet (en dat wordt ook gedaan).

- Uit de onderhavige verkenning komt naar voren dat naast peilverhoging in veenweiden het behoud van permanent grasland (geen kerende grondbewerking, oud laten worden) nog het meest kan bijdragen aan behoud van organisch koolstof in veengrond;
- Effecten van beweiden en maaien op CO<sub>2</sub>-emissie en C-vastlegging zijn op veengronden niet eenduidig. Beweiding kan mogelijk wel indirect bijdragen aan minder emissie door behoud van de zode en een hogere draagkracht. Daardoor is er minder noodzaak tot peilverlaging, graslandvernieuwing en verstoring van de bodem. Vertrapping onder natte omstandigheden dient te worden voorkomen;
- Op veengrond lijkt een hogere bemesting soms tot minder broeikasgassen te leiden en soms wordt geen verschil gevonden. Per saldo is steeds sprake van CO<sub>2</sub>-emissie en geen vastlegging. Over het algemeen geldt dat de kans op koolstofafbraak toeneemt, naarmate er meer stikstof wordt toegevoegd aan koolstofrijke bodems. Als langzaam verterende mestsoort met een hoog aandeel organisch gebonden stikstof, heeft vaste mest de voorkeur boven andere mestsoorten;
- Bij het ontwikkelen van kruidenrijk grasland op veengrond via inzaai is er een voorkeur voor ondiep wortelende kruiden. Met diep wortelende kruiden wordt mogelijk de veenafbraak gestimuleerd. Wel kan er een positief effect zijn op de gevoeligheid voor uitdroging, omdat een deel van het water uit een diepere laag wordt gehaald waardoor de bovengrond vochtiger blijft en regenwater beter blijft hangen. Meer kennis is nodig;
- Voor het veenweidegebied lijkt onderwerpen van biochar (door verhitting vastgelegde koolstof in biomassa) of organisch materiaal geen voor de hand liggende manier om het koolstofgehalte in de bodem te behouden of te vergroten. Door verstoring van de bodem zullen veendeeltjes worden verteerd en kan oude, stabiele os worden afgebroken;
- Inwerken van klei in een veenbodem leidt tot bodemverstoring en kan tot afbraak van os leiden. *Inspoelen* van klei in veengrond heeft echter mogelijk wel een positief effect op de emissiereductie van CO<sub>2</sub> omdat het de bodem niet verstoort, de beluchting van het veen



vermindert en daarmee de afbraak van organische stof. Niet iedere soort klei heeft dat effect. Het onderzoek daarnaar loopt nog.

### **Emissiereductie en C-vastlegging door slootbeheer**

Om de broeikasgasemissie in het veenweidegebied te verlagen kan, naast het verhogen van het grondwaterpeil, ook gedacht worden aan maatregelen rond sloten en overige wateren. De potentiële emissie uit sloten per m<sup>2</sup> is hoog in vergelijking met emissie uit land. Echter, omdat de oppervlakte aan sloten in een veenweidegebied aanzienlijk lager is dan aan land is de totale emissie uit sloten veel lager. De emissiewaarden van sloten zijn variabel. Een reeks eerste metingen in sloten in ADD wijzen op een niet heel hoge uitstoot, maar de informatie is tot nog toe zeer beperkt.

Broeikasgasemissie uit water ontstaat door afbraak van organisch materiaal. Als er zuurstof in het water aanwezig is wordt het organisch materiaal aerob afgebroken (mineralisatie) en ontstaat er voornamelijk CO<sub>2</sub>. Als er geen zuurstof aanwezig is dan wordt het organisch materiaal anaerob afgebroken en ontstaat er voornamelijk methaan (CH<sub>4</sub>) en lachgas (N<sub>2</sub>O). Het opborrelen (*ebullitie*) van CH<sub>4</sub> heeft een groot aandeel in de totale broeikasgasemissie uit sloten. De N<sub>2</sub>O-emissies zijn meestal laag.

De waterkwaliteit is een sturende factor voor de broeikasgasemissies uit water. Voedselrijke watersystemen hebben meestal veel organisch materiaal om af te breken, en zijn door een hoge afbraak ook vaker zuurstofarm. Over het algemeen geldt daarom dat bij een waterkwaliteit met veel nutriënten meer broeikasgas in de vorm van methaan wordt uitgestoten. Bij hogere nutriëntbelastingen zijn de emissies hoger dan bij lagere nutriëntbelastingen. Het verbeteren van de waterkwaliteit draagt daarom bij aan lagere emissies uit sloten, én aan de biodiversiteit.

De waterkwaliteit kan op meerdere manieren gestuurd worden. Het verhogen van het peil (al dan niet met de HAKLAM-methode) leidt tot een grotere waterbeweging in de sloot (water aan- en afvoer), en kan zo tot een hogere nutriëntbelasting leiden en daarmee de waterkwaliteit beïnvloeden. Aanpassing van het graslandgebruik (bv. onbemeste bufferstroken, geen kerende grondbewerking) leidt tot sterke verlaging van de nutriëntbelastingen naar omliggende watergangen. Er is nog weinig onderzoek gedaan naar de effecten van slootbeheer, zoals verschillende manieren van hekkelen en baggeren, op de emissies uit sloten. Het is wel duidelijk, dat het belangrijk is om *run off* en uitspoeling van nutriënten uit hekkelmateriaal en bagger naar de sloot te voorkomen. Stabiele taluds (flauw, met begroeiing) en onbemeste slootranden kunnen daarbij helpen. Ook de wijze waarop hekkelspecie wordt behandeld speelt een rol. Verspreiding over het perceel na indroging lijkt de beste optie, zodat het niet meer in de sloot terecht komt.

Over het algemeen zijn er nog weinig kwantitatieve gegevens beschikbaar over de emissies uit sloten en de effecten van maatregelen. Nader onderzoek is nodig om de processen en maatregelen waar mogelijk te kwantificeren.

### **Belang van een LCA en volledig overzicht**

De onzekerheden en nuances in deze verkenning laten zien, dat voor de inrichting van het watersysteem en het treffen van maatregelen in veenweiden (graslanden, bodems) een goed inzicht en overzicht nodig is van de broeikasgasemissie en C-vastlegging per maatregel en op het niveau van het gebied. Het is daarom van belang dat er een volledig beeld bestaat van de effecten op milieu, water, klimaat en biodiversiteit. Daarvoor is een LCA (Levenscyclusanalyse) per maatregel gewenst, zodat ze onderling vergelijkbaar zijn en de klimaatwinst over het geheel van de cyclus (aanleg en periode van implementatie) kan worden beoordeeld.



# 1 Inleiding

---

## Aanleiding

Het gebied Aldeboarn De Deelen (ADD) is ontwikkelgebied in het kader van het Friese Veenweideprogramma 2021-2030 (VP21-30). In het kader van gebiedsproces in ADD wordt gewerkt aan een gebiedsvisie en op basis daarvan aan meer gedetailleerde gebiedsplannen. In het Veenweide-programma 2021-2030 (VP21-30) zijn vier hoofddoelen opgenomen, nl. 1) een toekomstbestendige landbouw, 2) een klimaatbestendige inrichting van de waterhuishouding, 3) vermindering van effecten van bodemdaling, en 4) vermindering van de uitstoot van CO<sub>2</sub>. Om de twee laatstgenoemde doelen te bereiken wordt in het VP21-30 ingezet op een peilverhoging, waarbij de drooglegging op gebiedsniveau uitkomt op gemiddeld 40 cm -mv. Die peilverhoging is geen doel op zich maar moet leiden tot de beoogde reductie van CO<sub>2</sub> emissies en verminderde bodemdaling.

In het kader van de uitwerking van de gebiedsplannen ADD is in het gebiedsproces geregeld besproken dat het zinvol is om – naast peilverhoging - ook naar andere maatregelen te kijken om koolstof vast te leggen of de emissie te reduceren. Bij andere maatregelen wordt vooral gedacht aan het beheer van bodem, grasland en sloten. Tot nog toe is daar in het gebiedsproces steeds in kwalitatieve zin over gesproken, als mogelijk perspectiefvol. Of beheermaatregelen in grasland en sloten perspectief hebben, kan evenwel pas goed beoordeeld worden wanneer duidelijk is wat de bijdrage van dergelijke maatregelen zou kunnen zijn.

Om hierover meer helderheid te krijgen heeft de Provincie Fryslân opdracht gegeven aan Altenburg & Wymenga ecologisch onderzoek (A&W) om de kennis op dit punt nader in kaart te brengen. A&W heeft deze vraag nader ingevuld door een samenwerking met Galama Sustainable Solutions (regeneratieve landbouw) en Witteveen+Bos (broeikasgasemissies uit wateren).

## Doel en opzet

Het doel van deze verkenning is het in kaart brengen wat in de wetenschappelijke en grijze literatuur bekend is over de reductie van broeikasgasemissie en koolstof (C-) vastlegging in veenweidegebieden door middel van beheermaatregelen in grasland en sloten, en het benoemen van onzekerheden en kennishiaten.

De verkenning is beperkt tot beheermaatregelen anders dan waterpeilverhoging, en focust op het beheer van grasland, graslandbodems en sloten. De maatregelen worden hier uitsluitend bekeken vanuit het perspectief van koolstofvastlegging of emissiereductie. Benadrukt moet worden dat deze maatregelen ook relevant kunnen zijn voor andere doelen zoals bijvoorbeeld versterking van de bodemvitaliteit (bv. Deru 2021) of biodiversiteit. We gaan hier niet in op waterpeilverhoging en de effecten op broeikasgasemissie. Daarvoor verwijzen we naar het uitvoerige (lopende) onderzoek van het Nationaal Onderzoeksprogramma Broeikasgassen Veenweiden (NOBV 2023)<sup>2</sup>. Vanwege de complexiteit van de materie gaan we in het volgende hoofdstuk (2) eerst in op de koolstofhuishouding in bodems, en de verschillen tussen minerale en organische bodems. Vervolgens beschrijven we in hoofdstuk 3 mogelijke beheermaatregelen op graslandpercelen, met in hoofdstuk 4 een nadere blik op wat maatregelen uit de regeneratieve landbouw daaraan toe kan voegen. In hoofdstuk 5 wordt ingegaan op slootbeheer. Het rapport sluit af met kennishiaten in hoofdstuk 6.

---

<sup>2</sup> <https://www.nobveenweiden.nl/over-nobv/>

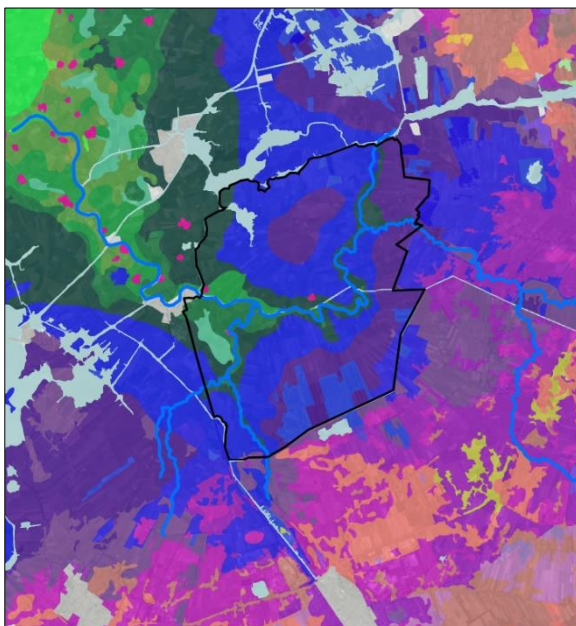
## 2 Koolstofhuishouding in minerale en veenbodems

### 2.1 Inleiding

Op voorhand was bekend dat het meeste onderzoek op het vlak van koolstof-vastlegging (C-vastlegging) in grasland wordt gedaan aan organische stof in minerale bodems (zand, klei) (o.a. Jones & Donnelly 2004, Soussana *et al.* 2004, 2010, Schepens *et al.* 2022). Dit omdat mineralisatie van organische stof door grondbewerking op minerale bodems een belangrijke bron van CO<sub>2</sub>-emissie is. En ook omdat juist op minerale gronden het gehalte aan organische stof vaak een belangrijk aandachtspunt is. Voor veenweiden heeft Deru (2021) duidelijk gemaakt hoe – naast (bodem)hydrologie - belangrijk ook daar organische stof is voor het leveren van ecosysteemdiensten. Broeikasgasemissiereductie op veengrond wordt evenwel voornamelijk bestudeerd in relatie tot waterpeilverhoging (NOBV 2023). Deze verkenning is gericht op mogelijkheden van emissiereductie en C-vastlegging in veenweidebodems door andere maatregelen, nl. het gebruik en beheer van grasland, bodem en sloten.

Bij het ontwikkelen van maatregelen voor de klimaatopgave om CO<sub>2</sub>-emissie te reduceren en/of meer koolstof vast te leggen in landbouwgebieden draait het om de kennis over hoe koolstof zich gedraagt in de bodem. Recent zijn er veel ontwikkelingen in dit vakgebied, samenhangend met de complexiteit van de materie en de urgentie om maatregelen te nemen. Een belangrijke vraag vanuit de veenweidenproblematiek daarbij is, of bevindingen van minerale bodems kunnen worden vertaald naar veenbodems. Daarom gaan we in dit hoofdstuk eerst in op verschillen in de koolstofhuishouding van minerale bodems en veenbodems. Dat betreft een korte samenvatting van een uitgebreide review en analyse die voor dit doel door Galama (2023) is uitgevoerd. Daarbij is veel aandacht besteed aan kennis uit de regeneratieve landbouw, omdat die vaak wordt benoemd in relatie tot bodemverbetering en klimaatmaatregelen.

Deze studie is uitgevoerd in het kader van het gebiedsproces ADD: een veenweidegebied met vooral klei-op-veen gronden, en voor een klein deel kleigronden. Voor een goed referentiebeeld is bijgaand een bodemkaart opgenomen (figuur 2.1).



*Figuur 2.1. Bodemkaart van ADD en omgeving. De (voormalige) stroomdraad van de Boarn en van haar zijrivieren is in blauw aangegeven. Groen – kleibodems, blauw-paars – veenbodems, oranje-geel zandige bodems. De bodems in ADD bestaan – van oost naar west - vooral uit koopveen-, waardveen- en weideveengronden. Rond de stroomdraad van de Boarn ligt klei-op-veen, met aan de westkant – monding vroegere Middellzee – een dikke kleilaag (vaaggronden).*

## 2.2 Bodems, organische stofgehalte en koolstof

Van oudsher is de bodem voor een boer het kapitaal van de onderneming. Dat heeft voor een belangrijk deel te maken met de productiviteit van de bodem, die samenhangt met de aard van de bodem, gezondheid van het bodemecosysteem en ook bemesting (Deru 2021). Het organische stofgehalte in de bovenste bodemlaag (teelaarde) speelt daarbij een belangrijke rol. Kennis daarover hangt sterk samen met de kennis over de koolstofhuishouding. Vandaag de dag bekijken we dat kennisveld ook met het oog op de klimaatopgaven, in het bijzonder voor wat betreft het verminderen van de emissie van broeikasgassen en het vastleggen van koolstof. Galama (2023) laat in zijn review en analyse zien, dat dat kennisveld volop in beweging is, en er recent veel nieuwe kennis is ontwikkeld.

