

Oeroude permafrostbodems in Siberië bevatten enorm veel koolstof dat daar al tienduizenden jaren veilig ligt opgeslagen. Nu die bodem door klimaatopwarming langzaam ontthooit, gaan bacteriën de koolstof omzetten in broeikasgassen, waardoor de opwarming van de aarde dreigt te versnellen.

Tikkende koolstofbom

Jorien Vonk

Aardwetenschappen, Universiteit Utrecht

Ongeveer een kwart van de bodems op het noordelijk halfrond is permanent bevroren, tot op dieptes van meer dan een kilometer (kaart). Inwoners van Siberië weten al eeuwenlang van het bestaan van deze *permafrost*, maar in de westerse wereld zijn we die pas halverwege de vorige eeuw gaan onderzoeken. We weten nu dat permafrost enorme hoeveelheden organisch materiaal herbergt. Dit komt omdat het groeiseizoen kort is en de temperatuur heel laag. De dode planten en dieren verdwijnen hierdoor meteen in de vriezer. Wereldwijd ligt er bijna 1700¹² kilogram koolstof opgeslagen; dat is meer dan vier keer zo veel als alle levende planten en bomen samen bevatten, en

ruim twee keer zo veel als nu aan broeikasgas in de atmosfeer zit (750¹² kg). De dooi van permafrost, waarbij die koolstofvoorraden vrijkomen, kan de klimaatopwarming dus enorm versterken.

OPWARMING

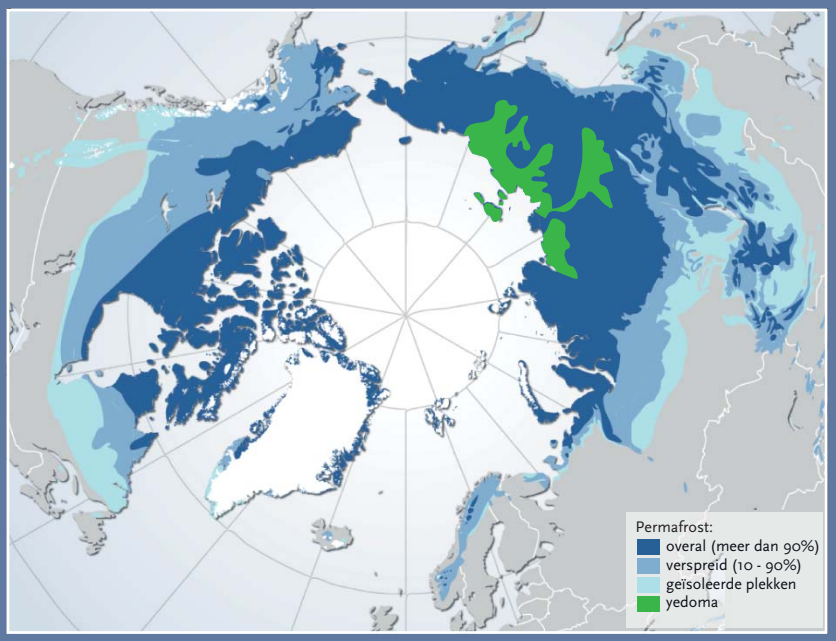
Het noordpoolgebied, en vooral het continentale deel ten noorden van 60° NB, warmt twee tot drie keer sneller op dan andere plekken op aarde. Dit heeft te maken met een vliegwieleffect in het klimaat: veranderingen in de natuur als gevolg van opwarming versnellen die opwarming weer. Een voorbeeld van zo'n 'positieve terugkoppeling' is het smelten van sneeuw en ijs. Hierdoor wordt het aardoppervlak gemiddeld donkerder en absorbeert het meer zonnewarmte omdat er minder licht weerkaatst. Een ander voorbeeld is de afname van ijs op de Noordelijke IJszee. Ijs verhindert de overdracht van warmte van het relatief warme water naar de atmosfeer, die zo kouder blijft. Als meer ijs verdwijnt, ontsnapt de warmte naar de atmosfeer en warmt de zon, die 's zomers 24 uur per dag schijnt, de Noordelijke IJszee sterker op, waardoor zich in de herfst pas later weer ijs vormt.

