Metingen van CO₂ emissie ten gevolge van hydrologische verbeteringsmaatregelen op schalterveen in Friesland.

J. van Huissteden, VOF Kytalyk Carbon Cycle Research oktober 2023.



Table of Contents

Samenvatting	2
1. Inleiding	3
2. Onderzoekslocatie en methoden	5
3. Resultaten	8
4. Statistische analyse	
5. Discussie	
6. Conclusies	21
Literatuur	22

Samenvatting.

In de periode juni-september zijn CO₂-metingen uitgevoerd om CO₂ emissie op een schalterveenbodem in Friesland te bepalen. Het doel van de metingen was detecteren van veenoxidatie, die kan ontstaan bij maatregelen om de hydrologische eigenschappen dit type veenbodem te verbeteren. Een schalterveen-bodem bestaat uit een sterk krimpende en zwellende kleilaag op veenmosveen met een slechte verticale doorlatendheid. De maatregel behelst het boren van 60 cm diepe gaten door het schalterveen, om de doorlatendheid van het veen te verbeteren.

De metingen zijn uitgevoerd in de eerste helft van juni 2023 en september 2023 met automatische fluxkamers, op een maatregel-lokatie en een controlelokatie zonder maatregel. In beide perioden was het weer droog en warm; in juni 2023 is de onderzoekslokatie in het midden van de meetperiode bevloeid met slootwater. De droogte bood door de lage grondwaterstand ideale omstandigheden om eventuele verschillen in veenoxidatie te detecteren.

De nachtelijke ecosysteemrespiratie (R_{eco}) geeft de beste maat voor verschillen tossen beide meetlokaties. De metingen geven statistische significante verschillen aan in R_{eco} tussen de maatregel- en de controle-plot; deze verschillen zijn echter niet consistent tussen beide meetperioden. Uit statistische analyse van de gegevens blijkt, dat de opname van CO₂ door fotosynthese de belangrijkste factor is die R_{eco} bepaalt. Dat wijst op dominantie van omzetting van recent geproduceerde labiele organische stof in de wortelzone. Een bijdrage uit veen is niet te detecteren, hoewel de grondwaterspiegel voldoende laag was tijdens de meetperiode voor detectie van verschillen in veenoxidatie.

De metingen geven ook een inzicht in het effect van bevloeiïng. Op de maatregelplot, die geïnundeerd werd met slootwater, ontstonden na bevloeiïng hoge CO₂ emissies. Mogelijke verklaringen hiervoor zijn de remming van microbiële afbraak van labiel organische stof uit mest en graswortels door droogte, waardoor er een inhaaleffect ontstaat wanneer er weer vocht beschikbaar is. Ook afbraak van organische stof in het slootwater kan hebben bijgedragen.

1. Inleiding.

"Schalterveen" is een in Friesland gebruikte term voor een bodem met een sterk gelaagde veenmoslaag, bedekt met een laag zeeklei van enkele decimeters (Fig. 1). Dit bodemtype geeft bij droogteperiodes landbouwkundige problemen in de vorm van scheurvorming, het onstaan van microreliëf, en irreversibele uitdroging / hydrofobie van de veenlaag. De veenlaag neemt dan vervolgens aan het einde van de droogteperiode maar zeer langzaam water op. In het Friese veenweidegebied is ca 8000 ha van dit bodemtype aanwezig.

MV	bodem	Omschrijving		
-10	klei			
-20	klei			
-30	klei	korrelig, onsamenhangend,		
-40	klei	wortelzone		
-50	klei			
-60	klei			
-70	veen	Coholtowyoon commont		
-80	veen	schalterveen, compact,		
-90	veen	gelaagu, grof materiaai		
-100	veen	zanderig, overgangslaagje		
-110	veen			
-120	zand			
-130	zand			
-140	zand			
-150	zand			
-160	zand	org. materiaal		
-170	zand			
-180	zand			

Figuur 1. Schalterveen-profiel op de onderzoekslocatie. Naar boorgegegevens van Acacia Water.

Op een perceel met schalterveen bij Koudefurderige wordt een proef uitgevoerd waarbij met het boren van gaten in de bodem het schalterveen wordt doorbroken en diepere doorworteling kan worden gestimuleerd. De boorgaten worden opgevuld met zand of gemengd materiaal uit de boorgaten of een combinatie hiervan. De eerste resultaten geven aan dat de boorgaten inderdaad resulteren in een betere afvoer van regenwater naar het grondwater.

Een vraag daarbij is, in hoeverre de oxidatie van veen en CO₂-emissie wordt beïnvloed door deze maatregel. Uit eerder onderzoek (o.a. Säurich et al., 2019) blijkt dat oxidatie van veen sterk variëert bij verschillende vochtgehaltes: laag bij droge bodem, toenemend naar een optimum bij vochtiger bodem en afnemend naarmate de bodem meer met water verzadigd word. De afname van de bodemrespiratie bij sterke verdroging wordt veroorzaakt doordat de geringe beschikbaarheid van vocht en hydrofobie de bacteriële activiteit remmen. Bij toenemende waterverzadiging van de bodem wordt de beschikbaarheid van zuurstof remmend.

Metingen van CO_2 emissie uit de bodem (bodemrespiratie) onder veldcondities worden doorgaans uitgevoerd met kamers, waarbij een afgesloten meetkamer over de bodem wordt geplaatst. Gedurende enkele minuten wordt de toe- of afname van de CO_2 concentratie in de lucht in de kamer gemeten. Hieruit kan de CO_2 emissie uit de bodem en vegetatie worden bepaald of, overdag, de netto opname van CO_2 door fotosynthese. Nachtelijke metingen geven de beste indicatie voor verschillen in bodemrespiratie.