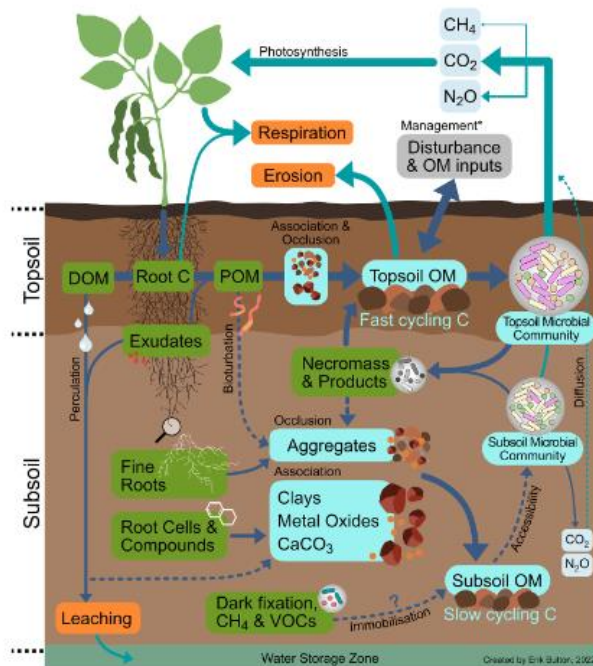
Op hoofdlijnen is er een onderscheid te maken tussen minerale en organische bodems. Minerale bodems zijn ontstaan door vertering van gesteenten. Organische stof is gehecht aan bodemdeeltjes of bevindt zich vrij tussen de bodemdeeltjes al dan niet vastgelegd in organismen en planten. Organische bodems zijn ontstaan door ophoping van biomassa. Organische stof vormt (een onderdeel van) de matrix van de bodem. Per definitie hebben minerale bodems een lager organische stofgehalte dan organische bodems. Veenweiden zijn organische bodems, in Fryslân vaak wel met een meer of minder dik mineraal kleidek, waar door bemesting en bodemprocessen (waaronder overstroming en activiteiten van bodemdieren) organische stof in is opgeslagen (en als zodanig de laag teelaarde vormend).

In artikelen en rapportages wordt zowel over organische stofgehalte van de bodem gesproken als over het organische *koolstof*gehalte. Voor veel bodemmonsters was het standaard om het organische stofgehalte van de bodem te bepalen, maar niet de hoeveelheid koolstof, de voornaamste component van organische stof. In de meeste internationale studies wordt aangenomen dat organische stof voor ca. 58% uit koolstof bestaat en dat het organische koolstofgehalte berekend kan worden met de formule: SOC (in g C/kg grond) = 0,58 x SOM. **SOC** staat daarbij voor *soil organic carbon* en **SOM** voor *soil organic matter*. In Nederland wordt vaak met een koolstofgehalte van 50% gerekend. Door mineralisatie van organische stof in de bodem en transformerende processen is de koolstoffractie van SOM niet stabiel. In de praktijk varieert het koolstofgehalte tussen de 40-65%. In Nederland is het gemiddeld gehalte 53%, wat door Eurofins Agro bepaald is op basis van meer dan 100.000 grondmonsters uit landbouwbodems uit 2017 en 2018 (zie Galama 2023).

Voorafgaand aan uitleg in de volgende paragraaf, is nog is enige uitleg van termen nodig. Om vorming en afbraakprocessen (dynamica) van SOM te begrijpen wordt organisch materiaal in de bodem niet als een homogeen geheel bekeken, maar opgedeeld in twee fracties. Een fractie van *i) delen organische materiaal (POM = particulate organic matter) en een fractie van ii) aan mineralen gehecht organisch materiaal (MAOM = mineral-associated organic matter)*. Dit omdat deze vormen van SOM fundamenteel verschillen in opbouw, functionaliteit en persistentie en verschillend reageren op beheer. Veengronden bestaan met name uit POM maar zullen ook een deel MAOM hebben.

## 2.3 Koolstofhuishouding van bodems

De koolstofkringloop in de bodem is complex en onderhevig aan interne en externe factoren. Ter illustratie hebben we een figuur opgenomen van de koolstofroutes in de boven- en ondergrond (figuur 2.2), zoals die uit de doeken is gedaan door Button *et al.* (2022). Zie voor meer informatie daaromtrent Galama (2023).



Figuur 2.2. Illustratie van de koolstofroutes in de bovengrond en ondergrond; figuur overgenomen uit Button et al. (2022).

De belangrijkste koolstofbronnen zijn weergegeven in groen, de belangrijkste aspecten die van invloed zijn op de stabiliteit van koolstof in licht blauw, landbouw praktijken in grijs, en verliezen in oranje.

DOM = dissolved organic matter (opgeloste organische stof), POM = particulate organic matter (organische stof deeltjes). Gestippelde pijlen kunnen plaatsvinden onder invloed van de omgevingscondities. De hoeveelheid verstoring en organische stof-input vanuit de landbouw heeft grote invloed op het organische stofgehalte in de bovenste grondlaag.

Voor er meer in detail wordt ingegaan op de relevante processen, eerst enkele algemene inzichten over de C-huishouding in bodems. Waar eerder werd aangenomen dat er door 'omstandigheden' een stabiele en persistente vorm van organische koolstof in de bodem ontstond (i.e. humus), blijkt uit onderzoek dat niet de persistentie van de koolstof ervoor zorgt dat koolstof niet of traag wordt afgebroken, maar het ontbreken van (actieve) micro-organismen en de juiste condities om organische stof af te breken. In de toplaag van de bodem is de input van organische-stof het grootst, verloopt de koolstofcyclus relatief snel en is de verblijftijd van koolstof relatief kort (jaren). Aanwezig koolstof dient hier als energiebron voor in de grond levende (micro)organismen, schimmels en planten. Deze relatief snel verterende organische stof (dat veelal gekwalificeerd wordt als POM) vormt een deel van de energievoorziening van de gehele voedselpiramide, inclusief weidevogels die sterk afhankelijk zijn van een rijk bodemleven.

Niet al de organische stof wordt verteerd of opgenomen door organismen en planten. Een deel van het organisch materiaal wordt via verschillende routes naar de diepere ondergrond (>30 cm) verplaatst. Over het algemeen geldt: hoe dieper in de ondergrond, hoe stabielere de koolstoffractie is, maar voor langdurige C-vastlegging in minerale bodems is stabilisatie van organische koolstof cruciaal. Een deel van de diepere C wordt door bijvoorbeeld wormen weer naar boven gebracht, er ontstaat een evenwicht tussen wat naar beneden gaat en wat weer omhoog komt. De meest stabiele koolstof bevindt zich op plekken waar micro-organismen niet kunnen komen, of waar ze niet erg actief kunnen zijn door een gebrek aan energie of andere belemmerende condities, en op locaties waar de organische stof chemisch gestabiliseerd wordt. Veelal wordt organische stof eerst grotendeels afgebroken, waarna de organische restfracties of 'producten van microbiologische vertering' door ad/absorptieprocessen worden opgenomen en gebonden in de poriën van minerale bodemdeeltjes (m.n. silt en kleideeltjes). In deze poriën wordt aan de voorwaarden voor stabilisatie voldaan (i.e. onbereikbaar voor micro-organismen). Een fractie van de POM wordt in de grond dus omgezet in MAOM. Omdat in de ondergrond (>30 cm) veel minder verstoring optreedt, kan het mineraal gebonden organische koolstof in diepere bodemlagen duizenden jaren aanwezig blijven. Dit is aangetoond in vele wetenschappelijke studies (zie bijv. het reviewartikel van Soussana et al. 2010).

### Mechanisme van organische stofvorming in grasland

Gezonde planten leggen meer koolstof vast tijdens fotosynthese dan minder gezonde planten. Een deel van dit vastgelegde koolstof komt in het bovengrondse deel van de plant. Voor vorming van organische stof (os) is het echter veel belangrijker dat juist ook het ondergrondse deel (wortels) wordt vergroot en dat de hoeveelheid wortellexudaten (uitscheidingen uit de wortels) toeneemt. Dit zogenaamde vloeibare koolstof is bij uitstek goed basismateriaal voor stabiele os (i.e. MAOM, de meest stabiele vorm van os). Kleine stukjes organische stof en wortellexudaten zijn goed materiaal voor binding aan klei en silt. De input uit het wortelsysteem in de bodem kan worden opgedeeld in 1) biomassa afkomstig van de wortels zelf, en 2) organisch stof dat via rhizodepositie (aanvoer vanuit de wortels) in de bodem terecht komt. Rhizodepositie omvat wortellexudaten, secreties, wortelhaartjes en organisch materiaal uit de wisselwerking met schimmels.

Uit werk van Villarino *et al.* (2021) blijkt dat MAOM-formatie in de bodem (% van de C-input die werd omgezet in MAOM, de stabiele vorm van os) voor 46% voor rekening komt van de rhizodepositie (aanvoer van C vanuit de wortels). Dit aandeel is veel hoger dan door wortelmateriaal zelf (9%) of bovengrondse plantendelen (7%). Tegelijkertijd zorgde rhizodepositie voor verminderde POM-formatie, waarschijnlijk doordat het de afbraak van nieuwe POM stimuleert. Wortelbiomassa resulteerde juist in de hoogste mate van POM-formatie (19%). Het wortelstelsel als geheel speelt dus een belangrijke rol in de opbouw van zowel POM als de omzetting hiervan naar (het stabielere) MAOM<sup>3</sup>. Juist de wisselwerking tussen wortels en micro-organismen is daarbij belangrijk: in de toplaag van grasland is gemiddeld 50% van het organische koolstof afkomstig van micro-organismen, m.n. schimmels. Voor vastlegging van een deel van de os is dus een goed werkende wisselwerking tussen wortels en micro-organismen essentieel.

In de literatuur worden nog de volgende mechanismen genoemd die samenhangen met C-vastlegging in de wisselwerking tussen plantenwortels en micro-organismen:

- Toename van de wortelbiomassa en afsterven van fijne wortels (Bardgett *et al.* 1998, Toal *et al.* 2000, Soussana *et al.* 2010, Acharya *et al.* 2012),
- Toename bodemmicroben door meer fijne wortels (Pucheta *et al.* 2004). Vastlegging van C in de microben (dood en levend) overtreft C-verlies door afbraakactiviteiten van de microben,
- Omzetting van organisch materiaal in stabiele organische koolstof door regenwormen (review in Soussana *et al.* 2010),
- Aanvoer van verse organische stof uit mest, compost (Franzluebbers & Stuedemann 2003). Dit leidt tot meer wortelgroei, maar kan ook tot extra afbraak van os leiden (het priming-effect, Galama 2023). Onbekend is uit die studies hoe de C-balans uitpakt.

### C-vastlegging in minerale en in veenbodems

In minerale bodems is vorming van MAOM van belang voor langdurige koolstofopslag in de bodem. Tegelijkertijd is voldoende POM-input in de bodem, en afbraak hiervan, nodig om het bodemleven van energie te voorzien en een rijke biodiversiteit te ondersteunen. Voor de vorming van MAOM vervullen microbiële processen (activiteit van met name bacteriën en schimmels) een sleutelrol (zie hiervoor). De absorptie van organische koolstof aan silt- en kleidelen (fractie < 63 µm) beperkt de toegankelijkheid voor micro-organismen tot de organische stof, en leidt dus tot minder afbraak. Stimulering van dit complexvormingsproces is daarom essentieel voor langdurige C-opslag. De aanwezigheid van klei en silt blijkt de meest bepalende factor in de maximale C-opslagcapaciteit van minerale bodems.

<sup>3</sup> Ook zijn er nog veel vragen: hoe snel bijvoorbeeld is de omzetting van POM in CO<sub>2</sub>? Wordt elk jaar alles wat is gevormd omgezet?

In minerale bodems kan verzadiging met MAOM optreden, afhankelijk van het gehalte aan klei- en siltdeeltjes. Na verzadiging kan alleen meer koolstof worden vastgehouden in de vorm van POM. POM kent in minerale bodems over het algemeen een relatief korte levensduur (~jaren). Hoe groter het verschil tussen de maximum hoeveelheid koolstof die een minerale bodem kan bevatten, en het huidige koolstofgehalte (zoals in veel intensief gebruikte bodems het geval is), hoe groter het potentieel voor C-vastlegging en hoe hoger de snelheid kan zijn waarmee de koolstofconcentratie toeneemt.

Pure veengrond bestaat louter uit POM, deeltjes van puur os. Vaak zijn ook klei en siltdeeltjes aanwezig en daarmee waarschijnlijk ook MAOM. Verzadiging met POM in pure veengronden kan niet gebeuren. Goed functionerende (volledig natte) veengronden kunnen een 'oneindige hoeveelheid POM opslaan' en de POM voorraad zal worden vergroot zolang de POM-input maar groter is dan de afbraaksnelheid van het veen<sup>4</sup>. Daarom moet - vanuit de invalshoek van alleen klimaat-maatregelen - het beheer op veenbodems vooral gericht zijn op het behoud van POM. Maatregelen die verkend worden in het kader van het project "Integrale bodemverbetering Feangreiden" en betrekking hebben op klei IN veen zijn mogelijk interessant voor de vorming van MAOM (zie Van Agtmaal & Keuskamp 2023). Bij de omzetting van POM uit wortels, stengels en bladeren naar MAOM gaat meer dan 90% van de organische stof verloren door microbiële activiteit.

In minerale bodems is het doel vaak om de activiteit van micro-organismen in de toplaag van de bodem te stimuleren, zo de afbraak van os te stimuleren en voedingsstoffen beschikbaar te maken voor plantengroei. Praktijken hiervoor zijn gericht op het vruchtbaar maken van bodems. Als dat leidt tot meer wortelbiomassa en vervolgens meer rhizodepositie kan dat leiden tot vastlegging van een deel van de os in de ondergrond.

Minerale bodems zitten per definitie onder de maximale hoeveelheid koolstof die kan worden vastgehouden, ze zijn onverzadigd. Wat niet wil zeggen dat er geen verzadiging op kan treden: deze verzadiging treedt op door de condities in de bodem (o.a. silt- en lutumpercentage) en is onderhevig aan het beheer van de gronden. Veenbodems daarentegen hebben per definitie al een maximum hoeveelheid aan organische stof. Elke 'verstoring' van de veenbodem – zoals bodemberoering, ontwatering e.d. - zal leiden tot het meer toegankelijk maken van de bodem voor microbiële activiteit en zal daarmee leiden tot afbraak van os. Veenbodems zijn niet geschikt voor extra C-opname in de grond<sup>5</sup>; enkel voor C-vastlegging door veengroei.

