

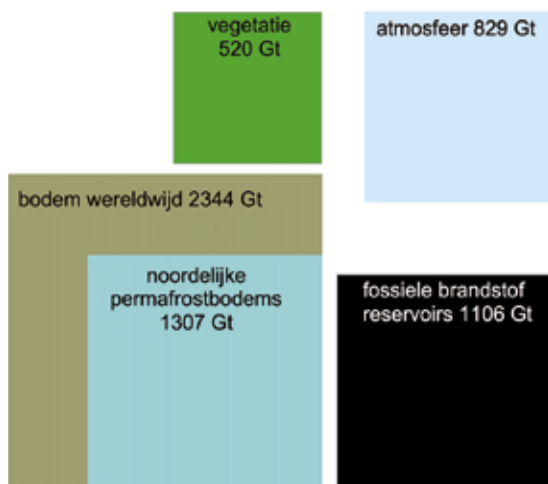
Gevolgen van ontdooiende permafrost

Ko van Huissteden en Jef Vandenberghe

j.van.huissteden@vu.nl; jef.vandenberghe@vu.nl

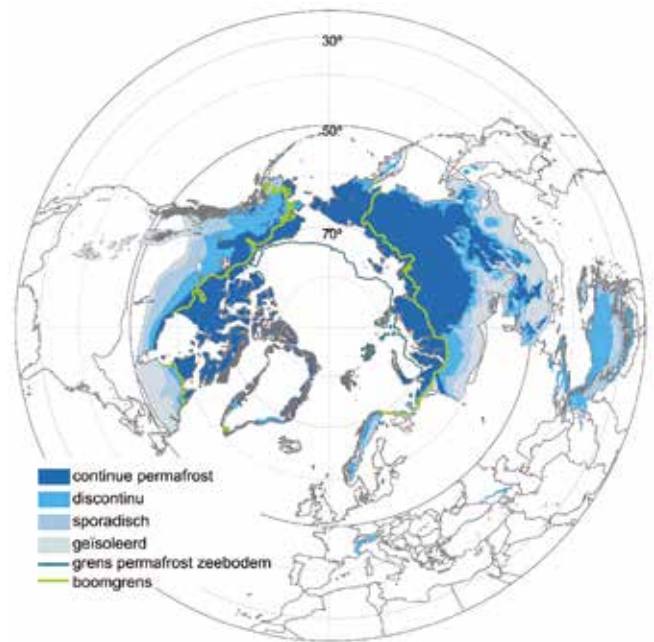
Tot 24% van het landoppervlak van het noordelijk halfrond heeft permafrost: permanent bevroren bodem. De opwarming van de aarde door uitstoot van broeikasgasen treft de noordelijke breedten het hardst; de temperatuur (van die atmosfeer) stijgt er gemiddeld twee keer zo hard als het wereldwijde gemiddelde. Dit leidt tot ontdooien van de permafrost, extra uitstoot van broeikasgasen en grondverzakkingen, met grote gevolgen voor mens en maatschappij. In dit artikel gaan we in op de plaatselijke en wereldwijde gevolgen van de ontdooiende permafrost.

Permafrost is permanent bevroren ondergrond, waarvan in de zomer hooguit de bovenste meter ontdooit. Daaronder blijft de temperatuur altijd onder de nul graden, en is het water in de bodem doorgaans bevroren. Wanneer grote oppervlakken permanent bevroren zijn, spreken we van continue permafrost; worden die gebieden onderbroken dan heet het discontinue permafrost en kleine geïsoleerde plekken heten sporadische permafrost (afb. 1).



▲ Afb. 2. Koolstof in organische stof in de bodem, wereldwijd, in permafrost, in vegetatie, vergeleken met de hoeveelheid koolstof in olie-, gas en kolenreservoirs, en koolstof in CO₂ in de atmosfeer. Bronnen: Van Huissteden et al., 2022; Strauss, 2017.

Dooi van permafrost wordt niet alleen veroorzaakt door klimaatopwarming maar ook direct, door de menselijke verstoring van de permafrostbodem. Anderszins veroorzaakt permafrostdooi juist uitstoot van broeikasgasen (waarover later meer) wat de opwarming van het klimaat verder versterkt. En het heeft daarnaast ook grote gevolgen voor de natuur en de menselijke bewoners van de permafrost.



▲ Afb. 1. Verbreiding van permafrost op het noordelijk halfrond, met de verschillende permafrostzones. Bron: Van Huissteden et al., 2022.

