

KO VAN HUISSTEDEN | JEF VANDENBERGHE

# PERMAFROST

NU EN IN DE IJSTIJD

# Inhoud

Voorwoord 9

## **DEEL 1**

- 1 Kennismaking met permafrost 15
- 2 Hoe blijft de permafrost koud? 43
- 3 Ijs in de bodem 73
- 4 De koolstofcyclus en broeikasgassen 123
- 5 Klimaatverandering 177

## **DEEL 2**

- 6 De bevroren bodem in het Kwartair in Nederland en omstreken 203
- 7 Het bevroren landschap 229
- 8 Klimaatverandering en stratigrafie in het Kwartair 257

Gedragsregels 291

Geologische monumenten 293

Interessante websites 294

Referenties 295

Register 315

# Voorwoord

Het klimaat verandert en dat laat ook de permafrost niet onberoerd. Wat permafrost is en wat het belang daarvan is, is niet voor iedereen zo duidelijk. Af en toe staan er alarmerende berichten over ontdooiende permafrost en broeikasgassen in kranten en op internet. Het zijn berichten over een vreemde, ijzige wereld, hier ver vandaan, in het hoge noorden. Toch is die wereld niet zo ver weg als het lijkt.

‘Permafrost’ is permanent bevroren bodem; het hele jaar door is de temperatuur van de bodem beneden de nul graden, behalve in de zomer in de bovenste laag. Permafrost is heel wijdverbreid: op 24% van het landoppervlak van het noordelijk halfrond komt nu nog permafrost voor. De dichtstbijzijnde permafrost vanuit Nederland gezien komt voor in het noorden van Scandinavië en hoog in de Alpen.

Intuïtief leek in dit verband ooit het bevriezen van de grond het grootste probleem. Het tegenovergestelde is echter een veel groter probleem, uit ontdooiende permafrostbodems komen namelijk broeikasgassen vrij. Dit zijn het bekende kooldioxide (chemische formule  $\text{CO}_2$ ), maar ook twee andere broeikasgassen, die een veel sterker opwarmend effect hebben op het klimaat: methaan ( $\text{CH}_4$  – hoofdbestanddeel van moerasgas en aardgas) en lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ). Met de broeikasgassen kan ontdooiende permafrost de klimaatverandering versterken.

Daarnaast veroorzaakt ontdooiende permafrost grote schade aan gebouwen en allerlei infrastructuur. Opwarming van de bodem zorgt voor afsmelten van aanwezige ijslenzen met aardverzakkingen als gevolg. Permafrost heeft daarmee ook een belangrijke geopolitieke dimensie vanwege de schade die aan fossiele brandstofextractie in het hoge noorden wordt veroorzaakt, wat overigens ook milieuschade aan permafrostecosystemen en lekkages van methaan met zich meebrengt. Daarom zie je ook dat in de huidige permafrostgebieden door allerlei maatregelen geprobeerd wordt het ontdooien van de permafrost tegen te gaan.

Het is daarom nuttig om de kennis die we hebben over permafrost voor een groter publiek toegankelijk te maken. Dat helpt om de rol van permafrost in het klimaatsysteem te begrijpen: hoe permafrost door klimaatverandering wordt beïnvloed en hoe permafrost op zijn beurt weer doorwerkt op het klimaat. Ook wordt er aandacht besteed aan wat we bij toekomstige, door de mens veroorzaakte, klimaatverandering kunnen verwachten aan dooi van de permafrost en verandering van landschappen en ecosystemen.

Vaak wordt in klimaatdiscussies door ‘klimaatsceptici’ opgeworpen dat klimaatveranderingen, inclusief al hun gevolgen, altijd al bestaan hebben in de geologische geschiedenis. Daarom is het goed om daadwerkelijk uit te zoeken hoe processen in permafrostmilieus zich in het verleden hebben voltrokken en met welke gevolgen. De voorbije ijstijden bieden daarvoor de beste mogelijkheden. Daaruit wordt ook duidelijk hoe groot de veranderingen zijn die we kunnen verwachten bij toekomstige klimaatverandering.

Tijdens de ijstijden waren de gebieden met permafrost nog veel groter dan nu; ook Nederland kende in de koudste perioden permafrost. De sporen daarvan zijn terug te vinden in de bodem; permafrost kwam in sommige perioden van de ijstijd tot in Zuid-Frankrijk voor. Sporen van permafrost vinden we in het grootste deel van Nederland – zuid, oost en noord – tot dicht onder de oppervlakte. Desondanks zullen de meeste mensen ze nauwelijks herkennen als er ergens een sloot of bouwput gegraven wordt. Toch zijn die sporen van groot belang geweest om het ijstijdklimaat te onderzoeken. Dit onderzoek heeft daarmee ook bijgedragen aan een betere kennis van het klimaatsysteem van de aarde.