Overigens is bij veenbodems slechts een deel van de bodemrespiratie daadwerkelijk afkomstig uit oxidatie van veen; een aanzienlijk deel is afkomstig van respiratie van planten en de oxidatie van verse organische stof (wortelexudaten en mest). Desondanks zijn nachtelijke metingen wel indicatief als er duidelijke verschillen in oxidatie van veen kunnen optreden (bij overigens vergelijkbare vegetatiedichtheid). Bij maatregelen in veenweidegebieden die de grondwaterstand in de veenbodem verhogen worden in droogteperiodes wel duidelijke verschillen in de ecosysteemrespiratie gemeten. Met behulp van modellen kan eventueel een nadere inschatting worden gemaakt van de veenoxidatie-component (Van de Craats et al., 2023).



Figuur 2. Lokatie van het onderzoek en de metingen op de maatregelen controleplots; letters A t/m D geven de plots aan met de verschillende bahandelingen (zie tekst).

2. Onderzoekslocatie en methoden.

De onderzoekslokatie is gelegen ten noordoosten van Woudsend, geografische coordinaten 52.9526°N, 5.67535°E (Fig. 2). Het perceel heeft een typische schalterveen-bodem, bestaande uit 30-40 cm sterk krimpgevoelige klei aan de top, daaronder platig en slecht doorlatend veenmosveen (de 'schalterlaag'). Op ca. 120 cm diepte bevindt zich zand, met ingespoeld organisch materiaal (Fig. 1). De dikte van de kleilaag in Fig. 1 is waarschijnlijk te hoog ingeschat; op de meeste lokaties is deze niet meer dan 30 cm (N. Hoekstra, pers. comm.).

Ter plaatse liggen 4 proefvelden van 6 x 6 m, die juli 2021 zijn aangelegd (Fig. 2). Op de proefvelden zijn gaten geboord tot in de zandlaag, met een onderlinge afstand van 0.75 m. De opvulling van de boorgaten varieert per proefvak: alleen boorsel (opgeboord materiaal) in vak A, zand in vak C, boorsel met zand in vak B en D. Het terrein helt iets naar beneden vanaf de toegangsweg naar het perceel (Fig. 2).

Om het effect van de gatenproef op de CO₂ emissie te onderzoeken is dit gemeten gedurende twee perioden in hoogzomer (8-19 juni) en nazomer (6-16 september) in 2023. Hiervoor worden gedurende 10 dagen in de twee meetperiodes twee automatische kamersystemen ingezet, één systeem op de gatenproef en een tweede systeem op een onbehandelde controle-plot. De maatregel-plot ligt in vak D, de controle-lokatie onmiddelijk ten zuiden van de proefvelden.

De controle-plot ligt iets hoger in het terrein dan de maatregelplot, het verschil bedraagt enkele centimeters (Fig. 3). Bij de aanvang van de metingen was de kleilaag vooral in de controle-plot sterk uitgedroogd en gescheurd; dit was ook het geval in september. Op beide plots is veel activiteit van muizen te zien, die vooral gebruik lijken te maken van de scheuren. Tijdens de eerste meetperiode



Figuur 3. Scheuren in de bodem in de controle-plot, juni 2023. Lengte zakmes 8.5 cm.

heeft vanwege droogte bevloeïng met slootwater plaatsgevonden, gestart op 14 juni. In de nacht van 14 op 15 juni heeft het bevloeïingswater ook de maatregel-lokatie bereikt, maar door de iets hogere ligging nauwelijks de controle-lokatie. De grens van het bevloeide gedeelte is overigens zeer onregelmatig, en wordt sterk bepaald door de ligging van de scheuren; het bevloeïingswater verplaatst zich door scheuren enkele meters verder dan bovengronds.

Voor de metingen is gebruik gemaakt van een geautomatiseerd kamersysteem, bestaande uit 4 kamers en een CO_2 gasanalyzer. De cylindrische kamers van transparant acrylaat hebben een binnendoorsnede van 34.5 cm en een hoogte van 50 cm. Ze worden ca. 3-4 cm in de grond gedrukt en verankerd met pinnen. Sluiting van de kamer gebeurt met een klep aan de bovenzijde. De kamers worden om de beurt gedurende 150 seconden gesloten. Via een luchtpomp en een kleppensysteem wordt de lucht naar een CO₂ analyzer (LiCor 850) geleid en weer teruggepompt in de kamer. De analyzer heeft een meetfrequentie van 1 seconde. Na de meting wordt de klep van de kamer weer geopend; 92 seconden later is dan de volgende kamer gesloten voor een meting. De kamers zijn dus gedurende 150 seconden gesloten op een totole cyclustijd van 1082 seconden. In de kamer is een ventilator ingebouwd om de lucht in de kamer te homogeniseren tijdens de meting, en de lucht in de kamer in evenwicht te brengen met de buitenlucht als de kamers geopend zijn.

De kamers zijn met 5 meter lange slangen verbonden aan de controlebox van het kamersysteem. Een Raspberry Pi microcomputer regelt de aansturing van het systeem en registratie van de meetgegevens in de controlebox.