Als we het over klimaatverandering hebben, gaat het niet alleen om de luchttemperatuur gemiddeld over het hele jaar. De opwarming verschilt ook per seizoen: de meeste opwarming vindt in het najaar en de winter plaats. Dat heeft met een andere, opwarming versterkende, terugkoppeling te maken: de afname van de hoeveelheid zee-ijs in de Arctische oceaan. Daardoor wordt in de zomer minder zonlicht teruggekaatst en meer warmte in het oceaanwater opgenomen. De oceaan vriest daardoor steeds later in het jaar dicht, en is in het najaar en begin winter steeds langer een bron van warmte en waterdamp. Najaarsregen en wintersneeuw nemen daardoor toe op veel noordelijk gelegen permafrost.

Voor de gevolgen van permafrostdooi zijn drie eigenschappen van permafrost van groot belang. Ten eerste zijn permafrostbodems rijk aan organische stof (afb. 2). Dikke veenbodems komen veel voor; ook laagjes plantenresten en zelfs hele mammoeten. Dit organisch materiaal is als in een vriezer beschermd tegen vertering door bacteriën, maar zodra de vriezer uitgaat treedt snelle vertering op. Ten tweede het ijsgehalte. Permafrostbodems kunnen zeer veel ijs bevatten, veel en veel meer ijs dan er in een normale bodem kan zitten – permafrost die voor 90% volume uit ijs bestaat komt regelmatig voor. Ten derde versterkt het permafrost-ijs de samenhang (cohesie) van de bodemdeeltjes; wie een kuil probeert te graven in een bevroren bodem komt daar snel achter. Bij het verlies van ijs door dooi verliest de bodem veel volume, en ook zijn stevigheid.

Gevolgen van de dooi: een vicieuze cirkel

Ontdooiende permafrost is vooral bekend geworden als bron van methaan (CH₄). De uitstoot van CO₂ uit permafrost is echter belangrijker dan die van methaan, en ook het derde belangrijke broeikasgas – lachgas (N₂O) – kan vrijkomen. Methaan heeft een sterker opwarmend



▲ Afb. 3. A. Krimpscheur in toendrabodem, ontstaan tijdens hevige kou. B. De ijswig is ontstaan door herhaald scheuren en opvulling van krimpscheuren met ijs. C. Ijswigpolygonen van bovenaf gezien; de donkere vlekken zijn poelen van enkele meters doorsnede, de licht-groene strepen zijn ruggen boven de ijswigg. Oost-Siberië. Foto's: J. van Huissteden.

effect dan CO_2 maar wordt veel sneller afgebroken in de atmosfeer. Lachgas heeft ook een sterk opwarmend effect en een langere verblijftijd dan methaan.

Het klimaateffect van verschillende broeikasgassen vergelijken is daardoor lastig. Als vuistregel wordt daarvoor het 'Global Warming Potential' gebruikt. Als je het effect van uitstoot van de verschillende broeikasgassen op het klimaat wil vergelijken over een periode van twintig jaar, dan is CH_4 81 keer zo sterk als CO_2 en N_2O 273 keer zo sterk als CO_2 .

Het vrijkomen van deze broeikasgassen uit ontdooiende permafrost jaagt de opwarming van het klimaat verder op. Hoe meer wij zelf broeikasgassen produceren, hoe meer de natuur dat dus ook gaat doen – en hoe moeilijker en duurder het wordt de klimaatopwarming te beperken door onze eigen broeikasgasuitstoot te verminderen. De opwarming kan belangrijke onder-

delen van het klimaatsysteem steeds verder uit evenwicht brengen. Er treden dan onomkeerbare veranderingen op; dit heet een kantelpunt. Grootschalige dooi van permafrost is een mogelijk kantelpunt.

Moerasmethaan

Er zijn veel verschillende manieren waarop broeikasgas-uitstoot uit permafrost kan toenemen. Laten we beginnen aan het oppervlak: het ecosysteem van de ondiepe bodem

en de planten die er groeien. Vanzelfsprekend grijpt daar de klimaatverandering het hardst aan.

Veel permafrostbodems zijn in de zomer drassig. Door het ijs in de bodem kan water niet in de grond zakken, zeker als het terrein vlak is. Daar komt bij, dat de bodem vaak bedekt is met zogenaamde ijswiggpolygonen. Die ontstaan in de strenge winter als krimpscheuren in de bodem. De scheuren worden opgevuld met sneeuw en ijs. Op den duur ontstaan verticale wiggen van ijs, aan het oppervlak vaak gemarkeerd door een ruggetje van omhoog geperst bodemmateriaal. Dat houdt de afstroming van water tegen; hele gebieden bestaan daardoor uit een netwerk van ondiepe poeltjes (afb. 3) (Vandenbergh, 2013; French, 2018).