Met dit boek willen we meer bekendheid geven aan de sporen van permafrost in de bodem en in het landschap van Nederland en omstreken. Het is over het algemeen niet wenselijk om die permafrostverschijnselen zelf te gaan bestuderen (zie de gedragsregels achter in dit boek), maar in sommige aardkundige monumenten is het wel mogelijk om deze verschijnselen te bekijken (zie de lijst achter in het boek).

Het boek bestaat uit twee delen:

Deel 1 behandelt de permafrost zoals die er nu uitziet. Daarnaast is er aandacht voor alle processen die daarbij horen, zoals de warmtebalans, de groei van permafrost in de bodem, het landschap, waarom permafrost zoveel organische stof bevat en de broeikasgassen die vrijkomen bij dooi. Het hele ecosysteem en de biologische processen in de bodem spelen bij deze processen een belangrijke rol. Ze komen tussen alle geologische processen door ook aan de orde. Daarnaast komt in hoofdstuk 5 het toekomstige klimaat ter sprake, met informatie uit het

meest recente IPCC-rapport over de te verwachten klimaatverandering. Deel 1 is gebaseerd op een wetenschappelijk boek (*Thawing Permafrost*, door J. van Huissteden, uitgegeven door Springer Nature).

Deel 2 betreft de permafrost in het ijstijdverleden. Hoe herken je de aanwezigheid van permafrost in aardlagen die in het verleden zijn afgezet en in het landschap? Met daarnaast de vraag: wanneer kwam permafrost voor? Deze hoofdstukken beschrijven hoe de sporen van de permafrost uit het verleden eruitzien en hoe de oorspronkelijke permafrost is veranderd door het dooiproces. Ook komt aan bod wat we weten over het klimaat in de ijstijden, en hoe klimaatreconstructies gemaakt worden. We hebben ons daarbij in de eerste plaats op Nederland gericht, maar omdat in Nederland de waarnemingen uit oudere ijstijden minder goed vertegenwoordigd zijn, wordt ook naar aangrenzende landen gekeken.

Dit boek is gericht op een breder publiek dan alleen vakspecialisten. Het is geschreven voor iedereen die interesse heeft in het klimaat, in de natuur, in ecosystemen in het hoge noorden, en in de bodem en geologie van Nederland – dus voor een breed publiek met belangstelling in natuurlijke zaken. Het is ook zeer geschikt om te worden opgenomen in schoolbibliotheken. Voor natuurbeheerders en bodembeleidsmakers is het van belang om permafrostverschijnselen in het landschap en bodem te herkennen en te bewaren. We pleiten ervoor dat deze verschijnselen net zo goed een plaats verdienen in het bodemarchief als archeologische vondsten. Ook voor instanties die professioneel in de grond graven, zoals bouw- en grondbedrijven, kan het interessant zijn om de sporen van permafrost uit het verleden te begrijpen.

Permafrost is niet simpel een kwestie van een bevroren bodem. Het is een uiterst boeiend onderwerp waarbij veel komt kijken: geologische processen zoals bodemdaling en -vervorming, erosie, veranderingen van grondwaterstroming, biologische processen van bodembacteriën, verandering van de vegetatie en de processen van uitwisseling van warmte tussen aardoppervlak en atmosfeer. Al die processen grijpen in elkaar, het ene proces kan het andere versterken of afzwakken. Ook in de wetenschap is nog veel onzekerheid over hoe sterk de opwarmende terugkoppeling door ontdooiende permafrost is.

We danken iedereen die aan dit boek heeft meegewerkt. In de eerste plaats Jeroen Schokker, die voor ons heeft geïnventariseerd welk materiaal er beschikbaar was in de archieven bij TNO | Geologische Dienst Nederland, en heeft meegedacht over de inhoud en meegelezen. Daarnaast Jet Rootlieb voor de taalkundige adviezen. Verder Zegert van Huissteden, die eveneens heeft meegele-

zen en daarbij speciaal op leesbaarheid van de tekst voor niet-specialisten heeft gelet. Ten slotte de KNNV Uitgeverij, die de uitgave van dit boek mogelijk heeft gemaakt.

