

Mechanistisch begrip – Kernvragen

Versie: 2024-09-28

1.1 Welke factoren spelen een rol bij de afbraak van veen?

De bodem van de Nederlandse veenweidegebieden bestaat vooral uit organisch materiaal, wat een mengsel is van 'oud' veen, dat al veelal duizenden jaren oud is, en 'nieuw' organisch materiaal afkomstig van het gras dat er op groeit. Onder de juiste omstandigheden breken micro-organismen dit mengsel langzaam af om energie te krijgen om te kunnen groeien. Tijdens dit afbraakproces komen, behalve energie, ook CO₂ en andere broeikasgassen zoals methaan (CH₄) en lachgas (N₂O) vrij.

De snelheid waarmee de afbraak plaatsvindt, hangt af van drie factoren:

- 1) de afbraakgevoeligheid van de organische verbindingen in de bodem
- 2) de beschikbaarheid van oxidatoren, zoals zuurstof
- 3) de activiteit van zogenaamde (exo)enzymen: door micro-organismen geproduceerde eiwitten die in staat zijn om organisch materiaal af te breken.

Deze drie factoren worden op hun beurt weer beïnvloed door omgevingsfactoren, zoals landgebruik, waterbeheer en weersomstandigheden. De combinatie van wat er in de bodem zit aan organisch materiaal (het bodemprofiel) en de omgevingsfactoren bepaalt dus hoe snel de afbraak gaat en hoeveel broeikasgassen er vrijkomen uit het veen.

Belangrijke omgevingsfactoren die invloed hebben op de afbraak zijn:

- *De grondwaterstand*
 - o Als de bodem vol water zit (verzadigd is), is er geen zuurstof uit de atmosfeer beschikbaar.
- *Het bodemvochtgehalte*
 - o In onverzadigde omstandigheden kan bij te veel vocht alsnog te weinig zuurstof beschikbaar zijn, terwijl bij te weinig vocht micro-organismen minder actief zijn.
- *De bodemtemperatuur*
 - o Hoe lager de temperatuur, hoe minder actief de enzymen zijn.
- *De biochemische omstandigheden*
 - o Bijvoorbeeld de samenstelling en zuurgraad van het water in de bodem.

Veel van deze omgevingsfactoren veranderen met de seizoenen, wat ervoor zorgt dat de afbraaksnelheid van organisch materiaal door het jaar heen verschilt. In de winter is de bovenste laag van de bodem vaak te nat en door de lage temperaturen vindt er bijna geen afbraak plaats. In de zomer verdampt het water, neemt het vochtgehalte af en daalt de grondwaterstand. Hierdoor neemt de afbraak toe. Tijdens droge periodes is de combinatie van hogere bodemtemperaturen en dalend grondwaterpeil, voldoende bodemvocht en zuurstof in de bodem ideaal voor snellere afbraak. Bovendien is er in de zomer vaak meer aanvoer van nieuw en vers organisch materiaal vanuit de vegetatie of mest, wat de afbraak van oud veen verder versnelt.

Het beheer van het land heeft een grote invloed op de omstandigheden in de bodem en dus op de snelheid van veenafbraak. Bijvoorbeeld, de mate van maaien, bemesten en begrazing heeft invloed op de hoeveel voedingsstoffen in de bodem. Ook heeft het waterbeheer invloed op het grondwaterpeil en de vochtigheid van de bodem, wat weer invloed heeft op de temperatuur en de hoeveelheid zuurstof in de bodem. Daarnaast kan het inlaten van nutriëntenrijk water of het binnendringen van brak water via grondwaterstromingen of vanuit het oppervlaktewater de veenafbraak beïnvloeden.

1.2 Wat is de rol van zuurstof in de afbraaksnelheid?

Zuurstof is een stof die door micro-organismen wordt gebruikt om organisch materiaal af te breken en energie te produceren. Tijdens dit proces komt CO₂ vrij. Afbraak met zuurstof levert veel energie op (door de hoge redoxpotentiaal van zuurstof) en is relatief makkelijk beschikbaar in de lucht. Daarom zijn veel afbraakprocessen afhankelijk van zuurstof (aerobe afbraak). Hoeveel zuurstof er in de bodem aanwezig is, bepaalt hoe snel en hoe volledig het organisch materiaal wordt afgebroken.