Op deze natte bodem kan makkelijk een laag veen ontstaan: dode plantenresten, vaak veenmos, die in de natte, koude en zuurstofloze bodem goed bewaard blijven. Dat is ook het ideale leefmilieu van de primitieve organismen (Archaea) die organische stof omzetten in moerasgas-methaan. Moerasplanten houden echter niet van methaan; ze puffen het zo snel mogelijk via holle wortels en stengels de atmosfeer in om het te vervangen door zuurstof. Er zijn overigens ook planten die het methaan kunnen gebruiken: veenmossen. In en tussen de bladeren leven bacteriën die methaan omzetten in CO_2 . Sommigen daarvan kunnen ook stikstof uit de lucht omzetten in stikstofverbindingen. Van zowel de CO_2 als de stikstofverbindingen profiteert het mos dan weer. Veenmosvegetaties in toendra's zijn daardoor nuttige CO_2 -vastleggers: ze nemen veel CO_2 op en er komt weinig methaan uit.

Bodembacteriën

Opwarming van de bodem zorgt er vooral voor dat de bodembacteriën harder gaan werken. Hoe warmer de bodem hoe meer methaan. Ook wordt de opdooilaag in de zomer dikker: eerder bevroren organische stof



▲ Afb. 4. A. Permafrost-dooiverschijnselen in taiga-bos (boreaal bos); vorming van poelen en 'drunken forest' (scheefzakkende bomen door dooi). B. Poelen, ontstaan door het dooien van ijswiggen in de toendra van Oost-Siberië. Foto's: J. Vandenberghé & J van Huissteden.



ontdooit, en wordt daardoor ook toegankelijk voor methaanvorming. Ook de vegetatie kan veranderen en vervangen worden door planten zoals zegges en grassen. Daardoor is meer organische stof beschikbaar voor de methaanvormers, en die planten transporteren ook methaan sneller uit de bodem naar de atmosfeer.

Riviervlakten, die regelmatig overstroomd worden met voedselrijk water, hebben een productieve vegetatie van hoge zegges en grassen. Ecosystemen op riviervlakten zijn de grootste methaanbronnen: volgens metingen op de Siberische toendra tot zeven maal zo sterk als van normale natte toendra. Meer overstromingen, zoals in delen van de permafrostgebieden verwacht wordt, versterken dat (Van Huissteden et al., 2022).

In de zomer kan de moerasbodem in een warmer klimaat sneller uitdrogen, waardoor het veen aan zuurstof wordt blootgesteld. Dat geeft weer andere groepen bacteriën de gelegenheid om het veen te oxideren tot CO_2 , precies zoals in onze veenweidegebieden gebeurt.

Een factor die voor extra opname van CO_2 in ecosystemen zou kunnen zorgen in een warmer klimaat en

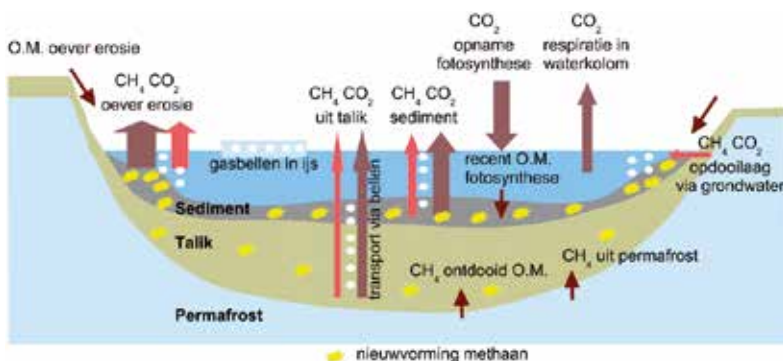
wordt niet bevestigd door metingen. Metingen laten zien dat bij een langer en warmer groeiseizoen ook meer afbraak van organische stof in de bodem plaatsvindt. Met meer struiken en bomen kan de hoeveelheid organische stof in de bodem afnemen door verschillende oorzaken (Van Huissteden et al., 2022). In de meest noordelijke permafrostgebieden – poolwoestijnen met nauwelijks plantengroei – kan door toename van vegetatie wel meer koolstof in de bodem opgeslagen worden.

Ontdooiend landschap

Een vegetatiedek boven de permafrost beschermt in zekere mate tegen ontdooien. Vegetatie vangt de zomerse zonnearmte op, wisselt die uit met de atmosfeer en zorgt voor schaduw op de bodem. Verwijderen of verdwijnen van het vegetatiedek zet ontdooien van permafrost in gang doordat de zomerwarmte beter in de bodem kan doordringen. Een laag water in een poel op het oppervlak vangt ook veel warmte in, en warmt daardoor eveneens de permafrost op (Nauta et al., 2014).

