



AFBEELDING 1. | *Ontdooiende permafrost op Herscheleiland in 2013.*

Foto: Boris Radosavljevic, CC BY 2.0, via Wikimedia Commons.

Verlag van de themadag *Sporen van permafrost*

PIETER BLIEK

Ongeveer een kwart van de bodem op het noordelijk halfrond is permanent bevroren. Vlak na de laatste ijstijd was die oppervlakte veel groter. Sporen zoals ijswiggen, cryoturbaties en restanten van vorstheuvelds zijn hier stille getuigen van. Ons land ligt ermee bezaaid. Door de voortschrijdende klimaatopwarming slinkt het restant van de eeuwig bevroren ondergrond in gestaag tempo. Bij het verrottingsproces van organisch materiaal in de vele smeltmeren komen grote hoeveelheden methaan vrij. Dit krachtige broeikasgas versterkt de opwarming. Door toename van vegetatie en methaan-etende bacteriën lijkt het effect van deze positieve terugkoppeling echter deels teniet te worden gedaan.



De eerste spreker van de themadag is Jef Vandenberghe, emeritus hoogleraar verbonden aan de Vrije Universiteit Amsterdam. Zijn wetenschappelijke expertise is gericht op het interpreteren van klimaatveranderingen in het verleden en vooral de invloed daarvan op rivier- en windsystemen. Hij is medeauteur van het boek 'Permafrost nu en in de ijstijd'. 'De hoofdmoot van mijn verhaal is het herkennen van permafrost in sedimenten. Welke effecten heeft permafrost op het landschap en omgekeerd? Vooral de relatie met het klimaat is heel belangrijk.' Als eerste geeft Vandenberghe de definitie van permafrost: 'De bodem die twee jaar aaneen bevroren blijft. Dat betekent dat de wintervorst niet helemaal teniet wordt gedaan door de zomerwarmte.' De huidige permafrostgebieden liggen vooral richting het oosten. Siberië kent uitgestrekte gebieden, maar ook Noord-Amerika, Canada en Alaska. 'De toename naar het noorden komt omdat het logischerwijs kouder wordt', weet de hoogleraar. 'Maar dat kan ook de hoogte zijn. Zo hebben de Alpen, de Rocky Mountains en het Tibetaanse plateau in China ook plekken met permafrost.'

Op het hoogtepunt van de laatste koude periode die grofweg 15 duizend jaar geleden eindigde, lag de grens van het permafrostgebied in Europa een stuk zuidelijker dan nu. 'Het laatste permafrost maximum noemen we dat', weet Vandenberghe. Naar het oosten toe richting Siberië werd de strook bevroren ondergrond steeds breder omdat in Europa ook noegen ijskap voorkwam. 'Die permafrostuitbreiding had vooral te maken met de volledige ijsbedekking in de Arctische oceaan tot aan het vaste land en de Noord-Atlantische oceaan ter hoogte van ongeveer Frankrijk. Hierdoor kon de grond van oost tot west helemaal bevroren', verklaart de hoogleraar. De permafrostzone in Noord-Amerika was in tegenstelling tot Siberië smalletjes. 'Dat kwam omdat daar nog uitgestrekte ijskappen lagen waardoor de vorst minder diep in de bodem kon doordringen.' De reden dat de altijd bevroren ondergrond in West-Europa nagenoeg is verdwenen heeft volgens Vandenberghe te maken met de invloed van de Atlantische oceaan. Alleen in het hoge noorden (Lapland) is er nog een restant

permafrost aanwezig. 'Op basis van onderzoek hebben we de grens van het permafrost maximum in het noordelijk halfrond gereconstrueerd.'

De huidige permafrostgebieden zijn grotendeels bedekt met toendravegetatie en taigabossen. 'Dat zijn uitgestrekte sparren- en dennenbossen', legt Vandenberghe uit. 'Het gevolg is dat rivieren nu veel minder erosiemateriaal te transporteren hebben dan tijdens het permafrostmaximum. Het sediment wordt door de bufferende werking van de vegetatie vastgehouden. Hierdoor zijn de waterafvoeren minder extreem vergeleken met de periode vlak na de ijstijd.' Door het plotseling stijgen van de temperatuur na de ijstijd smolt ineens veel ijs met als gevolg dat de rivieren ook nog eens veel meer water te verwerken hadden. De hoogleraar: 'De meanders van de grote rivieren gevormd na de laatste ijstijd waren ruim 60 keer groter. Zo zijn de extreem grote meanders langs de Rijn en de Maas nog in het landschap te herkennen.' De grens van de huidige permafrostgebieden is overigens niet een scherpe lijn. 'Als je naar de randen gaat



AFBEELDING 2. | Kaat van het permafrostareaal in de Sovjet-Unie in 1981.