Ko van Huissteden  
Jef Vandenberghe  
maart 2022

# DEEL 1

# 1

## Kennismaking met permafrost

### 1.1

#### Wat is permafrost eigenlijk?

Wie wel eens tijdens een flinke vorstperiode heeft geprobeerd een schep in de grond te steken, komt van een koude kermis thuis. De grond is keihard. Het water in de grond is bevroren, en de zandkorrels zitten muurvast.

In gematigde streken zoals Nederland duren vorstperiodes gewoonlijk niet lang. De laag die bevriest wordt nooit heel dik, een paar decimeters hooguit als het een tijdje stevig vriest (wat overigens steeds minder vaak voorkomt).

Stel je nu eens de winters vlak onder en boven de poolcirkel voor. Een deel van de winter komt de zon daar niet of nauwelijks boven de horizon, waardoor de bodem verstoken is van zonlicht en als de zon wel schijnt is dat maar voor een paar uur. De zon staat dan ook nog laag aan de horizon en er ligt een sneeuwdek dat alle zonlicht weerkaatst. In de winter wordt het ijzig koud – temperaturen van  $-30^{\circ}$  zijn gewoon, in Siberië wordt zelfs  $-60^{\circ}$  of kouder gehaald. En die winter duurt lang: van september tot mei kan het vriezen. In een dergelijk klimaat kan het ijs op meren en rivieren meer dan 2 meter dik worden. Van vaarwegen veranderen die rivieren dan in wegen van ijs waarover vrachtwagens rijden die de plaatsen in het hoge noorden bevoorraden.

Ook de bodem bevriest tot op grote diepte, zo diep dat het ijs in de bodem niet meer helemaal ontdooit in de zomer. Die zomer duurt immers maar een paar maanden. In juni is de sneeuw nog aan het ontdooien en in juli en augustus kan het dan wel zomers warm worden, maar dat is amper genoeg om alleen de bovenste laag van de bodem te laten ontdooien. Afhankelijk van het klimaat, de plantengroei en het type bodem is die *opdooil*aag een paar decimeter tot ruim meer dan een meter dik.

De opdooil

dige, scheikundige en biologische processen die zich gedurende de korte zomer in de opdooilag afspelen. Het is een periode waarin bodem, planten en dieren uitbundig tot leven komen. Die bodemprocessen zijn een belangrijk onderwerp in dit boek. Ze zijn fascinerend; onderzoek naar permafrost heeft dan ook veel verrassingen opgeleverd. We zullen het in dit boek meestal over de opdooilag hebben, maar de aanduiding ‘actieve laag’ komt ook voor als het over het leven in de bodem gaat.

Het diepere gedeelte van de bevroren bodem, het deel dat niet ontdooit in de zomer, is de *permafrost*. De temperatuur blijft daar het hele jaar beneden het vriespunt van water (in de definitie van permafrost is dat 0° Celsius).

Een belangrijk onderscheid is het verschil tussen ‘bevroren’ waarbij het water in de vorm van ijs in de bodem aanwezig is, en een temperatuur beneden 0° (tekstkader 1). Permafrost kan namelijk een temperatuur van minder dan 0° hebben, zonder bevroren te zijn. Vloeibaar water kan namelijk ook een temperatuur beneden 0° Celsius hebben. Stoffen die in water zijn opgelost, zoals zout, verlagen het vriespunt; zeewater bevriest bijvoorbeeld pas bij -2°. Ook opgeloste organische stoffen verlagen het vriespunt. Dat verschil tussen ‘bevroren’ en ‘niet bevroren’ lijkt scherp-slijperij, maar het is belangrijk voor het transport van grondwater en gassen door de permafrost, net als voor de activiteit van bacteriën.

Een stevig bevroren permafrostlaag laat overigens nauwelijks water door.<sup>2</sup> De opdooilag is daarom in de zomer vaak erg nat, omdat het smeltwater van de sneeuw niet goed kan wegzakken door de permafrost eronder. Vooral in vlakke gebieden waar het water niet snel weg kan stromen zijn permafrostbodems vaak moerassig. Pas als het ijs uit de bodem is verdwenen, komt de grondwaterstroming goed op gang – het water kan nu beter wegzakken in de bodem.