Ook ijswiggen spelen een grote rol. Ijswiggen dragen het meest bij aan het hoge ijsgehalte van de bodem. In sommige permafrostgebieden zoals in het noordoosten van Siberië, kunnen ijswiggen heel dik zijn doordat ze duizenden jaren – ook in de ijstijden – konden doorgroeien. Vooral aan de top van de permafrost worden vaak ijslenzen gevormd door water dat capillair door de poriën in de bodem aangezogen wordt naar het bevriezingsfront (ijssegregatie). In een fijnkorrelige bodem kunnen meer ijslenzen gevormd worden (vorstgevoelige grond) in tegenstelling tot grofkorrelig materiaal zoals grind, waarin nauwelijks ijslenzen ontstaan (vorstongevelig).

Als die ijsmassa's gaan ontdooien, heeft dat ingrijpende gevolgen voor het landschap. Een verzamelnaam voor deze verschijnselen is 'thermokarst' – een ongelukkige term omdat 'karst' slaat op verschijnselen die door oplossing van kalksteen ontstaan, een chemisch proces. Dat ontdooien kan twee kanten op gaan.



▲ Afb. 5. Bronnen van methaan en CO_2 in dooimeren: omzetting en uitsmelten van methaan uit permafrost en omzetting van vers geproduceerde organische stof in het sediment op de meerbodem. O.M.= organisch materiaal. Bron: Van Huissteden et al., 2022.

CO_2 -rijkere atmosfeer, is het langere groeiseizoen en toename van vegetatie. We zien in de toendra een verschuiving naar meer struiken. Maar meer CO_2 -opname

Poelen

Is het een vlak landschap, dan treedt er vooral inzakking van de bodem op. Het begint met poelen, vooral op

plekken waar ijswiggen ontdooien (afb. 3). In die poelen is de bodem altijd nat, met als gevolg sterke toename van methaanuitstoot. Bomen krijgen het ook moeilijk: wortels sterven af zodat de bomen scheef zakken en afsterven ('drunken forests', afb. 4). Bij ondiepe poelen is dooi nog omkeerbaar: de poelen kunnen weer dichtgroeien met vegetatie zodat de bodem beschermd is tegen verdere dooi.

Dooimeren

Als er steeds meer ijs verdwijnt ontstaan er ook meer-tjes: dooimeren. Stilstaand water warmt in de zomer makkelijk op, zodat de dooi van de permafrost versnelt. Als het meer zo diep is dat in de winter de ijslaag niet meer aan de bodem vast vriest, kan de bodem onder het meer steeds dieper ontdooien – tientallen meters; deze opdooilaag heet een 'talik'. Aan de randen breiden deze meren zich steeds meer uit door ontdooien van de oevers. De grotere dooimeren kunnen duizenden jaren oud zijn. Recent ontstane meren zijn kleiner. De meren lopen vaak leeg als ze door erosie in contact komen met een rivier. Als het klimaat koud genoeg is kan de bodem van het meer weer van boven af bevroren en vormt zich er nieuwe permafrost.

Poelen en dooimeren zijn een belangrijke bron van methaan en CO₂ (Van Huissteden et al., 2022; Nauta et al., 2014). Het methaan wordt gevormd uit organische stof in de ontdooiende permafrost onder het meer, uit dood