Bron: National Archives at College Park - Cartographic, Public domain, via Wikimedia Commons.



dan zitten er hier en daar gaten in. Die permafrostzone noemen we discontinue permafrost. Nog verder komt er zo weinig bevroren ondergrond voor dat we spreken van sporadische permafrost.’

De grote vraag is hoe je sporen van de aanwezigheid van vroegere permafrost kunt herkennen. ‘We noemen dat zogeheten diagnostische sporen’, antwoordt Vandenberghe. Een van de meest voorkomende en betrouwbare methodes voor het herkennen van vroegere permafrost zijn ijswiggen. ‘Ijswiggen ontstaan door krimpscheuren in de ondergrond. Elke lente en zomer sijpelt er wat smeltwater uit de bovengrond naar beneden in zo’n scheur. Zodra dit water in aanraking komt met de permafrost befrist het in de spleten en zet het uit. Zo krijgen de spleten elk jaar nieuw smeltwater dat befrist en door de opeenvolgende fasen van uitzetting steeds breder worden (wiggen) en meer dan een meter breed kunnen worden; het sediment naast de wig wordt daardoor ook opgedrukt’, legt de hoogleraar uit. Ijswiggen komen niet her en der voor, maar groepsgewijs in zogeheten polygonen. ‘Wanneer het ijs verdwijnt verzakt het sediment. Hierdoor ont-

staan er allerlei kleine breukjes die zich gedragen als een soort tektonische slenk, maar dan op microschaal. De structuur in het midden waar het ijs heeft gezeten ziet er anders uit. Het sediment is hier van bovenaf naar beneden gezakt.’

De verzakingsstructuur als gevolg van ontdooiende ijswiggen is een karakteristiek overblijfsel dat wijst op vroegere permafrost. ‘Overblijfselen van ijswiggen noemen we ook wel pseudomorfen’, zegt Vandenberghe. In droge gebieden ontstonden in plaats van ijswiggen daarentegen zandwiggen. ‘In woestijnachtige gebieden hoopten er in de spleten geen water op dat telkens bevroor, maar zand. Dat zand drukte net als bevroerend water ook de zijanten op’, legt de hoogleraar uit. Net als bij ijswiggen vormen zandwiggen polygonen. Een polygoon is een aaneengesloten stelsel van lijnsegmenten dat samen een plat vlak omsluit. ‘Zandwiggen zijn net als ijswiggen een aanwijzing van vroegere permafrost. Deze karakteristieke structuren in de grond kunnen alleen ontstaan als de grond bevroren is en door de druk in de spleten splitst.’

Een ander karakteristiek spoor van vroegere permafrost zijn de zogeheten cryoturbaties. ‘Deze structuren zijn indicatief voor de degradatie van permafrost’, aldus Vandenberghe. Cryoturbaties zijn periglaciale sedimentformaties waarbij zwaar sediment in licht sediment daalt en omgekeerd. Dat proces wordt ‘loading’ genoemd. Het kan leiden tot omkering van sedimentlagen. De hoogleraar: ‘Cryoturbaties ontstonden aan de bovenkant van vroegere permafrost. Hier zakten bollen sediment van ontdooiende bovengrond naar beneden, totdat ze door de bevroren ondergrond niet verder meer konden zakken. Bij een ontdooiende permafrostbodem stapelde zich zwaar materiaal (gewoon waterverzadigd sediment) bovenop lichter geworden materiaal (door het afsmelten van ijslenzen uit de top van de permafrost). Die op – en neerwaartse bewegingen waren mogelijk omdat de sedimentkorrels in de visceuze pap die bij de dooi ontstaat geen enkele weerstand boden. Het resultaat zijn opvallende vervormingen in de bodem.’ Gemiddeld zijn cryoturbaties anderhalve meter hoog. Er zijn structuren in de bodem gevonden van wel vier meter hoog. Door die inzinkingen en opstuwingen werden zelfs grote stenen en keien opwaarts gedrukt.



AFBEELDING 3. | Taigabos en meer in Canada. Foto: Peupleloup, CC BY-SA 3.0, via Wikimedia Commons.





AFBEELDING 4. | *Een ijswig in Sprengisandur, IJsland, in 1981.*
Foto: Till Niermann, CC BY-SA 3.0, via Wikimedia Commons.

Ook vandaag de dag spelen cryoturbaties een rol bij het ontdooien van permafrostgebieden. Hierbij is de degradatie van de bevroren ondergrond het directe gevolg van de mens. Huizen zakken letterlijk de grond in. ‘Met name boven het woongedeelte van huizen waar de kachel staat zie je verzakkingen optreden. Daarom worden huizen in permafrostgebieden tegenwoordig op palen gebouwd, zodat de vloer boven de grond hangt, geen warmte naar onder geleidt en de bovenlaag van de grond niet ontdooit. Die bovenlaag moet dus zo koud mogelijk gehouden worden. Daarom laat men tegenwoordig ook de vegetatie zitten. En onder spoorwegen worden pijpen aangelegd zodat de wind de bodem koel kan houden’, vertelt Vandenbergh. Allemaal maatregelen om het ontdooien van de

permafrost tegen te gaan. ‘Het grote probleem in deze gebieden is niet het bestaan van permafrost, maar juist het verdwijnen ervan.’ Naast cryoturbaties, ijs- en zandwiggen zijn er ook nog andere sporen van permafrost zoals de overblijfselen van vorstheuvelds, ook wel pingoruïnes genoemd. Daarover vertelt de tweede spreker van de themadag.