#### TEKSTKADER 1.1

### De definitie van permafrost

Het woord permafrost suggereert iets dat permanent bevroren is. De officiële definitie is: bodem waarvan de temperatuur gedurende minstens twee jaar beneden de 0° Celsius blijft.<sup>1</sup> Als je goed naar die definitie kijkt, houdt dat in dat ‘permafrost’ niet echt permanent hoeft te zijn – twee jaar is genoeg. Ook hoeft de bodem niet echt bevroren te zijn.

Met ‘bevroren’ bedoelen we dat er zich ijs heeft gevormd. Maar dat is niet altijd het geval als de temperatuur beneden de nul graden zakt. Als er veel opgeloste stoffen, zoals zouten, in het bodemwater zitten bevriest de bodem pas bij een lagere temperatuur. Bodem met een temperatuur beneden de nul graden maar

die niet bevroren is, heet *kryotisch*. Bij temperaturen van een paar graden onder nul hoeft de bodem dus nog niet bevroren te zijn, maar als die toestand voor meer dan twee jaar aanhoudt, is het toch permafrost.

Voor de aanduiding van de temperatuur zullen we hier bijna altijd graden Celsius gebruiken, zonder nadere aanduiding van de temperatuurschaal. In een enkel geval is het nodig om de Kelvin-temperatuurschaal te gebruiken bij nadere uitleg over natuurkundige processen; in dat geval wordt dat aangegeven met de letter K, bijvoorbeeld 273°K (= 0° Celsius = 0°).

## 1.2

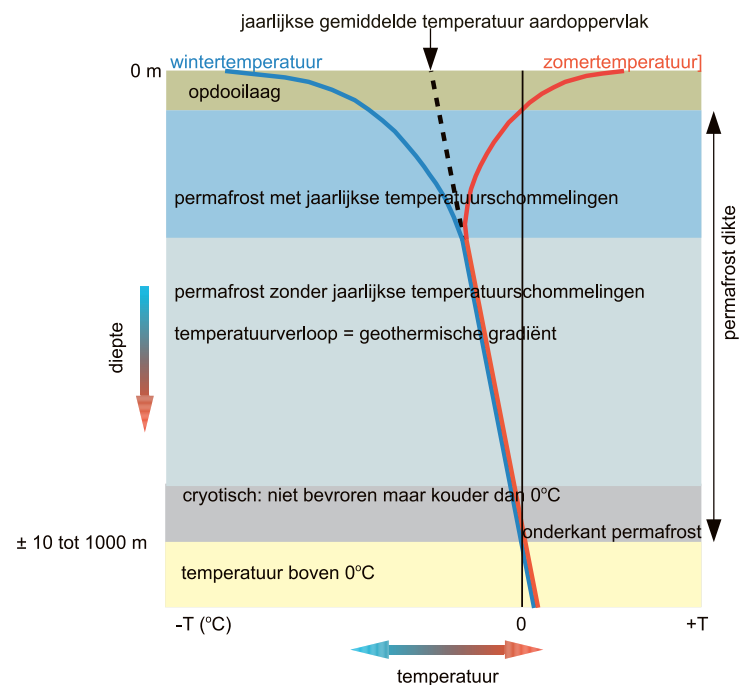
### Hoe dik en hoe koud is de permafrost?

De dikte van permafrost wordt begrensd door de warmte die uit het binnenste van de aarde naar boven stroomt.<sup>1</sup> Hoe dieper onder het oppervlak, hoe warmer het gesteente. Op een bepaalde diepte komt de temperatuur weer boven de nul graden. De gemiddelde temperatuurstijging per meter diepte heet de *geothermische gradiënt* (figuur 1.1). Hoe sterker deze gradiënt, hoe meer warmte er vanuit de diepte naar het oppervlak komt.

Je kunt verschillende zones onderscheiden als je vanuit het aardoppervlak de permafrost in duikt (figuur 1.2) De al besproken opdooilag ontdooit in de zomer. De dikte ervan varieert ieder jaar. In een koele zomer is de opdooilag dunner dan in een warme. De dikte van de opdooilag en de overgangslaag wordt ook bepaald door grondsoort, plantengroei en het sneeuwdek in de winter. Hoe die op elkaar ingrijpen wordt in het volgende hoofdstuk besproken. Tussen de opdooilag en de permafrost zit de *overgangslaag*, die in een koele zomer bevroren blijft maar in een warmere zomer kan ontdooien.

Daaronder bevindt zich een permanent bevroren zone, waar de temperatuurvariaties van de seizoenen in doordringen. Hoe dieper de zone in, hoe zwakker die seizoensvariaties. Op een diepte van een tiental meters zijn die invloeden meestal niet meer merkbaar.

