

CO₂-emissie bij ontgraving van veen ten behoeve van dijkversterking



CO₂-emissie bij ontgraving van veen ten behoeve van dijkversterking

Auteur(s)

Koen Pelsma

Martine Kox

Stefan Jansen

CO₂-emissie bij ontgraving van veen ten behoeve van dijkversterking

Opdrachtgever	Waterschap Zuiderzeeland
Contactpersoon	Christiaan Tenthof van Noorden
Referenties	INKO-02752 PPM
Trefwoorden	Veenafbraak, CO ₂ -uitstoot

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	29-02-2024
Projectnummer	11209889-002
Document ID	11209889-002-BGS-0001
Pagina's	23
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

Koen Pelsma Martine Kox Stefan Jansen

Samenvatting

De versterking van de IJsselmeerdijken is een dijkversterking van Waterschap Zuiderzeeland binnen het Hoogwaterbeschermingsprogramma met hoge duurzaamheidsambities. Een duidelijke raming van de koolstofdioxide (CO₂) uitstoot is een integraal onderdeel om grip te krijgen op kansen voor uitstootvermindering. Daarbij wordt niet alleen gekeken naar de uitstoot van materieel, maar ook naar die van het aanwezige materiaal. Onderdeel van de dijkversterking is de aanleg van een cunet voor een vooroever. Bij de aanleg daarvan moet een gedeelte van de bodem vergraven worden, waaronder een veenpakket van ongeveer 1 meter dikte. In deze rapportage wordt de CO₂ emissie als gevolg van de omzetting van dit veen ingeschat.

Omdat veen hoog-organisch materiaal is, kan de afbraak tijdens en na vergraven een grote impact hebben op de totale CO₂-uitstoot. Veenoxidatie met zuurstof leidt direct tot CO₂-uitstoot, maar veen kan ook afgebroken worden zonder zuurstof. Zuurstofloze afbraak heeft het broeikasgas methaan (CH₄) tot gevolg, wat per gram 28 maal sterker is dan CO₂.

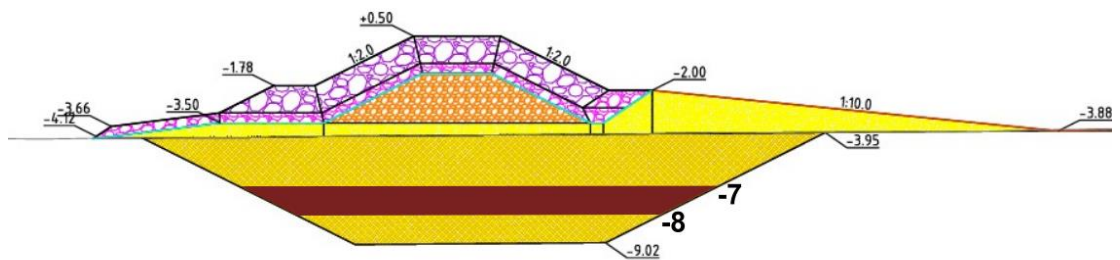
In dit rapport is laboratoriumonderzoek ingezet om de uitstoot als gevolg van zuurstofafhankelijke en zuurstofloze veenafbraak te onderzoeken. In combinatie met chemische analyses van het veen en het lokale water is een beeld geschetst van de potentiële CO₂-uitstoot. Een maximale zuurstofafhankelijke afbraaksnelheid voor de totale hoeveelheid veen bij een temperatuur van 20°C zal leiden tot een uitstoot van 38 ton CO₂ per dag. Omdat niet al het veen continu aan zuurstof is blootgesteld en ook is deze temperatuur waarschijnlijk aan de hoge kant voor de condities buiten, is deze maximale uitstoot een overschatting. Als de duur van de blootstelling aan zuurstof van het veen kort gehouden wordt (enkele weken), zal de uitstoot door veenafbraak beperkt blijven ten opzichte van het projecttotaal van 55000 ton CO₂. Het veen bestaat voor 75% van het drooggewicht uit organische stof. Als dit de kans krijgt om langer te oxideren, bijvoorbeeld door vermenging met de waterkolom, zal dit wel tot significante uitstoot leiden. Afhankelijk van de gekozen werkmethode wordt het veen anders behandeld en dit beïnvloedt de grootte van CO₂-emissie. Hierdoor is het van belang dat er gekeken wordt naar manieren om het veen zo kort mogelijk te mengen met zuurstofrijk water en dat het snel begraven wordt, om de kans op langdurige veenoxidatie zo laag mogelijk te houden.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	6
1.1	Doelstelling	8
2	Methodiek	9
2.1	Onderzoeksopzet	9
2.2	Veenmonsters	9
2.3	Manometrische metingen	9
2.4	Ionen en organische stof	10
3	Inschatting van de CO₂-uitstoot bij het vergraven van veen	11
3.1	Maximale oxidatiepotentieel van veen met zuurstof	11
3.2	Uitstoot bij zuurstofloze condities	13
3.3	Broeikasgasuitstoot tijdens het oppakken van veen	16
4	Conclusies	17
4.1	De emissies van broeikasgassen tijdens en na vergraving van veen	17
4.2	Aanbevelingen voor het verminderen van de CO ₂ -emissie	17
4.3	Kennisleemtes	18
5	Referenties	19
6	Bijlagen	20