Dr. Wim Hoek is als universitair hoofddocent werkzaam bij de Universiteit Utrecht. Zijn onderzoek richt zich op de effecten van de opwarming na de laatste ijstijd op het landschap en de vegetatie. Hierbij ligt de focus op pingoruïnes. Dat zijn restanten van vorstheuvelds waarin ijslenzen groeiden, die tientallen meters hoog konden worden. Hoek: ‘Elke pingo heeft zijn eigen verhaal met dezelfde karakteristieken, maar met andere details. Als die pingo’s afsmelten worden het ruïnes. Daar begint een nieuw verhaal.’ Pingo betekent in de Inuit-taal langzaam groeiende heuvel. ‘De Inuit zien de pingo’s langzaam groeien. In de zomer smelten ze iets en glijdt het sediment deels naar beneden. De ring die ontstaat wordt ook wel randwal genoemd’, legt de onderzoeker uit. Er worden



AFBEELDING 5. | *Een smeltende pingo en veelhoekig iyswig nabij Tuktoyaktuk, Northwest Territories, Canada.*
Foto: Emma Pike, Public domain, via Wikimedia Commons.



AFBEELDING 6. | *Deze bouwwerken werden gebouwd tijdens de goudkoorts van 1896-99 in de Yukon en stortten nu in door de ontdooiende permafrost. Foto: Terry Feuerborn, CC BY-NC 2.0, via Flickr.*

twee typen pingo's onderscheiden: 'Het eerst type ontstaat in continue permafrost. Dat zijn de gesloten pingosystemen. Het andere type ontstaat in discontinue permafrost, waar door injectie van water uit een waterdoorlatende laag de ijslenzen doet aangroeien. Bij open systemen heeft de diepte van de pingo's een relatie tot de dikte van de permafrost. Is de permafrost heel dik, dan is er geen relatie met het onderliggende watervoerend systeem.'

De permafrostgrens lag bij de laatste ijstijd rond de 50e breedtegraad. Momenteel is dat rond de 60e breedtegraad. Behalve in Noordwest-Europa. Daar ligt de grens bij de 80e breedtegraad. Dat is ter hoogte van Spitsbergen waar Hoek ook onderzoek doet. 'De oorzaak is de warme golfstroom die zo'n 14.700 jaar geleden ineens op gang kwam. Vanaf dat moment warmde de boel op en degradeerde de permafrost tot aan de Oeral', verklaart de onderzoeker. De degradatie van pingo's vond plaats op het moment dat de permafrost begon te verdwijnen, dus op het moment dat de golfstroom weer op gang kwam. Aan het einde van het Pleniglaciaal 14.700 jaar geleden gaan we ineens van hele koude condities naar plotseling warme condities. Het zogenoemde Bølling

interstadiaal, en warme fase in de ijstijd. Door de warme golfstroom ging de thermostaat ineens aan met grote invloed op Noordwest-Europa tot gevolg', aldus Hoek. Door het plotseling warmer worden kwamen er in korte tijd grote hoeveelheden smeltwater in zee terecht, waardoor de golfstroom meerdere malen stagneerde. De permafrost kon zelfs weer aangroeien. Hoek: 'In het Jonge Dryas stadiaal is er een poosje opnieuw permafrost geweest. Al deze gegevens zitten in de Nederlandse ondergrond en de pingoruïnes opgeslagen.'

Met 51 graden noorderbreedte lag Nederland zo'n beetje op de permafrostgrens. De bevroren ondergrond bestond hoofdzakelijk uit discontinue permafrost.



AFBEELDING 7. | *Ibyuk pingo bij Tuktoyaktuk, Northwest Territories, Canada. Foto: Adam Jones, Wikipedia.*

Hoek: ‘Het grootste deel van de Nederlandse pingo’s werd gevoed door grondwater en zijn hierdoor naar beneden gegroeid. Dit in tegenstelling tot pingo’s in gesloten permafrost, die juist naar boven toe groeien, waarbij sediment afglijdt en er een randwal omheen vormt.’ Sinds 1995 boort Hoek in verschillende pingo’s in ons land. ‘De diepte varieert van 200 meter diameter tot bijna 20 meter diepte in het noorden, tot 30 meter diameter bij 4 meter diepte in het zuiden. Er zou dus een relatie kunnen zijn tussen de afnemende dikte van de permafrost naarmate je afzakt naar het zuiden en de diepte van pingo’s.’ Hoek beweert dat de diepst gevonden pingoruïne van Nederland met een diepte van bijna 18 meter wel eens de diepste ter wereld kan zijn. Nederland is bezaaid met pingoruïnes. ‘Met name in Drenthe op het keileemplateau liggen er ongelooflijk veel. Daar alleen al meer dan 400 stuks. Maar ook Groningen, Friesland, Overijssel, op de Veluwe, in het IJsseldal, Brabant en Zuid-Limburg tellen er velen.’