Waar de temperatuurschommelingen van de seizoenen niet meer te meten zijn, volgt een zone waarin de temperatuurverloop ongeveer de geothermische gradiënt volgt. Als je een grafiek maakt waarin je de temperatuur afzet tegen de diepte zoals in figuur 1.1, kun je de lijn van de geothermische gradiënt naar de oppervlakte doortrekken. In theorie kom je dan bij een stabiel klimaat op de gemiddelde jaartemperatuur uit. In theorie, want klimaatveranderingen laten wel hun sporen na op deze diepte. Zo zijn bijvoorbeeld de effecten te zien van de Kleine IJstijd, die van de 15e tot de 19e eeuw duurde, door kleine afwijkingen van de temperatuur ten opzichte van de geothermische gradiënt.<sup>3</sup>



**FIGUUR 1.1** Temperatuur en dikte van de permafrost. In het bovenste deel van de permafrost verandert de temperatuur met de seizoenen. Daaronder volgt de temperatuur van de permafrost de geothermische gradiënt: de toename van de temperatuur van de aardkorst met de diepte. Horizontale as: bodemtemperatuur; verticale as: diepte. De rode lijn is de bodemtemperatuur in het warmste deel van de zomer, de blauwe lijn in het koudste deel van de winter.

Het is mogelijk dat aan de onderkant van de permafrost nog een zone voorkomt waar de temperatuur beneden de nul graden ligt, maar waar het water niet bevroren is. Dat zie je vooral waar het diepe grondwater zout is, bijvoorbeeld in afzettingen die in het verleden in zee gevormd zijn. Daar waar de geothermische gradiënt de nul graden passeert, is de onderkant van de permafrost (figuur 1.1).

De dikte van de permafrost verschilt van plaats tot plaats. Aan de zuidelijke rand van de gebieden waar permafrost voorkomt, is de dikte soms maar enkele meters. In het hoge noorden van Siberië kan de dikte van de permafrost honderden meters bedragen. Onder het Anabar-plateau in het noorden van Siberië zijn diktes tot bijna anderhalve kilometer gemeten. De dikte hangt af van het klimaat en de sterkte van de geothermische gradiënt. De permafrost is dunner als de geothermische gradiënt sterk is, door het grotere transport van warmte uit de diepte. En hoe kouder het klimaat, hoe dikker de permafrost, hoewel dat

niet altijd het geval is. Het ontdooien van permafrost dicht bij de oppervlakte kan heel snel gaan, maar permafrost op grotere diepte reageert heel langzaam op klimaatveranderingen. Ook de geologische geschiedenis is belangrijk.

#### TEKSTKADER 1.2

#### Permafrost termen

Veel woorden die samenhangen met permafrost hebben hun oorsprong in de talen van het hoge noorden, zoals het Samisch en Inuit-talen. Het woord *palsa* (ijsheuveltje in een moeras) is afkomstig uit het Samisch. Ook het Russisch heeft veel bijgedragen. Russische wetenschappers hebben altijd veel onderzoek naar permafrost gedaan. Bijvoorbeeld het woord *talik*, dat afgeleid is van het Russische woord voor ontdooien (*tajat*).

### 1.3

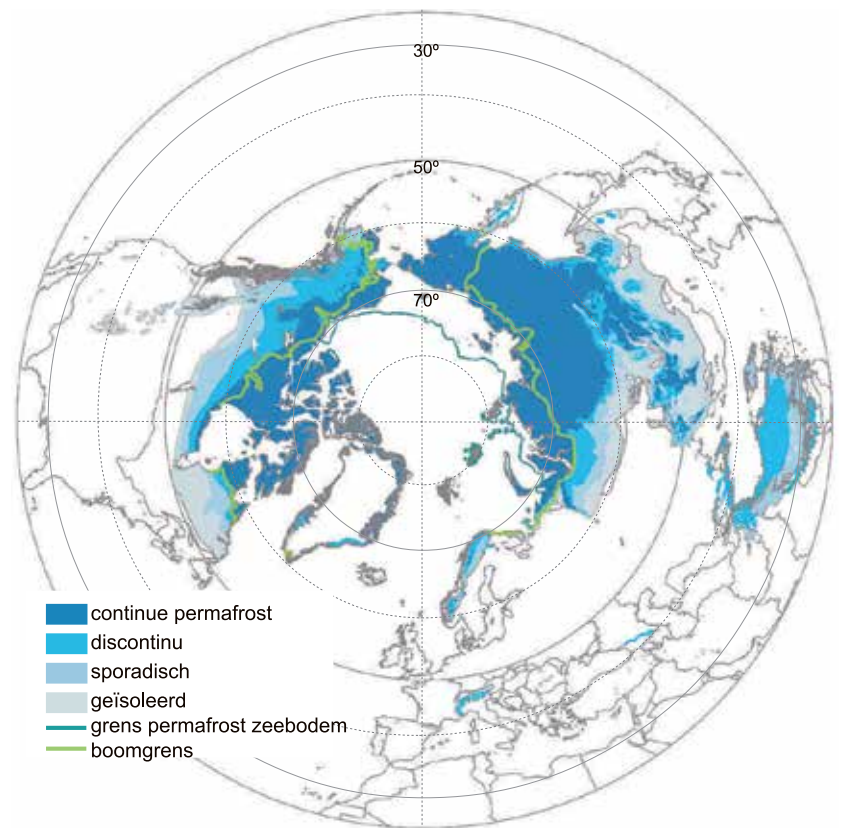
#### Waar komt permafrost voor?