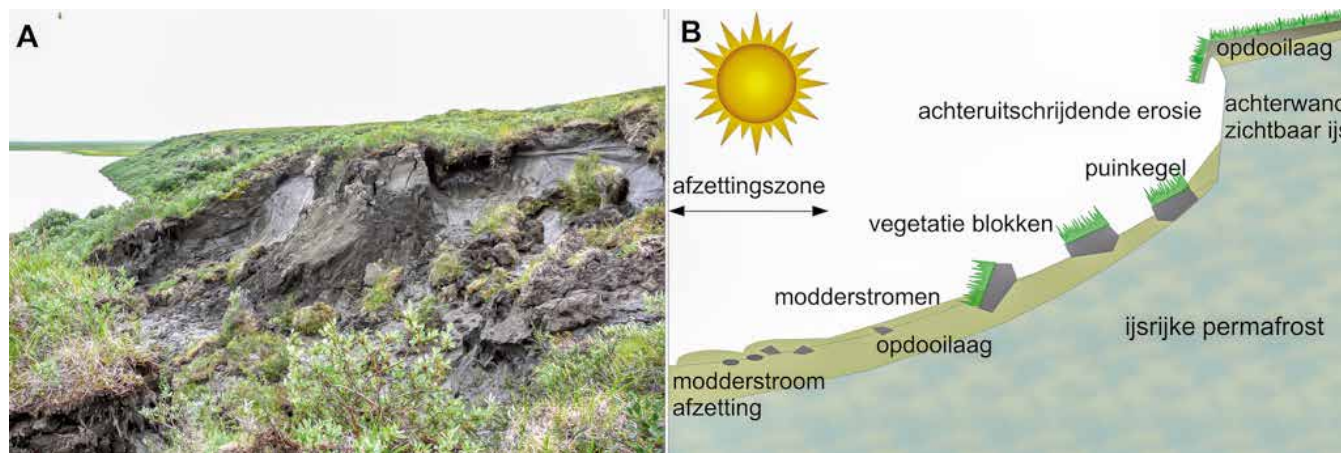
'Batagay krater' in Oost-Siberië, waar per jaar miljoenen kubieke kilometers ontdooien. In sommige gebieden nemen dooislumps sterk toe; op het Canadese Banks Island is het aantal sinds 1984 met een factor zestig toegenomen (Nauta et al., 2014).

Bij dooi in vlak terrein met poelen en dooimeren is CH₄ een belangrijk broeikasgas, bij erosie wordt de organische stof uit de permafrost veel meer aan zuurstof blootgesteld waardoor juist veel CO₂ ontstaat. Erosie is ook de bron van lachgas (N₂O), vooral als grote hoeveelheden organische stof tegelijk aan de lucht worden blootgesteld, zoals in veengebieden. Dan komt er door afbraak van veen veel stikstof vrij.

Diep ontdooien

Permafrost sluit de ondergrond ook af voor water en gassen die uit de diepte komen. Uit gasvoorkomens en steenkoollagen in de diepe ondergrond lekt altijd wel wat aardgas (ook methaan) naar boven. Het permafrost-ijs vormt een deksel op deze continue geologische gaslekage. Het gas verzamelt zich onder de permafrost, doorgaans als methaanhydraat – een ijsachtige massa (Van Huissteden et al., 2022).

Toch is dat deksel niet helemaal dicht, zeker niet als de permafrost relatief dun is (ruwweg 50 tot 150 meter) en aan het opwarmen is. Onder de nul graden is niet alle water in de bodem bevroren; hoe warmer de permafrost,



▲ Afb. 6. A. Dooislump aan de oever van een dooimeer in Oost-Siberië. B. Dwarsdoorsnede van een dooislump. Foto: J. van Huissteden.

plankton en planten die in het meer geleefd hebben, en uit wat er vanaf de oevers in terecht komt (afb. 5). Ook bevat de permafrost ingevroren methaan, die bij dooi vrijkomt.

Als er wat meer reliëf is, treedt er vooral erosie op. Ook dat grijpt in eerste instantie aan via ijswiggen: er kan makkelijk water stromen via de wiggen die daardoor veranderen in erosiegeulen. Er ontstaan aardverschuivingen. Het begint met afglijden van de opdooilaag, en dat ontwikkelt zich tot dooislumps (afb. 6). Zodra erosie optreedt verdwijnt de vegetatie en wordt permafrost-ijs aan zomerwarmte blootgesteld. De grote hoeveelheid dooiwater die dan vrijkomt versnelt de erosie verder. Dooislumps kunnen zich door erosie steeds verder helling opwaarts uitbreiden en grote hoeveelheden permafrost doen ontdooien. Een berucht voorbeeld is de 80 hectare grote

hoe meer vrij water erin kan voorkomen. Dat kan stroming van warm water en gas uit de diepere ondergrond toelaten, vooral als er druk op staat (Van Huissteden et al., 2022).

In dooimeren en in Arctische rivieren worden flinke methaanbronnen gezien, die zoveel methaan omhoog laten borrelen dat ter plaatse het water niet befrist. Er is ook sprake van toename hiervan; onder andere in de Mackenzie Delta in Canada. Nog spectaculairder is een nieuw verschijnsel: de methaankraters die enkele jaren geleden vanuit West-Siberië gerapporteerd werden. Dit zijn kraters in de toendra, die door gasexplosie ontstaan zijn, tot 30 meter doorsnede en tientallen meters diep. In de loop van de tijd ontwikkelen ze zich tot meertjes door het ontdooien en instorten van de omliggende



▲ Afb. 7. Oud houten huis; het middendeel is verzakt door ontdooien van permafrost. Foto: J. Vandenberghe.

permafrost. In West-Siberië (Yamal-schiereiland en omstreken) is de permafrost relatief dun. Er liggen grote gasvelden waaruit gas kan weglekken, en in dit deel van Siberië warmt het klimaat het snelst op.