Toen de Nederlandse vorstheuvelds afsmolten ontstonden er ronde meertjes zonder in- of uitstroom. ‘Met de komst van Google Earth was het veel makkelijker de pingoruïnes op te zoeken’ verklapt Hoek. Wat blijkt is dat de meeste ruïnes gekoppeld zijn aan dalsystemen. ‘Logisch, want die dalsystemen werden in de laatste ijstijd gevoed door smeltwater en grondwater. Dit zouden dan ook best wel eens de bronnen kunnen zijn van de ijslenzen.’ Ook in het westen van ons land zijn restanten van pingoruïnes gevonden. ‘Maar daar liggen ze verscholen onder een dikke plak Holocene klei’, weet Hoek. Niet alleen in Nederland, ook in onze buurlanden zoals in Engeland, Wales, en Ierland zijn restanten van vorstheuvelds gevonden. Deze moeten haast wel jonger zijn dan de laatste ijstijd, want toen lag hier een ijskap. Dat kan volgens Hoek kloppen. ‘Want de ruïnes hier hebben een Holocene invulling en blijken te dateren van de laatste koude fase na het aflopen van de laatste ijstijd.’ Net over de grens in Duitsland zijn eveneens overblijfselen gevonden. De meeste zuidelijke restanten zijn tot zelfs in de Ardennen te vinden.

De eerste pingoruïnes in Nederland werden reeds in 1955 herkend. Sinds halverwege de jaren 70 is er begonnen met serieus wetenschappelijk onderzoek naar de relictten van de permafrost. Omdat de ronde meertjes geen in- of uitstroom kennen is alle sediment ingevangen. ‘Hierin zit tot wel 15 duizend jaar aan klimaat en omgevingsgeschiedenis ingevangen’, vertelt Hoek. ‘De datering van de diepste boringen gaan 14 tot 15 duizend jaar terug tot aan het einde van de ijstijd. Ze zijn gekoppeld aan de afsmelting van de ijslenzen in de permafrost. Daarom hebben veel ruïnes een laat-glaciale invulling.’ Die opvulling ziet er volgens de onderzoeker als volgt uit: ‘Na het smelten van de ijslenzen zakt de mantel met vegetatie naar de bodem. Daartussenin zit venig zand en daarbovenop bruin veen.

Vind je dus vegetatie zoals dwergberkjes onderin de pingo, dan is er sprake van een typische situatie.’ Die sedimentlagen zijn voor Hoek mooie archieven. Die lagen vertellen ook over de afwisseling tussen warmere en koudere perioden in het postglaciale tijdperk. Hoek: ‘Was het kouder dan is er minder vegetatie en meer zand. Later is ook de invloed van de mensen terug te vinden. Mensen gingen bossen kappen, waardoor er zand in de pingo’s ophoopte.’

De afwisseling tussen warmere en koudere perioden is goed terug te vinden in de boorkernen uit de pingo’s. ‘De sedimentlagen in de boorkernen lijken behoorlijk synchroon te lopen met de gegevens uit boorkernen van de ijskap op Groenland. Zo is het temperatuurverloop te koppelen met de vegetatielagen en het gehalte organische stof’, verklaart Hoek. ‘Als we het gloeiverlies meten zien we bij de eerste klimaatopwarming nog weinig organisch stof. Dat is logisch, want aan het einde van zo’n koude periode staat er niet ineens een dichte vegetatie. Die moet zich eerst ontwikkelen. Wordt het daarna weer kouder, dan verdwijnt de vegetatie en waait er meer zand in de depressie. De lagen met een hoog zandgehalte duiden op de zogenoemde smeltwaterpulsen op de oceaan toen het weer eventjes kouder werd. Dat zie je dus heel mooi terug in de sedimentlagen.’ De afzettingen uit de pingo ruïnes bevatten vaak een mooie



AFBEELDING 8. | Diakonieveld. Natuurgebied van It Fryske Gea. Uit de Diakonieveld werd daarom turf gegraven. De restanten van deze verving en het graafwerk vormen een grote pingoruïne. Foto: Dominicus Johannes Bergsma, CC BY-SA 4.0, via Wikimedia Commons.

overgang naar het begin van het Holoceen. De onderzoeker: 'Dat is bijvoorbeeld goed te zien in de pollendia-grammen die klassiek zijn voor deze beginperiode. De sedimentlagen bevatten ook aanwijzingen voor bepaalde vulkaanuitbarstingen op IJsland. Dan zitten en glasscherfjes tussen.'