Zo gezien, zijn maatregelen gericht op stimulering van bodemleven, structuurverbetering en beluchting in de bovenste grondlaag van veenbodems – vanuit het oogpunt van alleen klimaatmaatregelen - niet geschikt en mogelijk contraproductief voor C-opslag. Veenbodems hebben voor hun voortbestaan juist belang bij een slechte beluchting en zoveel mogelijk remming van micro-organismen. Daarbij geldt de nuancering, dat structuurverbetering mogelijk wel leidt tot een betere waterinfiltratie en een groter poriënvolume (beluchting) voor een grotere berging en daarmee het minder uitzakken van de grondwaterstand.

---

<sup>4</sup> Dat is het geval in niet-ontwaterde veengronden; in de praktijk van de Friese veenweiden is dat anders omdat het veenpakket ontwaterd is en dus al afbraak van organisch materiaal plaatsvindt, waarbij CO<sub>2</sub> vrijkomt.

<sup>5</sup> Toch kan na opnieuw inzaaien of bijvoorbeeld het omzetten van mais naar grasland leiden tot een hoger percentage organische stof. Mogelijk speelt hiermee dat de bovenste bodemlaag (teelaarde, ontwaterd) in die gevallen niet uit puur veen bestaat.



## 3 Emissiereductie en koolstofvastlegging door graslandbeheer

---

### 3.1 Inleiding

In een review van onderzoeken naar ecosysteemdiensten van graslanden onderscheiden Schils *et al.* (2022) 18 verschillende diensten. Dat zijn welbekende diensten zoals productie, waterregulering, biodiversiteit (kruidenrijk grasland, weidevogels) en belevingswaarde van het agrarisch cultuurlandschap. Ook klimaatregulatie is een ecosysteemdienst van graslanden. Dat betreft (het beperken van) emissies van lachgas NO<sub>2</sub>, methaan CH<sub>4</sub>, kooldioxide CO<sub>2</sub> en de opslagcapaciteit van koolstof (C). In dit rapport zijn we vooral geïnteresseerd in de functie van klimaatregulatie via C-vastlegging - de hoeveelheid C die per tijdseenheid wordt vastgelegd - in de bodem (of vermindering van de emissie). Omdat C-vastlegging hiernaast een positief effect heeft op o.a. bodemstructuur, de watercyclus, bodemleven (zie ook Deru 2021) en vitaliteit van het levende systeem, is C-vastlegging voor klimaatregulatie in landbouwbodems vaak goed te verenigen met andere ecosysteemdiensten. Tegelijkertijd geldt dat klimaatmaatregelen op veengronden niet altijd sporen met bodemaatregelen of maatregelen voor weidevogelbeheer, hoewel dat afhangt van het type bodem en gebruik. In dit rapport bekijken we de maatregelen vanuit het perspectief van klimaat.

Dit hoofdstuk heeft ten doel een overzicht te geven van de bestaande kennis over C-vastlegging, veelal gebaseerd op minerale gronden. We presenteren eerst de bevindingen en geven in paragraaf 3.6 aan in hoeverre die kennis bruikbaar is voor veenbodems. De literatuurstudie bevestigt het beeld dat verreweg het meeste onderzoek is verricht aan minerale bodems. De belangrijkste beheermaatregelen die zijn onderzocht, zijn niet-kerende grondbewerking (leeftijd grasland), beweiden en maaien. Vaak worden aanzienlijke onzekerheden gemeld over de mate van C-vastlegging of -emissies onder verschillende omstandigheden (bijv. Jones & Donnelly 2004, Soussana *et al.* 2010).

Ter referentie vonden we de volgende kengetallen voor broeikasgasemissies uit veengrasland:

- 26 ton CO<sub>2</sub>/ha/jr en 29 ton CO<sub>2</sub>-equivalenten/ha/jr (inclusief methaan en lachgas) in Friese veenweidegebieden in 2017-2019 (Fritz *et al.* 2021),
- 14.5-19 ton CO<sub>2</sub>-eq/ha/jr in de Utrechtse Venen (Motelica-Wagenaar & Beemster 2020),
- 27.7 ton CO<sub>2</sub>/ha/jr voor Duitse veenweide (Tiemeyer *et al.* 2016).

### 3.2 Scheuren en leeftijd grasland

Als belangrijkste maatregel voor C-vastlegging op grasland komt het niet scheuren van grasland naar voren (Freibauer *et al.* 2004, Jones & Donnelly 2004, Soussana *et al.* 2004, 2010, Govaerts *et al.* 2009, Lesschen *et al.* 2012, Gregory *et al.* 2016, EIP-AGRI Focus Group Grazing for Carbon 2018, Staps *et al.* 2018, 2021). Permanente begroeiing van minerale bodems heeft voordelen voor het verhogen en vasthouden van het os-gehalte. Graslandpercelen waar enkel gemaaid wordt, ontwikkelen over het algemeen een open zode, waardoor periodiek graslandvernieuwing nodig is, d.w.z. doorzaaien of het opnieuw inzaaien van grassen (en kruiden). In percelen waar (ook) beweid wordt is dit minder nodig. Opnieuw inzaaien wordt toegepast als graslandverbetering om de opbrengst van percelen te maximaliseren maar heeft over het algemeen een negatief gevolg voor de koolstofvastlegging in de bodem, m.n. op veenbodems (Hennessy *et al.* 2018). In het veenweidegebied Aldeboarn De Deelen vindt jaarlijks

op 10% van de oppervlakte grondbewerking plaats, grotendeels voor graslandvernieuwing en deels ook voor maisteelt (Bekkema *et al.* 2022).

Nadat 50 jaar geleden grasland in bouwland was omgezet, was op Engelse kleigrond (Rothamstead) in de bovenste 30 cm 61-78% van de organische koolstof verdwenen en in de laag van 30-60 cm 22-52% van de organische koolstof (Gregory *et al.* 2016). Scheuren van grasland kan ook resulteren tot een hoge emissie van lachgas N<sub>2</sub>O (Staps *et al.* 2021). Over de wisselwerking tussen beheer en N<sub>2</sub>O emissies is nog veel onduidelijk en in de literatuur zijn vele tegenstrijdige resultaten te vinden.

Oud grasland (>15 jaar niet gescheurd) heeft op klei in Noord-Nederland een 20% grotere C-voorraad per ha dan jong grasland (5-15 jaar sinds scheuren) (62 mg C/ha vs. 51 mg C/ha in de bovenste 10 cm van de bodem; Iepema *et al.* 2022). De C-vastlegging van het jonge grasland in deze studie leek groter dan van het oude: 3,0 mg C/ha/jr vs 1.6 mg C/ha/jr, maar het verschil was niet statistisch significant. Rekening houdend met de bodemvoorraad koolstof (waarden niet benoemd), zou dat volgens Schepens *et al.* (2022) dan gaan om 2,5 ton CO<sub>2</sub>/ha/jr in de bovenste 10 cm. Het oude grasland lijkt over het algemeen beter bestand tegen droogte en kan stortbuien beter verwerken. Ook Acharya *et al.* (2012) vonden meer vastgelegde C naarmate grasland ouder was (in hun studie was de maximumleeftijd van het grasland 17 jaar). Het niet keren en verstoren van graslandbodems is dus belangrijk voor de hoeveelheid C-vastlegging in graslanden. In vergelijking tot andere beheersmaatregelen (op klei) zoals wisselteelt mais-grasklaver, niet-kerende grondbewerking bij mais en kruidenrijk grasland scoorde het verlengen van de graslandleeftijd het beste met een positief resultaat van 4,9 ton CO<sub>2</sub>/ha/jr in de bovenste 30 cm (over een onderzoeksperiode van vijf jaar, Schepens *et al.* 2022).

De C-vastlegging in grasland (op minerale bodems) is eindig en het potentieel is o.a. afhankelijk van het silt- en kleigehalte en de mate van uitputting van de bodem. De vastlegging (per tijdseenheid) neemt af met toename van het os-gehalte van de bodem. De mate van C-vastleggen varieert en is sterk afhankelijk van de beginsituatie, (klimatologische) omstandigheden en het beheer. Ook de tijdsduren die worden genoemd variëren sterk, van 10-100 jr (Jones & Donnelly 2004, Iepema *et al.* 2022: na 30 jaar nog geen verzadiging op klei, Smith 2014: tot 80 jaar op uitgemergelde bodem). Na verloop van tijd wordt C-vastlegging geneutraliseerd door het ontstaan van een balans tussen koolstofvastlegging en koolstofafbraak. Op oude, rijke 'C-verzadigde' gronden is deze balans gemakkelijk te verstoren en naar de kant van koolstofafbraak te verplaatsen door beheerveranderingen.

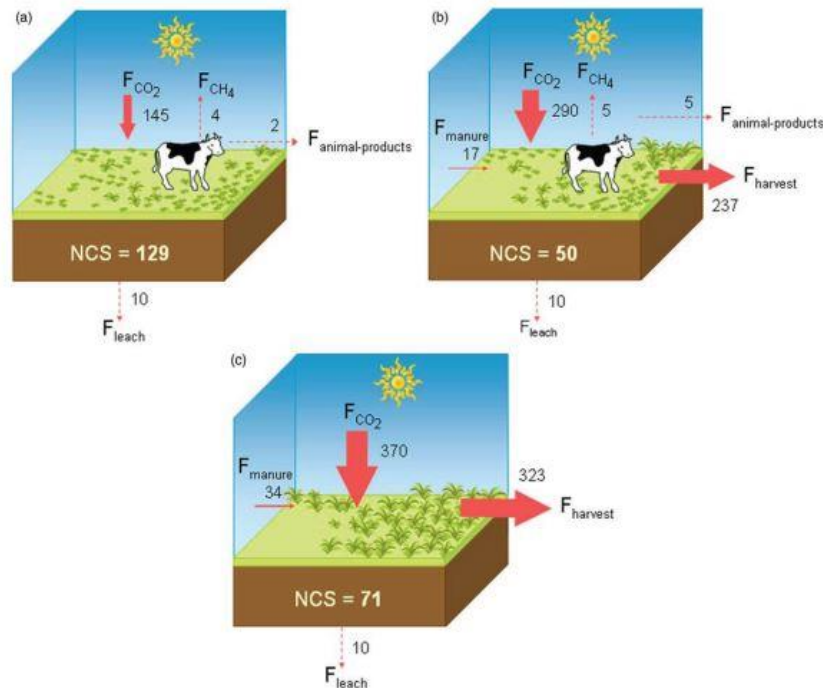
#### Samenvattend:

*Als belangrijkste maatregel voor C-vastlegging door graslandbeheer (op minerale bodems) komt in de literatuur naar voren dat graslandbodems niet gescheurd, gekeerd of anderszins verstoord moeten worden. Hoe ouder het grasland, hoe meer koolstof het bevat. De C-vastlegging in grasland (op minerale bodems) is eindig en het potentieel is o.a. afhankelijk van het silt- en kleigehalte en de mate van uitputting van de bodem (hoe lager het organische stofgehalte, hoe meer C-vastlegging per tijdseenheid).*

### **3.3 Beweiden en maaien**

Grasland dat enkel wordt beweid, heeft over het algemeen een hogere koolstofvastlegging dan grasland dat zowel beweid als gemaaid wordt (EIP-AGRI Focus Group 2018, van Eekeren *et al.* 2018). Uit recent werk (Bai & Cotrufo 2022, Chabbi *et al.* 2022) blijkt dat op percelen waar werd beweid met snel omweiden het os-gehalte ca. 26-28% hoger was dan op percelen waar

beweiden en maaien werden afgewisseld. Bovendien kan beweiding resulteren in een hogere kwaliteit van de os (lagere C/N) en lijkt het de vorming van MAOM te bevorderen (Bai & Cotrufo 2022). Volgens Soussana *et al.* (2004, 2010) leidt beweiding van grasland tot 80% meer C-vastlegging dan maaien, en uitsluitend maaien weer tot 40% meer C-vastlegging dan het afwisselen van beweiden en maaien (figuur 3.1: in de studie worden veedichtheden, bemestingsintensiteit en leeftijd van het grasland niet gespecificeerd).



Figuur 3.1 Gemiddelde koolstofluxen bij verschillend beheer van grasland op negen locaties met minerale bodems in Europa. NCS = Net Carbon Storage in de bodem in gr C/m<sup>2</sup>/jr. Dit is de balans van de diverse C-stromen via CO<sub>2</sub> en CH<sub>4</sub> van de relevante aan- en afvoerstromen (a) = alleen beweiden, (b) = afwisseling van beweiden en maaien, (c) = alleen maaien. Bron: Soussana *et al.* (2010).

Op basis van Europese data komt naar voren dat de koolstofvastlegging in rotatiesystemen (bijv. kort omweiden) net iets hoger is dan in continue systemen (bijv. standweiden). In een rotatiesysteem kunnen meer dieren per oppervlakte worden gehouden dan in een continu systeem zonder dat er verlies optreedt in koolstofvastlegging (van Eekeren *et al.* 2018). Het broeikaseffect van het beheer wordt ook bepaald door de bijkomende emissies van CH<sub>4</sub> uit de koeienmaag en N<sub>2</sub>O als gevolg van bemesting. In de studie van Soussana *et al.* (2010) was per saldo de vermindering van broeikasgas door C-vastlegging in het onderzochte grasland groter dan het vergroten van het broeikaseffect door CH<sub>4</sub> (uit koeienmagen) en N<sub>2</sub>O (door bemesting) (echter niet statistisch significant). Een uitzondering vormde intensief beheer met een N-bemesting van 200-300 kg N/ha/jr (in combinatie met maaien). Dat had per saldo een versterkend broeikasgaseffect.

Voor C-vastlegging is extensief beweiden (< 2 gve/ha) beter dan intensief beweiden (Soussana *et al.* 2004, Chang *et al.* 2021), maar dat verschil geldt niet altijd (Soussana *et al.* 2004). Acharya *et al.* (2012) vonden een significant hogere wortelbiomassa bij beweiding in vergelijking tot maaien, maar geen significant verschil in CO<sub>2</sub>-emissie.

### Samenvattend:

*Er lijkt een positief effect van beweiden op de C-vastlegging in minerale bodems in vergelijking tot maaien, maar dat effect wordt niet altijd gevonden. Er zijn ook grote onderlinge verschillen binnen beweidingssystemen en binnen vormen van maaibeheer die voor een grote spreiding van de resultaten kunnen zorgen. Over het algemeen stimuleert beweiding de groei van meer diep wortelende soorten en de wortelgroei, belangrijke mechanismen voor C-vastlegging in minerale bodems (zie paragraaf 2.2).*

## 3.4 Bemesting

Soussana *et al.* (2004) modelleerden dat bij maaibeheer van grasland op Franse minerale gronden bij matige N-bemesting (160 kgN/ha/jr) meer C-vastlegging optreedt dan bij een hoge N-bemesting (500-800 kg N/ha/jr). Vanuit eenzelfde uitgangssituatie was na 20 jaar de (gemodelleerde) C-voorraad bij een lage N-bemesting 44 ton C/ha en bij een hoge N-bemesting 34 ton C/ha. In Nederland komen bemestingsniveaus van 500-800 kg N/ha/jr tegenwoordig echter niet meer voor (meer in de range van 250-375 N/ha/jr).