De fluxen worden gedownload aan het einde van een meetperiode van meerdere dagen, en berekend met daarvoor ontwikkeld

gemeten



Figuur 4. Opstelling van het meetsysteem in juni. Op de voorgrond Octave/Matlab script. De zonnepanelen voor de stroomvoorziening, daarachter de kamers op de controleplot, daarachter weer de kamers op de maatregelplot.

gasconcentraties worden daarbij gecorrigeerd voor volume (bepaald door insteekddiepte) van de kamer, luchtdruk en temperatuur in de kamer. Voor het berekenvan de flux wordt de laatste 120 seconden van de meting gebruikt; de eerste 30 seconden zijn doorgaans beïnvloed door het doorspoelen van de leidingen van het systeem aan het begin van de meting. De flux wordt berekend aan de hand van lineaire regressie van de gasconcentratie tegen de tijd. Afname van CO₂ met de tijd geeft een negatieve CO_2 flux (onttrekking CO_2 aan atmosfeer), veroorzaakt door netto opname van CO₂ door fotosynthese van vegetatie; toename is een positieve flux (van bodem naar atmosfeer), veroorzaakt door emissie van CO₂ uit bodem en vegetatie. Van iedere meting wordt de concentratie tegen de tijd geplot om de kwaliteit van de meting visueel te beoordelen. Metingen met sterke afwijking van de lineariteit worden verworpen (tenzij aangenomen kan worden dat dit een natuurlijke oorzaak heeft, zoals wisselende bewolking overdag die de fotosynthese tijdens de meting heeft beïnvloed). In het algemeen is minder dan 1% van de metingen van onvoldoende kwaliteit.

Tijdens de metingen is ter hoogte van de kamers de temperatuur van het bodemoppervlak gemeten buiten de kamers, en de temperatuur in de kamers tijdens de metingen. Metingen van het bodemvochtgehalte in en buiten de

kamers hebben helaas geen resulten opgeleverd door dataverlies van de apparatuur (Fierldscout).

Na de beide meetperioden is ook de hoeveelheid bovengrondse groene biomassa in de kamers gemonsterd door knippen, om een indruk te krijgen van de hoeveelheid biomassa. Dit bepaalt de CO_2 opname overdag, en daarnaast ook de hoeveelheid labiel organisch materiaal uit wortelexudaten. Dit materiaal wordt zeer snel afgebroken door micro-organismen en draagt bij aan de bodemrespiratie. De meetperiode in juni is ongeveer twee weken na maaien gestart; dit heeft de hoeveelheid biomassa beïnvloed. Graslengtes zijn niet gemeten.

De scheurvorming in de bovengrond is (voorafgaand aan de bevloeïing) in juni gemeten, door het aantal scheuren langs enkele transecten te registreren na de eerste meetperiode. Deze transecten zijn 10 m lang, twee transecten op zowel controle-als maatregelplot, loodrecht op elkaar. Het aantal scheuren is geteld, de breedte en diepte zijn gemeten met een 1 mm dikke en 10 mm brede lineaal.

	Biomassa g/m²	Biomassa g/m ²	T-test p
	juni	september	
Maatregel kamer 1	281	457	
Maatregel kamer 2	231	598	
Maatregel kamer 3	384	437	
Maatregel kamer 4	425	604	
Maatregel	330	524	Ctrl-Mtrl 0.29
gemiddeld			
Controle kamer 1	195	232	
Controle kamer 2	239	261	
Controle kamer 3	240	232	
Controle kamer 4	371	377	
Controle gemiddeld	261	275	Ctrl-Mtrl <0.01
5			Ctrl-Ctrl juni-sept 0.79
			Mtrl-Mtrl juni-sept
			0.02

Tabel 1. Groene biomassa (drooggewicht, omgerekend naar g/m^2) per kamer in juni en september aan het einde van beide meetperiodes.

Grondwaterstandsmetingen in peilbuizen zijn ter beschikking gesteld door N. Hoekstra (Louis Bolk Instituut). De maatregelplot ligt dichtbij de grondswaterstandsmetingen op lokatie D van de gatenproef, de controleplot dichtbij lokatie E (ten zuiden van C in Fig. 2). Bodemvochtgegevens voor de beide meetplots waren door apparatuurproblemen helaas niet beschikbaar.

3. Resultaten.

Tabel 1 geeft de verschillen in groene biomassa (drooggewicht per kameroppervlak, omgerekend naar drooggewicht per m²). Er is een duidelijk verschil in hoeveelheid biomassa tussen controle- en maatregelplots; de maatregelplot heeft meer groene biomassa. In september is dit verschil statistisch significant (t-test). In september is de biomassa op de controleplot nauwelijks groter dan die in juni. Voor de maatregelplot is in september de hoeveelheid biomassa duidelijk groter dan in juni, en bijna twee keer zo groot als op de controleplot.



Figuur 5. Windsnelheid (m/s), luchttemperatuur (2 m hoogte, °C), inkomende straling (J/cm², gedeeld door 10 voor de schaal) en regenval (mm) tijdens de meetperiodes. Gemiddelden van KNMI stations Leeuwarden en Marknesse.

Het aantal scheuren, hun breedte en diepte verschilt ook sterk tussen controleen maatregelpot. In de controle-plot zijn 2.65 scheuren per meter transect geteld, in de maatregelplot 1.05. Hoewel er minder scheuren zijn in de maatregel-plot, zijn ze gemiddeld wel breder dan in de controleplot (1.69 ± 0.90 cm tegen 1.09 ± 0.56 cm, t-test p<0.01). De scheuren in de controleplot zijn gemiddeld wel wat dieper dan in de maatregelplot (7.27 ± 5.38 cm tegen 6.14 \pm 4.65cm, t-test p= 0.20). De maximum scheurdieptes voor controle en maatregel zijn 24 en 19 cm. De meting van de diepte kan echter de werkelijke diepte onderschatten; waarschijnlijk rijken de diepste scheuren wel door de kleilaag heen tot in het veen.