Zuurstof in de bodem

Het zuurstofgehalte in de bodem hangt van verschillende factoren af. In de onverzadigde zone, boven de grondwaterstand, kan het zuurstof door de poriën naar binnen dringen. Zuurstof zit daar vooral in de met lucht gevulde poriën. Onder de grondwaterstand, in de verzadigde zone, is er heel weinig zuurstof. Dit systeem beweegt op en neer met de grondwaterstand en de vochtigheid van de bodem. Het zuurstofgehalte is dus hoofdzakelijk afhankelijk van de bodemhydrologie. Uit metingen blijkt daarnaast dat zuurstof meestal niet dieper dan 50-70 cm in de bodem komt, onder andere omdat het boven in de bodem wordt gebruikt door de micro-organismen.

Directe metingen van zuurstofgehalten in de bodem hebben geen betrouwbare resultaten opgeleverd, maar er zijn wel indirecte (redox-) metingen die de beschikbaarheid van zuurstof laten zien. Deze redoxmetingen hebben de link tussen de aanwezigheid van zuurstof en de grondwaterstand in de bodem bevestigd, en helpen ook om te bepalen hoe diep de zuurstof in de bodem kan doordringen. Daarnaast kunnen gemeten bodemvochtcondities een aanwijzing geven voor hoeveel zuurstof beschikbaar is, wat gebruikt wordt om de aerobe afbraaksnelheid in te schatten.

Verschillen tussen anaerobe en aerobe afbraak

Als er zuurstof beschikbaar is, kunnen *aerobe* micro-organismen het veen afbreken. Zonder zuurstof nemen *anaerobe* micro-organismen dit over. Aerobe afbraak is 2-20 keer sneller dan anaerobe afbraak. Zelfs als de zuurstof in de bodemlaag verdwijnt, kan het effect van eerdere zuurstofbeschikbaarheid nog een tijd (maanden tot één jaar) doorwerken. Dit gebeurt bijvoorbeeld bij sterk wisselende grondwaterstanden, zoals in veenweidegebieden waar 's zomers het grondwaterpeil laag staat en 's winters hoog. In deze bodems kan de afbraak nog een tijdje sneller doorgaan. Dit komt omdat er meer makkelijk afbreekbare organische moleculen zijn als gevolg van de gedeeltelijke afbraak onder invloed van zuurstof. Ook kunnen ijzer en sulfaat zijn 'opgeladen' met zuurstof (geoxideerd), wat betekent dat de energie nodig op een later moment kan vrijkomen om te worden gebruikt bij de afbraak.

Alternatieve stoffen voor anaerobe afbraak

2	
---	--

Geoxideerd ijzer en sulfaat kunnen, net als zuurstof, gebruikt worden door micro-organismen om veen af te breken. Dit proces levert minder energie op dan afbraak met zuurstof waardoor de afbraaksnelheid lager is. Omdat in het afbraakproces eerst de meest energie-efficiënte stoffen (zoals zuurstof) worden gebruikt om het makkelijkst afbreekbare organisch materiaal af te breken, blijven moeilijker afbreekbare organische verbindingen. Als dan alle zuurstof is gebruikt, wordt het afbraakproces langzamer. Als er na een tijd weer zuurstof in de bodem komt, begint dit proces opnieuw. Hoe langer er geen zuurstof is in de bodem, hoe lager de afbraaksnelheid zal zijn. Een andere factor die hierbij een rol speelt is dat sommige stoffen, zoals fenolen (die van nature veel in veen voorkomen), alleen mét zuurstof kunnen worden afgebroken. Als er te veel fenolen ophopen, stopt de veenafbraak. Als er wél weer zuurstof in de bodem komt, dan worden de fenolen afgebroken en kan de afbraaksnelheid weer toenemen, zelfs nadat de zuurstof daarna weer verdwijnt.

Productie van methaan en lachgas bij anaerobe afbraak

Tijdens anaerobe veenafbraak kunnen er naast CO_2 ook methaan (CH_4) en lachgas (N_2O) ontstaan. Lachgas wordt vooral geproduceerd als de bodem overgaat van zuurstofrijke naar zuurstofarme omstandigheden. Methaan ontstaat vooral als de bodem lange tijd (één jaar tot meerdere jaren) zuurstofarm blijft. Dit komt omdat methaanproductie weinig energie oplevert, en dus pas begint als de efficiëntere stoffen opgebruikt zijn. Dit gebeurt in diepere bodemlagen die permanent verzadigd zijn met water. Methaan verspreidt zich langzaam naar de oppervlakte, waardoor hoge concentraties methaan zich kunnen ophopen in de diepere bodemlagen. Dit betekent niet per sé dat er ook een meer methaan wordt uitgestoten. Als methaan omhoog beweegt, wordt het bijna altijd afgebroken als het een zuurstofrijke bodemlaag tegenkomt. Maar bij planten zoals riet of lisdodde kan methaan via hun wortels en stengels makkelijk ontsnappen naar de lucht (het zogenaamde schoorsteeneffect). In ondiepe lagen ontstaat methaan onder zuurstofarme condities boven in de bodem in situaties waar veel makkelijk afbreekbaar koolstof wordt toegevoegd. Dit zijn omstandigheden waar het land min of meer permanent onder water staat, en/of bij hele hoge grondwaterstanden (<20 cm onder maaiveld), waarbij daarnaast door de vegetatie constant veel vers organisch materiaal aan de verzadigde bovenlaag wordt toegevoegd. Ook ontbreekt in deze omstandigheden een zuurstofrijke laag boven in de bodem waar geproduceerd methaan nog eventueel zou kunnen worden afgebroken.