Sandor *et al.* (2018) berekenen modelmatig voor gangbaar gebruikt grasland op zandige kleibodems op drie continenten, dat halvering van de veebezetting (van 0.76 naar 0.38 gve/ha) de vastlegging van C met een factor 2 vergroot (van 0,30 ton C/ha/jr naar 0,64 ton C/ha/jr). Bij graslandbeheer gaat een lagere veebezetting doorgaans samen met een lager bemestingsniveau. Daarnaast berekenen zij, dat de combinatie van halvering van de veebezetting met het achterwege laten van N-bemesting de vastlegging van C nog 30% extra vergroot (van 0,64 ton C/ha/jr naar 0,84 ton C/ha/jr). Wanneer de N-bemesting werd teruggebracht van gemiddeld 220 kg N/ha/jr tot 0 kg N/ha/jr nam de emissie van N<sub>2</sub>O af met een factor 3. Dit effect geldt bij een veebezetting van 0,76 gve/ha. Deze veebezetting is voor Nederlandse begrippen laag. Die is op intensieve bedrijven doorgaans ca. 2 gve/ha (in ADD gemiddeld 1,85 gve/ha). Bol *et al.* (2003) vonden in kleigrasland meer C-emissie bij het gebruik van drijfmest in vergelijking tot geen drijfmest. Ze verklaarden dit door een toename van de respiratie (activiteit bodemleven) door de drijfmest. Kennelijk woog C-vastlegging door stimulering van de wortelgroei daar niet tegenop. Acharya *et al.* (2012) vonden dit effect van drijfmest echter niet.

De uitgebreide studie van Galama (2023) leverde de volgende aanvullende bevindingen (zie Galama 2023 voor literatuurverwijzingen en details):

- Bemesting heeft invloed op de broeikasgasemissies via de os-balans en via de vorming van lachgas. Het effect van bemesting via beide routes is context-specifiek. In - op papier - vergelijkbare cases worden tegenstrijdige of zeer uitlopende resultaten gevonden. Dit geeft aan hoe complex het bodemsysteem is en hoe weinig processen en verbanden er nog echt worden doorgrond.
- Mest met een hoog stikstofgehalte (lage C/N) en een lage benuttingsgraad door planten, lijkt een negatief effect te hebben op de hoeveelheid POM in de bodem. Afbraak van POM door micro-organismen (gestimuleerd door verse organische stof) kan wel leiden tot een verhoogde MAOM-formatie. Het netto-effect op os moet over langere tijd worden bekeken en er moet gedacht worden vanuit een nieuw evenwicht dat zich moet instellen. Door bemesting en afbraak van POM zal er meer energie voor groei en vorming van nieuwe POM zijn. Op organische veenbodems die een laag silt/klei gehalte hebben, zal stabilisatie van afgebroken POM via MAOM moeilijk verlopen en kan er mogelijk verlies, zonder stabiele koolstofvorming,

optreden. Op die bodems zal stikstofbemesting heel voorzichtig moeten worden toegepast. Het toepassen van goed verteerde mest met een hoog gehalte aan organisch gebonden stikstof lijkt over het algemeen een positief effect te hebben op de os-vastlegging.

- Toediening van grote hoeveelheden stikstof resulteert in verhoogde lachgasproductie. Doordat stikstof uit minerale kunstmest of gier direct beschikbaar is in de bodem, ontstaat het risico van tijdelijke overbemeste situaties, wat N<sub>2</sub>O vorming in de hand werkt. Bemesting met vaste mest zal tot een minder grote piek leiden. Gebruik van organisch gebonden stikstof kan een deel van de N<sub>2</sub>O productie doen voorkomen, omdat planten ook stikstof in organische vorm opnemen en deze vorm van stikstof niet beschikbaar is voor lachgasproductie.
- In organische bodems zijn grote stikstofvoorraden aanwezig. Door ontwatering wordt POM in deze bodems doorlopend gemineraliseerd. Hierbij komt stikstof vrij als ammonium, dat in beluchte bodems genitrificeerd wordt tot nitraat. Tijdens dit proces ontstaat meestal ook lachgas. Stikstofbemesting op deze ontwaterde bodems stimuleert de POM-afbraak verder waardoor de stikstoflimitatie van de groei van micro-organismen wordt opgeheven en N<sub>2</sub>O-vorming nog verder toeneemt.

#### Samenvattend:

*Door grote onzekerheid in data en onvolledig begrip van het effect van bemesting op os- en N<sub>2</sub>O-vorming is het moeilijk een eenduidige samenvatting te geven over bemesting. Mest waarbij stikstof organisch gebonden is, waaruit stikstof langzaam vrijkomt en de stikstofbenutting hoog is (vaste mest), lijkt voor zowel behoud van os als N<sub>2</sub>O-emissie de beste keus. Een advies dat te allen tijde geldig lijkt, is dat de mate van bemesting in balans moet zijn met de capaciteit van de grond om de nutriënten op te nemen in biomassa van planten en bodemleven. Overbemesting werkt afbraak van os en N<sub>2</sub>O-emissie in de hand.*

### **3.5 Toepasbaarheid maatregelen in veenweiden**

Veenweidebodems bestaan niet enkel en alleen uit organische stof. Het os-gehalte van de bovenste 30 cm in veenweide in Nederland is gemiddeld ca. 25% (van Tol-Leender *et al.* 2019). Dat wil dus zeggen dat in veel gevallen de toplaag is bijgemengd met een minerale grondsoort. In het Nederlandse veenweidegebied, en ook ADD, is dat doorgaans klei en is sprake van klei-op-veen (zie figuur 2.1).

#### **Graslandbeheer versus waterpeil in veenweiden**

In deze studie beperken we ons tot beheermaatregelen om te zien of daar aanknopingspunten liggen voor emissiereductie en/of C-vastlegging in veenweiden, analoog aan minerale gronden. In veenweiden gaat echter vooral aandacht uit naar waterpeilverhoging (zie ook NOBV 2023). Een relevante vraag voor deze verkenning is wat de betekenis van maatregelen op het vlak van grasland- en bodembeheer is in vergelijking tot peilbeheer.



Hoog water en plasdras in het veenweidegebied de Soarremoarre, ADD, april 2023, foto A&W.

Een recente samenvatting van onderzoek naar veel verschillende soorten van landgebruik concludeert dat voor broeikasgasemissies uit veengronden de gemiddelde grondwaterstand door het jaar heen verreweg de grootste invloed heeft in vergelijking tot effecten van klimaat, vegetatiesamenstelling en beheer (Evans *et al.* 2021). In Galama (2023) en in hoofdstuk 2 in de bespreking van de C-huishouding van bodems is dat ook de conclusie. Beheermaatregelen van bodem en grasland zijn in vergelijking tot vernatting dus maar beperkt van betekenis. Aangezien in veenweiden graslandbeheer een gegeven is, is het echter wel de moeite waard om na te gaan hoe dat beheer zo uitgevoerd kan worden, dat het tot *zo min mogelijk* emissie leidt. Zeker in vergelijking tot de reguliere praktijk.

Zoals eerder benoemd kunnen de bevindingen voor minerale gronden niet één op één worden vertaald naar veenweiden. Deze conclusie werd bevestigd in een bijeenkomst met experts aan wie we een eerste versie van de bevindingen voorlegden (zie het dankwoord voor de betreffende experts). Hieronder wordt besproken wat - met de huidige stand van kennis – geleerd kan worden uit de bevindingen van minerale bodems. Aanvullend is er ook enig onderzoek specifiek voor veenbodems. Naast niet-kerende grondbewerking, bemesting en beweiden en maaien, gaan we ook kort in op maatregelen als het toevoegen van biochar/organisch materiaal en het opbrengen en bijmengen van klei.

### **Blijvend grasland**

Grondbewerking op veengrond – voor herinzaai of maisteelt - leidt tot bodemverstoring, waardoor de afbraak van veen wordt gestimuleerd. Bodemrust is daarom van groot belang om afbraak van veen te voorkomen, maar ook om de vegetatie de kans te geven zich te ontwikkelen, waardoor ook een dichtere zode kan ontstaan. Ook in het veenweidegebied heeft blijvend grasland over het algemeen een hoger os-gehalte in de toplaag dan percelen die periodiek geploegd worden of waar mechanische structuurverbetering<sup>6</sup> heeft plaatsgevonden.

---

<sup>6</sup> De noodzaak tot mechanische structuurverbetering kan een indicatie zijn dat het bodemleven niet op orde is, maar kan ook nodig worden geacht vanwege storende lagen, zoals de schalterlaag in sommige veenweidegebieden.

### **Beweidings- en maaiing op veenweidegronden**

Omdat het onderzoek hiernaar zo goed als geheel betrekking heeft op minerale bodems, is op basis van de geraadpleegde literatuur niet te zeggen wat het effect is van beweiding of maaien in het veenweidegebied op het os-gehalte en de koolstofvastlegging.

Wel geldt, dat wanneer beweiding wordt toegepast op percelen op veengrond met een hoge grondwaterstand, het voor het vasthouden van de os belangrijk is dat vertrapping van de zode, en oxidatie en erosie als gevolg hiervan, wordt voorkomen. Als beweiding kan bijdragen aan behoud van de zode, waardoor de noodzaak tot graslandvernieuwing en daarmee versterking van de bodem kan worden voorkomen, kan het effect van beweiding indirect positief zijn voor de koolstofhuishouding. De meest optimale beweidingstrategie zal op veengrond naar verwachting niet leiden tot verhoging van de os; het hoogst haalbare is behoud van de reeds aanwezige os.

### **Bemesting op veenweidegronden**

Bemesting heeft tot doel om beperkende groeifactoren van (productie)planten op te heffen, en betreft toevoeging van nutriënten als N, P en K. Deze nutriënten stimuleren niet alleen direct de groei van het gewas maar ook de activiteit van bodemorganismen die op hun beurt os omzetten in voor planten opneembare nutriënten. Bij dit laatste komt CO<sub>2</sub> vrij, en vindt bij overbemesting door denitrificatie omzetting van nitraat in N<sub>2</sub>O plaats. Maar bij bemesting met organische mest (drijfmest, vaste mest) vindt ook aanvoer van nieuw organisch materiaal plaats, wat tot C-vastlegging kan leiden. De vraag is wat het saldo van de verschillende processen is. We vonden een paar studies over broeikas effecten van bemesting op veengrasland.

In een vergelijking van broeikasgasemissies bij graslandbeheer op veenbodems in Duitsland vonden Poyda *et al.* (2016) 3-4 keer meer CO<sub>2</sub>-emissie op bemest veengrasland met intensief (maai)beheer met een drooglegging van 20 cm, vergeleken met onbemest, zeer nat veengrasland. Veenendaal *et al.* (2007) vonden geen verschil in het totaal van CO<sub>2</sub>- en CH<sub>4</sub>-emissies van klei-op-veenbodems in Zuid-Holland bij extensief weidevogelgrasland in vergelijking tot intensief productieland. Per saldo was sprake van C-emissie van 4,29 ton C/ha/jr (omgerekend naar CO<sub>2</sub>-eq is dat 15.8 ton CO<sub>2</sub>-eq/ha/jr<sup>7</sup>). Van den Pol-van Daselaar *et al.* (1997) vonden voor CH<sub>4</sub>-emissie op intensief gebruikt grasland op veenbodems geen verschil tussen beweiden, maaien en wel of geen N-bemesting (drooglegging 22-42 cm).

Het gebruik van N-kunstmest leidt volgens Deru & van Eekeren (2018) op veenbodems in vergelijking tot diverse organische meststoffen niet tot meer veenafbraak. Bij kunstmest was er het hoogste os-gehalte door wortelgroei, terwijl door verlaging van de pH door de kunstmest de mineralisatie werd geremd (een lage pH is ongunstig voor regenwormen; kennelijk woog dit effect in die situatie niet op tegen de toegenomen wortelgroei).

### **Kruidrijk grasland**

Als positief effect van kruidrijk grasland wordt wel genoemd dat het diep wortelende soorten bevat en over het algemeen meer wortelmassa heeft waarmee meer C in de bodem wordt gebracht in vergelijking met puur grasland (bijv. Jones & Donnelly 2004, Sebastia *et al.* 2018). Deze resultaten gelden voor ontwaterde minerale gronden. In principe geldt dat alle gewassen die in de landbouw gebruikt worden zorgen voor het verdampen van water uit de bodem. Dit is niet gunstig voor veenbodems die, voor behoud van koolstof, juist vochtig moeten blijven. Gewassen met brede bladeren of lange bladeren verdampen meer dan bijvoorbeeld mossen, die van nature op veengronden voorkomen. 'Verlanding' van natuurlijke, natte veengebieden gaat gepaard met de groei van 'verdampende' soorten waaronder ook bomen, deze creëren daarmee

<sup>7</sup> Atoomgewicht C = 12, atoomgewicht O = 16. Aandeel C in gewicht CO<sub>2</sub> = 12 : (12 + (2x16)) = 3/11 = 27% → 1 g CO<sub>2</sub> = 3.7 g C. 1 ha is 10.000 m<sup>2</sup>.

eigen drogere gebied. Voor veengronden is het tegelijkertijd belangrijk een dichte zode (i.e. begroeiing op de bodem) te houden, zodat directe uitdroging van de bodem wordt voorkomen. Er is een optimale verhouding tussen de hoeveelheid gewas die beschermd tegen uitdroging van de bodem en verdamping door vegetatie. Begroeiing op de bodem zorgt er ook voor dat meer damp condenseert aan de vegetatie en in de bodem kan doordringen.

Verder geldt dat naar mate er meer wortelmassa is, er meer bodemoppervlak belucht kan worden en door micro-organismen gekoloniseerd kan worden. Diep wortelende plantensoorten en grote wortelstelsels zijn goed voor opbouw van het stabiele MAOM in minerale bodems, maar zullen op veenbodems mogelijk een negatief effect hebben op het os-gehalte, doordat het de omstandigheden voor POM-afbraak positief beïnvloed. Ook Brouns (2016) benoemt het risico dat C-vastlegging door dieper wortelende soorten in natte veenbodems niet werkt en tot veenafbraak leidt doordat via de wortels zuurstof en exudaten (worteluitscheidings) in de bodem wordt gebracht die de activiteit van micro-organismen stimuleren. Een relevante vraag daarbij is, of deze extra C in diepere lagen in alle gevallen weer zal worden afgebroken. Als afbraak benodigde voedingsstoffen of de pH beperkend zijn kan deze extra C dan leiden tot minder afbraak van het veen? Hierover is in de literatuur geen uitspraak over gevonden. Voor beoordeling in Friese veenweiden is het van belang om rekening te houden met de dikte van de minerale kleilaag (bij een dikke kleilaag heeft diepere beworteling minder risico's).