Temperatuurstijgingen beïnvloeden ook de permafrost. Op veel plaatsen ontthooit elke zomer een steeds dikkere bovenste laag van de bevroren bodem. Bodemtemperaturen die vroeger ver onder nul lagen, komen nu dicht bij het dooipunt. Bij het ontthooien van permafrost komt een deel van de bevroren koolstofvoorraad vrij. Bacteriën kunnen deze omzetten in de broeikasgassen koolstofdioxide (CO₂) en methaan. Op sommige plaatsen, zoals in Alaska, Zweden en op Groenland, waar op onderzoeksstations al lange tijd metingen worden gedaan, blijken er nu inderdaad meer broeikasgassen uit de dooiende permafrost te ontsnappen.

YEDOMA

In het deel van Siberië waar vroeger nooit gletsjers lagen, bevindt zich een speciaal soort permafrost, yedoma. Hier bestond een ecosysteem dat lijkt op een kruising tussen de huidige steppen in Afrika en de toendragebieden op het noordelijk halfrond. Het was er koud en enorm droog. Mammoeten, bizonen en andere grote grazers domineerden de vlakten. Gedurende tientallen millennia zijn hier organische resten van dieren en planten gemengd

Permafrost op het noordelijk halfrond



in Siberië

De kust van het eiland Muostakh in de zuidelijke Laptev Zee is aan sterke erosie onderhevig.

FOTO: ICOR SEMILETOV

met sedimentafzettingen. Het sediment werd getransporteerd via wind, water en sneeuw en vormde een nieuwe laag op de bodem, waardoor de laag daaronder bevroor en opging in de permafrost. Yedoma is strikt genomen dus eigenlijk geen bodem en ook geen sedimentafzetting, maar zit er tussenin.

De organische mix van planten, dieren en sediment werd opgeslagen in de diepgevroren bodem en is sindsdien niet meer aan temperaturen boven nul blootgesteld. Yedoma is dan ook de oudste vorm van permafrost op aarde. Er is nog iets dat yedoma uniek maakt: de aanwezigheid van gigantische ijswiggen. Deze werden gevormd door smeltende sneeuw die iedere lente via vorstscheuren de grond in sijpelt en daar bevriest en uitzet. In de loop van de tijd nemen deze ijswiggen grootse vormen aan en kunnen meer dan de helft van het totale bodemvolume beslaan. Als de ijswiggen smelten, zakt yedoma in elkaar. Dit type permafrost is dus heel kwetsbaar voor klimaatopwarming.

VERSTERKTE DOOI

Er zijn vier mechanismen die maken dat permafrost ontdooit. Ten eerste is er de jaarlijkse dooi van het bovenste deel van de bodem in de zomer. Deze 'opdooilaag' bevriest de daaropvolgende winter weer. Soms is hij slechts 10 centimeter dik, maar soms meerdere

meters. Dankzij deze laag kunnen er planten en bomen groeien. Als de luchttemperatuur toeneemt, wordt de laag dikker.

Ten tweede kan permafrost ontdooien door de vorming van een *talik*, een grondlaag die zelf niet bevroren is, maar wel omgeven is door permafrost. Taliks, afgeleid van het Russische woord voor dooi, *tait*, ontstaan vaak onder meren en rivieren waar het diepere water niet befrist in de winter en dus relatief warm is (zoetwater heeft de hoogste dichtheid bij 4°C en dit zinkt dus naar de bodem). Ook kan er een talik ontstaan als de toplaag van de bodem 's zomers zo diep ontdooit dat deze in de winter niet meer bevroren kan.