Figuur 6. Grondwaterstanden rijdens de meetperioden. Data ter beschikking gesteld door N. Hoekstra, Louis Bolk Instituut.

Het weer tijdens beide meetperioden was over het algemeen zonnig en warm (Fig. 5); in deze figuur is het gemiddelde van de twee dichtstbijzijnde KNMI stations genomen, omdat de onderzoekslokatie bij benadering midden tussen beide stations in ligt. In beide perioden werden teperaturen rond 30 graden bereikt. In juni was er weinig bewolking (m.u.v. dag 11) en geen regenval, na een al langer durende droogteperiode. In september kwam vanaf dag 6 meer bewolking en viel er op dag 7 tot 10 mm regen.

De grondwaterstand (Fig. 6) fluctueerde tijdens de metingen, in juni door de bevloeïing, in september door regenval. In juni was er vanaf dag 4 een lichte stijging van de grondwaterstand, voorafgaand aan het moment dat de meetlokaties werden bereikt door het bevloeïingswater. Er was die dagen geen regenval, waarschijnlijk steeg het waterpeil doordat er op nabijgelegen percelen al bevloeïing plaatsvond (er was geen sloot tussen de percelen die het bevloeiingswater afving). De controleplot heeft een iets lagere grondwaterstand ten opzichte van maaiveld dan de maatregelplot, maar het maaiveld ligt er ook iets hoger. Aan de grondwaterstanden in juni is ook te zien, dat de controleplot minder bevloeïingswater heeft gekregen door de hogere ligging. De grondwaterspiegel moet gedurende het grootste deel van de metingen in de veenlaag gelegen hebben.

De warmte en instraling van de zon kan de metingen vooral overdag beïnvloeden, door de broeikaswerking van de kamers. Hoewel de ventilatoren in de kamers voldoende sterk zijn om de temperatuur binnen de kamers gelijk te houden aan die van de omgevingslucht, is het onvermijdelijk dat tijdens een meting de temperatuur oploopt. De kamers zijn 14% van de tijd gesloten tijdens een meetcyclus. Dit kan bij hoge temperaturen de fotosynthese verminderen tijdens de meting.



Figuur 7. Gemeten CO_2 -fluxen in beide meetperioden, in volgorde van de tijd. De bandbreedte geeft de variatie van de fluxen tussen de kamers aan en benadert de onzekerheid ten gevolge van kleinschalige verschillen in bodem en vegetatie.

De CO_2 -metingen laten een duidelijke dag-nacht cyclus zien ten gevolge van fotosynthese (Fig. 7). In Fig. 7 zijn de metingen weergegeven in volgorde van de tijd, waarbij de resultaten van de afzonderlijke kamers niet uitgesplitst zijn. De bandbreedte van de CO_2 metingen in Fig. 7 kan dus opgevat worden als variabiliteit tussen de kamers, en daarmee ook variabiliteit ten gevolge van verschillen in bodem en vegetatie op kleine schaal van enkele meters.

Deze variabiliteit is voor de controleplot duidelijk groter danvoor de maatregelplot. In juni neemt echter de variabiliteit in de maatregelplot zeer sterk toe na de bevloeiing, en worden er ook extreem hoge waarden van de CO₂ flux bereikt. De fotosynthese overdag compenseert dan ook niet meer voor de respiratie, en we zien dan ook overdag positieve CO₂ fluxen (emissie). Bij extra controle van de metingen uit deze periode blijkt geen reden aanwezig te zijn om de metingen te verwerpen. De beginconcentraties van de metingen liggen over het algemeen 5-35 ppm boven de huidige atmosferische concentratie (ca. 418 ppm). Dat zijn normale waarden zijn voor metingen vlak boven het bodemoppervlak. Een effect van hitte overdag is niet waarschijnlijk; juist in de laatste meetdag met de hoogste fluxen is door bewolking de instraling van de zon veel lager dan op voorgaande dagen (Fig. 5). De geringere instraling van de zon kan op die dag wel de CO₂ fluxen overdag verhoogd hebben. De bevloeiing doet kennelijk de bodemrespiratie tijdelijk sterk toenemen (in september zien we dit effect niet meer terug). Ook de controleplot laat bij één van de kamers een toename van de CO₂ flux zien; mogelijk is hier ook een effect van bevloeiing, zij het geringer dan op de maatregelplot.

In september is er echter ook een grote variatie in de metingen op de controleplot, groter dan in juni. In Fig. 8 blijkt dat dit slechts aan één kamer te wijten, die afwijkt met sterkt positieve fluxen. De reden hiervoor is onbekend, bij tussentijdse controle in het veld kon hiervoor geen verklaring gevonden worden. Mogelijk speelde hier een niet opgemerkte verbinding met de veenlaag via een scheur of een muizenhol een rol, of, gezien het zeer onregelmatige verloop en zichtbare activiteit van muizen. Bij verdere statische analyse zijn de periode na bevloeiing in juni, en de afwijkende kamer 2 op de controleplot in september weggelaten.



Figuur 7. CO_2 fluxen uitgesplitst per kamer. Boven: controle- en maatregelplot in juni; onder idem in september. Let op verschillen in schaal van de y-as tussen juni en september.