Een ander punt dat speelt, is dat diep-wortelende kruiden mogelijk een effect kunnen hebben op de gevoeligheid voor verdroging. Gedurende een lange periode van droogte zal de bovenkant van het bodemprofiel op veengrond uitdrogen en mogelijk gescheurd en/ of waterafstotend worden. Een proces waar boeren op lichte veengrond heel bekend mee zijn (zie voor hydrofobie en scheurvorming op veengrond bijv. Hoekstra *et al.* 2020). De regen die daarna valt kan via scheuren snel naar sloot of ondergrond lopen, en de bovenkant blijft droog. Als er ook kruiden zijn die dieper wortelen dan wordt een deel van het water uit een dieper laag gehaald waardoor de bovengrond vochtiger blijft en regenval beter blijft hangen. Over dit aspect van dieper wortelende kruiden is nog weinig bekend, en ook over hoe de balans uiteindelijk uitpakt (uitdrogen van de bovengrond met diepe scheuren, versus extra afbraak door diepere beworteling).

### **Toevoegen biochar, organisch materiaal**

Biochar is een product van biomassapyrolyse. Pyrolyse is verhitting van grondstoffen tot hoge temperatuur in afwezigheid van zuurstof, waardoor geen verbranding en verlies van koolstof optreedt. Toevoegen van biochar en organisch materiaal (organische mest, compost) aan de bodem lijkt voor gronden met een laag os-gehalte een positief effect te kunnen hebben op het os-gehalte en op functionaliteit van de bodem (zie Galama 2023 voor details). Maar in bodems die al rijk zijn aan os (zoals veen), kan toevoeging van biochar of organisch materiaal een negatief effect hebben op de C-voorraad die al in de bodem aanwezig is, doordat microbiële activiteit wordt gestimuleerd en afbraak van oude os (in de vorm van POM) plaatsvindt (priming effect). Alleen wanneer er onvoldoende zuurstof is (hoog waterpeil!) of voedingsstoffen ontbreken vindt die afbraak mogelijk niet plaats. Het gebeurt vooral wanneer toevoegingen een relatief lage C-concentratie en een hoge N-concentratie hebben (lage C/N-verhouding), zoals in drijfmest. Bij hoge drijfmestgiften treedt bovendien het risico van overbemesting op waardoor zowel N<sub>2</sub>O als NH<sub>3</sub> gevormd kan worden.

### **Opbrengen kleidek, bijmengen klei**

Bij het zoeken naar mogelijke maatregelen is de laatste jaren ook het opbrengen en bijmengen van klei in veenweiden in beeld gekomen om bodemdaling en broeikasgasemissie te verminderen.





*Bij beweiding in veenweiden moet erop worden gelet dat de zode niet wordt vertrapt*

### Opbrengen klei

Veengronden met een kleidek tot 40 cm dik, zogenaamd klei-op-veen, worden in bodemkundige zin tot veenbodems gerekend. De aanwezigheid van een kleidek op het veen heeft qua zuurstof- en koolstofhuishouding en waterhuishouding invloed op het onderliggende veen, dus heeft een kleidek mogelijk ook invloed op broeikasgasemissie. Nieuw aanbrengen van een kleidek op een veenbodem beperkt mogelijk broeikasgasemissie.

Metingen in het kader van het NOBV-programma leveren voor dit punt nog geen eenduidige resultaten. In metingen op vier locaties in het Friese veenweidegebied gedurende 2017-2019 vonden Fritz *et al.* (2021) geen verschil in emissies tussen wel of geen kleidek op het veen. Volgens de auteurs kwam dat doordat het kleidek in Friesland sterk gemengd is en een hoog os-gehalte heeft (gemiddeld 25%). Volgens Van den Akker *et al.* (2018) leidt een kleidek op het veen tot 4x minder uitstoot van CO<sub>2</sub>-equivalenten/ha/jr dan bij puur veen zonder kleidek. Deze resultaten zijn gebaseerd op metingen in West- en ook Noord-Nederlandse veengebieden. Fritz *et al.* (2021) bevelen aan alle beschikbare data samen te vatten.

Het is wellicht van invloed of het veen onder de kleilaag zich boven of onder de gemiddeld laagste grondwaterstand bevindt. Een kleilaag van geringe dikte zal uitwisseling van gassen met de onderliggende veengronden niet in de weg staan, waardoor omstandigheden voor oxidatie aanwezig kunnen blijven. Voor meer informatie over broeikasmetingen in Friese veenweiden, zie NOBV (2023).

### Bijmengen klei

Recent is er veel aandacht voor het bijmengen van klei in de toplaag van het veen (VIC, LBI, Royal Haskoning zj). In het kader van het “Integrale bodemverbetering Feangreiden” wordt hier onder de noemen ‘Klei IN veen’ onderzoek naar gedaan (Van Agtmaal & Keuskamp 2023). De gedachte is dat door het bijmengen van klei(deeltjes) in de veenbodem of het opbrengen van kleine hoeveelheden (1-2 cm) klei op veen de afbraak kan worden geremd. Het mengen van minerale deeltjes door een organische bodem kan ervoor zorgen dat eerder voor micro-organismen onbereikbare os beschikbaar wordt gemaakt voor microbiële afbraak. Op deze manier kan een groot gedeelte van de os worden afgebroken (zie Galama 2023 voor details), tenminste als overige condities voor afbraak gunstig zijn. Het bijmengen van minerale deeltjes in

bodems lijkt meer geschikt voor zandbodems dan voor veenbodems. In veenbodems wordt het os-gehalte gehandhaafd door verstoring te voorkomen, niet door MAOM-vorming. MAOM vorming kan ook een deel van de organische stof stabiliseren met minder emissie als gevolg.

Wanneer klei bovengronds wordt aangebracht, of als dun laagje wordt opgespoten en wordt ingespoeld, zal dit de ondergrond niet verstoren. Omdat inspoelen van klei plaats zal vinden via dezelfde kanalen als waarlangs beluchting plaatsvindt, kan het de beluchting van de bodem verminderen en daarmee mineralisatie van de os door micro-organismen. Voor zover in die kanalen nog mineralisatie plaatsvindt, kunnen kleimineralen afgebroken of stabiliseren.

Er is nog verder onderzoek nodig om het mechanisme precies te begrijpen en uit te testen hoe bijmenging met klei in de praktijk uitwerkt. De belangrijke eerste resultaten uit o.a. het laboratoriumwerk, laten zien dat de werking zowel kleisoort- als veensoort-specifiek kan zijn. In de meeste gevallen leidde in het lab bijmenging van klei tot een lagere CO<sub>2</sub>-emissie. Het toevoegen van lutumhoudende keileem gaf geen remming op de CO<sub>2</sub>-emissie (zie verder voor details van Agtmaal & Keuskamp 2023).



Veenweidelandschap, Aldeboarn, mei 2021. Foto A&W.

## 4 Betekenis regeneratieve landbouw voor C-vastlegging

---

In de discussies over klimaatregulatie en graslandbeheer wordt vaak over de mogelijke betekenis van regeneratieve landbouw gesproken. In dit hoofdstuk wordt nagegaan welke rol maatregelen uit de regeneratieve landbouw – aanvullend - zouden kunnen spelen in emissiereductie van broeikasgassen en C-vastlegging in veenweiden. Deze korte samenvatting is gebaseerd op de review en analyse die door Galama (2023) voor dit doel is uitgevoerd.

### 4.1 Wat is regeneratieve landbouw?

Regeneratieve landbouw (RL) richt zich op het herstellen en creëren van natuurlijke, levende en functionele landbouwgronden die hoogwaardig, gezond voedsel produceren met minimale externe input. Bij RL staat het herstellen en bevorderen van de koolstofcyclus, watercyclus, stikstofcyclus, bodemstructuur en het natuurlijke productievermogen centraal. RL wordt soms gezien als een stroming binnen de biologische landbouw, maar dat is het niet. RL en biologisch boeren zijn door bepaalde gedeelde aspecten goed te combineren, maar waar biologische landbouw zich vooral richt op het niet doen van bepaalde dingen (geen gebruik kunstmest, pesticiden), richt RL zich meer op het toepassen van werkwijzen die bijdragen aan (herstel van) een gezond, robuust en natuurlijk productielandschap. Te denken valt aan niet-kerende grondbewerking in de akkerbouw en maisteelt, gebruik van groenbemesters en bodembedekkers, strokenteelt. Veel RL-methoden kunnen prima worden toegepast door gangbare bedrijven. Er is geen keurmerk of een organisatie die eisen stelt hoe deze methoden gebruikt. Hierdoor is RL toegankelijk en laagdrempelig.

### 4.2 Emissiereductie en C-vastlegging door regeneratieve landbouw

RL omvat veel werkwijzen die bewezen koolstofopslag in minerale bodems kunnen bewerkstelligen. De effectiviteit van de verschillende werkwijzen is context-specifiek. Er is een goede kennis van de geologische, biologische en fysische staat van het lokale systeem (bodem, waterhuishouding) nodig voor de selectie van effectieve werkwijzen. Mogelijk effectief zijn maatregelen als niet-kerende grondbewerking, ondiep ploegen, groenbemesters toepassen op bouwland, blijvend grasland bemesten met vaste mest en beweiding toepassen op grasland.

Regeneratieve landbouwmethoden zijn bewezen effectief voor minerale bodems en worden vooral toegepast in bodems die veel os zijn verloren. Er zijn echter heel weinig studies bekend naar het effect van regeneratieve werkwijzen op het koolstofgehalte in veenbodems. Kwantificering van effecten van individuele maatregelen op organische bodems is niet mogelijk. Maar op grond van de algemene inzichten, benoemd in hoofdstuk 2 (verschillen in C-huishouding tussen minerale en veenbodems), lijkt het effect van RL-methoden op veengronden – met als doel emissiereductie en C-vastlegging - niet per se positief te zullen zijn. Dat komt omdat ook bij RL-methoden ontwatering en bodembewerking, en daardoor veenaafbraak plaatsvindt. En omdat RL-methoden gericht zijn op een actieve bodem, POM-vertering en MAOM-vorming.

Onder deskundigen is er brede overeenstemming, dat in veenbodems een hoog waterpeil welhaast de enige methode is om veenaafbraak en bodemdaling tegen te gaan (NOBV 2023, zie ook paragraaf 3.5). Er is echter wel een nuancering in vergelijking tot gangbaar gebruik (mét overwegend een stevige ontwatering, bemesting en regelmatige grondbewerking), waarbij RL-methoden wel een stap vooruit kunnen betekenen. Zeker ook wanneer sprake is van een kleidek



op het veen. Denk daarbij aan de inzet van blijvend grasland, niet kerende grondbewerking bij mais, en niet-kerend of ondiep ploegen bij herinzaai.

Zie voor verdere toelichting en details Galama (2023).

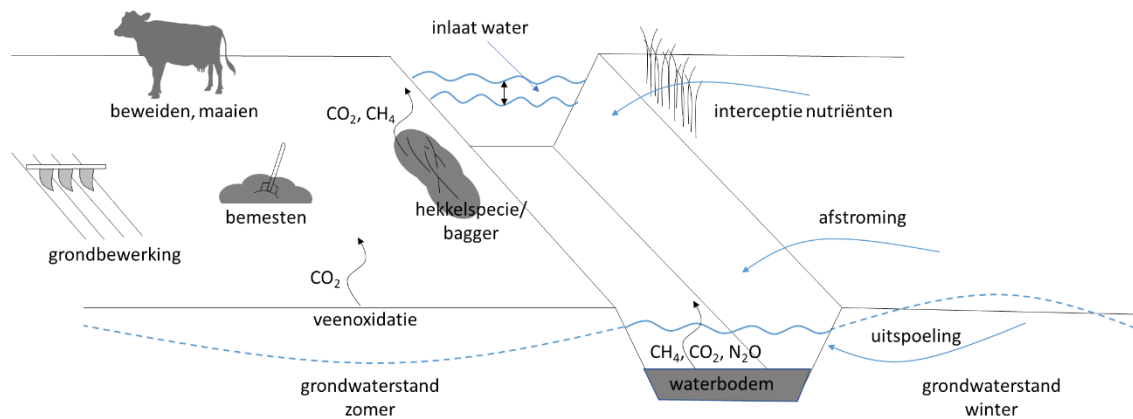


*In ADD-Zuid is enkele jaren geleden (foto 4 mei 2021, A&W) een pilot gedaan met verduurzaming van maisteelt op veen, met onder meer toepassing van niet-kerende grondbewerking.*

## 5 Emissiereductie en C-vastlegging door slootbeheer

### 5.1 Inleiding

Om de broeikasgasemissie in het veenweidegebied te verlagen kan, naast het verhogen van het grondwaterpeil, ook gedacht worden aan maatregelen die broeikasgasemissie uit en rondom sloten en overige wateren verlagen. Eerdere studies in de veengebieden komen uit op een forse emissies van broeikasgassen uit sloten (Kosten 2021, Hendriks *et al.* in voorbereiding, zie ook Peacock *et al.* 2021 en Motelica-Wagenaar *et al.* 2020) en op een bijdrage van sloten aan de klimaatschade van ongeveer 10%, uitgedrukt in euro's (MKBA Friese Veenweiden Provincie Fryslân 2019). Er spelen meerdere en complexe processen in en rondom de sloten plaats die de broeikasgasemissie beïnvloeden (figuur 5.1). In de volgende paragrafen worden de processen in en rondom de wateren benoemd en kort toegelicht.



Figuur 5.1. Schematisch overzicht van de processen in en rondom sloten die de broeikasgasemissie veroorzaken. Blauwe pijlen: water met nutriënten. Zwarte pijlen: emissies van broeikasgas

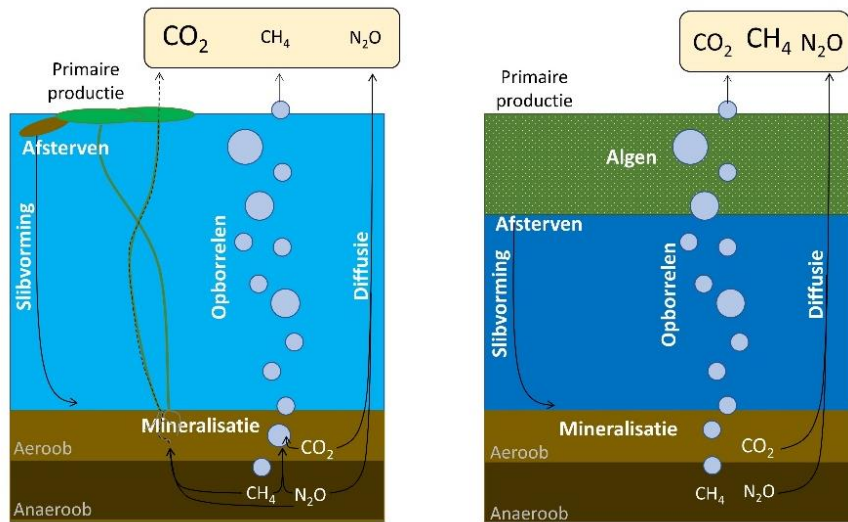
### 5.2 Proces van broeikasgasemissies uit en rondom sloten

Hier wordt een korte schets gegeven van de processen die een rol spelen bij de emissie van broeikasgassen in oppervlaktewater. De kennis over sloten is beperkt, hoewel die kennis de laatste jaren wel snel toeneemt, o.a. onder door het onderzoek van de Universiteit van Utrecht (S. Kosten en L. Hendriks *cs.*; in voorbereiding) en Deltares *cs.* (in het kader van het model BlueCAN; Deltares *et al.* 2022).