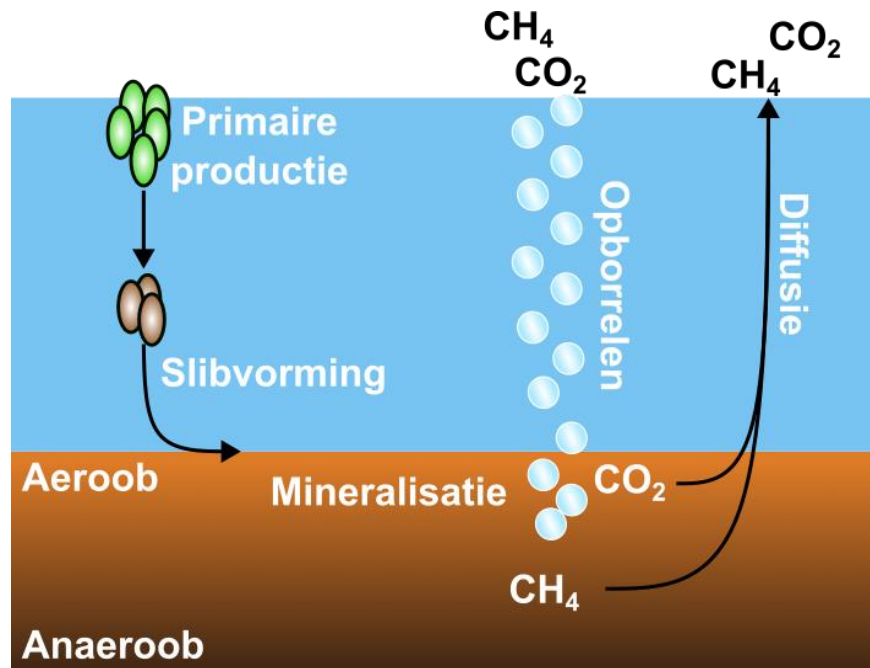
1 Inleiding

Verhoogde hoeveelheden broeikasgassen in de atmosfeer zijn de oorzaak van de opwarming van de aarde. Koolstofdioxide (CO₂) is het belangrijkste broeikasgas en wordt in grote mate uitgestoten door het verbranden van fossiele brandstoffen. Het verminderen van de uitstoot van CO₂ tijdens grootschalige bouwprojecten kan via verschillende manieren, zoals het verminderen van grondverzet en het gebruik van elektrisch aangedreven apparatuur. Andere emissieroutes kunnen ook zeer relevant zijn voor de totale projectuitstoot, bijvoorbeeld de uitstoot door het verplaatsen van materiaal en de potentiële oxidatie daarvan. Als onderdeel van het landelijke Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP) is Waterschap Zuiderzeeland (ZZL) voornemens een versterking van de IJsselmeerdijk (IJMD) uit te voeren. De ruim 17 kilometer lange IJsselmeerdijk loopt van de Houtribdijk bij Lelystad noordwaarts naar de Ketelbrug. Het project Versterking IJsselmeerdijk bevindt zich in de planuitwerkingsfase. In de vorige fase, de verkenningsfase, is een voorkeursalternatief geïdentificeerd. Dit voorkeursalternatief betreft voor 11 kilometer van het traject een innovatieve vooroeveroplossing inclusief vooroeverdam (Nieuwenhuis et al., 2022). Een van de uitvoeropties om deze vooroeverdam te kunnen bouwen betreft het eerst ontgraven en toepassen van een grondverbeteringscunet van circa 4 meter te opzichte van de IJsselmeerbodem. Het bij de cunetontgraving vrijgekomen materiaal wordt bij voorkeur hergebruikt in de vooroever. Het cunetmateriaal bestaat voor een vrij groot gedeelte uit veen (~20%; Figuur 1).



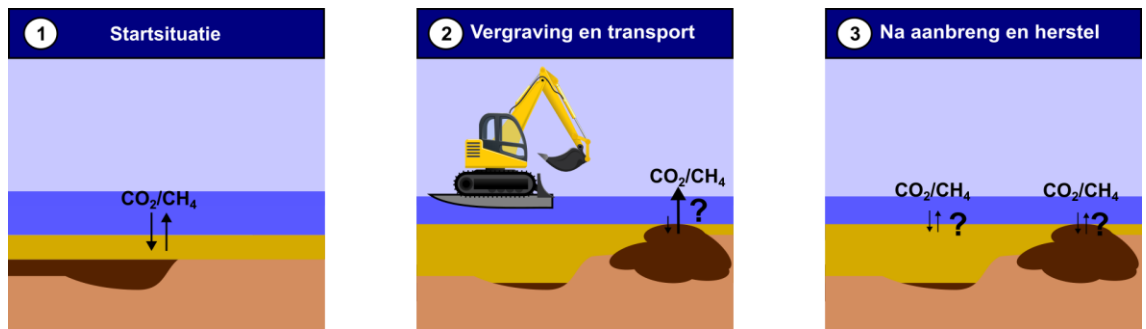
Figuur 1. Tekening van de cunet dat ontgraven moet worden met de veenlaag tussen -7 en -8 NAP aangegeven in het donkerrood. Sonderingsresultaten van SOCOTEC zijn te vinden in de bijlage.

Veen is organisch rijk materiaal, dat de potentie heeft om verder af te breken zodra het weer aan de lucht wordt blootgesteld. Bij deze afbraak kan het broeikasgas CO₂ vrijkomen (Figuur 2). Ook zonder zuurstof kan het veen afgebroken worden, wat met name resulteert in het sterke broeikasgas methaan (CH₄). Naast CO₂ of methaan-productie door aerobe of anaerobe afbraak van het veen, is er nog een andere route waarmee broeikasgas vrij kan komen. In het onaantaste veenpakket kunnen reeds CO₂ en CH₄ bellen aanwezig zijn, die nooit ontsnapt zijn naar de atmosfeer en dus gevangen zitten in de bodemlagen. Wanneer het veen vergraven wordt kan dit vrijkomen. Uit ervaring weten we dat dit in potentie een aanzienlijke bron van broeikasgas uitstoot kan vormen. Echter is het door beperkte beschikbare kennis moeilijk in te schatten wat de omvang van deze uitstoot-route is.



Figuur 2. Mogelijke emissieroutes van CO_2 en CH_4 in een natuurlijk systeem. Veen kan op eenzelfde manier afgebroken worden als het wordt blootgesteld aan een zuurstofrijk milieu.

Waterschap Zuiderzeeland heeft hoge duurzaamheidsambities en wil broeikasgas emissies als gevolg van verstoring van het veenpakket zoveel als mogelijk vermijden, bijvoorbeeld door eisen te stellen aan de uitvoering als onderdeel van de aanbesteding indien de uitstoot significant blijkt. In het baggerproces zijn 3 belangrijke momenten te onderscheiden die potentieel impact hebben op de mate van broeikasgasuitstoot als gevolg van verstoring: (1) de locatie waar het materiaal opgepakt wordt, (2) het transport en (3) het depot waar het materiaal uiteindelijk terecht komt. In al deze stappen moet overwogen worden wat leidt tot de laagst mogelijke broeikasgas uitstoot (Figuur 3).



Figuur 3. Schets van de fases waar verhoogde broeikasgasuitstoot verwacht wordt ten opzichte van de startsituatie. (1) Een natuurlijk systeem heeft een bepaalde referentie-uitstoot. Tijdens de vergraving van het veen (2) en het transport kan een gedeelte oxideren door blootstelling aan de lucht. Na het verplaatsen en afdekken (3) kan de verstoring leiden tot een verhoogde uitstoot voor een bepaalde tijd, totdat het systeem hersteld is.

In verband met de mogelijke uitstoot door veenoxidatie na vergraving is het Waterschap Zuiderzeeland geïnteresseerd in de afbreekbaarheid van het veen en de daaruit volgende broeikasgasvorming. Daarbij is behoefte aan een inschatting van de afbreekbaarheid van het veen onder verschillende condities (zuurstofrijk, zuurstofloos). Deltares is gevraagd om dit te onderzoeken.