De lokaal gemeten bodemtemperaturen en de temperatuur in de kamers tijdens iedere meting is weergegeven in Fig. 8. Tijdens de meting blijkt bij zonnig weer de luchttemperatuur tussen 13:00 en 16:00 uur in de kamers te kunnen oplopen tot gemiddeld 2,9 °C boven de bodemtemperatuur, maar uitschieters tot 16 °C komen voor. Overigens is dit waarschijnlijk een te hoge schatting van de temperatuurverhoging, omdat de temperatuursensor in kamers ook straling van de zon kan invangen en daardoor opwarmen. In juni bleek op de maatregelplot de bodemtemperatuursensor uit de grond getrokken te zijn. Die heeft in de zon gelegen en registreerde daardoor te hoge temperaturen. Dat is bij veldbezoek op 13 juni gecorrigeerd.



Figuur 8. Lokaal gemeten bodemtemperaturen en temperaturen in de meetkamers.

4. Statistische analyse.

De hoge temperaturen in de meetkamers tijdens zonnige dagen kunnen de fotosynthese negatief beïnvloeden, doordat optimumtemperaturen voor fotosynthese overschreden worden. Om dit voor de meetperioden te kwantificeren is het verband tussen de kamertemperatuur en de maximum netto fotosynthese voor iedere dag onderzocht door een lineaire regressie uit te voeren (met uitzondering van de bevloeiingsdagen op de maatregelplot). Als schatting voor de maximale fotosynthese op een dag is de amplitude tussen de CO₂ flux rond het midden van de dag en de gemiddelde nachtelijke CO₂ flux (bodem- en plantenrespiratie) genomen. De nachtelijke CO₂ flux is berekend als gemiddelde over de nacht van 0.5 uur na zonsondergang tot 0.5 uur voor zonsopkomst en gemiddeld over alle kamers. Voor de dagmetingen bij gemiddelde van 2 uur voor de kamers; onder: bodemtemperatuur. middag (zonnetijd) en twee





uur erna genomen. De metingen van de maatregelplot na de bevloeiing zijn niet betrokken in de bereking met de kamertemperatuur, evenmin kamer 2 in de controleplot in september. Voor de berekening waarin bodemtemperatuur betrokken is, zijn alle metingen op de maatregelplot in juni buiten beschouwing gelaten vanwege de problemen met de bodemtemperatuursensor. In figuur 9 is de lineaire regressie weergegeven, in tabel 2 de resultaten. R² in tabel 2 is de 'goodness-of-fit' die aangeeft hoeveel spreiding van de gegevens er is rond de regressielijn; de F test geeft aan in welke mate de regressielijn de variatie in de data verklaart. Een lage F-test waarde geeft aan, dat de regressieergelijking geen verlaring voor de variatie in de data geeft.

Er is een negatief verband tussen de geschatte fotosynthese en kamertemperatuur, met een afname van 77.1 mg CO₂.m⁻¹.uur⁻¹ per extra graad luchttemperatuur in de kamers. De F-test voor het regressiemodel geeft een pwaarde van 0.05 (Tabel 2). Wanneer echter een regressie wordt uitgevoerd op

bodemtemperatuur wordt uitgevoerd, blijkt de afname van de fotosynthese sterker te zijn (97.7 mg $CO_2.m^{-1}.uur^{-1}$ per °C, p = 0.06). Regressie van fotosynthese op het verschil kamertemperatuur – bodemtemperatuur (als maat voor verschil kamer-omgeving) is echter niet significant.

Hieruit kan worden geconcludeerd kan worden dat de temperatuurverhoging in de kamers tijdens de metingen op de momenten van de meeste instraling geen significante invloed heeft gehad op de CO_2 opname. Het is eerder een gevolg van de hoge temperaturen in de omgeving (en daarbij mogelijk gepaard gaand vochttekort), dan van de broeikaswerking van de kamers. De tijd waarin de temperatuurverhoging optreedt tijdens de meting is waarschijnlijk te kort voor een reactie van de vegetatie hierop.

	intercept	helling	Betrouwaarheids- interval helling	R ²	F test waarde	р	
Kamert T	5300	-77.1	-154.9 - +0.6	0.13	4.12	0.05	
Kamer –	3423	-57.7	-203.76 - +88.3	0.02	0.66	0.42	
Bodem T							
Bodem T	5105	-97.9	-198.5 - +2.7	0.12	3.97	0.06	
Tabel 2. Resultaten van regressie-analyse van amplitude CO ₂ emissie (als maat voor fotosynthese)							
op kamer- en be	odemtempera	atuur. Zie	e tekst. Metingen in j	juni zonder de	metingen na bevloeiing	g op	
de maatregelplo	ot, metingen	in septen	nber zonder afwijken	de kamer 2 va	n de controleplot. Zie t	ekst	

voor verklaring van de parameters.

	P test	Gemid	Gemid.	Min	Min	Mediaa	Mediaan	Betrouwb.	Betrouwb.	Max	Max
		. Ctrl	Mtrl	Ctrl	Mtrl	n Ctrl	Mtrl	interval Ctr	linterval Mtrl	Ctrl	Mtrl
Alle	< 0.01	.1944	1804	39	92	1881	1881	1843-1918	1823-1938	9157	4577
Juni	0	1936	650	39	92	1549	429	1474-1623	383-475	9257	2731
Sept.	0	1951	2260	42	50	2040	2359	2005-2074	2311-2408	3647	4577

Tabel 3. Vergelijking tussen controle- en maatregelplot voor alle individuele metingen van zowel juni als september ('Alle'), en voor de metingen in juni en september afzonderlijk. Verklaring afkortingen: p = p-waarde voor het verschil tussen gemiddelden volgens de Welch test; Gemid. = gemiddelde; Min = minimum; Betrouwb. Interval – betrouwbaarheids interval voor de mediaan; Max = maximum; Ctrl = controle, Mtrl = maatregel. Metingen in juni zonder de metingen na bevloeiing van de maatregelplot, metingen in september zonder afwijkende kamer 2 van de controleplot.