#### Waterkwaliteit en broeikasgasemissies (CH<sub>4</sub>, NO<sub>2</sub> en CO<sub>2</sub>)

De waterkwaliteit in oppervlaktewater wordt voor een belangrijk deel bepaald door het gehalte aan nutriënten (N, P, K), en de herkomst van het water (oppervlaktewater, grondwater of regenwater). Onderzoek toont aan dat een lagere nutriëntenbelasting van wateren leidt tot minder emissie van broeikasgassen uit die wateren (Stowa 2020, BlueCAN conceptversie 2022, Motelica-Wagenaar *et al.* 2020). Vooral de emissie van methaan uit wateren is van belang, omdat dit een 28 keer zo sterk broeikasgas is als CO<sub>2</sub> (Greenhouse gas protocol 2016). Een lagere nutriëntenbelasting is ook beter voor de biodiversiteit (onderwaterleven).

Wateren stoten broeikasgassen uit door de afbraak van organisch materiaal. Als er zuurstof in het water aanwezig is wordt het organisch materiaal aerobisch afgebroken (mineralisatie) en ontstaat er voornamelijk CO<sub>2</sub> (BlueCAN conceptversie 2022). Als er geen zuurstof aanwezig is dan wordt het organisch materiaal anaerobisch afgebroken en ontstaat er voornamelijk CH<sub>4</sub> (methanogenese) en N<sub>2</sub>O (onvolledige denitrificatie) (BlueCAN conceptversie 2022; figuur 5.2). Voedselrijke watersystemen hebben meestal veel organisch materiaal om af te breken, en zullen door een hoge afbraak ook vaker zuurstofarm zijn. Over het algemeen geldt daarom dat bij een slechtere waterkwaliteit meer broeikasgas in de vorm van methaan wordt uitgestoten (Stowa 2020). Dit kan resulteren in een tot 10 keer hogere broeikasgasemissie in wateren met een slechte waterkwaliteit dan in wateren met een goede waterkwaliteit (Stowa 2020). In figuur 5.3 wordt de broeikasgas uitstoot vergeleken tussen verschillende grote wateren met een verschillende trofiegraad (d.w.z. verschillende mate van voedselrijkdom). Ook daarin zien we verreweg de grootste uitstoot terugkomen in voedselrijke wateren.



Figuur 5.2. Schematische weergave van broeikasgasemissie in een situatie voor een helder en plantrijk water (links) en een troebel en algenrijk water (rechts) (Bron: conceptversie BlueCAN conceptversie 2022, aangepast van Deltafact).

### Afbraak van veen door sulfaat

De bijdrage van veenafbraak door sulfaat is door Vermaat *et al.* (2012) geschat op 5% van de totale veenafbraak en door Hendriks & Van den Akker (2012) op 3% voor veenbodems zonder kleidek en 5% (bij 60 cm drooglegging) tot 10% (bij 40 cm drooglegging) voor profielen met een kleidek.

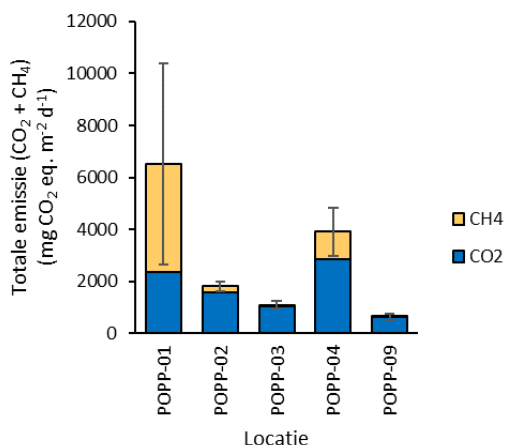
Sulfaat kan in het veen komen via infiltrerend water uit de sloten, kwel, atmosferische depositie, opgebrachte bemesting en bagger (Vermaat *et al.*, 2013). Sulfaat kan in de sloten komen via instroom van sulfaatrijk water, uit- en afspoeling en mineralisatie van pyriet en veen (Vermaat *et al.* 2013). Sulfaat kan reageren met het veen waardoor dit mineraliseert (Van Diggelen *et al.* 2013; Vermaat *et al.* 2013). Bij de afbraak van veen met sulfaat komen ook nutriënten vrij in het water, die vervolgens weer tot verhoogde broeikasgasemissie leiden. Daarnaast verdwijnt zwavel niet uit de sloten. Bij de reactie van sulfaat met veen wordt het sulfaat omgezet tot sulfide, dat vervolgens met ijzer bindt tot ijzersulfiden.

### Gemeten emissiewaarden van sloten

Per oppervlakte eenheid (m<sup>2</sup>, ha) is de emissie uit sloten in de meeste literatuur hoger dan uit land. Echter, omdat de oppervlakte aan sloten aanzienlijk lager is dan het oppervlak land is de totale emissie uit sloten veel lager dan uit land. De emissiewaarden van sloten zijn erg variabel. Hendriks *et al.* (in voorbereiding) hebben jaarrond metingen gedaan aan tien verschillende sloten in veenweiden. De gemiddelde jaarlijkse emissies van deze sloten varieerden tussen 3,57 en 60,1 g CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>/dag (overeenkomend met 12,7 tot 213 ton CO<sub>2</sub> eq. per hectare per jaar), waarbij CO<sub>2</sub> gemiddeld 43% (range 1,9 - 22,0 g CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/dag) en diffuus CH<sub>4</sub> 16% (0,1 - 16,5 g CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>/dag) bijdroeg aan de totale broeikasgasemissie. Ebullitie (opborrelen) van CH<sub>4</sub> maakte bijna de helft van de totale broeikasgasemissie uit (40%, 1,3 - 40,9 g CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>/dag). De N<sub>2</sub>O-emissies waren meestal laag. De CO<sub>2</sub>-emissies waren hoger in de wintermaanden, terwijl de ebullitie van CH<sub>4</sub> hoger was in de lente en de zomer. Arets *et al.* (2019) en Motelica-Wagenaar *et al.* (2020) gaan uit van lagere emissies (maar dat zijn geen nieuwe studies), namelijk van ca. 36 en 33 ton CO<sub>2</sub> eq. per hectare per jaar uit sloten respectievelijk. De grote verschillen in emissiewaarden laten zien, dat nog veel onderzoek en kennis nodig is om representatieve emissie-data van verschillende typen sloten te krijgen.

Er is op beperkte schaal onderzoek gedaan naar broeikasgasemissie in sloten in ADD. In het kader van het project BlueCAN zijn metingen gedaan, waaronder in september 2021 bij Poppenhuizen ten noorden van Aldeboarn. De broeikasgasemissie in sloten bij Poppenhuizen wordt geschat op een orde grootte van 10 ton CO<sub>2</sub>-eq. per hectare per jaar (rond de 2700 mg CO<sub>2</sub> eq/m<sup>2</sup>/d, zie figuur 5.3). Dit is net wat lager dan de laagste waarde (12,7 ton/ha/jr) in het onderzoek van Hendriks *et al.* (in voorbereiding), maar aanmerkelijk lager dan de waarden genoemd door Motelica-Wagenaar *et al.* (2020). Verschillen hebben mogelijk te maken met bodemtype, type water en verschillen in waterkwaliteit. Bovendien is het aantal metingen in de praktijk nog maar beperkt, en om die reden moeten de genoemde cijfers dan ook niet meer als een vingeroefening worden beschouwd.

De geschatte broeikasgasemissie voor sloten bij Poppenhuizen zijn naar alle waarschijnlijkheid niet representatief voor ADD, maar geldt als een eerste schatting. Het geeft de mogelijkheid om een gevoel te krijgen van de omvang van de emissie uit sloten, met alle beperkingen en slagen om de arm die genoemd zijn: de totale oppervlakte aan sloten in ADD wordt door Wetterskip Fryslân geschat op 160 ha (3% van de totale oppervlakte van ADD 5300 ha). Bij een emissie van 10 CO<sub>2</sub> equivalenten per ha per jaar, zou dit neerkomen op een totaal van 1600 ton CO<sub>2</sub>-eq. emissie uit sloten per jaar uit in ADD.



Figuur 5.3. Gestapeld staafdiagram van de broeikasgasemissie (in mg CO<sub>2</sub>-eq. m<sup>2</sup>/dag) van vijf gemeten sloten in Poppenhuizen. (Bron: conceptversie BlueCAN november 2022).

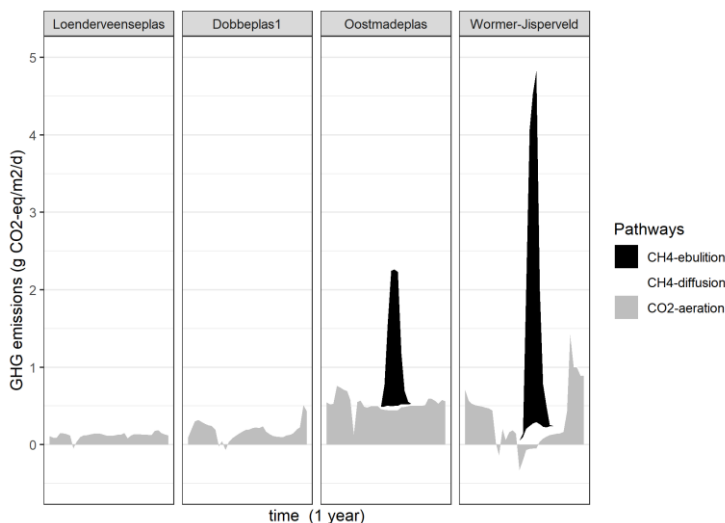
### Lachgasemissie

De emissie van N<sub>2</sub>O uit sloten is nog niet goed bekend (BlueCAN conceptversie 2022, Stowa, 2020). Lachgas is echter een sterk broeikasgas met een global warming potential (GWP) van 265 CO<sub>2</sub> equivalenten (bijna 10 keer zo sterk als methaan). Bij baggeren kan N<sub>2</sub>O vrijkomen als gevolg van onvolledige denitrificatie (Stowa, 2020). Daarnaast kan na een grote regenbui ook N<sub>2</sub>O vrijkomen als gevolg van onvolledige denitrificatie in het uit- en afspoelwater (Veraart *et al.* in prep.)

### 5.3 Beïnvloeden van broeikasgasemissie via de waterkwaliteit

De toevoer van nutriënten in een sloot kan via verschillende wegen verlopen (figuur 5.1). Een daarvan is de aanvoer van nutriënten via de aanvoer van voedselrijk water, dat als inlaatwater wordt gebruikt. Dan kan gaan om de aanvoer van boezemwater (via de inlaatpunten in het watersysteem) of water uit andere voedselrijke watersystemen. In ADD gaat het vooral om boezemwater. Een andere aanvoerweg is de runoff van bemesting vanaf de percelen, bijvoorbeeld in het voorjaar bij mestinjectie, of uitspoeling van meststoffen vanuit de perceelranden. Hier worden kort enkele opties benoemd om de aanvoer van nutriënten te beperken, en daarmee de waterkwaliteit te verbeteren. Deels zijn dit ook maatregelen die in het kader van de KRW of nitraatrichtlijn relevant zijn, en deels ook al zijn opgenomen in de ecoregelingen in het nieuwe GLB.

In zijn algemeenheid geldt, dat door een betere waterkwaliteit de broeikasgasemissie uit de sloten afneemt en de biodiversiteit toeneemt. Echter, hoeveel de emissie zal afnemen door het verbeteren van de waterkwaliteit is niet duidelijk in de literatuur (zie paragraaf 5.2.). Figuur 5.4 laat wat dat betreft ook grote verschillen zien tussen voedselrijke en voedselarme wateren. In eutrofe en hypertrofe systemen vindt vooral uitstoot van methaan plaats, in nutriëntarmere systemen voornamelijk CO<sub>2</sub>-uitstoot. Wat het effect is van verbetering van de waterkwaliteit in de watersystemen van ADD hangt samen met de huidige waterkwaliteit. Via een in 2023 opgestart onderzoek wordt die waterkwaliteit nader in beeld gebracht (Wetterskip Fryslân / Witteveen+Bos), ook in vergelijking tot de inlaat vanuit de boezem.



Figuur 5.4. Broeikasgasemissies (GHG) door het jaar heen, gemodelleerd voor systemen met verschillende trofiegraden. De Loenderveenseplas is oligotroof (voedselarm), de Dobbelpas is mesotroof (matig voedselrijk), de Oostmadeplas is eutroof (voedselrijk), en Wormer-Jisperveld is hypertroof (zeer voedselrijk). Bron conceptversie BlueCAN (november 2022).



### **Onbemeste randen en duurzaam bodembeheer**

Door de nutriëntbelasting in wateren te verlagen wordt bijgedragen aan waterkwaliteitsdoelen (KRW, biodiversiteit) en tevens aan het verlagen van broeikasgasemissies. De nutriëntbelasting kan onder andere worden verlaagd door aanpassing van het graslandbeheer (minder bemesten, verminderen van uitspoeling, niet-kerende grondbewerking) en door te werken met onbemeste randen langs sloten, waardoor uitspoeling naar het slootwater zo goed als voorkomen wordt (Groenendijk *et al.* 2021).

Met de introductie van verplichte bufferstroken per 1 maart 2023 in Nederland in het kader van de afbouw van de derogatie is de uitspoeling van nutriënten naar het oppervlaktewater sterk beperkt. Op de site <https://www.rvo.nl/onderwerpen/bufferstroken> is gedetailleerde informatie te vinden. Een bufferstrook is een strook grond waarop geen mest, chemische gewasbeschermingsmiddelen of biociden worden gebruikt en die begint vanaf de insteek van de sloot. Wanneer sprake is van een flauw talud dan start de strook op 1 m vanaf de waterlijn. De breedte van de strook is afhankelijk van het type waterloop en wordt op perceelsniveau bepaald door RVO.

### **Peilverhogingen en flexibel peil (HAKLAM)**

Peilverhoging vermindert de veenoxidatie op het land, maar veroorzaakt mogelijk verhoogde nutriëntbelastingen van wateren en daarmee verhoogde broeikasgasemissies uit wateren. Peilverhogingen in ADD vragen namelijk, vooral in het zomerhalfjaar, een vergrote aanvoer van water, en dat komt uit de Friese boezem. Het boezemwater wordt steeds schoner, maar met name in het zomerhalfjaar kan het toch voedselrijk zijn. Een ander aspect van een hoog peil is, dat het risico op denitrificatie en afspoeling van mest groter is, wat voor verhoogde nutriëntbelasting van de sloten zou kunnen zorgen. De inzet van onbemeste bufferstroken langs watergangen (zie hiervoor) zal de uitspoeling van meststoffen al sterk beperken.