1.1 Doelstelling

Doel van dit onderzoek is om duidelijk te krijgen in welke mate er sprake is van uitstoot door veenafbraak onder zuurstofrijke of zuurstofloze, als gevolg van de verstoring van het ontgraven van een cunet. Hierbij dient een realistisch beeld te geschetst te worden van de hoeveelheid broeikasgasuitstoot (CO₂ en CH₄) als gevolg van biochemische processen onder zuurstofrijke en zuurstofloze condities.

2 Methodiek

2.1 Onderzoeksopzet

De samenstelling van het te ontgraven gebied is onderzocht door een externe partij (SOCOTEC) en blijkt veelal eenzelfde veentype te bevatten op ca. 6-9 m diepte. Om die reden is ervoor gekozen om mengmonsters te maken van het beschikbare materiaal en deze in vijfvoud in te zetten voor afbraakproeven onder zuurstofrijke en zuurstofloze condities (resp. aerob 1-5 en anaerob 1-5). Met behulp van manometrische testen in combinatie met gas en vloeistof analyse (via het OxiTop-meetsysteem) kan een goede inschatting gegeven worden van de zuurstofafhankelijke afbraak van organisch materiaal door middel van drukafname in een afgesloten fles. Hieruit is een afbraaksnelheid bepaald. Zuurstofloze afbraak is met eenzelfde systeem gemeten door deze onder een totale stikstofatmosfeer te houden. In deze flessen is drukopbouw een maat voor de productie van methaan. In combinatie met biochemische analyses van het poriewater en de vaste stof is een raming gemaakt van de potentiële broeikasgasuitstoot in CO₂-equivalenten.

2.2 Veemonsters

Acht buizen veen zijn gemonsterd door SOCOTEC (Geotechnisch Onderzoek Planuitwerkingsfase Dijkversterking IJsselmeerdijk, SOCOTEC, 2023). De bodemtransecten zijn bemonsterd met buizen, waarvan 8 buizen met weinig materiaal, 60 cm lang en 67 mm doorsnede, verpakt in plastic en bewaard bij 4°C overgebracht zijn naar Deltares voor dit onderzoek. Deze zijn vervolgens bewaard bij 4°C in de aangeleverde verpakking en alleen verstoord tijdens het maken van de mengmonsters. Bodemidentificatie van de gebruikte monsters is weergegeven in de bijlagen (Tabel 4). Voor de mengmonsters is IJsselmeerwater gemonsterd eind november door Deltares (GPS locatie in RD coördinaten: 163896, 508817). Gezien het tijdsbestek tussen het geotechnisch onderzoek en de start van de experimenten bij Deltares, is het mogelijk dat de monsters verstoord kunnen zijn geraakt. Bijvoorbeeld door langdurige blootstelling aan zuurstof tijdens de opslag.

2.3 Manometrische metingen

Mengmonsters zijn bereid vanuit drie verschillende veenbuizen. Uit iedere buis is willekeurig een blok van 150 g uitgesneden. Het veen is met behulp van mechanisch roeren gemengd totdat er brokjes kleiner dan 1 cm waren. Voor de flesincubaties is gekozen om het veen te verdunnen met IJsselmeerwater. Hiervoor is per fles 30g gemengd veen met 60g IJsselmeerwater ingewogen. Aan iedere fles is een roervlo toegevoegd om tijdens het experiment een goed-gemengd systeem te behouden door continu te mengen. De gebruikte flessen hebben zijarmpjes en een indicatief volume van 250 ml.

De veenafbraak is bepaald door middel van het OxiTop systeem (WTW) en gaschromatografie. Het OxiTop-meetsysteem werkt door middel van een drukafname in een afgesloten omgeving. Door natronloog in de dop van de meetfles, wordt CO₂ uit de gasfase weggevangen. Hierdoor kan aangenomen worden dat alle drukafname tot stand is gekomen door zuurstofverbruik en er geen invloed is van drukopbouw door CO₂-productie. Onder de aanname dat alleen zuurstof wordt gebruikt uit de gasfase en geen gas geproduceerd wordt, is de drukafname een maat voor zuurstofverbruik. Met behulp van de ideale gaswet kan de omzettingssnelheid (Oxygen Consumption Rate: OCR) uitgerekend worden op basis van het drukverschil:

$$OCR = \frac{\delta P * V_{gas}}{R * T} * M_{w,O_2}$$

Waar δP de drukafnamesnelheid in de tijd is (kPa/min), V_{gas} het volume van de gasfase (L), R de ideale gasconstante (8,314 L kPa K⁻¹ mol⁻¹), T de temperatuur (K) en M_{w,O_2} de molecuulmassa van zuurstof (32 g mol⁻¹). Door aan te nemen dat 1 mol organisch materiaal 1 mol CO₂ produceert, kan de drukafname met behulp van het molmassa van CO₂ omgerekend worden naar een schatting van de CO₂-productie.

Twee condities zijn getest: 1) afbraak met zuurstof en 2) afbraak onder zuurstofloze omstandigheden. Zuurstofloze condities zijn bewerkstelligd door een stikstofatmosfeer in de fles te maken door de gasfase gedurende 10 minuten te beluchten met stikstofgas. De flessen zijn op een magnetisch roerplateau gezet, ingepakt in aluminiumfolie om invloed van licht te beperken en ingezet bij 20°C. Periodiek zijn er gasmonsters genomen voor het meten van CO₂ en CH₄ met een gaschromatograaf. Gasmonsters van de anaerobe OxiTop-incubaties zijn geanalyseerd bij Isolab B.V. op samenstelling van CH₄ en CO₂ na 65 dagen.