Permafrost komt voor op bijna een kwart (24%) van het landoppervlak van het noordelijk halfrond. Wat echter niet wil zeggen dat permafrost ook echt overal aanwezig is in die 24%. De aanwezigheid hangt in de meer zuidelijk gelegen gebieden, waar het klimaat maar net koud genoeg is voor permafrost, sterk af van de eigenschappen van de bodem en de vegetatie. Doordat deze lokale omstandigheden sterk kunnen verschillen, kan permafrost afwezig zijn op plaatsen waar je die op grond van het klimaat wel zou verwachten. Daarentegen kan op plaatsen waar het klimaat er eigenlijk iets te warm voor is, toch permafrost voorkomen. Permafrost die niet overal aanwezig is in een gebied heet *discontinue permafrost* (figuur 1.2 en 1.3). Er zitten dan gaten in. In de minder koude gebieden kan de permafrost ook bestaan uit geïsoleerde 'eilandjes'. We noemen dat *geïsoleerde permafrost* of *sporadische permafrost*.<sup>4</sup>

Van zuid naar noord kun je verschillende zones onderscheiden (figuur 1.2):

- Continue permafrost (zonder onderbreking; meer dan 90% van het oppervlak).
- Discontinue permafrost (met 'gaten', vooral bij meren en rivieren, 50–90% van het oppervlak). Gaten in de permafrost en lagen met een temperatuur boven 0° heten *taliks* (figuur 1.3).
- Sporadische permafrost (10–50% van het oppervlak, alleen waar de plaatselijke omstandigheden gunstig zijn)





**FIGUUR 1.2** Verbreiding van permafrost op het noordelijk halfrond, met onderscheid in verschillende permafrostzones.<sup>4</sup>

- Geïsoleerde permafrost (plaatselijke, kleine restanten, minder dan 10% van het oppervlak, meestal restanten van een eerdere veel grotere verbreding<sup>5</sup>)
- Volledigheidshalve moet nog bevroren ondergrond vermeld worden die niet (meer) in evenwicht is met huidige vormingscondities, maar een overblijfsel is van een vroeger kouder klimaat (fossiele of 'relict permafrost'). Doorgaans komt dit op grotere diepte onder het oppervlak voor. Het kan duizenden jaren duren voordat permafrost op grotere diepte kan ontdooien.

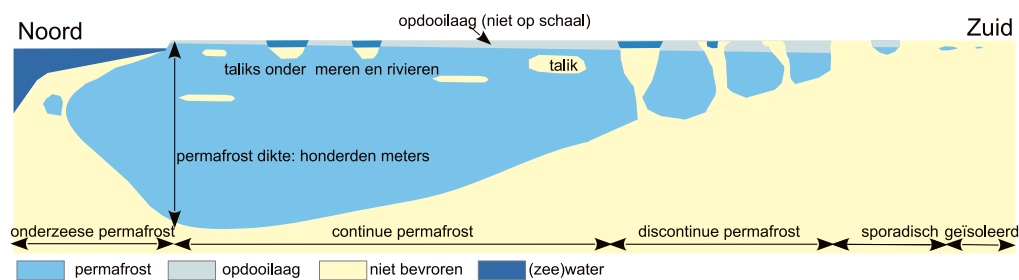
De grenzen tussen deze verschillende soorten permafrost zijn wat arbitrair, en de overgangen daartussen zijn dan ook geleidelijk. Dat komt doordat aan het oppervlak de aanwezigheid van permafrost niet altijd goed te herkennen is zonder metingen van de temperatuur dieper in de bodem.