De diepste pingo van Nederland en mogelijk dus ook de diepste van de wereld ligt in Hardenberg, Overijssel. 'We kregen het verzoek van Staatsbos-beheer hier onderzoek te doen. We boorden tot een diepte van 17 meter en 80 centimeter. Hier vonden we blaadjes van de dwergberk. Na datering en kalibratie van deze bladmonsters kwamen we uit op 14702 jaar. Bijna te mooi om waar te zijn.' De onderste 11 meter waren Laatglaciaal, met daarin 10 meter Jonge Dryas-afzettingen. Die Jonge Dryas periode duurt circa 1000 jaar. Hoek: 'Dat is een meter per eeuw en dat komt neer op een centimeter per jaar. Er zitten veel zandfluxen in en daarna komen we in het Holoceen. Aan de hand van de pollen van de hazelaar gevolgd door de els kunnen we zien dat hier de warmere periode begint.' De pingoruïnes bevatten een schat aan klimatologische

geschiedenis van de afgelopen 15 duizend jaar. Daarom moet je ze volgens Hoek niet leegschoppen, maar actief beschermen. Het Limburgs Landschap heeft in het Weerterbos in het kader van natuurontwikkeling enkele meertjes uitgegraven. 'Echt stuitend! Door hard op de rem te trappen heb ik verdere uitgraving weten te voorkomen.'

De derde spreker van de themadag is emeritus hoofddocent van de faculteit Aardwetenschappen aan de Vrije Universiteit Amsterdam Dr. Ko van Huissteden. Samen met de eerste spreker schreef hij het eerdergenoemde boek 'Permafrost nu en in de ijstijd'. 'Na mijn pensionering ben ik onderzoek gaan doen naar broeikasgassen in Hollandse veenweidegebieden.' In hoeverre de broeikasgassen die vrijkomen bij het ontdooien van de permafrost de opwarming beïnvloeden bestaan volgens Huissteden verschillende ideeën. 'Je hoort van alles over methaan in de media als het gaat om de dooi van permafrost. Het is echter niet het belangrijkste gas dat vrijkomt. CO₂ blijkt ook een grote bijdrage te leveren net als lachgas.' De docent stelt dat er drie bronnen zijn waarmee rekening gehouden dient te worden: 'Ten eerste is dat ecosysteememissie. Er wordt CO₂ afgestaan, maar ook weer opgenomen. Dat verandert naarmate de bodem opwarmt. Daarnaast gaat het om fossiele koolstof uit de ijstijd dat bij het ontdooien door micro-organismen wordt opgegeten. Hierbij komen gassen vrij. Ten derde de geologische emissie. Bij temperatuurstijging ontstaan er gaten in de permafrost waardoor gassen ontsnappen.'

Bij permafrost denken de meeste mensen aan toendra- of woestijngebieden. 'Maar de meeste permafrost bevindt zich onder boreaal taigabos (naaldbossen)', aldus Huissteden. Er zit voor gigatonnen organische koolstof in de bevroren ondergrond. De docent: 'Als je dit vergelijkt met de hoeveelheid in de atmosfeer, dan zit er veel meer in de permafrost opgeslagen.' Voor het grootste gedeelte bestaat die opgeslagen koolstof uit veenlagen. Vooral in Noord-Canada en in het westelijke deel van Siberië. Maar ook in lossafzettingen zit veel koolstof. 'Hierin zitten plantenresten en zelfs complete mammoeten', weet Huissteden te vertellen. Naast grote hoeveelheden organische koolstof kan permafrost ook be-



AFBEELDING 9. | Thermokarstmeren als gevolg van dooiende permafrost op het Yamal-schiereiland in het noordwesten van Siberië, vastgelegd door de Copernicus Sentinel-2-missie op 27 augustus 2018. Licentie: CC BY-SA 3.0 IGO, via Wikimedia Commons.



staan uit bijna puur ijs. ‘Denk aan ijswiggen en ijslenzen. Ijsvolumes van meer dan 90 procent kunnen makkelijk voorkomen.’ In de zomer ontdooit de bovenste laag van de bodem. ‘Dat noemen we de opdooilaag. Door de klimaatopwarming wordt de opdooilaag ieder jaar dikker, totdat deze in de winter niet meer helemaal bevroert. ‘Dan zit er een onbevroren laag tussen die we talik noemen. Een dikkere opdooilaag betekent verlies van bodemijs en dat de permafrost permeabel wordt voor grondwaterstromingen.’ Als de opdooilaag dikker wordt dan 3 meter, wordt aangenomen dat je de permafrost kunt beschouwen als een relict van een vroeger kouder klimaat en zal het op de lange duur volledig verdwijnen.