▲ Afb. 8. Appartementengebouw op palen om in de winter koude lucht over de bodem te laten ventileren en zo de permafrost bevroren te houden. Foto: J. Vandenberghe.

Broeikasgas uit dooiende permafrost

De hoeveelheid broeikasgassen, en de verhouding tussen CO₂, CH₄ en N₂O is moeilijk te schatten. Uit het voorgaande blijkt dat er veel verschillende processen een rol spelen. Vooral in de uitgestrekte Siberische permafrostgebieden zijn weinig meetgegevens. Het hangt ook sterk af van hoeveel we zelf het klimaat opwarmen. Hoe meer opwarming, hoe meer broeikasgas. Bij de meer extreme klimaatscenario's blijft er hooguit nog wat permafrost over op de Noord-Canadese eilanden en het uiterste noorden van Siberië. Met klimaatmodellen wordt geschat dat er 3-5 km² permafrost (in de bovenste drie meter van de bodem) verdwijnt per graad opwarming (Chadburn et al., 2017).

De meeste broeikasgasemissie is CO₂, met methaan als goede tweede. Verrassingen daargelaten, zal die uitstoot geleidelijk verlopen. Volgens schattingen van experts (Schuur et al., 2015) zal het per jaar minder dan 20% zijn van de uitstoot van onze fossiele brandstoffen. Dat lijkt mee te vallen, maar het betekent een grote extra inspanning voor ons, als we klimaatverandering willen beperken. De emissie uit permafrost gaat ook voorlopig

nog door, zelfs als we erin slagen de uitstoot uit fossiele brandstoffen tot nul terug te brengen.

Wonen en werken op permafrost

Een bevroren ondergrond en processen van vorst en dooi scheppen nadelige condities voor bewoning en infrastructuur (French, 2018). Toch hebben de strategische positie en voorraden aan mineralen, olie en gas in Arctische gebieden een grote aantrekkingskracht. Herhaald bevroren van de ondergrond zorgt voor problemen, maar de meeste ongemakken zijn een gevolg van het ontdooien van de permafrost.

'Verkeerd bevroren'

De volumetoename van 9% bij de omzetting van water naar ijs kan zorgen voor vervormingen, meer bepaald opheffing ('heave'), in de bodem. Vooral pijpleidingen zijn kwetsbaar. De uitzetting van de bodem rondom zo'n pijpleiding voor koude stoffen zoals gas kan desastreus zijn. Het is niet alleen het bevroren van poriënwater. Bij herhaaldelijk bevroren en ontdooien vormen zich ijslenzen, door het proces van ijssegregatie. Dat gebeurt vooral in de jaarlijkse opdooilag. Dat zorgt ook voor problemen bij bouwen op permafrost.

In de winter wordt de bodem met de ijslenzen opgeheven samen met palen en pijlers van bruggen en gebouwen. Daardoor ontstaat een holte onder de paal of pijler. Tijdens de lente zakt dat geheel wel weer naar beneden, maar niet tot op het oorspronkelijke niveau omdat de eerder ontstane holte verkleind is door zijwaartse druk vanuit de ondergrond en/of inzakking van omgevend bodemmateriaal. Bij elke vorst-dooi cyclus doet dat proces zich voor, met als resultaat dat de objecten in de bodem – zoals palen, pijlers, funderingen en bestratingen, maar ook steenbrokken – steeds verder omhoog 'geduwd' worden ('upfreezing'). Vandaar ook het gezegde 'de stenen vriezen de bodem uit'.

Voorwaar, geen makkelijk oplosbaar probleem. Waar toepasbaar kan men paalfunderingen tot in de permafrost inslaan.



▲ Afb. 9. Utilidor (bovengrondse leidingenstraat) om schade van ontdoende permafrost op ondergrondse leidingen te voorkomen; hier over een weg geleid.



▲ Afb. 10. Ophoging met grove steenslag om verzakkingen van een weg door permafrostdooi te voorkomen. Foto: J. Vandenberghe.

Plaatselijk ontdooien van de permafrost

De gevolgen van een (gedeeltelijk) ontdooiende permafrost zijn talrijker en ingrijpender dan die van het bevroren van de grond. Als de top van ijsrijke permafrost afsmelt, dan kan er een oververzadiging aan water ontstaan. De gevolgen zijn: grondverzakking, verpapping en algehele instabiliteit van de bodem.

In het landschap levert dat de hierboven beschreven poelen en dooimeren op.