1.3 Wat is de invloed van verschillende soorten organische stoffen op de afbraaksnelheid?

Een veenbodem is een mengsel van allerlei organische stoffen met verschillende oorsprong, ouderdom en eigenschappen. Sommige organische stoffen breken onder de juiste omstandigheden snel af (labiele stoffen), terwijl andere organische stoffen zelfs onder de juiste omstandigheden heel moeilijk afbreken (recalcitrante stoffen). Dit verschil hangt af van hoe gemakkelijk micro-organismen een bepaalde stof kunnen gebruiken om voor hun groei. Eenvoudige, oplosbare stoffen zoals suikers worden veel sneller afgebroken dan complexe, niet-oplosbare stoffen, zoals lignine.

Hoewel labiele stoffen makkelijk afbreken onder de juiste omstandigheden, betekent dat niet dat ze ook snel uit het veen verdwijnen. In oude, verzadigde veenlagen zonder zuurstof blijven deze stoffen nog vaak bewaard, omdat de zuurstofloze omstandigheden afbraak voorkomen. In systemen waarin veen nog steeds gevormd wordt, komen daarom labiele onderdelen van de organische stof voor tot aan het oppervlak. Als deze lagen gedraineerd worden zal de veenafbraak snel sterk toenemen.

In gedraineerde veenweidegebieden, waar de bovenste veenlagen door drainage al eeuwen aan zuurstof zijn blootgesteld, zijn de oude labiele organische verbindingen al afgebroken. De afbraak van het recalcitrante deel verloopt daardoor moeilijk en langzaam. Ondanks deze langzame afbraak van de organische verbindingen in het oude veen, komt er toch nog CO₂ vrij, wat ook blijkt uit de NOBV-metingen. Dit is het gevolg van het eeuwenlange waterbeheer en de resulterende bodemdaling die hebben gezorgd voor een hoge dichtheid aan organisch materiaal in de bovenbodem. De koolstofdichtheid blijkt zeer bepalend voor de uitstoot van CO₂. Daarnaast wordt door bodemdaling en peilverlagingen steeds aanvullend oud veen materiaal toegevoegd aan de bovengrond, wat eerder onder verzadigde omstandigheden bewaard is gebleven. Dit nieuw toegevoegde materiaal bevat daarom ook labiele organische verbindingen.

Zowel de afbraak van jong als oud organisch materiaal draagt bij aan de totale uitstoot van CO₂. Het verschil is dat CO₂ afkomstig uit het oud materiaal (lang-cyclisch) bijdraagt aan de toename van CO₂-concentraties in de atmosfeer, omdat de koolstof al honderden tot duizenden jaren geleden uit de lucht is opgenomen. De netto toename van het CO₂-concentraties in de atmosfeer zorgt voor de opwarming van het klimaat en de aarde. CO₂ uit jong organisch materiaal (kort-cyclisch) draagt daarentegen niet bij aan de stijging van CO₂-concentraties in de atmosfeer, omdat deze koolstof recent is opgenomen.

1.4 Wat is de rol van de micro-organismen in het veenafbraakproces?

Veenafbraak (ook wel veenoxidatie genoemd) is een biologisch proces, waarbij micro-organismen zoals bacteriën, archaea en schimmels, speciale enzymen aanmaken om veen af te breken. Deze exo-enzymen versnellen de veenafbraak in zuurstofrijke omstandigheden. Als er geen zuurstof is, vertraagt de activiteit van deze enzymen.

Er zijn grofweg twee soorten exo-enzymen te onderscheiden: oxidatieve- en hydrolytische enzymen. Oxidatieve enzymen helpen bij het afbreken van de meer complexe organische stoffen in het veen. Hydrolytische enzymen breken eenvoudigere organische stoffen af. In de bovenste laag van het veen helpen hydrolytische enzymen bij de afbraak van jong organisch materiaal, zoals plantenresten, om voedingsstoffen vrij te maken voor de groei van planten. Oxidatieve enzymen breken stoffen af die de afbraak van oud veen vertragen, zoals fenolen. Als de concentratie fenolen afneemt, worden andere exo-enzymen niet meer vertraagd, en is het veen minder beschermd tegen afbraak.