De mate van continuïteit van de permafrost heeft veel effect op het landschap. De meest in het oog springende eigenschap, de waterdoorlatendheid, kunnen we daarbij als voorbeeld nemen. Een continu bevroren bodem laat nauwelijks water door, dus regen- en smeltwater blijven aan de oppervlakte. Zitten er gaten in de permafrost, dan zakt het water daar naar beneden. De verhouding tussen weg-zakkend en afstromend water is belangrijk voor de vorming van het landschap. Aan de ene kant is er stromend water, en daarnaast is er de aanwezigheid van meren en moerassen. Het aandeel moerassen en meren in het landschap heeft grote invloed op de uitstoot van het broeikasgas methaan uit de permafrost.

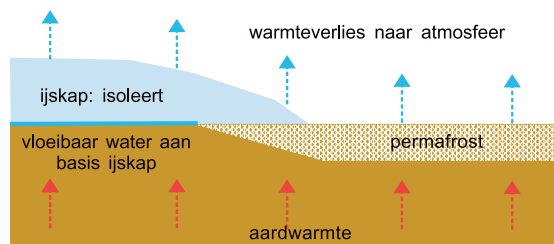
Als het klimaat zo koud is dat de gemiddelde luchttemperatuur over het hele jaar niet boven de nul graden komt, kun je permafrost verwachten. Dan kan de bodem in de winter zover afkoelen dat die het hele jaar door bevroren blijft. Dat is echter een heel ruwe benadering vanwege de al genoemde lokale verschillen in bodem en vegetatie. Vooral in veenmoerassen kan permafrost makkelijk ontstaan en bewaard blijven, in tegenstelling tot andere typen bodems in de buurt waar geen permafrost voorkomt.

Op het noordelijk halfrond vinden we de meeste permafrost in Noord-Amerika en op het Euraziatische continent, vooral in Azië. In Centraal Siberië strekt de permafrost zich ver naar het zuiden, tot in Mongolië, uit (figuur 1.2). Behalve in Siberië komt er in Azië ook een uitgestrekt permafrostgebied voor op het Tibetaans plateau (figuur 1.2), dat op zo'n 4,5 kilometer hoogte ligt. Ondanks de zuidelijke ligging is dit plateau door de grote hoogte zo koud dat er permafrost ontstaat. Dit gebied wordt ook wel 'de derde pool' genoemd. Verder kun je permafrost tegenkomen in alle hooggebergtes; in Europa in de hoogste delen van de Alpen en in de bergen van Scandinavië.

Op het zuidelijk halfrond komt niet zoveel permafrost voor als op het noordelijk halfrond. Antarctica is voor het grootste gedeelte bedekt met een ijskap, maar alleen aan de randen komen stroken land met permafrost voor. Je zou



**FIGUUR 1.3** Schematische verticale dwarsdoorsnede van de permafrost van Noord naar Zuid. De verticale schaal is sterk overdreven.



**FIGUUR 1.4** Permafrost onder een ijskap komt vooral aan de randen voor, door de isolerende werking van een dikke ijskap.

onder ijskappen en gletsjers ook permafrost verwachten, maar dat blijkt slechts in geringe mate het geval. Ijskappen ontstaan weliswaar in een zeer koud klimaat, maar een dikke ijskap isoleert ook zijn ondergrond. Door de warmte vanuit de aarde kan dan toch vloeibaar water aan de basis van de ijskap voorkomen (figuur 1.4). De ondergrond van gletsjers en ijskappen kan daardoor een temperatuur boven 0° hebben. In feite valt dan de onderkant van de permafrost (figuur 1.1) samen met de onderkant van de ijskap. Alleen aan de randen, waar het gletsjerijs niet al te dik is, kan dan permafrost voorkomen.<sup>6</sup>