2.4 Ionen en organische stof

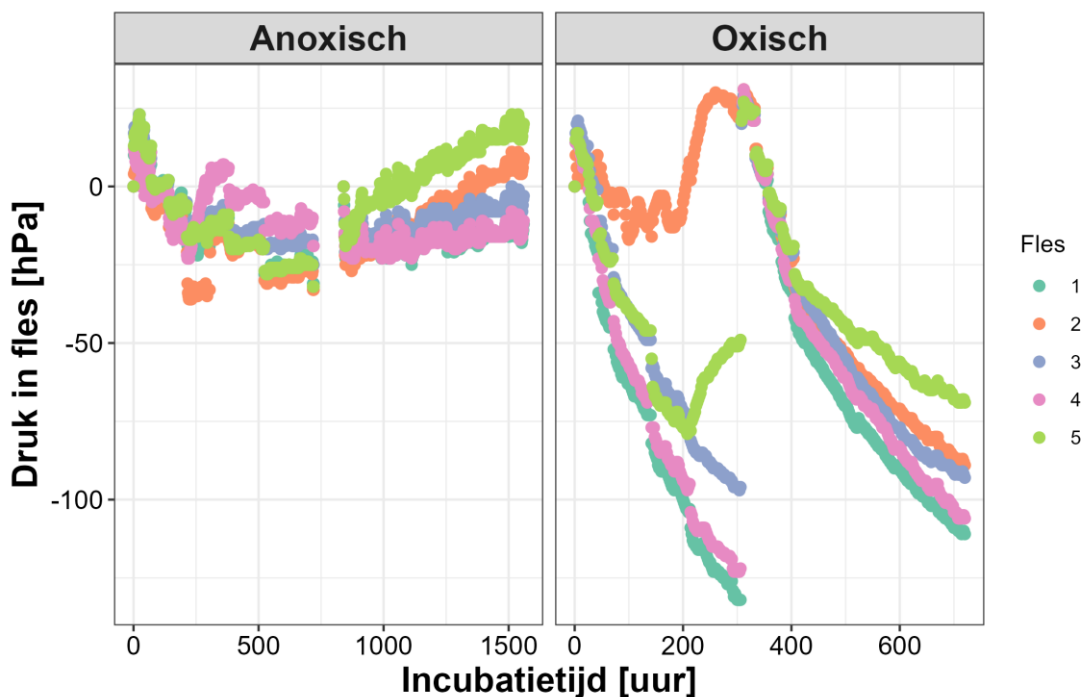
Drogestof- en organische stofgehalte van het veen is bepaald door middel van thermogravimetrische analyse (TGA). Ionen in de het IJsselmeerwater en in het mengsel daarvan met veen zijn bepaald met ion chromatografie (IC) na filteren over een 0.45 µm spuitfilter. Veenmengmonsters zijn eerst een uur gecentrifugeerd (4000 rpm) voordat het supernatant gefilterd werd. Opgelost organische stof is bepaald met een Shimadzu TOC analyzer.

3 Inschatting van de CO₂-uitstoot bij het vergraven van veen

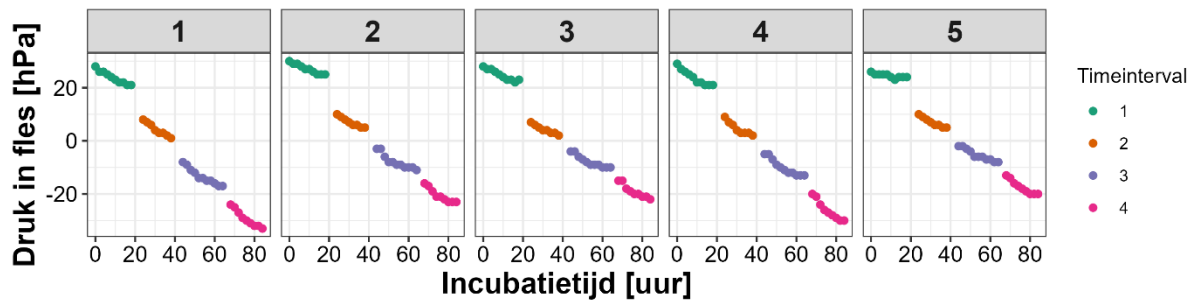
3.1 Maximale oxidatiepotentieel van veen met zuurstof

Drukafname in de zuurstofloze (anoxisch) en zuurstofrijke (oxische) flessen is afgebeeld in de tijd in Figuur 4. De oxische flessen zijn 1 keer geopend om het gas in de fles te verversen (na ca 300 uur). Dit is te zien in de sprong in de druk en een tweede reeks van drukafname. Ook is er een grote drukafname te zien door het monstere van de gasfase in de flessen. Met een spuit is enkele keren gasfase onttrokken, waardoor de druk in de fles verspringt in de grafiek (bijvoorbeeld rond 150 uur). In de eerste reeks is ook te zien dat flessen 2 en 5 een druktoename laten zien, wat zou wijzen op zuurstofloosheid en de productie van methaan. In beide gevallen is de druktoename te zien na een punt dat de gasfase gemonsterd werd. Omdat eenzelfde druktoename niet gezien is in de tweede reeks, is zuurstofloosheid niet waarschijnlijk en zal het gekomen zijn door een lek na het monstere.

De drukafname snelheid (δP) wordt bepaald door een lineaire regressie van de druk in de tijd. De helling van de lijn beschrijft dan de drukafnamesnelheid in de tijd. Voor de vijf replica's zijn de volgende datareeksen apart behandeld omdat door handmatig monstere van de gasfase de druk op bepaalde tijdstippen verspringt en een overschatting van de afbraaksnelheid zal opleveren. In Figuur 5 is te zien dat de afzonderlijke datareeksen een vergelijkbare helling hebben. De helling is bepaald op de tweede reeks van de proeven, omdat deze een representatief beeld geeft van de afbraaksnelheid gezien de gelijkenis met de eerste reeks.

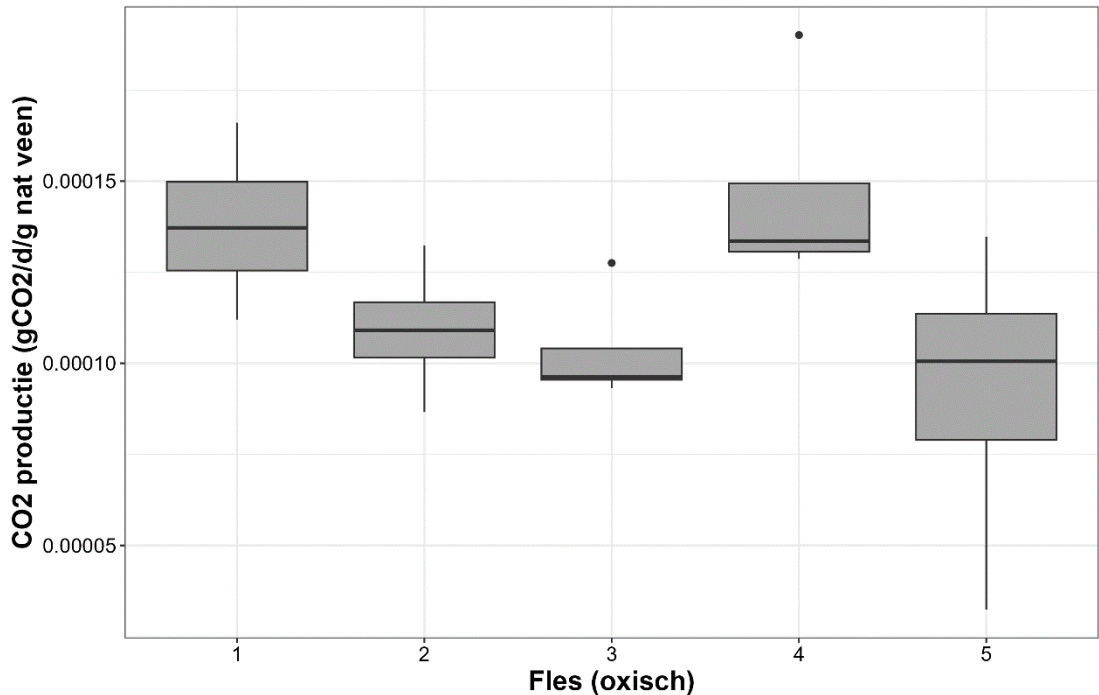


Figuur 4. Drukverloop in de tijd per replica tijdens de afbraakproeven.