Het aanmaken van (oxidatieve) exo-enzymen kost micro-organismen veel energie waardoor ze minder snel kunnen groeien. Dit zorgt voor een balans: micro-organismen kunnen niet tegelijk snel groeien én veel exo-enzymen aanmaken om het veen af te breken. Binnen de microbiële gemeenschap ontstaan daardoor verschillende strategieën: sommige micro-organismen richten zich op het maken van enzymen, terwijl anderen juist snel groeien. Binnen het NOBV wordt onderzoek gedaan naar de concurrentie tussen deze twee groepen micro-organismen om meer inzicht te krijgen in factoren die de snelheid van veenafbraak bepalen. Maatregelen die doelgericht groepen micro-organismen die veel (oxidatieve) exo-enzymen aanmaken remmen, zouden de afbraak van veen kunnen vertragen, zonder dat de afbraak van makkelijk afbreekbaar koolstof tot stilstand komt. Dit laatste is belangrijk voor de voedingsstoffen in de bodem en daarmee voor plantengroei zoals gras in veenweidegebieden.

1.5 Hoe beïnvloedt waterbeheer de afbraak van veen?

Waterbeheer in veengebieden heeft invloed op de afbraak van veen in de bodem. Dit komt omdat de waterhuishouding beïnvloedt hoeveel zuurstof beschikbaar is, wat belangrijk is voor veenafbraak.

In de bodem zijn de luchtgevulde poriën boven de grondwaterstand deels gevuld met water en deels met lucht. Hoe droger de bodem, hoe meer lucht (en zuurstof) in de poriën zit, wat de afbraak kan versnellen. Vlak boven de grondwaterstand, waar de bodem natter is en minder luchtgevulde poriën zijn, is er minder zuurstof beschikbaar voor veenafbraak dan vlak onder het maaiveld in de wortelzone, waar veel luchtgevulde poriën zijn (zeker als het niet recent heeft geregend).

De grondwaterstand bepaalt samen met de neerslag en verdamping het bodemvochtgehalte, wat de zuurstofbeschikbaarheid regelt, en daarmee de snelheid van veenafbraak. Zo is de grondwaterstand indirect sturend voor veenafbraak.

Als de bodem echter te droog wordt, bijvoorbeeld tijdens een extreme zomerdroogte, zakken de grondwaterstanden uit, en neemt het bodemvocht af. Dit kan de veenafbraak juist weer vertragen. Dit komt omdat micro-organismen vocht nodig hebben om organische materiaal af te breken. Het netto-effect van extreem droge bodemcondities op de totale jaarlijkse veenafbraak is waarschijnlijk relatief klein vergeleken met de jaarrond invloed van de grondwaterstand.

Veenafbraak in een bodem waar zuurstof aanwezig is leidt tot de uitstoot van CO₂. Naast CO₂ zijn ook lachgas (N₂O) en methaan (CH₄) twee broeikasgassen die worden uitgestoten in veengebieden. De uitstoot van lachgas in veengebieden is deels gekoppeld aan de veenafbraak: de stikstof die vrijkomt bij de veenafbraak kan worden omgezet in lachgas. Als de veenafbraak vermindert door hogere grondwaterpeilen dan zal er minder productie zijn van lachgas doordat er minder stikstof beschikbaar is. Maar nattere omstandigheden leiden ook tot makkelijkere vorming van lachgas met de stikstof dat wel beschikbaar is. Ook zijn er aanwijzingen dat sterke fluctuaties in de grondwaterstand meer lachgasuitstoot kunnen veroorzaken. Om meer inzicht te krijgen in de gevoeligheid van lachgasvorming voor verschillende omstandigheden worden metingen uitgevoerd in het NOBV. De productie van methaan is mede afhankelijk van de grondwaterstand omdat methaan wordt gevormd door micro-organismen onder verzadigde omstandigheden, dus bij hoge grondwaterstanden. Bij lagere grondwaterstanden, of sterk wisselende grondwaterstanden, wordt minder methaan geproduceerd en wordt daarbij het geproduceerde methaan ook weer deels afgebroken in zuurstofrijke bodemlagen boven in de bodem. Naast de grondwaterstand zijn ook andere factoren belangrijk voor methaanvorming, bijvoorbeeld de aanvoer van jong en makkelijk afbreekbaar organisch materiaal door de vegetatie, het type vegetatie, aanwezige nutriënten, en de bodemtemperatuur.