Een derde mechanisme is de erosie van kusten en rivierbanken. Satellietopnamen van de Siberische kustlijn laten aan het eind van de zomer duidelijk zien dat de kust stukje bij beetje in zee verdwijnt. Duizenden kilometers bevroren yedomakliffen vallen langzaam uiteen en laten daarbij grote wolken sediment vrij. Dit wordt

Indrukwekkende sedimentkliffen met permafrost ontdooien waar je bij staat

‘WALK LIKE A CROCODILE’

Het is midden juli. In een militair propellervliegtuigje reizen we in ruim vier uur vanuit Yakutsk noordoostwaarts naar het dorpje Cherskiy in Noordoost-Siberië. Vlakbij het dorp is een klein, permanent bewoond wetenschappelijk station. Daar stappen we in een motorbootje en varen 120 kilometer stroomopwaarts over de Kolyma, de op-vijf-na grootste rivier in het poolgebied, die jaarlijks zo'n 140 kubieke kilometer water afvoert – ongeveer twee keer zo veel als de Rijn.

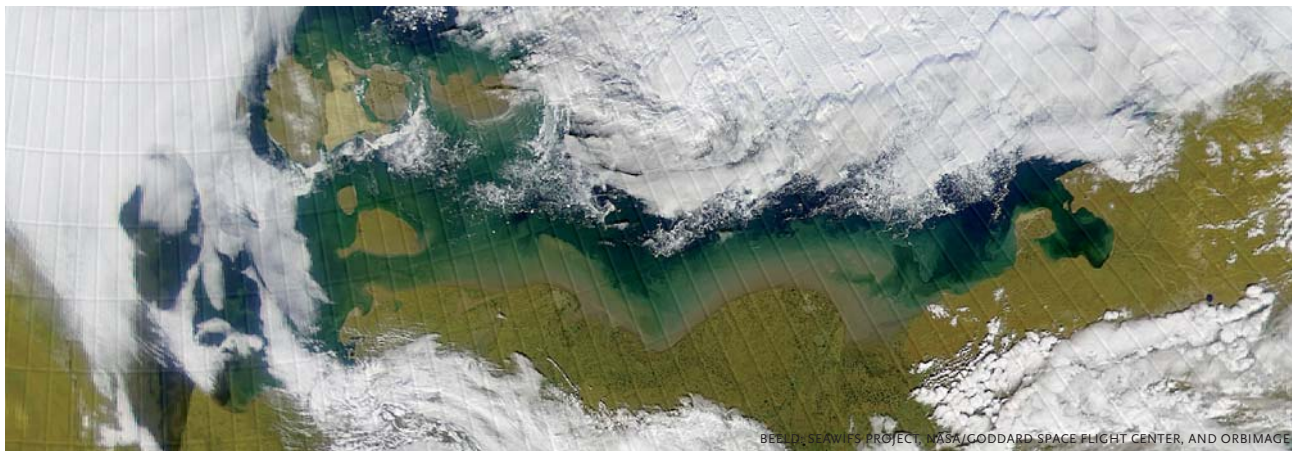
Deze morgen is het water spiegelglad en de tocht verloopt voorspoedig. Na een paar uur doemen de rivierbanken van Duvannyi Yar op: indrukwekkend hoge sedimentkliffen die yedoma blootleggen en die ontgooien waar je bij staat. De laatste dertig jaar heeft de Kolyma zo'n 100 meter van deze rivierbank opgeslokt over een afstand van meerdere kilometers. We meren aan op het smalle strand waar mammoettanden, bizonkiezen en paardenbotten verspreid liggen. Het is warm en de muggen zoemen rond het hoofd. De enorme ijswiggen smelten en zo ontstaan modderstroompjes vol yedoma waar van we monsters willen nemen. Maar voorzichtig! ‘Walk like a crocodile,’ is het advies van onze Russische collega, ‘anders zak je weg in de drijfzandachtige modder’. Ook van de kliffen zelf nemen we monsters en een paar uur later is het bootje zwaarbeladen met honderden kilo's yedoma. We moeten allemaal ver over de boeg hangen om nog vaart te kunnen maken. De wind is nu opgestoken, en de metalen boot dendert over de hoge, onregelmatige golven. We lachen naar elkaar maar de stemming is wat minder onbezorgd dan op de heenweg; als dat maar goed gaat! Uiteindelijk bereiken we het station, waar we moe maar voldaan aanschuiven voor de rijst-met-eland, *Plov*. En die wodka hebben we wel verdiend.