#### 1.4 Permafrost en ijstijden

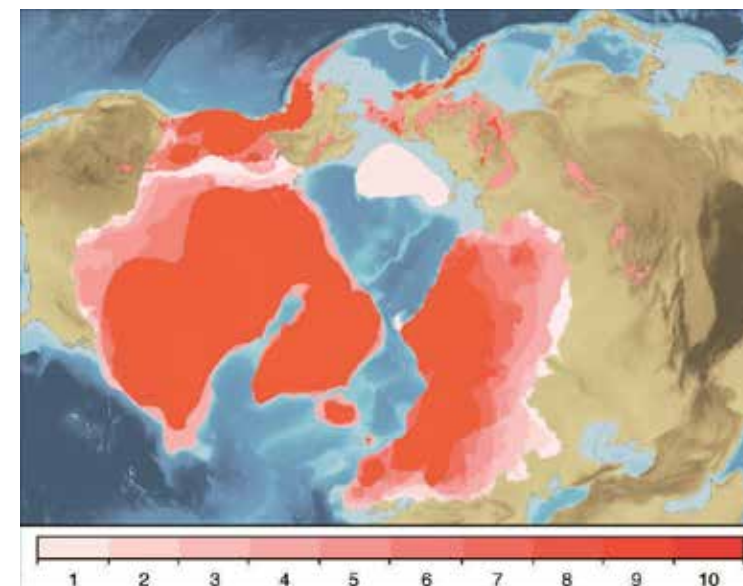
Permafrost op het noordelijk halfrond gaat terug op het begin van het *ijstijdenvak*, in de geologie bekend als het *Kwartair*, zo'n 2,5 miljoen jaar geleden (deel 2 van dit boek). In Antarctica komt mogelijk nog oudere permafrost voor, ongeveer 20 miljoen jaar oud.<sup>7</sup> Tijdens de ijstijden (*glacialen*) in het Kwartair breidden ijskappen, gletsjers en permafrost zich uit over grote delen van het landoppervlak. Ze verdwenen voor een groot deel weer in de tussenliggende warme perioden (*interglacialen*). Permafrost is ook buiten de huidige permafrostgebieden van grote invloed geweest op het landschap. De glacialen hebben namelijk aanmerkelijk langer geduurd dan de interglacialen. Het klimaat binnen een glaciaal kon ook sterk wisselen; er waren koudere perioden (*stadialen*) en warmere perioden (*interstadialen*). In de interstadialen kon het zo warm worden dat er ook dooi van de permafrost optrad. Desondanks was de aanwezigheid van permafrost in Nederland heel gewoon gedurende het hele Kwartair. In de periode tussen het einde van de voorlaatste ijstijd (het Saalien-glaciaal) en nu, die zo'n 140.000 jaar beslaat, moet er gedurende zo'n 80.000 jaar minstens discontinu permafrost aanwezig zijn geweest in Nederland.<sup>8</sup>

Het effect van gletsjers en ijskappen in de ijstijden heeft een groot effect

gehad op de dikte en het voorkomen van permafrost. Zo is het noordoosten van Siberië nooit bedekt geweest met ijskappen doordat het klimaat er in de ijstijden zeer droog en koud was, en er te weinig sneeuw viel voor de vorming ervan. Daar vinden we dan ook de dikste en oudste permafrost van het noordelijk halfrond.<sup>7</sup> In het uiterste noorden van Alaska en Canada lag ook niet overal een ijskap (figuur 1.5).

Zo loopt er aan de oostkant van de Mackenzie Delta in het noorden van Canada een scherpe grens. Daar neemt de dikte van de permafrost naar het oosten snel toe, van ± 100 meter tot 500 meter.<sup>9</sup> De Mackenzie Delta was een deel van de ijstijd bedekt met gletsjers, maar op het plateau ten oosten ervan lag geen gletsjerijs. Daar is de permafrost veel dikker dan onder de Delta, waar permafrost pas kon ontstaan nadat de ijstijd-ijskap verdween. Ook de afdamming van rivieren door het landijs heeft de dikte van permafrost bepaald. Delen van West-Siberië waren bedekt met enorme meren, omdat het landijs in het hoge noorden de loop van de grote Siberische rivieren (de Yenesei en de Ob) afdamde.<sup>10,11</sup>

Tijdens de ijstijden lag er heel veel water opgeslagen in de grote ijskappen in Canada en Scandinavië. De zeespiegel stond daardoor in de koudste delen van



**FIGUUR 1.5** Reconstructie van ijskappen op het land tijdens de laatste 920.000 jaar. De kleurenschaal geeft aan hoe vaak een gebied in die periode door een ijskap bedekt is geweest. De ijskappen zijn gereconstrueerd voor de jongste tien ijstijden van het ijstijdvak (zie ook deel 2). Bron: referentie 11, figuur 4 (ongewijzigd overgenomen); Creative Commons Attribution 4.0 International License <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>. Achtergrond: ETOPO1 globaal reliëf model.<sup>28</sup>