Flexibel peilbeheer is een belangrijke stap in ADD om peilverhoging in het veenweidegebied mogelijk te maken, en tegelijkertijd de effecten daarvan op de bedrijfsvoering te beperken. Momenteel loopt er in ADD een pilot om ervaring hiermee op te doen. Dit flexibele peilbeheer wordt uitgevoerd volgens het principe van HAKLAM: Hoger peil Als het Kan, Lager Als het Moet. Voor HAKLAM is het nodig dat de aan- en afvoer van water optimaal is, om relatief snel te kunnen reageren op droogte en natte situaties. Daarvoor wordt veel water in- en uitgelaten, waardoor HAKLAM mogelijk zou kunnen leiden tot verhoogde nutriëntbelastingen van wateren. En daarmee tot verhoogde broeikasgasemissies uit wateren. Ten slotte kunnen wisselende slootpeilen mogelijk leiden tot minder stabiele slootkanten (Pijlman *et al.* 2020), met als gevolg meer erosie en daarmee hogere organisch stof belastingen van de sloten. Het is nog onbekend hoe groot de effecten van HAKLAM in de praktijk zijn, hier is (praktijk-)onderzoek en/of monitoring gewenst. Via een in 2023 opgestart onderzoek wordt dit nader in beeld gebracht (Wetterskip Fryslân / Witteveen+Bos).

### **Baggeren van sloten**

Met baggeren wordt bedoeld dat sloten periodiek op diepte worden gebracht, en met een kraan de baggerspecie wordt verwijderd. Dat is veel ingrijpender dan het jaarlijks schonen van de sloten, waarbij vaak tot op de slootbodem wordt geschoond en de baggerspecie in de sloot blijft (maar soms ook deels meegaat, afhankelijk of met een open of gesloten bak wordt geschoond). Of baggeren voor meer of minder broeikasgasemissies vanuit de sloot leidt, direct of indirect door invloed op de waterkwaliteit, is afhankelijk van de samenstelling van het baggermateriaal, de onderliggende bodem en hoe het baggermateriaal verwerkt wordt (Stowa, 2020). Eerste, voorlopige metingen van het team van S. Kosten en L. Hendriks (RUU) laten zien, dat in bagger veel koolstof kan zijn opgeslagen (pers. med. S. Kosten, RUU).

Metingen van BlueCAN laten geen rechtstreeks verband zien tussen recent baggeren en broeikasgasemissie. Aan de andere kant laat onderzoek van Nijman *et al.* (2022) een trend van lagere CH<sub>4</sub> emissies zien bij baggeren voor ondiepe plassen. De achterliggende oorzaak hiervan is mogelijk dat via baggeren de sliblaag met methaan-producerende bacteriën wordt verwijderd en ook de waterplanten, wat tot minder dood organisch materiaal in het water leidt (Nijman *et al.* 2022). Echter, bij baggeren in een veengebied kan ook een onderliggende laag met organisch materiaal vrij komen te liggen, waardoor de broeikasgasemissie ook kan toenemen. De kennis hieromtrent is nog maar zeer beperkt, en daarom is nog geen eenduidig antwoord te geven op de vraag of baggeren voor lagere of hogere broeikasemissies leidt. In Van Beek *et al.* (2010) wordt deze kennisleemte onderstreept: 'Het is hoog tijd voor een integrale vergelijkende studie op veldschaal naar de effecten van verschillende vormen van baggeren op de bemesting, broeikasgasemissies en uitspoeling naar grond- en oppervlaktewater.'

#### **Effecten van fauna op de waterkwaliteit**

In deze korte beschouwing wordt niet specifiek ingegaan op de effecten van fauna op de broeikasemissies. Echter, waterfauna – in het bijzonder bodemwoelende vissen - kunnen wel voor meer bioturbatie zorgen en daardoor mogelijk tot hogere emissies door zuurstof in de waterbodem te brengen. Aan de waterkant kan beweiding voor vertrapping van de oevers zorgen en daarmee voor afkalving, en zo bijdragen aan een hogere nutriëntbelasting van het slootwater. Ook bij muizenuitbraken – zoals die er geregeld waren in Fryslân in de afgelopen jaren (Wymenga *et al.* 2021) - kan er sprake zijn van extra uitspoeling van nutriënten naar het oppervlaktewater.

#### **5.4 Beïnvloeden van broeikasgasemissie door slootschonen**

Een groot deel van de sloten wordt jaarlijks geschoond. Er wordt jaarlijks gehekkeld waarbij er voornamelijk plantmateriaal wordt verwijderd, en er wordt eens in de 5 tot 10 jaar gebaggerd (zie hiervoor). Het vrijgekomen materiaal wordt op de slootranden verspreid waar het mineraliseert. Het is nog onbekend in de literatuur hoeveel emissie vrijkomt bij de mineralisatie van hekkel- en baggerspecie. De emissie is onder andere afhankelijk van de hoeveelheid materiaal, de samenstelling van het materiaal en hoe het vrijgekomen materiaal wordt verwerkt. Het volume aan hekkelspecie is niet bekend, maar bij een slootlengte van alleen al in ADD-Zuid van 22 km, gaat dat jaarlijks om een flink volume.

#### **Verschillende vormen van sloot schonen**

Er zijn verschillende opties voor het slootschonen, maar er is weinig tot niets bekend over verschillen in broeikasgasemissies. Verschillen liggen evenwel voor de hand: wanneer alleen plantmateriaal uit de sloten worden gehaald zal dat naar verwachting minder belastend zijn dan wanneer ook een deel van de slootbodem wordt meegenomen (zie de opmerking onder de kop 'baggeren'). Als er ook baggerspecie uit de sloot wordt gehaald, zal er meer organisch materiaal op de oever komen, wat door mineralisatie in potentie een bron van uitstoot kan zijn. Een extensiever slootbeheer, en daarmee het minder verstoren van de waterbodem, is in elk geval gunstig voor de flora en fauna in de sloot.

Hekkel- of baggerspecie kan op verschillende manieren op de kant worden gelegd. Het kan worden verspreid op het aangrenzende perceel of in hopen op de slootrand worden gedeponeerd. Ervan uit gaande dat al het (organische) materiaal afbreekt, kan het materiaal beter genoeg zuurstof hebben om oxisch af te breken tot CO<sub>2</sub> dan dat het anoxisch afbreekt waarbij CH<sub>4</sub> (methaan) vrijkomt. CH<sub>4</sub> is namelijk een sterker broeikasgas dan CO<sub>2</sub>. Met andere

woorden: afbraak op land (verspreiding over het perceel) is beter dan in de sloot. Het betekent wel, dat het materiaal niet in hopen op de slootrand gelegd moet worden, maar kort na het slootschonen – en na indroging – wordt verspreid over het perceel met een frees. In de praktijk gebeurt dat overigens ook vaak. Dit is zeker een punt van aandacht bij onbemeste bufferstroken.

## **5.5 Broeikasgasemissie door grondwerkzaamheden**

Voor aanpassingen aan het watersysteem is het mogelijk nodig dat extra watergangen moeten worden gegraven. Afhankelijk van de diepte en bodemopbouw wordt daarbij veen uitgegraven dat oxideert bij blootstelling aan zuurstof. Volgens Bos *et al.* (2011) is de CO<sub>2</sub> voetafdruk van veenafraving circa 0,25 ton CO<sub>2</sub> per 1 m<sup>3</sup> veen. Per meter te graven veensloten zou dat neerkomen op een emissie van circa 0,49 ton CO<sub>2</sub> equivalenten.

Bovenstaande laat zien, dat het nodig is om bij de inrichting van het watersysteem en het treffen van maatregelen een goed inzicht en overzicht te hebben van de broeikasgasemissie over de tijd. Het is daarbij van belang dat een volledig beeld bestaat van de effecten op milieu, water, klimaat en biodiversiteit. Daarvoor is een LCA (Levenscyclusanalyse) per maatregel gewenst, zodat ze onderling vergelijkbaar zijn en de klimaatwinst over het geheel van de cyclus (aanleg en periode van implementatie) kan worden beoordeeld.

## 6 Kennishiaten en onzekerheden

---

Uit de voorgaande hoofdstukken zijn kennishiaten en onzekerheden naar voren gekomen. Veel van deze zaken zijn niet nieuw en momenteel – direct of indirect - onderwerp van onderzoek. Bijvoorbeeld in het kader van het onderzoek van het NOBV (2023), het project “Integrale bodemverbetering Feangreiden” en andere veenweide-onderzoeken<sup>8</sup>.

### 6.1 Graslanden in veenweiden

- Er is weinig onderzoek gedaan naar de effecten van beheer en gebruik op broeikasgasemissie en C-vastlegging in veenweidegrasland in vergelijking tot grasland op minerale bodems. Nader onderzoek naar de uitwerking van graslandbeheermaatregelen in veenweiden en verschillen met minerale bodems zijn gewenst. Het gaat dan in het bijzonder ook om beter zicht te krijgen of maatregelen op minerale bodems ook relevant zijn voor veengronden met een mineraal kleidek, en hoe die zich verhouden tot de reguliere praktijk;
- Kruidenrijk grasland heeft een belangrijke meerwaarde voor de biodiversiteit (o.a. weidevogels, insecten), voor droogteresistentie en mogelijk ook voor de koegezondheid. Op minerale bodems zijn er belangrijke voordelen van diepwortelende kruidensoorten, maar in veenweiden verhoogt dat mogelijk de broeikasgasemissie. Er kan mogelijk wel een positief effect zijn op de gevoeligheid voor droogte. Het is gewenst om na te gaan wat vanuit die optiek specifiek voor veenweiden de beste kruidenmengsels zijn, en hoe zich dat verhoudt tot bijvoorbeeld de ontwikkeling van kruidenrijke graslanden voor weidevogels;
- Er is meer kennis nodig over de rol van een kleidek op het veen en van bijmengen van klei in veen, de afbraak uit het kleidek en onderliggende veen en het transport van organische (kool)stof tussen kleidek en veen. Onderzoek naar de mogelijke rol van klei IN veen is inmiddels opgestart vanuit het project “Integrale bodemverbetering Feangreiden” (Van Agtmaal & Keuskamp 2023). Verder onderzoek is nodig het mechanistisch proces te begrijpen en maatregelen te ontwerpen.

### 6.2 Sloten in veenweiden

- Onderzoek aan emissies uit wateren is volop gaande (bijv. team S. Kosten & L. Hendriks Rijksuniversiteit Utrecht, Deltares cs). Verder onderzoek is nodig om representatieve emissie-data van verschillende typen sloten te krijgen.
- In samenhang met bovenstaande neemt het begrip over de factoren die de broeikasemissies uit sloten sturen steeds meer toe, in het bijzonder over de waterkwaliteit te verbeteren. Ook hier geldt, dat verder onderzoek gewenst is om de juiste maatregelen te kunnen ontwerpen, met name op het gebied van slootschonen / baggeren is en het effect van verschillende slootschoonmethodes op de broeikasgasemissie, uit de sloot zelf en op de rand. Een belangrijke kennisleemte is bijvoorbeeld wat de optimale baggerfrequentie is voor een optimale broeikasgasreductie én watervoerende functie;
- Onderzoek naar de effecten van flexibel peilbeheer (HAKLAM) op de waterkwaliteit is van groot belang. Het gaat dan om het effect van verschillende peilregimes op de waterkwaliteit, de doorwerking daarvan op broeikasgasemissies uit water, en of er maatregelen zijn om daar mee om te gaan. Een eerste onderzoek daarnaar is thans opgestart.

---

<sup>8</sup> Diverse onderzoeken WUR, en bijvoorbeeld Living Lab Veenvitaal van de Vrije Universiteit van Amsterdam - <https://veenvitaal.info/>

## 7 Literatuur

---

- Acharya, B. S., Rasmussen, J., & Eriksen, J. 2012. Grassland carbon sequestration and emissions following cultivation in a mixed crop rotation. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 153, 33-39.
- 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. 2019. *Greenhouse gas reporting of the LULUCF sector in the Netherlands. Methodological background, update 2019, Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu*. WOt-technical report 146, 113 pp.
- Bai, Y. & M. F. Cotrufo 2022. Grassland soil carbon sequestration: Current understanding, challenges, and solutions. *Science* 377 (6606), doi: 10.1126/science.abo2380.
- Balen, D.J.M. van, Topper, C.G., Geel, W.C.A. van, Haan, J.J. de, Berg, W. van den, Haas J.G. de & Bussink, D.W. 2016. Effecten bodem- en structuurverbetersaars. Lelystad, PPO Publicatienummer 693.
- Bardgett, R. D., Wardle, D. A., & Yeates, G. W. (1998). Linking above-ground and below-ground interactions: how plant responses to foliar herbivory influence soil organisms. *Soil Biology and Biochemistry*, 30(14), 1867-1878.
- Bekkema, M., E. Wymenga, J. Loonstra 2022. Oud gras- en greppelland in beeld. Remote sensing analyse voor het in kaart brengen en ecologisch waarderen van (oud) grasland en greppelland in Friesland. A&W-rapport 22-021. Altenburg & Wymenga ecologisch onderzoek, Feanwâlden.
- Bol, R., Moering, J., Kuzyakov, Y., & Amelung, W. 2003. Quantification of priming and CO<sub>2</sub> respiration sources following slurry-C incorporation into two grassland soils with different C content. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 17(23), 2585-2590.
- Bos, M. G., Diemont, W. H., & Verhagen, A. 2011. Sustainable peat supply chain. Alterra-rapport-Wageningen University and Research Centre, Wageningen.
- Brouns, K. (2016). *The effects of climate change on decomposition in Dutch peatlands: an exploration of peat origin and land use effects* (Doctoral dissertation, Utrecht University). Utrecht.
- Button, E. S., J. Pett-Ridge, D. v. Murphy, Y. Kuzyakov, D. R. Chadwick & D. L. Jones, "Deep-C storage: Biological, chemical and physical strategies to enhance carbon stocks in agricultural subsoils," *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 170. Elsevier Ltd, Jul. 01, 2022. doi: 10.1016/j.soilbio.2022.108697.
- Chabbi, A., C. Rumpel, K. Klumpp, & A. J. Franzluebbers 2022. Managing grasslands to optimize soil carbon sequestration. pp. 523–554 in Rumpel (ed) 2022. doi: 10.19103/AS.2022.0106.17.
- Chang, J., Ciais, P., Gasser, T., Smith, P., Herrero, M., Havlík, P. & Zhu, D. (2021). Climate warming from managed grasslands cancels the cooling effect of carbon sinks in sparsely grazed and natural grasslands. *Nature Communications*, 12(1), 1-10.
- Deltares, Witteveen+Bos, B-Ware. BlueCAN. Conceptversie 2022.
- Deru, J. 2021. Soil quality and ecosystem services of peat grasslands. Phd. Wur, Wageningen.
- EIP-AGRI Focus Group Grazing for Carbon 2018. Mini papers at <https://ec.europa.eu/eip/agriculture/sites/default/files/>.
- Evans, C. D., Peacock, M., Baird, A. J., Artz, R. R. E., Burden, A., Callaghan, N. & Morrison, R. 2021. Overriding water table control on managed peatland greenhouse gas emissions. *Nature*, 593(7860), 548-552.
- Franzluebbers, A. J., & Stuedemann, J. A. 2003. Bermudagrass management in the Southern Piedmont USA. III. Particulate and biologically active soil carbon. *Soil Science Society of America Journal*, 67(1), 132-138.
- Freibauer, A., Rounsevell, M. D., Smith, P., & Verhagen, J. 2004. Carbon sequestration in the agricultural soils of Europe. *Geoderma*, 122(1), 1-23.
- Fritz, C., Weideveld, S., Velthuis, M., & M. van den Berg 2021. Broeikasgasuitstoot van Friese veenbodems. Kunnen onderwaterdrainage en infiltratie aan een duurzame emissiereductie bijdragen? Rapport PF2016/165140. Radboud Universiteit, Nijmegen.
- Galama, A.H. 2023. Regeneratieve landbouw en koolstofvastlegging - Actuele inzichten en implicaties voor het veenweidegebied . Galama Sustainable Solutions, Hilaard.