Figuur 5. Drukintervallen in de incubaties die gebruikt zijn voor de bepaling van de drukafnamesnelheid. De verschillende kleuren duiden de verschillende tijdsreeksen aan. De kaders beschrijven de 5 replica's.

De berekende CO₂-productiesnelheid varieert een klein beetje tussen de tijdsintervallen, maar veel van de replica's vallen in dezelfde ordegrootte (Figuur 6). Op basis van de experimenten is de inschatting dat er 120 mg CO₂ / dag / kg veen geproduceerd wordt (mediaan).



Figuur 6. Kooldioxideproductiesnelheid voor de oxische afbraak van IJsselmeerveen. De boxplot is berekend met vier afbraaksnelheden per fles. De lijn in het midden van de doos geeft de mediaan aan.

Doorrekenen naar totale veen hoeveelheid bij ontgraving cunet

De huidige inschatting voor het aantal kubieke meters veen dat ontgraven wordt tijdens het project is circa 270 000 m³ (SSK-Raming Ontwerploop 2). Een bepaling van het bulk-dichtheid van het veen komt uit op 1169 kg/m³. Met deze kentallen komen we op een totale maximale uitstoot van 38 ton CO₂ / dag als al het veen oxideert (**0,17 kg / m³ veen / dag**)

Deze uitstoot is bepaald bij een temperatuur van 20°C. Biologische reacties verlopen trager bij lagere temperaturen en voor veen is dit ongeveer een factor ~3 (Davidson & Janssens, 2006). Wanneer we de uitstoot hiermee omrekenen, komen we op een realistischere waarde voor de maximale zuurstof-afhankelijke uitstoot bij 10 °C van 12,7 ton CO₂ / dag (voor al het veen; **0,06 kg / m³ veen / dag**). Deze uitstoot is gebaseerd op een goed gemengd OxiTop systeem waarbij al het veen optimaal is blootgesteld aan zuurstof. Deze inschatting geeft de maximale uitstoot en is waarschijnlijk een overschatting, omdat het veen in de praktijk gedurende een groot deel van de tijd niet goed gemengd zal zijn en ook om verschillende redenen de beschikbaarheid van zuurstof niet optimaal zal zijn (bijvoorbeeld door beperking van de aanvoer van zuurstof door afdekken of consolidatie). De hierboven gegeven inschatting op basis van de OxiTop-

experimenten komt per dag neer op 0,069% van de duurzaamheidsdoelstelling bij de aanleg van de vooroever bij de IJsselmeerdijk (55000 ton CO₂).

	Zuurstofrijke condities CO ₂ productie (ton CO ₂ /dag)
Lab condities (20°C, optimaal O ₂)	38
Realistische condities veld (10°C, optimaal O ₂)	12,7

Veenoxidatie door afdrijving

Gezien het hoge organisch stofgehalte in het veen (75% van de droge stof) en de afdrijving na menging met water, is het realistisch dat een gedeelte van het veen compleet zal oxideren. Als al het veen zou oxideren komt er:

$$0,75 \text{ gOS/g}_{\text{DW}} * 0,2 \text{ g}_{\text{DW}} / \text{g (nat) veen} * (1 \text{ } 169 \text{) kg veen} / \text{m}^3 = 175,35 \text{ kg OS} / \text{m}^3 \text{ veen}$$

$$175,35 \text{ kg /m}^3 * 217 \text{ } 229 \text{ m}^3 \text{ veen totaal} = 47 \text{ } 560 \text{ } 005 \text{ kg OS totaal}$$

$$47 \text{ } 560 \text{ } 005 * 0,5 (50\% \text{ C}) * (44/12) = 87 \text{ } 193 \text{ ton CO}_2 \text{ in totaal}$$

waarbij OS staat voor organische stof. De aannames zijn gedaan dat de organische stof in het veen voor 50% bestaat uit koolstof. Om tot gram CO₂ te komen vanuit gram C wordt er een factor toegepast van de molmassa's van CO₂ en een koolstofatoom (44/12).

Dit is hoger dan de raming die voor de CO₂-emissie gesteld is (C. Tenthof, pers. comm. & SSK Raming Ontwerploop 2). Stel dat 10% van het veen afdrijft en compleet oxideert, dan zal er 8700 ton CO₂ (10% van totaal veen; **0.4 ton CO₂/m³ nat veen**) vrijkomen in het systeem. Dit is een zeer grove schatting onder de aanname dat al het koolstof in veen omgezet kan worden en "labiel" is. Ook is 10% een aanname die getoetst moet worden in de praktijk, omdat de hoeveelheid veenverlies bepalend is voor de uitstoot.

3.2 Uitstoot bij zuurstofloze condities

De hierboven beschreven inschattingen van de CO₂-uitstoot zijn voornamelijk onder zuurstofrijke condities of met de aanwezigheid van andere elektronacceptoren (zoals nitraat en sulfaat). In vijf mengmonsters met veen is de afbraak onder stikstofatmosfeer enkele weken gevolgd. Bij productie van methaan zou hier een drukopbouw worden verwacht. Er is echter geen significante drukopbouw gemeten. Omdat dit veen van oudsher is blootgesteld aan mariene condities, terug te zien in de hoge sulfaatconcentraties in het poriewater, is de kans op methaanoxidatie met sulfaat erg groot. Dit zou de potentiële methaanuitstoot kunnen temperen. Ook kan de aanwezigheid van grote hoeveelheden sulfaat leiden tot competitie tussen microbiële processen van sulfaatreductie en methanogenese, waardoor zolang er nog veel sulfaatreductie plaatsvindt geen methanogenese optreedt.

De pH in de aerobe incubaties verzuurde gedurende het experiment tot 5,2, wat remmend is voor microbiële afbraak. Ook zal het aanwezige sulfaat door sulfaatreductie sulfide produceren, wat een remmende werking kan hebben op de afbraak en methaanproductie. Omdat het veen naar alle waarschijnlijkheid een zeer recalcitrante fractie organische stof is, zal de afbraak onder zuurstofloze condities erg laag zijn en de methaanproductie beperkt. Echter kan kortstondige blootstelling aan zuurstof een puls geven en leiden tot extra methaanproductie nadat het weer vergraven is (Brouns et al., 2014). Daarom is er niet doorgerekend naar de methaanuitstoot na het vergaven in de realistische situatie.