Dergelijke effecten van een degraderende permafrost kunnen een natuurlijke oorzaak hebben, maar geotechnische veranderingen kunnen ook een direct gevolg zijn van menselijke activiteit. Het zijn vooral de plaatselijke verzakkingen die voor de grootste problemen zorgen ten gevolge van de ongelijkmatige effecten. Een mooi voorbeeld daarvan zijn de traditionele huizen waarvan alleen de leefruimte verwarmd werd in tegenstelling tot de aanpalende opslagruimtes.

Vervolgens zakt vooral het woongedeelte van het huis in door dooiende permafrost (afb. 7).

Om scheefzakken van gebouwen te vermijden worden de meeste gebouwen nu op palen gefundeerd die tot in de permafrost reiken en zo voor de nodige stabiliteit zorgen. Een probleem dat daarbij moet vermeden worden is dat warmte door geleiding via de palen in de diepte kan doordringen, wat zorgt voor permafrostdooi rondom de paal. Dat kan weer verzakkingen of opvriezen van de palen veroorzaken. Daarom probeert men ook de bodem onder het gebouw zo koud

mogelijk te houden, door tussen de bodem en de vloer van het gebouw ruimte open te houden voor natuurlijke ventilatie met koude lucht (afb. 8).

Infrastructuur

Een andere reeks van problemen ontstaat bij de aanleg van allerlei soorten infrastructuur. Zodra de bovengrond en vegetatie daarop verstoord wordt, kan de zomerwarmte makkelijker de bovenkant van de permafrost ontdooien. Een voorbeeld van een verstoring van de bovengrond is het aanbrengen van allerlei leidingen, zoals watervoorziening, rioolwaterafvoer, elektriciteitskabels, enzovoort. Daarom worden in vele permafrostgebieden dit soort leidingen verzameld en in een soort transporthuls boven de grond aangebracht ('utilidors'). Bij het kruisen van wegen leidt deze werkwijze dan ook tot kenmerkende beelden (afb. 9). Deze bovengrondse utilidors vereisen vanzelfsprekend flink wat onderhoud.



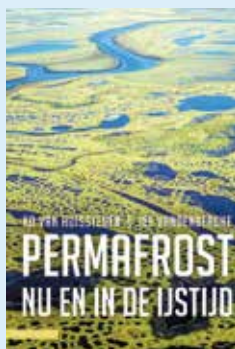
▲ Afb. 11. Thermosyphons (thermistors) langs een spoorlijn. Foto: J. Vandenberghe.

Ook autowegen, spoorwegen en vliegvelden vergen bijzondere maatregelen. Alles op palen plaatsen is te bewerkelijk. In plaats daarvan wordt de bodem opgehoogd met materiaal waarin vriezen en dooien minder beweging kan veroorzaken. Dat is grofkorrelig sediment (meestal grind) of steenslag, waarin geen ijslenzen gevormd worden door de afwezigheid van capillaire krachten. Bovendien heeft het veel poriënruimte om transport van koude buitenlucht naar de permafrost toe te laten. Het kan tevens variatie van de dikte van de opdooi-laag opvangen. Hierdoor wordt zowel 'thermal heave' als bodemverzakking tegengegaan (afb. 10) (French, 2018).

Koelsystemen

Een andere algemeen toegepaste technische ingreep bij allerlei infrastructurele werken en gebouwen, is het gebruik van speciale koelsystemen, zogenaamde thermistoren of 'thermosyphons'. Ze werken als bij een koel-

Dit artikel is gebaseerd op het boek 'Permafrost - nu en in de IJstijd', van de schrijvers van dit artikel; hierin zijn eveneens meer gedetailleerde referenties opgenomen. Technische specificaties: *Permafrost - nu en in de ijstijd. Wat is permafrost en waarom is het belangrijk in de context van klimaatverandering*, door Ko van Huissteden en Jef Vandenberghe. KNNV Uitgeverij, 2022. Paperback, 320 pag. ISBN: 9789050118637. Prijs: € 29,95.



kast: een pijp in de permafrost neemt bij verdamping van een gas, bijv. koolzuurgas of ammoniak, warmte op vanuit de omringende grond. Het gas in de pijp stijgt vervolgens omhoog en koelt door de koude buitenlucht af, dus geeft de opgenomen warmte af. Daardoor treedt weer condensatie op, en de vloeistof daalt dan door de zwaartekracht weer af in de pijp (afb. 11). Dit circulatiesysteem werkt zonder energietoever, maar functioneert alleen in de winter omdat koude lucht vereist is voor de condensatie. Deze thermistoren vinden toepassing bij gebouwen, wegen en spoorwegen, en paalfunderingen van bovengrondse pijpleidingen van olie.