Permafrostgebieden hebben allemaal een eigen permafrostecosysteem. Huissteden: ‘Zie het als een balans. De hoeveelheid organische stof is op een zeker moment gestabiliseerd. Dit hangt van allerlei milieufactoren af. Belangrijke stabilisatiefactoren zijn de zuurgraad van het veen en de lage temperatuur. Hierdoor breekt organisch materiaal veel minder snel af. Maar bij het oplopen van de temperatuur gaat de afbraak exponentieel sneller. Dan komt er extra koolstof uit de bodem vrij. In feite is dat fossiele koolstof.’ Dit is volgens de docent precies wat er in onze veenweidengebieden gebeurt. Door de lage waterstand komt veen droog te liggen. Hierdoor komt er zuurstof bij het veen terecht en kunnen bacteriën de organische stof afbreken. De koolstof die hierbij vrijkomt is net als bij permafrost en het verbranden van fossiele brandstoffen ook fossiele koolstof die in de atmosfeer terechtkomt en dus bijdraagt aan de opwarming.’

Het permafrostecosysteem is een ingewikkeld gekoppeld systeem. Het gaat niet alleen om de zuurgraad en het oplopen van de bodemtemperatuur, maar vooral ook om de bodemwarmtebalans. ‘Deze wordt sterk wordt bepaald door de vegetatie. Zo vangt een kale bodem meer warmte. En in de zomer vangt de vegetatie de warmte grotendeels en wisselt deze uit met de wind, terwijl de bodem in de schaduw zit en minder snel opwarmt. In de winter isoleert een sneeuwdek de bodem juist waardoor deze minder goed afkoelt. Een sneeuwdek en de vegetatie hangen nauw met elkaar samen, om aan te geven hoe ingewikkeld dit systeem werkt. Daarbij speelt de beschikbaarheid van nutriënten om organische stof af te

breken eveneens een belangrijke rol van betekenis’, legt Huissteden uit. Het is dus niet zo dat de klimaatopwarming overal hetzelfde effect heeft op het ontdooien permafrost en snelheid waarmee dit gepaard gaat. En of er als gevolg van het stijgen van de temperatuur alleen maar onbelemmerd broeikasgassen uit de bevroren ondergrond vrijkomen is ook nog maar de vraag.

Van de totale hoeveelheid broeikasgassen die uit de ontdooiende permafrost vrijkomen is slechts 2 procent methaan. ‘De bodembacteriën zetten maar een klein beetje organische stof om in methaangas’, zegt Huissteden. ‘En dat kleine beetje is geen extra toevoeging aan de atmosfeer. Maar dat kan wel veranderen als het ecosysteem verandert. Door de opwarming gaan methaanbacteriën namelijk feestvieren en meer methaan produceren. Dat is een stukje positieve terugkoppeling’, vervolgt de docent. Door de opwarming daartegen is het groeiseizoen langer met als gevolg dat planten op hun beurt meer CO₂ kunnen opnemen. Een zogeheten negatieve terugkoppeling. Naar de netto-uitstoot van CO₂ en methaan in permafrost-



AFBEELDING 10. | Dooiende permafrost op Herschel-eiland. Foto: Boris Radosavljevic, CC BY 2.0, via Wikimedia Commons.

gebieden is lang onderzoek gedaan. Wat blijkt is dat er als gevolg van de opwarming en langer groeiseizoen meer CO₂ door planten wordt opgenomen, maar ook meer CO₂ door de bodem aan de lucht wordt afgegeven. 'Het effect van een langer groeiseizoen op de netto-uitstoot is dus nul', aldus van Huissteden.

Een ander effect is het priming effect. Door het warmere weer schuift de boomgrens naar het noorden. Als eerste doen de struiken dat. De toegevoegde vegetatie voegt meer snel afbreekbare organische stof aan de bodem toe. Daardoor wordt ook oude, fossiele organische stof in de bodem sneller afgebroken. In de bodemkunde staat dit bekend als het priming-effect.'

In de toename van vegetatie in permafrostgebieden schuilt echter ook een gevaar. De docent: 'Het risico op bosbranden is ook veel groter. Kijk maar naar de bosbranden in Canada en Siberië van de afgelopen jaren. Door de verbranding komt de opgeslagen CO₂ alsnog in de atmosfeer terecht.' En door de toename van het aantal planten kan er juist extra methaangas uit de permafrost ontsnappen. Planten spelen namelijk een belangrijke rol bij methaantransport. 'Dat komt door hun holle wortels. Deze gebruiken de planten om zuurstof naar beneden te transporteren. Vooral planten en riet in moerasachtige milieus hebben holle stengels. Hierdoor komt methaan naar boven', legt Huissteden uit. Nu maakt het wel uit wat voor soort en hoeveel vegetatie er in het moeras staat. Veenmossen zetten juist methaan om in CO₂ door symbiose met bacteriën die dat doen. Er is niet alleen methaanemissie in de zomer, maar ook in de herfst. in 'Dan bevriest alleen het bovenste gedeelte van de opdooilaag. Door de druk in de niet bevroren tussenlaag ontstaan scheurtjes en wordt het methaan naar buiten geperst.'