- Govaerts, B., Verhulst, N., Castellanos-Navarrete, A., Sayre, K. D., Dixon, J., & Dendooven, L. 2009. Conservation agriculture and soil carbon sequestration: between myth and farmer reality. *Critical Reviews in Plant Science*, 28(3), 97-122.
- Greenhouse gas protocol (2016). Global Warming Potential Values. Geraadpleegd op 23 november 2022 op [https://www.ghgprotocol.org/sites/default/files/ghgp/Global-Warming-Potential-Values%20%28Feb%2016%202016%29\\_1.pdf](https://www.ghgprotocol.org/sites/default/files/ghgp/Global-Warming-Potential-Values%20%28Feb%2016%202016%29_1.pdf).
- Gregory, A. S., Dungait, J. A. J., Watts, C. W., Bol, R., Dixon, E. R., White, R. P., & Whitmore, A. P. 2016. Long-term management changes topsoil and subsoil organic carbon and nitrogen dynamics in a temperate agricultural system. *European Journal of Soil Science*, 67(4), 421-430.
- Groenendijk, P., L. van Gerven, E. van Boekel & P. Schipper 2021. Maatregelen op en rond landbouwpercelen ter vermindering van de nutriëntenbelasting van water. Achtergrondinformatie effectiviteit landbouwmaatregelen. ten behoeve van de Nationale Analyse Waterkwaliteit. Kennisimpuls Waterkwaliteit. Rapportnr. KIWK 2021-54. STOWA, Utrecht.
- Hendriks, L., S. Weideveld, C. Fritz, T. Stepina, R. C. H. Aben, N. E. Fung & S. Kosten *in prep*. Drainage ditches are greenhouse gas hotlines in peat landscapes with strong seasonal and spatial variation in diffusive and ebullitive emissions. *Submitted*. *Freshwater Biology*.
- Hendriks, R. F. A., & Van den Akker, J. J. H. 2012. Effecten van onderwaterdrains op de waterkwaliteit in veenweiden: modelberekeningen met SWAP-ANIMO voor veenweide-eenheden naar veranderingen van de fosfor-, stikstof- en sulfaatbelasting van het oppervlaktewater bij toepassing van onderwaterdrains in het westelijke veenweidegebied (No. 2354). Alterra, Wageningen-UR.
- Hennessy, D. *et al.* (2018). "EIP-AGRI Focus Group-Grazing for carbon Mini-paper-Guidelines.". EIP-Agri. [https://ec.europa.eu/eip/agriculture/sites/default/files/fg25\\_03\\_minipaper\\_guidelines.pdf](https://ec.europa.eu/eip/agriculture/sites/default/files/fg25_03_minipaper_guidelines.pdf)
- Hoekstra, N.J., Sleiderink, J.W.M., Deru, J.G.C., van Agtmaal, M. & van Eekeren, N. 2020. Hydrofobie op veengrond: oorzaken en maatregelen - Rapportage van lab-experimenten in Project Integrale Bodemverbetering Feangreide. 2020-047 LbD. Louis Bolk Instituut, Bunnik.
- Hoving, I. E., van Houwelingen, K. M., & van der Vegte, D. Z. 2008. Water gerelateerde maatregelen melkveehouderij ter vermindering van de broeikasgasemissie op zand-en veengrond (No. 129). Animal Sciences Group.
- Iepema, G., Hoekstra, N. J., de Goede, R., Bloem, J., Brussaard, L., & van Eekeren, N. 2022. Extending grassland age for climate change mitigation and adaptation on clay soils. *European Journal of Soil Science*, 73(1), e13134.
- Jones, M. B., & Donnelly, A. (2004). Carbon sequestration in temperate grassland ecosystems and the influence of management, climate and elevated CO<sub>2</sub>. *New Phytologist*, 164(3), 423-439.
- Kosten, S. (14th October 2021). Greenhouse gas emissions from inland waters: quantification and potential mitigation measures [presentatie]
- Lesschen, J. P., H. Heesmans, J. Mol, A. van Doorn, E. Verkaik, I. van den Wyngaert, P. Kuikman 2012. Mogelijkheden voor koolstofvastlegging in de Nederlandse landbouw en natuur. Wageningen, Alterra, Alterra-Rapport 2396. Wageningen.
- Motelica-Wagenaar, A. M. & Beemster, J. 2020. Greenhouse gas emissions and surface water management. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 382, 643-649.
- Motelica-Wagenaar, A. M., Pelsma, T. A., Moria, L., & Kosten, S. 2020. The potential impact of measures taken by water authorities on greenhouse gas emissions. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 382, 635-642.
- Nijman, T. P., Lemmens, M., Lurling, M., Kosten, S., Welte, C. & Veraart, A. J. 2022. Phosphorus control and dredging decrease methane emissions from shallow lakes. *Science of the Total Environment*, 847, 157584.
- NOBV 2023. Samenvatting rapportage jaar 3. Nationaal Onderzoeksprogramma Broeikasgassen Veenweiden. NOBV-onderzoeksconsortium, definitieve versie d.d. 14 juni 2023. Zie ook <https://www.nobveenweiden.nl/3-juli-2023-webinar-drie-jaar-nobv-waar-staan-we/>

- Peacock, M, J Audet, D Bastviken, M N Futter, V Gauci, A Grinham, J A Harrison, M S Kent, S Kosten, C E Lovelock, A J Veraart & C D Evans 2021. Global importance of methane emissions from drainage ditches and canals. *Environ. Res. Lett.* 16 044010.
- Pijlman, J., Roelen, S., & van Eekeren, N. 2020. Klimaatmaatregelen in het veenweidegebied in relatie tot biodiversiteit, bodem- en waterkwaliteit. Louis Bolk Instituut, Publicatienummer, 36.
- Poyda, A., Reinsch, T., Kluß, C., Loges, R., & Taube, F. 2016. Greenhouse gas emissions from fen soils used for forage production in northern Germany. *Biogeosciences*, 13(18), 5221-5244.
- Provincie Fryslân (2019). MKBA remming bodemdaling in het Friese veenweidegebied. Provincie Fryslân, Leeuwarden.
- Pucheta, E., Bonamici, I., Cabido, M. & Díaz, S. 2004. Below-ground biomass and productivity of a grazed site and a neighbouring ungrazed enclosure in a grassland in central Argentina. *Austral Ecology*, 29(2), 201-208.
- Rumpel, C. (ed) 2022. *Understanding and fostering soil carbon sequestration*. Burleigh Dodds Series in Agricultural Science, Paris
- Sándor, R., Ehrhardt, F., Brilli, L., Carozzi, M., Recous, S., Smith, P. & Bellocchi, G. 2018. The use of biogeochemical models to evaluate mitigation of greenhouse gas emissions from managed grasslands. *Science of the Total Environment*, 642, 292-306.
- Schepens, J. A. B., Timmermans, B. G. H., Fuchs, L., Peters, R., Bloem, J., Heupink, D. T. & Koopmans, C. J. 2022. Meerjarige evaluatie van maatregelen voor het vastleggen van koolstof in minerale gronden. *Slim Landgebruik. Publicatienr.* 16.
- Schils, R.L.M., C. Bufe, C.M. Rhymer, R.M. Francksen, V.H. Klaus, M. Abdalla, F. Milazzo, E. Lellei-Kova, H. ten Berge, C. Bertora, A. Chodkiewicz, C. Dămăţircă, I. Feigenwinter, P. Fernandez-Rebollo, S. Ghiasi, S. Hejduk, M. Hiron, M. Janicka, R. Pellato, K.E. Smith, R. Thorman, T. Vanwalleghem, J. Williams, L. Zavattaro, J. Kampen, R. Derkx, P. Smith, M. Whittingham, N. Buchmann, J.P. Newell Price 2022. Permanent grasslands in Europe: Land use changes and intensification decrease their multifunctionality. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 330: 3-10.
- Sebastia, M.T. *et al.* (2018). "EIP-AGRI Focus Group-Grazing for carbon Mini-paper-Mixtures of species."
- Smith, P. 2014. Do grasslands act as a perpetual sink for carbon? *Global change biology*, 20(9), 2708-2711.
- Smolders, A., van Diggelen, J., Loermans, J., van Dijk, G., van Mullekom, M. & Lamers, L. (2013). Het veenweidegebied: pompen en verzuipen?. *De Levende Natuur*, 114(4), 127-133.
- Smolders, A.J.P., R. van Diggelen, J., Geurts, J., Roelofs, E., Geurts, J. J. M., Roelofs, J. G. M., Lucassen, E. & Lamers, L. 2013. Waterkwaliteit in het veenweidegebied. *Landschap* 2013(3): 145-153.
- Soussana, J. F., Loiseau, P., Vuichard, N., Ceschia, E., Balesdent, J., Chevallier, T. & Arrouays, D. 2004. Carbon cycling and sequestration opportunities in temperate grasslands. *Soil use and management*, 20(2), 219-230.
- Soussana, J. F., Tallec, T. & Blanfort, V. 2010. Mitigating the greenhouse gas balance of ruminant production systems through carbon sequestration in grasslands. *Animal*, 4(3), 334-350.
- Staps, S. (2018). Handleiding goed koolstofbeheer. Publicatienummer 2017-038. Louis Bolk Instituut, Bunnik.
- Staps, S., Rougoor, C., Lesschen, J. P. & Cozijnsen, J. 2021 *Methode voor vaststelling van CO2-vastlegging in de bodem*. Stichting Nationale Koolstofmarkt.
- Stowa (2020). Deltafact - Broeikasgasemissies uit zoetwater. STOWA, Amersfoort.
- Tiemeyer, B., Albiac Borraz, E., Augustin, J., Bechtold, M., Beetz, S., Beyer, C. & Zeitz, J. (2016). High emissions of greenhouse gases from grasslands on peat and other organic soils. *Global change biology*, 22(12), 4134-4149.
- Toal, M. E., Yeomans, C., Killham, K., & Meharg, A. A. (2000). A review of rhizosphere carbon flow modelling. *Plant and Soil*, 222(1), 263-281.
- Van Agtmaal, M. & J. Keuskamp 2023. Klei in veen als maatregel tegen veenafbraak – Verkennende laboratoriumproeven met veen en klei uit Friesland. Publicatienummer 2023-007 LbD. Louis Bolk Instituut, Bunnik.

- Van Agtmaal, M., G. Iepema, J. Deru, & N. van Eekeren, N. 2018. Effect van kunstmestgift op afbraak van organische stof in veenweidebodems. Publicatienummer 2018-016 LbD. Louis Bolk Instituut/ Van Hall Larenstein, Bunnink/Leeuwarden.
- Van Beek, C. L., Rietra, R. P. J. J., Harmsen, J., & van der Bolt, F. J. E. 2010. De effecten van baggeren op emissies naar water en lucht. *H2O: tijdschrift voor watervoorziening en afvalwaterbehandeling*, 2010(9), 34-35.
- van den Akker, J. J. H., Massop, H. T. L. & Rietra, R. P. J. J. 2018. *Potentiële emissiereductie broeikasgassen Fries veenweidegebied: waterhuishoudkundige en bodembeheermaatregelen om broeikasemissies te beperken* (No. 2905). Wageningen Environmental Research. Wageningen.
- Van den Pol-van Dasselaar, A., Van Beusichem, M. L. & Oenema, O. 1997. Effects of grassland management on the emission of methane from intensively managed grasslands on peat soil. *Plant and soil*, 189(1), 1-9.
- Van Dijk, G., M. Poelen, S. Kosten, C. Cusell & A.J.P. Smolders (in prep.) De consequenties van baggeren op de broeikasgasemissies van de Noordelijke Langerarseplas, RP-18.206.20.11, Onderzoekcentrum B-WARE, Radboud Universiteit en Witteveen + Bos i.o.v. Hoogheemraadschap Rijnland.
- Van Eekeren, N. *et al.* 2018. "EIP-AGRI Focus Group-Grazing for carbon Mini-paper-Effects and trade-offs."
- Van Tol-Leender, D., Krotters, M., de Groot, W., Gerritsen, P., Reijneveld, A., van Egmond, F. & Kuikman, P. 2019. *Koolstofvoorraad in de bodem van Nederland (1998-2018): CC-NL* (No. 2974). Wageningen Environmental Research.
- Veenendaal, E. M., Kollé, O., Leffelaar, P. A., Schrier-Uijl, A. P., Van Huissteden, J., Van Walsem, J. & Berendse, F. 2007. CO<sub>2</sub> exchange and carbon balance in two grassland sites on eutrophic drained peat soils. *Biogeosciences*, 4(6), 1027-1040.
- Veenweiden Innovatiecentrum (VIC), LBI & Royal Haskoning (zonder jaar). Klei in veen: doorontwikkeling van een oud principe. Veenweiden Innovatiecentrum, Zegveld.
- Vermaat, J., Harmsen, J. O. O. P., Hellmann, F. R. I. T. Z., Geest, H., Klein, J., Kosten, S., Mes, R. & M. Ouboter 2013. Sulfaatbronnen in het Hollandse veenlandschap. *Landschap* 30: 5-13.
- Vermaat, J., Harmsen, J., Hellmann, F., van der Geest, H., de Klein, J. J. M., Kosten, S. & Verhoeven, J. 2012. Zwaveldynamiek in het West-Nederlandse laagveengebied: met het oog op klimaatverandering. Vrije Universiteit.
- Villarino, S.H., P. Pinto, R. B. Jackson & G. Piñeiro 2021. Plant rhizodeposition: A key factor for soil organic matter formation in stable fractions. *Sci Adv*, 7 (16): 3176–3190, doi: 10.1126/sciadv.abd3176.
- Wymenga, E. , N. Beemster, D. Bos, M. Bekkema & E. van der Zee 2021. Recurring outbreaks of common vole (*Microtus arvalis*) in grasslands in the low-lying parts of the Netherlands. *Lutra* 64: 81-101.





**Adres**

Suderwei 2  
9269 TZ Feanwâlden  
Telefoon 0511 47 47 64  
[info@altwym.nl](mailto:info@altwym.nl)

[www.altwym.nl](http://www.altwym.nl)

**Adres Amsterdam**

Gebouw Matrix II,  
Science Park 400/K1.05  
1098 XH Amsterdam