FOTO: JORIEN VONK

Bemonstering van ijswiggen in de steile rivierbanken van Duvannyi Yar, een snel eroderende bocht in de Kolyma-rivier in Noordoost-Siberië.

Op dit satellietbeeld van 24 augustus 2000 is goed te zien hoe het water van de Laptev en Oost-Siberische Zee vertroebeld is door kusterosie.



BEELD: SEAWIFS PROJECT, NASA/GODDARD SPACE FLIGHT CENTER, AND ORBIMAGE

veroorzaakt door een combinatie van dooi, stormen, golven, getijden en kruierend ijs. Rivierbankerosie ontstaat vooral tijdens het openbreken van de rivier iedere lente. Binnen heel korte tijd worden dan gigantische hoeveelheden gesmolten sneeuw en ijs afgevoerd, waarbij ook veel bevroren bodem- en bankmateriaal verdwijnt. Later in de zomer, als de temperaturen hoger liggen, kalven de dooiende rivierbanken nog verder af.

Tot slot zijn er thermokarstprocessen. Thermokarst is het lokaal inzakken van de bodem doordat het ijs in de grond smelt. Je kunt dit vergelijken met een karstlandschap waarbij kalksteen op sommige plaatsen wordt aangetast (bijvoorbeeld door regen) en er dalen of gaten ontstaan. Door thermokarst kunnen zich meertjes vormen die de dooi van de omliggende grond versterken.

BROEIKASGASSEN

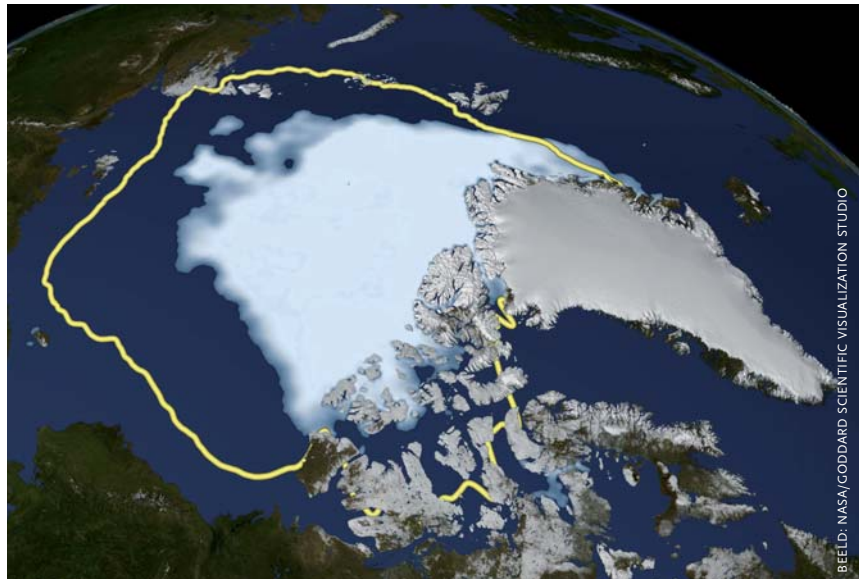
Het is natuurlijk de vraag of het dooiende organisch materiaal uit permafrost ook eetbaar is voor bacteriën, want als het alleen ontdooit en vervolgens op de zeebodem belandt, is er weinig aan de hand. Onderzoek in Siberië laat echter zien dat de koolstof razendsnel afbreekt. Op de kliffen langs de meer dan 5000 kilometer lange kust wordt een groot deel van de koolstof in de jaarlijkse dooiende permafrost omgezet in koolstofdioxide. De condities zijn hier optimaal: temperaturen boven nul en de beschikbaarheid van water van smeltende ijswiggen samen met vrijkomende voedingsstoffen uit de dooiende permafrost. En zo nu en dan maken golven of stormen dat de bovenste dooilaag wordt weggeslagen en afgevoerd, en een nieuw stuk permafrost wordt blootgesteld. Als het organisch materiaal in de rivier of de kustzeeën belandt, zijn ook hier bacteriën actief die de opgeloste koolstof verder afbreken. De warmte die bij de afbraakprocessen in de bodem vrijkomt, maakt soms dat de grond in de winter niet meer bevroert, waardoor de afbraak het hele jaar plaatsvindt en dus sneller kan gaan (*self-sustaining thaw*). We weten dat yedoma permafrost hier een ideale kandidaat voor is. Tot nu toe hebben we dit proces echter nog niet waargenomen.

TOEKOMST

De hoeveelheid ijs op de Noordelijke IJszee slinkt ongeveer 12% per decennium (kaart). Dit dramatische tempo verbaast wetenschappers en is ook veel sneller dan het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) van de VN heeft voorspeld. De achteruitgang van dik, meerjarig ijs is nog schokkender. Momenteel is meer dan de helft van het totale ijsoppervlak dun, eenjarig ijs, terwijl dat in 1980 maar zo'n 20% was.

Minder ijs op de Noordelijke IJszee betekent dat golven, stormen en getijden meer grip krijgen op de dooiende kustlijn, en de verwachting is dan ook dat de kusterosie zal toenemen en er meer yedoma vrijkomt. Veel wetenschappers proberen momenteel de omvang van de permafrostkoolstof terugkoppeling te voorspellen, maar dit gebeurt met complexe modellen waarin heel veel aannamen zitten.

Momenteel ligt het CO₂-gehalte in de atmosfeer rond de 400



In 2007 bereikte het ijsoppervlak in de Noordelijke IJszee een historisch minimum van 4,17 miljoen km². In 2011 kwam het opnieuw dicht bij dit record, en in 2012 kromp het ijsoppervlak zelfs tot 3,39 miljoen km². Gele lijn: gemiddeld ijsoppervlak 1979-2010. Wit oppervlak: historisch minimum op 26 augustus 2012.

ppm (parts per million). Een grote groep permafrostexperts schat de toename in atmosferische CO₂ op circa 30 ppm in 2100 en circa 75 ppm in 2300. Hierbij is ook de uitstoot van methaan meegenomen door deze in CO₂-eenheden om te zetten. Deze schattingen zijn voor een scenario van milde klimaatopwarming (2°C in 2100). Gaan we uit van een extremere opwarming (7,5°C in 2100) dan lopen de schattingen op tot circa 105 ppm in 2100 en circa 220 ppm in 2300. De dooi van yedoma kan nog niet goed worden meegenomen in deze modellen en schattingen. Dit is wel hard nodig, want deze enorme koolstofvoorraad kan in sneltreinvaart broeikasgassen genereren.

De dooi van yedoma is onomkeerbaar en geeft de klimaatopwarming een fikse zet. •

[i] Bekijk VPRO's Klimaatjagers over dooiende permafrost in Alaska op www.uitzendinggemist.nl/afleveringen/1364718

OPNAME OF UITSTOOT VAN CO₂?

Het poolgebied is heel divers. Binnen de toendra- en taigazones bevinden zich hoog- en laaggebergten, uitgestrekte veengebieden, delta's, lariksbossen, grasige toendra's en nog veel meer typen landschap. Het effect van een opwarmend klimaat op de uitstoot van koolstofdioxide (CO₂) of methaan zal dan ook van gebied tot gebied verschillen. Tijdens een acht jaar durend experiment in een veengebied in het noorden van Zweden werd de bodem kunstmatig opgewarmd. Dit leidde tot een toename in de uitstoot van CO₂. Recent onderzoek op de toendra van Alaska laat echter zien dat bij kunstmatige opwarming over twintig jaar de toendravegetatie toeneemt. Hier werd dus netto CO₂ vastgelegd. Op plaatsen waar organisch materiaal uit permafrost vrijkomt via kusterosie, thermokarst en riviertransport, is geen sprake van compensatie door vegetatietoename. De afbraak die dan plaatsvindt en CO₂ oplevert, is onomkeerbaar.