Ondanks al deze technische maatregelen is ontdoende permafrost een groot probleem. Bij oudere constructies is doorgaans geen rekening gehouden met een snel opwarmend klimaat. Dan zijn er ook nog risico's door constructiefouten. Voor allerlei industriële infrastructuur, in het bijzonder olie- en gasopslag en transport zijn er risico's op ernstige milieu- en klimaatschade door lekkages van gas en olie door verzakkingen bij ontdoende permafrost. In 2020 werd dit nog gedemonstreerd door een catastrofale lekkage van diesel bij Norilsk in Siberië.

Paleontologie

Kamoya Kimeu, fossielenvinder in Tanzania en Kenia

door Bert Boekschoten

g.j.boekschoten@vu.nl

Het overlijden van Kamoya Kimeu stond september jl. in het wetenschappelijk vakblad *Nature*. Hij werd daarin herdacht door de paleoantropologen Louise Leakey en Robert Foley. De Keniaan werd 82 jaar oud en besteedde een groot deel van zijn leven aan het beroepsmatig fossielen zoeken.

Van Sinai tot Mozambique, van noord naar zuid, groeide het Oost-Afrikaanse breuksysteem tijdens 50 miljoen jaar. De Rode Zee is er het noordelijke deel van. Op het land strekt deze kolossale barst in de aardkorst zich uit in de Rift Valley. Deze verloopt van Ethiopië zuidwaarts. Zo diep reikt die breuk, dat er veel vulkanisme in is opgetreden. Talrijke rivieren mondden erin uit, vulden diepe rekkloven die nu de grote diepe meren van Oost-Afrika vormen. Het riviersediment is vaak fossielrijk. Turkana, in Noordelijk Kenia, is daar een deel van. Ik mocht in 2006 met Kimeu mee, naar fossiele beenderen zoeken.

De vindplaats

Langs de oostoever van het enorme Turkana-meer ligt een groot gebied van hoge heuvels. Ze werden opgebouwd tijdens een Pliocene hoogwaterstand van dat meer. Het zijn

Referenties

- J. van Huissteden, J. Vandenberghe (2022). Permafrost, nu en in de ijstijd. KNNV Uitgeverij, Zeist.
- Strauss J, Schirmermeister L, et al. (2017) Deep Yedoma permafrost: a synthesis of depositional characteristics and carbon vulnerability. *Earth Science Reviews* 172:75-86.
- IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge.
- J. Vandenberghe. (2013). Permafrost in Nederland: sporen van vroegere aanwezigheid in sediment en landschap. *Gea*, 46(1), 10-14. Lees online via natuurtijdschriften.nl/pub/568798.
- French, H. M. (2018). *The periglacial environment*. Oxford, John Wiley & Sons Ltd.
- Nauta A.L. et al. (2014) Permafrost collapse after shrub removal shifts tundra ecosystem to a methane source. *Nature Climate Change* 5(1):67-70. <https://doi.org/10.1038/nclimate2446>
- Lewkowicz A.G., Way R.G. (2019) Extremes of summer climate trigger thousands of thermokarst landslides in a high Arctic environment. *Nature Communications* 10(1):1329. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09314-7>.
- Chadburn et al. (2017) An observation-based constraint on permafrost loss as a function of global warming. *Nature Climate Change* 7(5):340.
- Schuur E.A. et al. (2015) Climate change and the permafrost carbon feedback. *Nature* 520(7546), pp.171-179.



▲ Afb. 1. Verzamelaar Kimeu, op zoek in district Turkana. Foto: José Joordens.

overwegend lagen vette klei, met enkele horizonten vulkanische tuf. Deze werden zeer snel afgezet, waardoor resten van levende wezens goed werden bewaard.

De fossielen die hier worden gevonden zijn afkomstig van dieren die in en langs het water leefden. Schelpen van zoetwatermollusken, graten van vissen, stukken schildpadschild en ook tanden van krokodillen tref je veelvuldig aan. Ook nijlpaardresten zijn er niet zeldzaam. Van landdieren vind je minder vaak fossielen. Uiteraard zijn grazende hoefdieren veel aanwezig; de veel minder talrijke roofdieren, apen en mensachtigen zijn zelden gefossiliseerd.

De heuvels zijn spaarzaam begroeid. Vroeger veroorzaakte de hoge wildstand dat; de laatste twintig jaar is overbegrazing door hun voedselconcurrenten, kuddes tamme herkauwers, bepalend. Tropische regenbuien stro-