De anoxische flessen laten eerst een afname van de druk zien, wat duidt op enige oxidatie van het veen (Figuur 3). Mogelijk is dit gedeeltelijk te verklaren door residueel zuurstof in het water of de gasfase.

De productie van CH₄ leidt theoretisch tot een druktoename in de fles. In de monsters is een dergelijke toename van de druk zichtbaar voor flessen 2 en 5 na een incubatietijd van meer dan 29 dagen (700 uur). Op het eind van de meetreeks is een gasmonster genomen en deze is geanalyseerd op de aanwezigheid van CH₄ en CO₂. Hieruit bleek dat er amper CH₄ gevormd is. Daarom achten we de uitstoot van broeikasgassen via CH₄ erg laag. Om dit met grote zekerheid vast te stellen, is het aan te bevelen intensievere batch afbraakproeven in serumflessen met butylrubberen stoppers uit te voeren, waarbij druk en gasconcentratie handmatig regelmatig gemonitord worden.

Anaerobe CO₂ productie na afdekken

Buiten de vorming van methaan, kunnen zuurstofloze condities ook leiden tot de vorming van CO₂. Indien er nitraat of sulfaat aanwezig is, zal dit leiden tot de microbiële afbraak van het veen totdat al het nitraat en sulfaat verbruikt is. Pas als al het zuurstof, nitraat en sulfaat is omgezet, zal methanogenese plaatsvinden en het afbreekbare deel van het organisch materiaal omzetten in methaan. In de monsters is sulfaat en nitraat gemeten: sulfaat afkomstig uit de veenlaag zelf of door oxidatie van ijzersulfides, en nitraat doordat dit aanwezig is in het oppervlaktewater van het IJsselmeer.

In het IJsselmeerwater is een 12,6 mg/L nitraat gemeten. Als we aannemen dat het veen compleet gemengd wordt met het IJsselmeerwater tijdens het vergraven, dan is per m³ veen 800L water aanwezig met 12,6 mg/L nitraat. Dit is omdat het veen voor 80% uit water bestaat (droge stof van 20%). Als we aannemen dat er geen inzijging plaatsvindt na afdekking, dan zou een volledige omzetting van het nitraat leiden tot een CO₂-productie van:

12,6 mg/L → 0,2 mM NO₃⁻ → **8,8 g CO₂ / m³ veen** → 2,3 ton CO₂ in totaal door nitraat in al het veen

Tijdens de experimentele setup is geconstateerd dat er veel sulfaat gevormd wordt. Van holocene lagen in veenweide-gebieden is bekend dat deze een bron kunnen zijn van sulfaat vanwege de blootstelling aan zeewater ca. 5000 jaar geleden (Vermaat et al., 2016). Dit is ook terug te zien ook in de hogere natrium en chloride concentraties in de gemengde veenmonsters ten opzichte van het IJsselmeerwater. Dit levert een gemiddelde concentratie van 1000 mg/L sulfaat (SO₄²⁻) op na blootstelling met zuurstof. Waarschijnlijk komt dit doordat ijzersulfide wordt blootgesteld aan zuurstof en omgezet naar Fe³⁺ en SO₄²⁻. Sulfaat kan gebruikt worden om sulfide te vormen en organische stof om te zetten tot CO₂ in de afwezigheid van zuurstof. Met een verhouding van 2 mol CO₂ per mol SO₄²⁻, zou dit leiden tot:

1000 mg/L → 10,4 mM SO₄²⁻ → **733 g CO₂ / m³ veen** → 199 ton CO₂ in totaal door sulfaat in al het veen

Tabel 1. Gemeten en berekende CO₂-uitstoot die plaats kan vinden naar aanleiding van veenafbraak.

	Initiele omzettingssnelheid (vermengd) [ton CO ₂ /dag]	Volledige omzetting [ton CO ₂]	Waarschijnlijkheid
CO ₂ uit aerobe afbraak (gemeten)	12,7	n.v.t.	Zeer hoog
CO ₂ uit denitrificatie (berekend)	n.v.t.	2,3	Hoog
CO ₂ uit sulfaatreductie (berekend)	n.v.t.	199	Laag
CH ₄ uit zuurstofloze afbraak (gemeten)	CH ₄ beneden detectie		Onduidelijk

De totale CO₂-uitstoot na vergraving van het veen is niet volledig op voorhand te voorspellen. Afhankelijk van de tijd dat het veen aan zuurstof wordt blootgesteld, wordt de uitstoot hoger of lager. Tijdens de anaerobe afbraak is er geen methaanvorming geconstateerd, maar vanwege de meetmethode is een directe meting van de anaerobe CO₂ productie niet mogelijk. Dit komt omdat de drukafname in een zuurstofloze omgeving niet gelijk staat aan zuurstofconsumptie en dus CO₂ productie. De maximale uitstoot door denitrificatie en sulfaatreductie, gebaseerd op ion-metingen, is vele malen lager dan de geschatte totaal CO₂-uitstoot van de dijkversterking. De grootste bron van CO₂ is de volledige oxidatie van een deel van het veen dat afdrijft. Als dit beperkt wordt tot enkele procenten van het projecttotaal (2% veen levert 1740 ton CO₂ op), dan zal de uitstoot door veenafbraak beperkt blijven. De lage uitstoot door aerobe afbraak- ~400 ton CO₂ voor al het veen als het een maand aan zuurstof blootgesteld wordt- zal de totale CO₂-afdruk van veenoxidatie bij weinig afdrijven laag houden.

Tabel 2. Concentraties van an- en kationen en opgeloste organische stof (NPOC: Non-Purgeable Organic Carbon) in de waterfase van de veenmonsters, organische stofgehalte (OS) en CaCO₃-gehalte van het veen. N.d. indiceert een concentratie beneden het detectielimiet.

Naam	Cl [mg/L]	NO ₂ ⁻ [mg/L]	NO ₃ ⁻ [mg/L]	SO ₄ ²⁻ [mg/L]	Na [mg/L]	NH ₄ ⁺ [mg/L]	K [mg/L]	Mg [mg/L]	Ca [mg/L]	OS [% van droog-gewicht]	CaCO ₃ [% van droog-gewicht]	NPOC [mg/L]
IJsselmeer	67,7	n.d	12,6	54,3	36,9	0,0	5,8	9,1	63,4			7,5
Veenmeng-monster voor afbraak	734,4	n.d.	10,4	657,3	456,8	18,5	19,7	75,9	131,0	71,3	3,0	15,5
Gemiddelde van oxische incubaties	768 ± 26	1	n.a.	971 ± 219	523 ± 22	14 ± 3	22 ± 1	110 ± 19	207 ± 50	75 ± 1	1 ± 0,1	279 ± 399

3.3 Broeikasgasuitstoot tijdens het oppakken van veen

Veenlagen in de bodem kunnen een reservoir zijn voor gasbellen die voornamelijk uit CH₄ bestaan. Dit gas zit opgeslagen in de bodem en komt door de verstoring van het oppakken vrij. Omdat CH₄ een 25 keer sterker broeikasgas is dan CO₂ kan de impact van het gas door bodemverstoring erg hoog zijn (Raadgever et al., 2020). Echter door de beperkte beschikbare kennis over hoeveel gas er in de bodem zit opgeslagen, is het op dit moment niet mogelijk om een inschatting te geven van de broeikasgas uitstoot tijdens het vergraven. Om hier grip op te krijgen is het aan te raden om hier in de projectvoorbereiding nader onderzoek naar te doen. .