Een andere oorzaak waardoor er meer methaangas in de atmosfeer komt is de toename van het aantal poelen in de toendra. 'Door de opwarming ontstaan er een factor 2 tot 3 keer zoveel poelen. Dwergberkjes kunnen daar niet tegen en gaan liggen rotten', verklaart Huissteden. De toename van de vegetatie kan door het natter worden teniet worden gedaan met als gevolg dat er toch meer methaangas vrijkomt. Als de poelen zich aaneenschakelen

tot grotere plassen ontstaan dooimeren. De poelen of dooimeren zijn daarom beruchte methaanbronnen. De docent: 'Als daar veel organische stof op de bodem ligt kan er extra methaan ontstaan door afbraak van organische stoffen. Het methaan verzamelt zich dan onder het ijs in de winter en komt als het ijs smelt vrij.' Soms worden dooimeren zo groot dat ze leeglopen en het rottingsproces juist wordt tegengegaan. Toendra's die meer met mossen bedekt zijn kennen veel minder methaanuitstoot dan toendra's bedekt met grassen in riviervlaktes. 'Hier kan de uitstoot zomaar een factor 7 meer zijn', aldus de docent. Om maar aan te geven welke rol de vegetatiesoort bij gasemissies speelt. Een nieuw fenomeen zijn de enorme gaten op de toendra. Kraters van 30 meter doorsnede en 80 meter diepte als gevolg van enorme methaanexplosies.

Momenteel ontdooit de permafrost 2,5 keer zo snel als aan het einde van de laatste ijstijd. De oppervlakte aan eeuwig bevroren ondergrond slinkt dus in zeer hoog tempo. Bij die dooi komen broeikasgassen vrij, maar een groot gedeelte daarvan wordt weer in de toenemende vegetatielaag opgeslagen. Op basis van wetenschappelijk onderzoek wordt het effect van de positieve terugkoppeling geschat op 10 procent extra koolstof in de atmosfeer. Huissteden: 'Dat betekent dat we 10 procent extra ons best moeten doen om de CO₂-emissies terug te dringen. Want de nieuwe vegetatie neemt veel minder CO₂ op dan verwacht, en door de toename van het aantal bosbranden komt er veel extra koolstof in de atmosfeer terecht. De toename van lachgas (N₂O stikstofoxide), een sterk broeikasgas dat eveneens vrijkomt uit de ontdooiende permafrost, mag ook niet onderschat worden. Al deze factoren leveren een belangrijke bijdrage aan de wereldwijde opwarming, waarvan de effecten helaas nog niet goed zijn doorberekend in de huidige klimaatmodellen.'

De laatste spreker van de themadag is Michiel in 't Zandt, gepromoveerd aan de Radboud Universiteit in Nijmegen. Zijn onderzoek richtte zich op de productie van methaan in bodems van smeltmeren en de rol van microben bij zowel de productie als de afbraak van dit sterke broeikasgas. 'Methaan is een veel krachtiger broeikasgas dan CO₂. Over een periode van 20 jaar heeft eenzelfde hoeveelheid methaan een 86 keer zo'n sterk effect als dezelfde hoeveelheid CO₂', aldus in 't Zandt. Gelukkig is het gehalte methaan in de atmosfeer vele malen lager dan koolstofdioxide. Ter vergelijking: het gehalte CO₂ in de atmosfeer bedraagt thans 415 ppm (parts per million). Het gehalte methaan bedraagt nu 1906 ppb (parts per billion). Omgerekend naar ppm is dat slechts 1,9 deeltjes methaan per miljoen deeltjes. Dat is zeer weinig. Daarom worden zulke kleine hoeveelheden uitgedrukt in deeltjes per miljard. In 't Zandt: 'Rond het begin van de Industriële Revolutie lag het gehalte methaan tussen de 600 en 700 ppb. Een ruime verdubbeling, terwijl het gehalte CO₂ met minder dan 50 procent steeg.' Het aandeel methaan bedraagt tegenwoordig 9 procent van de broeikasgassen.