Verschillen in R_{eco} tussen de controle- en maatregelplot kunnen wijzen op verschillen in afbraak van veen, afbraak van andere soorten organische stof in de bodem of verschillen in respiratie van de biomassa. In de boxplot van Fig. 10 is de mediaan en spreiding van alle individuele metingen weergegeven (exclusief de hierboven al aangegeven uitzonderingen); in Tabel 3 resultaten van statistische tests (Welch test, een variant van de t-test voor grote datasets). Alle verschillen tussen maatregel en controle zijn significant, maar niet consistent. Over beide meetporioden samen("Alle" in Tabel 3) heeft de controleplot een significant grotere gemiddelde flux (1944 t.o.v. 1804 mg CO₂.m⁻².uur⁻¹), maar de mediaan is hetzelfde. Dit is vermoedelijk een effect van de grote uitschieters van de metingen in juni. In juni is echter de flux van de controleplot een factor 3 hoger dan die in de maatregel-plot (zonder bevloeïing, 1936 t.o.v. 650 mg CO₂.m⁻².uur⁻¹), terwijl in september de flux uit de maatregelplot weer beduidend hoger is (2260 t.o.v. 1951 mg CO₂.m⁻².uur⁻¹). De mediaan is voor beide perioden consistent met het gemiddelde. Hieruit kan geconcludeerd worden dat de flux overe langere tijd niet veel verschilt, maar dat er per periode wel sterke verschillen kunnen optreden.



Figuur 10. Box plot van de nachtelijke CO2 metingen, als maat voor de ecosysteemrespiratie. De middenstreep van de boxplot is de mediaan, de onderzijde de waarde waaronder 25% (onderste kwartiel) van de gegevens ligt, de bovenzijde 75% (bovenste kwartiel). De lengte van de verticale lijn is 1,5 x de afstand tussen de kwartielen; de met rood gemarkeerde punten zijn uitbijters buiten dit bereik.

De vraag blijft, wat de verschillen in Fig. 10 veroorzaakt, en of de maatregel mogelijk de oxidatie van veen heeft beïnvloed. Om dit te onderzoeken is gewerkt met een lineair regressiemodel. Dit is een lineaire regressie van de gemiddelde nachtelijke CO_2 flux per kamer (R_{eco}) op mogelijk verklarende variabelen, zoals bodemtemperatuur, biomassa (Tabel 1), maximum fotosynthese tijdens de voorgaande dag (de dag-nacht amplitude van de CO_2 flux, zie boven), en de lokatie (controle- of maatregelplot). De lokatie en de meetperiode (juni, september)zijn toegevoegd als dummy kwantitatieve variabele (0 voor controle/juni, 1 voor maatregel/september). Er zijn geen aanwijzingen dat de variabelen een sterk niet-lineair verband met R_{eco} hebben binnen het gemeten bereik, daarom is voor een lineair regressiemodel gekozen.

Er is geëxperimenteerd met toevoegen en weglaten van verschillende variabelen in de regressievergelijking:

 $R_{eco} = a + b_1 * bodemtemperatuur + b_2 * biomassa + b_3 * fotosynthese + b_4 * lokatie + b_5 * meetperiode$

regressiemodel	R ²	F test waarde	р
bodemtemperatuur	0.007	0.869	0.353
bodem T -biomassa	0.036	2.193	0.116
bodem T - fotosynthese	0.226	16.969	<0.01
fotosynthese	0.223	33.607	<0.01
bodem T-fotosynthese-lokatie	0.230	11.448	<0.01
bodem T-fotosynthese-maand	0.227	11.230	<0.01
fotosynthese-lokatie	0.229	17.268	<0.01
alle variabelen	0.230	6.78	<0.01

Tabel 4. Resultaten van regressie-analyse van de nachtelijke CO_2 emissie /ecosysteemrespiratie (R_{eco}) per kamer op bodemtemperatuur, bovengrondse biomassa van het gras, dag-nacht amplitude van de CO_2 emissie van de voorgaande dag (maat voor maximale fotosynthese) en lokatie (controle of maatregel). Metingen in juni zijn exclusief de metingen na bevloeiing op de maatregelplot, metingen in september zonder afwijkende kamer 2 van de controleplot;de 1e dag van iedere meetreeks is niet meegenomen vanwege ontbreken fotosynthesegegevens van de voorgaande dag.