4 Conclusies

De raming van broeikasgasuitstoot van (water)bouwprojecten is vaak gebaseerd op de uitstoot door het materieel, maar er zijn andere emissiebronnen die relevant kunnen zijn. Bijvoorbeeld de uitstoot van bodems door verplaatsing en (microbiële) oxidatie. Materiaal rijk in organische stof, zoals veen, is gevoelig voor oxidatie. Het doel van dit onderzoek was om te concretiseren in welke mate er sprake is van uitstoot door veenafbraak onder zuurstofrijke of zuurstofloze, als gevolg van de verstoring van het ontgraven van een cunet. Hierbij is met beschikbare kennis en opgedane resultaten een realistisch beeld geschetst van de hoeveelheid broeikasgasuitstoot (CO₂ en CH₄) als gevolg van biochemische processen onder zuurstofrijke en zuurstofloze condities tijdens en na de aanleg van de cunet.

4.1 De emissies van broeikasgassen tijdens en na vergraving van veen

De vergraving noodzakelijk voor het cunet zal veen blootstellen aan een zuurstofrijk milieu. Gedurende de tijd dat het veen veel uitwisseling heeft met het zuurstofrijke water zal er een geschatte CO₂-uitstoot zijn van 12,7 ton / dag, als we al het te vergraven veen meerekenen, (temperatuur van 10°C). Omdat dit gaat over een situatie waar al het veen lange tijd zuurstofrijk is, is dit een inschatting van een maximale uitstoot. Het is erg aannemelijk dat de uitstoot via oxidatie minder zal zijn dan deze inschatting.

De mogelijkheid dat veen afdrijft na cutteren en in een zuurstofrijk milieu blijft oxideren is een potentiële bron van een aanzienlijke hoeveelheid CO₂. Vergraven met een sleephopperzuiger of cutter kan de kans het afdrijven van het veen vergroten doordat het veen vermengd wordt met water. Een alternatieve manier van vergraven (bijvoorbeeld met een hydraulische kraan (backhoe)) of het voorkomen van afdrijvend veen vermindert de uitstoot. Omdat een schatting van 10% veenverlies kan leiden tot 16% van de totale geschatte CO₂-uitstoot, is het noodzakelijk om de afdrijving zo klein mogelijk te houden.

Buiten directe oxidatie en afdrijving zijn zuurstofloze bronnen van broeikasgassen klein. Uit het onderzoek is gebleken dat methaanuitstoot laag of afwezig is. CO₂-productie door denitrificatie en sulfaatreductie zijn in omvang beperkt en erg onwaarschijnlijk door twee factoren: 1) de lage concentratie van nitraat (12,6 mg/L) en de lage pH (5,2). Ook zal er in het geval van sulfaatreductie sulfide vrijkomen, wat methaanproductie en afbraak van het veen verder zal verminderen. Het veen is onder zuurstofloze omstandigheden moeilijk afbreekbaar, wat de berekende uitstoot van CO₂ via denitrificatie en sulfaatreductie maakt tot een theoretisch maximum.

Een moeilijk te duiden bron van broeikasgassen is de mogelijke uitstoot van CH₄ via gasbellen die vrij komen door bodemverstoring. Vanwege de potentiële omvang en impact op de uitstoot is het van belang eisen te stellen om de hoeveelheid gas dat vrijkomt te minimaliseren.

4.2 Aanbevelingen voor het verminderen van de CO₂-emissie

Om de broeikasgasuitstoot uit het veen door verstoring en als gevolg van veenafbraak tot een minimum te beperken zijn er een aantal gedachtegangen rondom het baggerproces relevant:

(1) om bellen uit het veen zo min mogelijk te laten ontsnappen dient de verstoring van het veen tot een minimum beperkt te worden,

(2) om aerobe veenafbraak zo minimaal mogelijk te houden dient het veen zo kort mogelijk bloot gesteld worden aan zuurstof,

Uit de resultaten van de experimenten en labanalyses komen enkele aanbevelingen voor het verminderen van de CO₂-uitstoot voort:

- De tijd dat het veen blootgesteld is aan zuurstof is bepalend. Het is van belang om te waarborgen dat het veen snel wordt afgedekt, het liefst met een materiaal dat weinig zuurstof doorlaat (klei)
- Het afdrijven van het veen is een grote potentiële bron van CO₂. Het voorkomen hiervan door bijvoorbeeld netten of het gebruik van een hydraulische kraan (backhoe) kan de kans op afdrijven verminderen
- Indien er gekozen wordt voor een methode met veel bodemverstoring, is het methaangas dat vrijkomt een directe bron van broeikasgas. Wij adviseren om dit gas op te vangen of direct af te fakkelen tot CO₂.
- De uitstoot via zuurstofloze afbraakprocessen lijkt op basis van onze resultaten bescheiden. Daarom is afdekken van het veen om zo latere blootstelling aan zuurstof te beperken aan te bevelen. Relevant hierbij is dat op lange termijn ook de aanwezigheid van planten kan leiden tot verhoogde broeikasgas uitstoot. Daarmee dient de afdekking in ieder geval dieper te zijn dan de worteldiepte van planten waarvan bekend is dat zij als een schoorsteen broeikasgassen uit de bodem naar de lucht toe uitstoten (bijv. riet, lisdodde).

4.3 Kennisleemtes

Voor de uitstoot van broeikasgassen is er een duidelijke inschatting van de uitstoot bij zuurstofafhankelijke afbraak. Voor andere emissieroutes is dit onduidelijk of zijn er aannames die bijgestuurd kunnen worden door aanvullend onderzoek. Om een beter beeld te krijgen van het gedrag van de veenlaag, de uitstoot tijdens en na het vergraven, kunnen de volgende onderzoeken uitgevoerd worden:

- Het meten van de hoeveelheid gas die vrijkomt tijdens het vergraven. Een debietmeter op de ontgassingspijp van het baggermateriaal gecombineerd met een analyse van het gas kan al een goede indicatie opleveren van de grootte van de methaanuitstoot via deze emissieroute
- Het veen consolideert afhankelijk van de methode van vergraven. Een inschatting van de hoeveelheid veen dat “oplost” gedurende het proces zal een verbeterde inschatting van de zuurstofafhankelijke afbraak van het veen opleveren
- De anaerobe afbraak is laag maar ook onzeker. Een aanvullend experiment met recent bemonsterd materiaal in een proefopstelling waar zuurstofloosheid beter gegarandeerd is, is aanbevolen

5 Referenties

Brouns, K., Verhoeven, J. T., & Hefting, M. M. (2014). Short period of oxygenation releases latch on peat decomposition. *Science of the Total Environment*, 481, 61-68.