Methaan mag dan wel een krachtig broeikasgas zijn, het effect ervan ebt naarmate de tijd verstrijkt weg. 'Dat komt omdat methaan niet zo stabiel is, een molecuul methaan heeft een atmosferische levensduur van ongeveer 12 jaar', verklaart in 't Zandt. Het reduceren van de methaanuitstoot kan dus snel een positief effect op het klimaat hebben. De natuurlijke bronnen van methaangas zijn moerassen, rivieren, herkauwers, bosbranden, geologisch methaan en permafrost. De door de mens veroorzaakte bronnen zijn onder andere de bio-industrie, rijstvelden en vuilstortplaatsen. De methaanuitstoot als gevolg van dooiende permafrost bedraagt jaarlijks een gigaton. 'Dat valt eigenlijk best mee', meent de promovendus. En dat te bedenken dat de meeste koolstof in de eeuwig bevroren ondergrond zit opgeslagen. Met name in de zogeheten Yedoma permafrost. Dit type maakt 7 procent van de totale permafrost uit. En juist in Yedoma ontstaan steeds grotere dooimeren die als gevolg van de klimaatopwarming 's winters niet helemaal bevroren. De promovendus: 'Hierdoor hebben bacteriën het hele jaar vat op organisch materiaal dat op de bodem ligt. En door de verdere opwarming worden de meren steeds groter en verzamelt meer materiaal op de bodems, met als gevolg een positief terugkoppelingseffect.' Tocht hoeven we ons volgens de onderzoeker niet meteen grote zorgen te maken, al blijft de toekomst onzeker. 'Er is biologisch gezien geen methaanbom. Het gaat geleidelijk.' Juist die geleidelijke afbraak maakt dat de toekomst onzeker is. Verdere op-



warming kan deze processen namelijk versnellen, waardoor permafrostgebieden steeds meer methaan gaan uitstoten.

Wat er nou precies op de bodems van die smeltmeren gebeurt, hoeveel methaangas daarbij vrijkomt en welke micro-organismen hierbij een rol spelen is het onderzoek van in 't Zandt. 'We hebben gekeken naar wat bacteriën in het sediment aan het doen zijn. Vooral het bovenste laagje ter dikte van een plakje kaas is interessant. Dit bevat zuurstof en methaan etende bacteriën, die dit gas met behulp van zuurstof in CO₂ omzetten. Het sediment daaronder bevat geen zuurstof. Hier zetten micro-organismen (bacteriën en archaea, eencelligen die op bacteriën lijken) het organische materiaal om in organische zuren en uiteindelijk in methaangas dat naar boven borrelt. Maar niet al het methaan komt in de atmosfeer terecht. Een deel daarvan wordt opgegeten.' De grote vraag is wat de balans is? Hoeveel methaan wordt er opgegeten en hoeveel komt er uiteindelijk in de atmosfeer terecht? Uit onderzoek is bekend hoe groot dat effect momenteel is, maar hoe groot dat effect aan het einde van de 21e eeuw zal zijn is onbekend. 'Om dat te onderzoeken hebben we in het noorden van Canada twee jonge smeltmeren bemonsterd. Uit het sediment zijn de soorten micro-organismen in kaart gebracht.'

In het laboratorium worden in tientallen kleine flesjes van 120 milliliter de omstandigheden van het water in de smeltmeren nagebootst, en wordt er onderzocht hoe de micro-organismen zich gedragen bij een stijgende watertemperatuur. 'Zo kijken we naar het gedrag van micro-organismen bij de huidige watertemperatuur van 4 graden, en naar het gedrag van diezelfde micro-organismen bij de te verwachten watertemperatuur van 10 graden aan het einde van deze eeuw. Vervolgens zijn we gaan meten wat er met de methaanproductie- en consumptie gebeurt. Op basis van de resultaten kunnen we een balans opmaken van wat we bij verschillende temperaturen zien.' Wat blijkt is dat de methaanproductie bij 10 graden met dezelfde hoeveelheid voedingsstoffen en verder gelijke milieuom-

standigheden hoger is dan bij 4 graden. De toename bedraagt maar liefst 17 procent. Maar de consumptie van methaaneters houdt nagenoeg gelijke tred. in 't Zandt: 'Dat dunne plakje sediment is in staat een groot deel van het methaan eruit te filteren. Bij een temperatuur van 10 graden gaat dat proces ongeveer 15 procent sneller.'

Bij een temperatuurstijging van 6 graden in de dooimeren wordt er bijna een vijfde deel meer methaangas geproduceerd, dat op zijn beurt weer geneutraliseerd kan worden door de methaan etende bacteriën die het effect nagenoeg teniet kunnen doen. Dat blijkt althans uit de laboratoriumtesten. Maar of diezelfde bufferende werking in de praktijk zich ook voordoet valt nog te bezien. De promovendus: 'Hoeveel meer methaan er uiteindelijk uit de smeltmeren vrijkomt hangt af van hoe de micro-organismen zich in het echt zullen gaan gedragen. De werkelijkheid kunnen we onmogelijk helemaal in het laboratorium nabootsen. Er zijn zoveel mechanismen bij betrokken dat we dat om heel eerlijk te zijn eigenlijk niet precies weten.'



AFBEELDING 11. | Een foto van bevroren methaانبellen. Foto: U.S. Geological Survey from Reston, VA, USA, Public domain, via Wikimedia Commons.