Uit het regressiemodel in Tabel 4 blijkt dat bodemtemperatuur en biomassa slechts een klein deel van de variatie in R_{eco} bepalen (lage R², F-test waarde en hoge pwaarde). Wanneer de dag-nacht CO₂ amplitude van de vorige dag als maat voor de fotosynthese wordt toegevoegd, nemen R_2 en de F-test waarde sterk toe; p<0.01. Toevoegen van de meetperiode (juni of september) aan het model vergroot de R² niet. Toevoegen van de lokatie aan het model vergroot de R² wel (naar de maximumwaarde van



0.23), maar niet veel ten opzichte Figuur 11. Boxplot van de maximum fotosynthese per van de andere regressiemodellen kamer, geschat uit de dagelijkse CO2 amplitude. Verder waarin fotosynthese is legenda zie fig. 10. opgenomen. Dat komt overeen

met de verschillen in gemiddelde R_{eco} van beide lokaties, die wel een gring maar sgnificant verschil vertoont over alle metingen, maar een verschil dat niet consisten tussen de meetperioden (Tabel 3). De regressie laat zien dat de fotosynthese van de voorgaande dag verreweg de belangrijkste variabele is. De meeste gemeten CO_2 zal daarom afkomstig zijn uit zeer recent geproduceerde, snel afbreekbare (labiele) organische stof. Aan de hoge F-test waarde voor alle modelvarianten met fotosynthese erin, is te zien dat dit de meest efficiënte modelvarianten zijn. Veld- en laboratoriumexperimenten laten ook zien dat het transport van door fotosynthese vastgelegde koolstof naar de bodem in de wortelzone zeer snel verloopt en dat de microbiële populatie in de wortelzone dat weer snel omzet in CO₂ (Cheng en Gershenson, 2007).

De fotosynthese, zoals geschat uit de dagelijkse CO_2 - amplitude nauwelijks (Fig. 11) veschilt over beide meetperioden nauwelijks. Voor de gemiddelden (2711 en 2748 mg CO_2 .m⁻².uur⁻¹) wijst een een t-test niet op een significant verschil. Dit is opmerkelijk gezien de gemeten verschillen in bovengrondse biomassa.

5. Discussie.

Er zijn geen aanwijzingen uit de CO_2 -metingen voor een verhoogde afbraak van veen op de maatregelplot door het boren van gaten in de gatenproef. Er zijn wel significante verschillen in ecosysteemrespiratie (R_{eco} , nachtelijke CO_2 emissie) tussen controle- en maatregelplot, maar die verschillen zijn niet consistent: in verschillende richtingen tijdens de twee meetperioden (maatregel < controle in juni, maatregel > controle in september). Ook in de regressie-analyse van R_{eco} op sturende variabelen (bodemtemperatuur, biomassa en fotosynthese) komt de lokatie (maatregel of controle) niet als belangrijke sturende variabele naar voren.

De fotosynthese van de vorige dag is in de regressie-analyse van de variabelen die bijdragen aan R_{eco} de belangrijkste variable, en bepaalt grootste deel van de variatie in R_{eco} . Dat wijst erop dat afbraak van verse organische stof, die deels nog tijdens de voorafgaande dagperiode geproduceerd is de CO₂ emissie grotendeels bepaalt, samen met de instantane respiratie van het gras. De R_{eco} bestaat uit de som van CO₂-respiratie van planten inclusief de wortels, de omzetting door bodemfauna, schimmels en bacteriën van recent door planten toegevoegde organische stof in de wortelzone (dood plantenmateriaal en uitscheidingsproducten van wortels), van mest en tenslotte van veen in de bodem (Cheng en Gershenson, 2007).

Kennelijk maskeert deze snelle omzetting van labiele, recent geproduceerde organische stof eventuele verschillen in oxidatie van veen tussen maatregel en controle. Dat wil niet zeggen dat die verschillen er niet zijn, maar ze zijn niet meetbaar gegeven meetmethode en omstandigheden tijdens de meting. Overigens zijn de omstandigheden wel voldoende om eventuele verschillen in veenoxidatie te meten; gezien de lage grondwaterstand en scheurvorming in de kleilaag is diffusie van zuurstof naar de veenlaag goed mogelijk. In het algemeen worden bij verschillen in grondwaterstand in een veenpakket verschillen in emissie door oxidatie van veen wel gemeten (Van de Craats et al., 2023). In dit geval lag echter de veenlaag deels onder de grondwaterspiegel. Ook het deel van de veenlaag dat boven de grondwaterspiegel ligt heeft hier een beperkte dikte en zal dan nog grotendeels met water verzadigd zijn geweest, wat mogelijk veenoxidatie heeft beperkt.

Het geringe effect van de hoeveelheid biomassa op R_{eco} ten opzichte van de invloed van fotosynthese lijkt ongerijmd. Echter, in de eerste plaats is de door knippen gemeten biomassa slechts een momentopname. De tijd tussen de laatste maaibeurt en de datum van knippen verschilt per meetperiode; in juni was de laatste maaibeurt slechts 2 weken voor het begin van de metingen. In de tweede plaats is de hoeveelheid labiele organische stof die ondergronds vrijkomt mede bepaald door de hoeveelheid wortelmassa, die niet bemonsterd is en ook moeilijker exact te bepalen is. Bovendien produceren planten die meer stress ondervinden, bijvoorbeeld door droogte, meer wortelmassa en meer exudaten (Cheng en Gershenson, 2007). Ook het geringe effect van de bodemtemperatuur is op het eerste gezicht onverwacht. Beide meetperioden hadden echter deels hetzelfde weertype; september was ongebruikelijk warm en vergelijkbaar met juni, met uitzondering van de laatste vier meetdagen. De verschillen in nachtelijke bodemtemperatuur waren daardoor gering. De fotosynthese blijkt echter wel gevoelig te zijn voor hoge bodemtemperatuur in beide meetperiodes, waarschijnlijk door de combinatie van hittestress en droogte in de wortelzone (Blösch et al., 2015). Dit leidt tot een vermindering van het aantal fotosynthetisch actieve bladeren, afsterven van oudere bladeren en mogelijk ook wortels (ook zichtbaar in Fig. 4).

De bevloeiing in juni had een groot effect op de maatregelplot met een sterke stijging van de CO₂ emissies. In de controleplot was dit nauwelijks te zien, slechts één kamer liet een wat verhoogde flux zien (Fig. 6, 7). Gezien het geringe verschil in hoogteligging tussen beide plots, heeft het bevloeiingswater de controleplot niet goed bereikt, mogelijk alleen via scheuren, wat het verschil in effect tussen de kamers op de controleplot kan verklaren. Op de maatregelplot bleef de emissie toenemen tot aan het eind van de meetperiode in juni, terwijl het geringe effect op een van de kamers in de controleplot al na twee dagen afnam.

Naar de oorzaak van de verhoogde emissie door bevloeiing kon met de beschikbare gegevens geen onderzoek worden gedaan. Deze emissie is in de analyse van de gegevens buiten beschouwing gelaten, om zoveel mogelijk de normale processen te kunnen analyseren. Er is van uitgegaan, dat het effect van de bevloeiing op de CO₂-emissie slechts tijdelijk is en na enkele dagen weer afneemt. Desondanks geven de hoge CO₂ fluxen een interessant inzicht van het effect van de bevloeiing op de koolstofcyclus. Mogelijke oorzaken van de hoge fluxen zijn:

- Vochtafhankelijkheid van afbraakprocessen van organisch materiaal: Voor de microbiële afbraak is er een optimum bodemvochtgehalte (Säurich et al., 2019). Bij hoge vochtgehalten is de aanvoer van zuurstof limiterend, bij lage vochtgehalten is er onvoldoende vocht voor de activiteit van bodemfauna en micro-organismen en wordt veel organische stof in de bodem hydrofoob. Voorafgaand aan de bevloeiing was er een droogteperiode. Er lag er ingedroogde mest op de bodem, en was er mogelijk een groot reservoir aan door droogte slecht verteerd organisch materiaal in de bodem aanwezig. Door de bevloeiing werd dit vochttekort opgeheven, waardoor deze organische reservoirs snel konden worden omgezet in CO₂. Dit is inhaaleffect, waarbij de eerdere remming van omzetting van organische stof door droogte wordt ingehaald zodra meer bodemvocht beschikbaar is.
- 2. Het bevloeïingswater was afkomstig uit de sloten en bevat waarschijnlijk grote hoeveelheden labiel organisch materiaal, afkomstig van waterplanten en waterfauna. De snelle afbraak van dit materiaal heeft ongetwijfeld bijgedragen aan de emissie.
- 3. De droogte voorafgaand aan de bevloeïing kan ook leiden tot een verhoogde hoeveelheid afbreekbaar materiaal in de bodem door het afsterven van gras en wortels.

4. De bevloeïing leidt ook tot verdrinking van bodemfauna (vooral muizen, die in grote getale aanwezig zijn). Dit is goed te zien aan de grote hoeveelheid vogels die op de bevloeïing af komen. Afbraak van de resten van de bodemfauna kan ook bijdragen aan de CO₂-emissie.

6. Conclusies.

1. Oxidatie van veen. Er is geen meetbare toe- of afname van CO_2 emissie door oxidatie van veen door de maatregel geconstateerd. De gemeten verschillen in CO_2 emissie hangen in hoofdzaak samen met oxidatie van recent door fotosynthese van het gras geproduceerde organische stof, in de vorm van uitscheidingsproducten van wortels en ander plantenafval. Deze spelen zich vooral in de wortelzone in de kleilaag boven de veenlaag af. Eventuele verschillen in veenoxidatie tussen maatregel- en controleplot zijn waarschijnlijk zeer gering en komen niet uit boven de verschillen veroorzaakt door andere CO_2 bronnen.

2. *Hitte en droogte.* Uit de metingen blijkt dat hitte en droogte tijdens beide meetperioden de fotosynthese heeft geremd.

3. *Bevloeiing.* De bevloeiing veroorzaakt een tijdelijk verhoogde emissie van CO₂. Waarschijnlijke oorzaken zijn: een "inhaaleffect", waarbij organische stof waarvan de afbraak door droogte geremd was versneld wordt afgebroken; aanvoer van labiele organische stof van recente oorsprong uit de sloten; toename van labiel organisch materiaal tijdens droogte door afsterven van bladeren en wortels, en door omzetting van door de bevloeiing gedode bodemfauna, of een combinatie van deze CO₂ bronnen.

Literatuur.

Blösch, R. M., Riesen, O., & Feller, U. (2015). Extended drought periods in grasslands: impacts on the number of photosynthetically active leaves and on leaf senescence in grass and clover species. International Journal of Energy and Environment, 9, 147-155.

Cheng, W., Gershenson, A. (2007). Carbon fluxes in the Rhizosphere. In: Cardon, Z.G. and Whitbeck, J.L. (eds.) The Rhizosphere, An Ecological Perspective. Elsevier, Amsterdam, p. 2-56.

Säurich, A., Tiemeyer, B., Dettmann, U., & Don, A. (2019). How do sand addition, soil moisture and nutrient status influence greenhouse gas fluxes from drained organic soils?. *Soil Biology and Biochemistry*, *135*, 71-84

Van de Craats, D., Van den Berg, M., Van Huissteden, J., Van der Velde, Y., & Boonman, J., (2023). Process-based modelling of CO₂ fluxes in Vlist. Chapter 11 NOBV year report 2022, <u>https://www.nobveenweiden.nl/wp-content/uploads/2023/08/11.-</u> VandenBerg Model FINAL 2.pdf

22