Davidson, E., Janssens, I. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature* **440**, 165–173 (2006).
<https://doi.org/10.1038/nature04514>

Geotechnisch Onderzoek Planuitwerkingsfase Dijkversterking IJsselmeerdijk, SOCOTEC, 2023

Nieuwenhuis, O., Van de Laar, R., Pieters, J., Wendt, T.A., Eerens-Kostense, J. & Baltissen, J. (2022). Verkenningsfase Versterking IJsselmeerdijk Notitie Voorkeursbeslissing. Waterschap Zuiderzeeland en RoyalHaskoningDHV

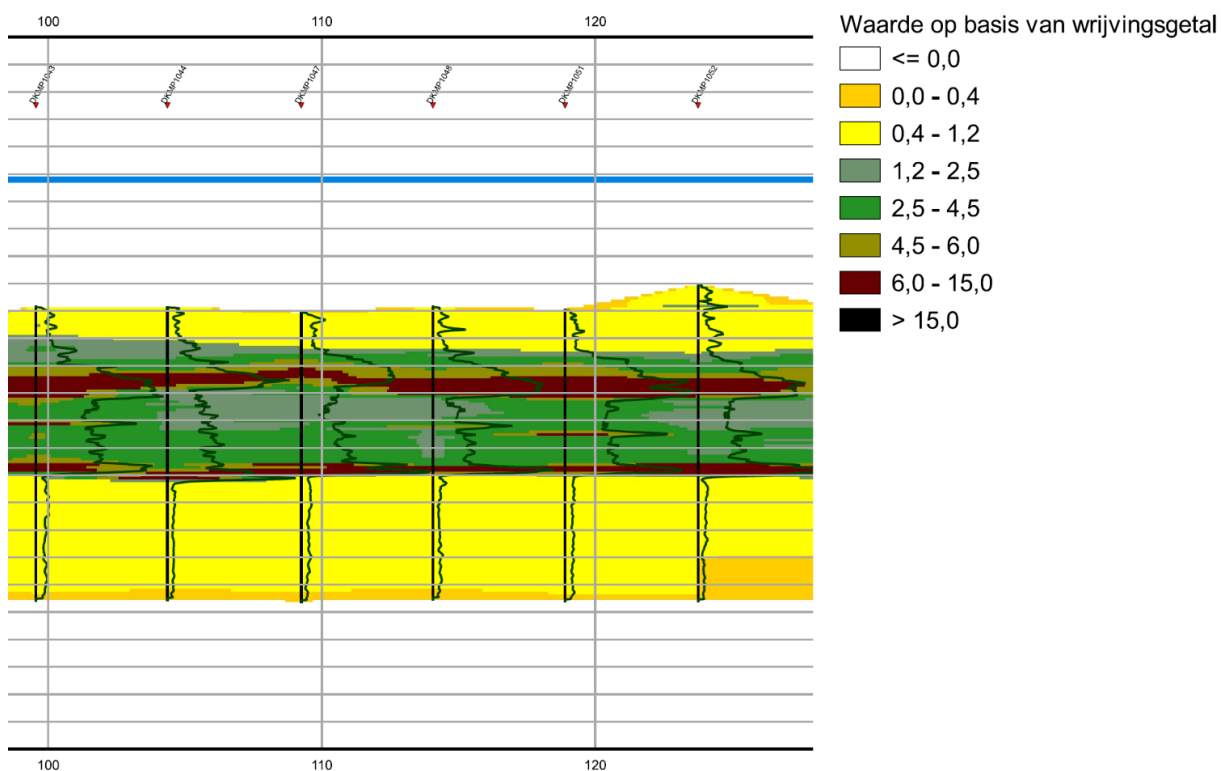
Raadgever, Tom & Groenendijk, Floris & Haarman, Fred & Klinge, Marcel & Rijk, Sacha & van der Star, Wouter & Pohnke, Carina & Robert, Suzanne & Fiselier, Jasper & Kollen, Jan & Sulker, Desley & Ven, Joost. (2020). Verkenning proeftuin duurzaam en effectief grondverzet.

Vermaat, J. E., Harmsen, J., Hellmann, F. A., van der Geest, H. G., de Klein, J. J., Kosten, S., Smolders, A.J.P., Verhoeven, J.T.A., Mes, R.G. & Ouboter, M. (2016). Annual sulfate budgets for Dutch lowland peat polders: The soil is a major sulfate source through peat and pyrite oxidation. *Journal of Hydrology*, 533, 515-522.

6 Bijlagen

Tabel 3. Gascompositie van de zuurstofloze incubaties na 65 dagen, uitgedrukt in ppm op volumebasis.

Fles	CH ₄ [ppmv]	N ₂ [mol%]	CO ₂ [mol%]
1	4	88	2,3
2	5	94,6	3,7
3	3	92,2	3
4	4	93,1	2,7
5	4	94,8	3,5
Gemiddelde	4 ± 0,7	92,5 ± 2,8	3 ± 0,6



Figuur 7. Bodemprofiel over een deel van het beoogde dijktraject, op basis van sonderingen (uitgevoerd door SOCOTEC voor Waterschap Zuiderzeeland).



Figuur 8. Voorbeeld van het veen dat gebruikt is voor de afbraakproeven. Monsters zijn uit het midden van de bus gesneden.

Tabel 4. Locaties en eigenschappen van de veenmonsters die gebruikt zijn voor de afbraakproeven.
 Identificatie is uitgevoerd door SOCOTEC voor Waterschap Zuiderzeeland.

Monsternummer	Diepte [m-mv]	RD coördinaten X	RD coördinaten Y	Waterdiepte [m]	Identificatie [NEN-EN-ISO 14688-1:2019+NEN8990:2020]
B006	7,7 - 8,2	161663	507354,8	4,7	Veen, matig stevig, matige treksterkte, fijn pseudo-vezelig, donkerbruin
B007	7,1 - 7,6	162227,3	507418,8	4,6	Veen, matig slap, matige treksterkte, fijnvezelig, weinig hout, weinig plantenresten, zwart
B017	8,8 - 9,3	168425,5	512417,9	4,3	Klei, slap, sterk organisch, weinig plastisch, kalkloos, weinig plantenresten, donkerbruin

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl