



Tipping points on ice

Een Geo Future Module over landijs

drs. Rob Adriaens (KNAG & CSG Het Streek)

prof. dr. Michiel van den Broeke, dr. Tine Béneker (NESSC / Universiteit Utrecht)



- © Deze module is eigendom van het Koninklijk Nederlands Aardrijkskundig Genootschap (KNAG) en Netherlands Earth System Science Centre (NESSC).
Gebruik van deze module is toegestaan aan scholen of instellingen onder vermelding van de auteurs en de hieronder weergegeven instellingen.

Foto voorzijde: gletsjer van de Sukkertoppen ijskap in Zuidwest-Groenland, NASA.



Tipping points on ice

Een Geo Future School module over landijs

Deze module is gecertificeerd door het Koninklijk Nederlands Aardrijkskundig Genootschap (KNAG). De module maakt onderdeel uit van het concept Geo Future School

Drs. Rob Adriaens
Prof. dr. Michiel van den Broeke
Dr. Tine Béneker
© 2015



Inhoudsopgave

Inleiding	4
Curriculum	5
De opdracht.....	6
De opbouw van de module.....	7
Startopdracht.....	8
Hoofdstuk 1: Landijs op aarde.....	9
Hoofdstuk 2: Accumulatie en ablatie	14
Hoofdstuk 3: Smeltende ijskappen en zeespiegelstijging	18
Hoofdstuk 4: Landijs als klimaatarchief	33
Hoofdstuk 5: de eindopdracht.....	36
Beoordeling	38

Inleiding

Ons klimaat verandert. Vrijwel alle wetenschappers zijn het daarover eens. Over de omvang van de klimaatverandering lopen de verwachtingen uiteen. Er wordt veel onderzoek verricht naar klimaatverandering. Vooral naar de mogelijke gevolgen ervan. Eén van de gevolgen van klimaatverandering met een grote mondiale impact is het smelten van landijs.

De grootste hoeveelheden landijs bevinden zich in de ijskappen van Antarctica en Groenland. In deze module staat het mogelijk smelten van deze ijskappen centraal. *Tipping points* spelen hierin een cruciale rol. Als het smelten van een ijskap een zekere grenswaarde – het *tipping point* - overschrijdt, wordt het vrijwel helemaal afsmelten een onomkeerbaar proces. En dat kan grote gevolgen hebben. De zeespiegel kan met vele meters stijgen. Deze stijging zal niet overal op aarde even groot zijn. Er zijn zelfs plekken waar de zeespiegel zou kunnen dalen. Toch is het op voorhand duidelijk dat veel dichtbevolkte deltagebieden in zo'n geval kunnen overstromen. Honderden miljoenen mensen lopen dan gevaar.

Het Netherlands Earth System Science Centre (NESSC) is een centrum waarin wetenschappers van de Universiteit Utrecht, de Vrije Universiteit Amsterdam, de Universiteit Nijmegen, Het Nederlands Instituut voor Onderzoek der Zee (NIOZ) en de Wageningen Universiteit samenwerken in onderzoek naar *tipping points* of kantelpunten in het systeem aarde. De onderzoekers delen in deze module hun kennis over ijskappen en *tippings points* met je.

Je focust in deze module op de grootste landijsmassa's: de ijskappen van Antarctica en Groenland. De centrale vraag in de module luidt: waar ligt het *tipping point* voor de Groenlandse en Antarctische ijskappen? Voordat je die vraag kunt beantwoorden moet je eerst meer weten over ijskappen. Hoe ontstaan ze? Hoe smelten ze? Hoe meten we de omvang van een ijskap of de snelheid waarmee deze smelt? Allemaal vragen waarop je in het eerste deel van deze module een antwoord kunt vinden. Verderop in de module ga je zelf onderzoek doen. Je eindopdracht is het schrijven van een scenario voor een documentaire over het *tipping point* van één van de ijskappen.

Curriculum

<p>Aan het einde van deze module kun je</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ beschrijven hoe ijskappen ontstaan en op welke – verschillende – manieren ze kunnen afsmelten ▪ beschrijven welke terugkoppelingsmechanismen actief zijn bij het smelten van ijskappen. ▪ relaties leggen tussen het smelten van landijs en zeespiegelstijging ▪ uitleggen welke rol <i>tipping points</i> spelen in het afsmelten van landijs ▪ meettechnieken beschrijven waarbij gebruik wordt gemaakt van landijs als klimaatarchief ▪ een eigen onderzoek uitvoeren met betrekking op landijs ▪ een script ontwerpen voor een documentaire over <i>tipping points on ice</i> 		
Aandachtspunten	<ul style="list-style-type: none"> ▪ De ijskappen op Antarctica en Groenland vertonen overeenkomsten, maar ook belangrijke verschillen ▪ Er zijn verschillende terugkoppelingsmechanismen actief bij het smelten van landijs, dit zijn zowel positieve als negatieve terugkoppelingsmechanismen ▪ Zowel de atmosfeer als de oceaan spelen een belangrijke rol in het smeltproces ▪ De poolgebieden zijn erg gevoelig voor klimaatverandering ▪ Ijskappen vormen een belangrijk klimaatarchief ▪ De zeespiegelstijging als gevolg van het smelten van een ijskap is door het gravitatie-effect niet overal op aarde hetzelfde 	
Denkvaardigheid (uit de gereviseerde taxonomie van Bloom)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Begrijpen: de wijze waarop de massabalans van ijskappen berekend kan worden en de wijze waarop meettechnieken aan het ijs klimaatverandering inzichtelijk kunnen maken beschrijven. ▪ Analyseren: de werking van terugkoppelingsmechanismen schematiseren en een practicum uitvoeren. ▪ Creëren: een scenario voor een documentaire ontwerpen 	
Begrippen	Ijskappen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Cryosfeer ▪ Firn ▪ Inklinking ▪ <i>Settling</i> ▪ <i>Sintering</i> ▪ Deformatie ▪ <i>Sliding</i> ▪ Ijsbassin ▪ Gletsjerspleten ▪ Accumulatiegebied ▪ Ablatiegebied ▪ Evenwichtslijn ▪ Ijsplaat ▪ Ijsberg ▪ Afkalven (<i>calving</i>)

Begrippen	Smeltende ijskappen en zeespiegel-stijging	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Massabalans ▪ <i>Basal melt</i> ▪ Albedo ▪ Albedo-massabalans terugkoppeling ▪ Hoogte-massabalans terugkoppeling ▪ Subglaciale meren en rivieren ▪ <i>Moulins</i> (verticale scheuren) ▪ Thermische expansie ▪ Absolute zeespiegelstijging ▪ Relatieve zeespiegelstijging
	Ijskappen als klimaatarchief	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Paleoklimatologie ▪ Proxy ▪ Ijskern ▪ <i>Dynamic thinning</i> ▪ Isotopen ▪ δD-waarde
	De toekomst	<ul style="list-style-type: none"> ▪ IPCC ▪ <i>Tipping points</i>

De opdracht

De eindopdracht van deze module luidt: Maak een documentaire over de ijskap van Groenland of Antarctica waarbij je focust op het *tipping point*, de temperatuurverandering waarbij de ijskap grotendeels zal afsmelten.

In je documentaire moet je zo goed mogelijk uitleggen hoe de massabalans van de ijskap in een bepaalde richting kan verschuiven. Je maakt daarbij gebruik van wat je in de module hebt geleerd en van de resultaten van het practicum dat je hebt uitgevoerd.

De opbouw van de module

Les	Activiteit	Uitwerking
1	Introductie van de eindopdracht	Het thema wordt geïntroduceerd. Er wordt verteld wat de eindopdracht inhoudt. De startopdracht wordt gemaakt.
2 3	Landijs op aarde Accumulatie & Ablatie	Hoofdstuk 1 & 2 Google Earth opdracht ► Verwerkingsopdrachten + Google Earth opdracht
go - no go: de Google Earth opdracht moet goedgekeurd worden door de docent		
4 5 6 7	Smeltende ijskappen en zeespiegelstijging	Hoofdstuk 3 Veldwerkopdracht 'Albedo bepalen' ► Verwerkingsopdrachten + Veldwerkopdracht
go – no go: de veldwerkopdracht moet goedgekeurd worden door de docent		
8 9 10	Meettechnieken – landijs als klimaatarchief	Hoofdstuk 3 en 4 <i>Infographic</i> maken ► Verwerkingsopdrachten + <i>infographic</i>
go - no go: de infographic moet goedgekeurd worden		
11 12 13 14	Eindopdracht	Scenario voor de documentaire schrijven. Documentaire opnemen. ► De eindopdracht: documentaire maken.
Presentatie van de documentaires		

Startopdracht

Je begint deze module met een heel eenvoudig huis- tuin-en-keukenexperiment. Je hebt daarvoor de volgende dingen nodig:

- Een liniaal of geo-driehoek
 - Een potlood of pen
 - Een langwerpig glas (long drinkglas)
 - Een ijsblokje
-
- Zet het glas op het aanrecht en vul het voor ongeveer $\frac{3}{4}$ met water.
 - Doe het ijsblokje in het water.
 - Meet zo precies mogelijk de hoogte van het waterniveau. Vul de gemeten hoogte in, in de onderstaande tabel.
 - Bepaal zo nauwkeurig mogelijk welk deel van het ijsblokje boven het waterniveau uitsteekt en welk deel zich onder het waterniveau bevindt.
 - Wacht totdat het ijsblokje helemaal gesmolten is en meet dan opnieuw het waterniveau. Vul het resultaat weer in, in de tabel.

	Waterniveau in het glas (in cm)
Water met ijsblokje	
Water (ijsblokje is gesmolten)	

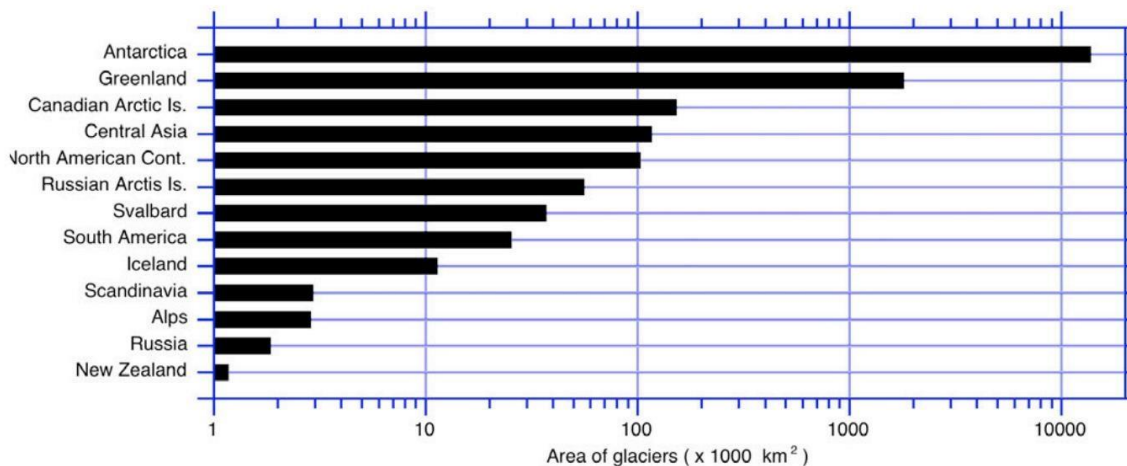
Trek op basis van dit experiment conclusies met betrekking tot

- de betrouwbaarheid van de metingen die je hebt gedaan
- de dichtheid van water en ijs;
- het deel van een ijsberg dat zich boven en onder water bevindt
- de bijdrage van het smelten van zee-ijs aan zeespiegelstijging
- de bijdrage van het smelten van landijs aan zeespiegelstijging

Hoe simpel dit experiment ook lijkt, de conclusies zijn voor deze module van groot belang.

Hoofdstuk 1: Landijs op aarde

Ongeveer 10% van het landoppervlak op aarde is bedekt met landijs. Het grootste deel hiervan bevindt zich in de ijskappen die grote delen van Antarctica en Groenland bedekken. Deze ijskappen zijn zo groot dat veranderingen in de omvang van invloed kunnen zijn op de mondiale temperatuur en zeespiegelstand. De stabiliteit van de ijskappen is dan ook een belangrijk studieobject van wetenschappers. De ijskappen maken deel uit van de **cryosfeer**. De cryosfeer omvat naast het landijs ook het zee-ijs en het ijs in de bodem (permafrost) en de atmosfeer. In deze module focussen we vooral op het landijs dat is opgeslagen in de grote ijskappen. De interactie met het zee-ijs en het ijs in de atmosfeer speelt daarbij uiteraard een belangrijke rol.



Bron 1: Oppervlakte van gletsjers en ijskappen in km² (logaritmische schaal)

Uit Bron 1 kun je afleiden dat verreweg het grootste deel van het ijs op aarde zich bevindt in de ijskappen die Antarctica en Groenland bedekken. Deze ijskappen bevatten respectievelijk 24,7 en 2,9 miljoen km³ ijs, 99% van al het landijs op aarde. Kleinere hoeveelheden ijs bevinden zich in gletsjers in de gebergten als de Himalaya of de Alpen. In de ijskappen is een groot deel van het zoet water op aarde opgeslagen in de vorm van ijs. Ongeveer 60% van het zoet water is vastgelegd op Antarctica, 7% op Groenland.

Al dat ijs is oorspronkelijk gevormd uit sneeuw. Sneeuw ontstaat uit ijskristallen in de lucht. Deze worden gevormd als er voldoende vocht in de atmosfeer zit én de temperatuur laag genoeg is. Als de sneeuw kristallen groot genoeg zijn, vallen ze naar beneden. Ze klonteren dan samen tot sneeuwvlokken. Als de temperatuur in de onderste laag van de atmosfeer hoger is dan het smeltpunt van ijs, gaat de sneeuw over in regen. Als de temperatuur lager is dan het smeltpunt bereiken de sneeuwvlokken het aardoppervlak. In vers gevallen sneeuw zit veel lucht tussen de sneeuw kristallen. Wel 90% van de sneeuw kan bestaan uit lucht. Een sneeuwlaag werkt door de ingevangen lucht isolerend, vergelijkbaar met een vacht of verendek.

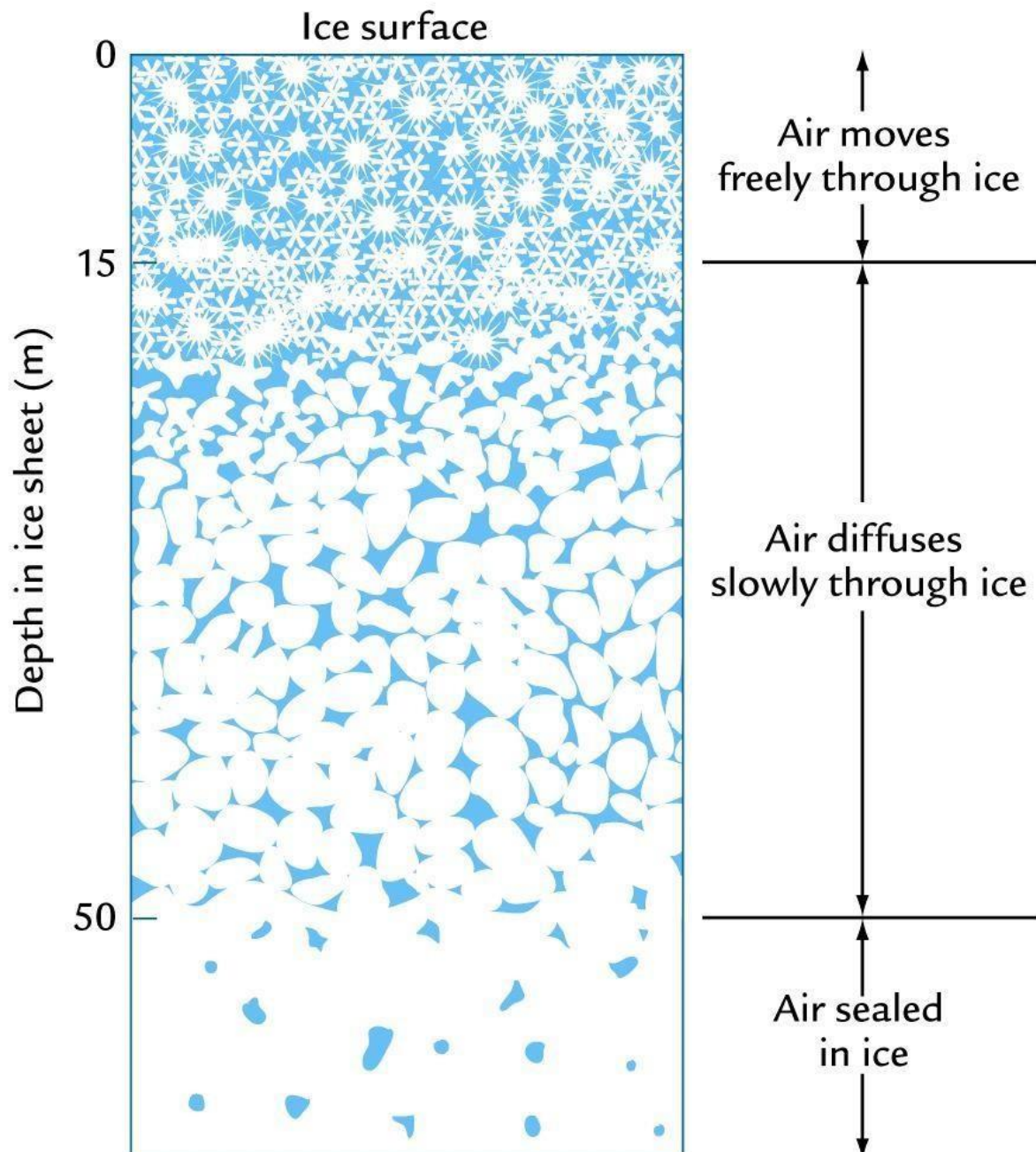
De meeste sneeuw die op aarde valt, smelt in de zomer weer snel. Alleen op grote hoogte én op hoge breedten kan sneeuw ook tijdens het zomerseizoen blijven liggen. De sneeuwlaag kan dan van jaar tot jaar aangroeien. Onder invloed van het eigen gewicht van de sneeuw en de groei van de sneeuw kristallen wordt de sneeuwlaag dan na verloop van tijd compacter. Dit proces wordt **inklinking** genoemd en is vergelijkbaar met het compacter worden van bijvoorbeeld veen. Bij veen wordt bij inklinking water uit de veenlagen geperst, bij sneeuw wordt lucht uit de sneeuwlagen geperst.

Meerjarige sneeuw of **firn** verandert onder invloed van het proces van inklinking. Door het toenemende gewicht van de steeds groeiende firnlaag neemt het luchtgehalte steeds verder af en de ijskristallen worden effectiever gestapeld (**settling**). Als de druk toeneemt gaan de ijskristallen samenklonteren en veranderen ze van vorm (**sintering**). Bij een nog verdere toename van de druk worden de poriën tussen de ijskristallen, waarin zich lucht bevindt, afgesloten. Luchtbellen zijn vanaf dat moment ingesloten tussen de ijskristallen (zie Bron 3). Er is gletsjerijs ontstaan. Gletsjerijs heeft een lichtblauwe kleur. De dichtheid van gletsjerijs is vele malen groter dan de dichtheid van vers gevallen sneeuw. Vanaf een dichtheid van 830 kg/m^3 tot de maximale dichtheid van 900 kg/m^3 spreken we van gletsjerijs.



Bron 2: Blauw gletsjerijs in een ijsberg voor de kust van Alaska. Gletsjerijs is blauw omdat de zuurstof-waterstof verbindingen in ijs (net als in water) het rode deel van het licht absorberen. © Dough Knuth, 2010

De diepte waarop gletsjerijs ontstaat is niet overal hetzelfde. Als de temperatuur relatief hoog is, ontstaat gletsjerijs al dicht bij het oppervlak. Doordat smeltwater de sneeuw in zakt, neemt de dichtheid sneller toe dan wanneer helemaal geen smeltwater wordt gevormd. Ook als er geen smelt plaatsvindt, wordt in relatief warme (en droge) gebieden gletsjerijs op geringere diepte gevormd dan in koude gebieden. De dichtheid van ijs neemt dus grofweg toe met de diepte, maar de mate van toename is sterk afhankelijk van het gebied waar je je bevindt.



Bron 3: De vorming van gletsjerijs uit sneeuw. De dichtheid neemt toe naarmate sneeuw overgaat in firm en gletsjerijs. In gletsjerijs zijn luchtbellen ingesloten.

Bron: <http://www.atmosedu.com/Geol390/Life/proxy/11-03.jpg>

De grote ijskappen

De ijskappen van Antarctica en Groenland worden vaak in één adem genoemd. Dat is niet helemaal terecht. Er zijn veel verschillen tussen de ijskappen. De ijskappen op Antarctica zijn ongeveer 45 miljoen jaar geleden ontstaan toen als gevolg van tektonische processen Zuid-Amerika en Australië wegdreven van Antarctica. Hierdoor kon een circumpolaire zeestroom rondom Antarctica ontstaan die voorkomt dat warme zeestromen dit continent kunnen bereiken. Het ijs op Antarctica is te verdelen in een oostelijke en een westelijke ijskap, waarbij de oostelijke het grootst is. De maximale dikte van het ijs is ongeveer 4.800 meter. Aan de rand van het continent stroomt het ijs de oceaan in, en vormt daar in veel gebieden drijvende ijsplaten. Van deze ijsplaten breken tafelijsbergen af, herkenbaar aan hun vlakke bovenkant. De luchttemperatuur op Antarctica is zo laag dat het ijs niet snel in zijn geheel zal afsmelten. Aan de randen van met name de westelijke ijskap wordt echter wel verlies waargenomen. De ijsplaten in dit gebied smelten aan de onderkant door de aanvoer van relatief warm water door de oceaan; hierdoor worden de ijsplaten dunner en stromen gletsjers van land sneller de zee op, waardoor de ijskap massa verliest.

Waar Antarctica in zijn geheel rondom de Zuidpool ligt, is Groenland een stuk verwijderd van de Noordpool. Het eiland steekt als een punt naar het zuiden. Sinds 2,7 miljoen jaar geleden is vrijwel heel Groenland bedekt met ijs. Daarvoor was alleen sprake van gedeeltelijke vergletsjering vanaf ongeveer 37 miljoen jaar geleden. De ijskap heeft een maximale dikte van 3.200 meter. Vanaf de ijskap stromen gletsjers diepe fjorden in. Grote ijsplaten als bij Antarctica worden hierbij niet gevormd. Er kalven wel regelmatig ijsbergen af die door de stroming zuidwaarts drijven. De ijsberg die het lot van de Titanic bezegelde was ook afkomstig van Groenland. De temperaturen op Groenland zijn minder laag dan op Antarctica. In de zomermaanden komt de temperatuur vaak boven de 0° C en dan treedt smelt op. Dit gebeurt vooral aan het oppervlak van de gletsjer, waarbij smeltwater door scheuren in het ijs zakt. Door het relatief milde klimaat is de Groenlandse ijskap erg gevoelig voor klimaatverandering.

In het Pleistoceen (de laatste 2,7 miljoen jaar van de geologische geschiedenis van de aarde) hebben zich tijdens enkele ijstijden ook andere grote ijskappen gevormd: bijvoorbeeld in Scandinavië en West-Rusland, in Canada en de Rocky Mountains, op de Canadese eilanden ten westen van Groenland en in het zuiden van het Andesgebergte in Zuid-Amerika. Door de opwarming die heeft plaatsgevonden sinds de laatste ijstijd zijn deze ijskappen vrijwel helemaal gesmolten. In een verder geologisch verleden zijn er ook periodes geweest dat er helemaal geen ijskappen waren. De zeespiegel stond toen ongeveer 70 meter hoger dan nu het geval is. De laagst gelegen delen van continenten stonden toen onder water.

Opdrachten

Opdracht 1

Gebruik de Grote Bosatlas.

Om in de atlas het noordpoolgebied en het zuidpoolgebied af te beelden is gebruik gemaakt van een andere projectie dan voor de meeste kaarten in de atlas is gebruikt.

Geef aan

- welke projectie gebruikt wordt voor het afbeelden van het noordpoolgebied en het zuidpoolgebied;
- waarom voor het afbeelden van deze gebieden voor deze projectie is gekozen.

Tip: één van de eerste kaartbladen in de atlas toont veel gebruikte projecties.

Opdracht 2

Op de meeste kaarten wordt door de gekozen projectie de omvang van Groenland en Antarctica sterk overdreven ingetekend. Via <http://thetruesize.com> kun je een realistische vergelijking maken met landen op lagere breedten.

Geef aan

- waarom de omvang van Groenland en Antarctica op de meeste kaarten sterk overdreven is;
- welk land op lagere breedte een omvang heeft vergelijkbaar met Groenland;
- welk land op lagere breedte een omvang heeft vergelijkbaar met Antarctica.

Opdracht 3

Maak onderstaand schema af.

Vul ook de processen in die bij de cijfers 1, 2 en 3 horen.

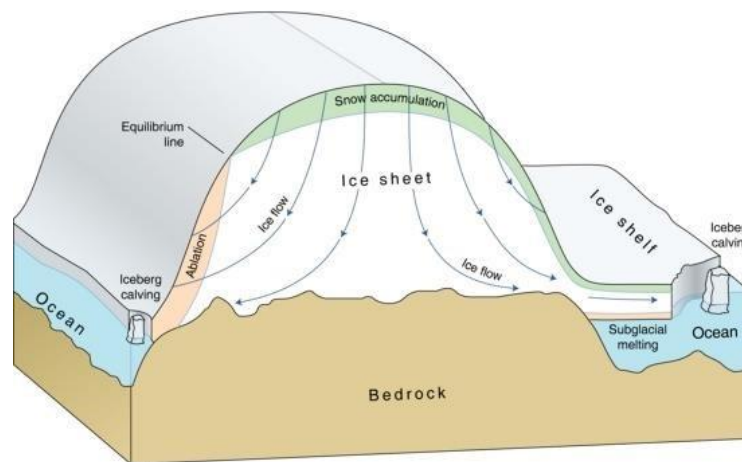


Opdracht 4

Maak een vergelijking tussen de ijskap op Groenland en de Antarctische ijskappen door kenmerken die in dit hoofdstuk worden genoemd tegen elkaar af te zetten.

Hoofdstuk 2: Accumulatie en ablatie

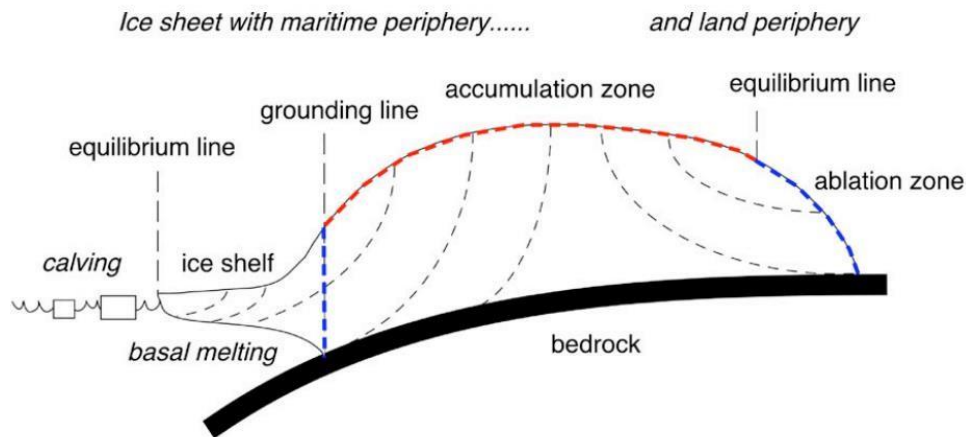
Als ijs dik genoeg is gegroeid, komt het in beweging. Het stroomt onder de invloed van de zwaartekracht langzaam naar beneden. De stroming ontstaat dus als gevolg van het eigen gewicht van het ijs, waardoor het vervormt. Als het ijs in een lager, en daardoor warmer gebied terechtkomt kan het gaan afsmelten. Omdat het afsmelten van een grote hoeveelheid gletsjerijs veel tijd kost en de ijsstroming in die tijd doorgaat, kan het ijs zich een eind in het warmere gebied uitstrekken. Iedere ijskap bestaat dan ook uit een deel waar sprake is van netto aangroei van ijs (de **accumulatiezone**) en een deel waar netto verlies van ijs plaatsvindt (de **ablatiezone**).



Bron 4: schematische weergave van accumulatie en ablatie en de ligging van de evenwichtslijn op een ijskap. Bron: www.climate.be/textbook/images/image3x15.jpg

Accumulatie vindt voornamelijk plaats door sneeuwval en in mindere mate door rijpvorming (waterdamp gaat direct over in ijs). Ablatie kan plaatsvinden door smelt of **sublimatie** (ijs gaat direct over in waterdamp). Midden tussen de accumulatie- en de ablatiezone bevindt zich de **evenwichtslijn**. Aangroei en verlies van ijs zijn op deze lijn netto aan elkaar gelijk. Je kunt zeggen: de **oppervlaktemassabalans** van de ijskap is er 0. In de accumulatiezone is de oppervlaktemassabalans positief en in de ablatiezone negatief. Als in de ablatiezone de sneeuw en firn smelten komt het lichtblauwe gletsjerijs aan de oppervlakte.

Ijsstroming gaat gepaard met vervorming of **deformatie** van het ijs. Hierbij ontstaan scheuren of gletsjerspleten. Aan de oppervlakte zijn deze soms nauwelijks zichtbaar door een sneeuwdek en daardoor extra gevaarlijk voor mensen die de gletsjers willen oversteken. Naast het deformeren van het ijs, schuift het ijs over de ondergrond. Dit wordt **sliding** genoemd. De ijsstroming is niet overal hetzelfde. In sommige delen van ijskappen stroomt het ijs met een snelheid van wel enkele kilometers per jaar terwijl in andere delen het ijs nauwelijks beweegt. Er is dus sprake van een verschijnsel dat je zou kunnen aanduiden als 'ijsrivieren' en 'ijsbassins'. De ijsbassins hebben dan veel overeenkomsten met de stroomgebieden van rivieren.



Bron 5: Schematische doorsnede van een ijskap. De linkerzijde is kenmerkend voor Antarctica met de evenwichtslijn (equilibrium line) in zee. Ijsverlies treedt hier op door het afkalven van ijsbergen en door basal melting. De rechterzijde is kenmerkend voor grote delen van Groenland. Ijsverlies treedt hier op door smelt aan het oppervlak. Aangezien sommige gletsjers van de Groenlandse ijskap in fjorden uitstromen treedt er in Groenland ook afkalving van ijsbergen op. Bron:IMAU

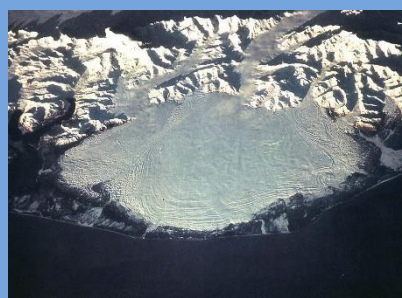
Typen gletsjers

Er zijn verschillende typen gletsjers. In berggebieden zijn de valleigletsjers te vinden. Deze stromen naar beneden in valleien. Tijdens de stroming komen deze gletsjers in een lager gelegen en dus warmere zone. Uiteindelijk krijgt daar ablatie de overhand. De gletsjers vervoeren puin van de bergwanden en drukken dat voor zich uit als de gletsjer langer wordt. Ook aan de zijkanten en tussen twee gletsjers worden wallen van puin opgestuwd. Deze puinwallen worden morenen genoemd. Een gletsjer die vanuit een berggebied een vlakte bereikt, waaiert vaak breed uit. Een dergelijke gletsjer is een Piedmontgletsjer.

Op vlakke gebieden ontstaan ijskappen. Ijskappen stromen vooral zijwaarts. Op Antarctica en Groenland bevinden zich grote ijskappen, maar ook in bijvoorbeeld IJsland bevinden zich ijskappen op de afgevlakte vulkaantoppen; de grootste ijskap van Europa, Vatnajökull, ligt op IJsland. De Antarctische ijskappen stromen uit in de oceaan. De evenwichtslijn is daar op zeeniveau nog niet bereikt, waardoor het ijs 'over het water' uitstroomt in de vorm van ijsplaten (*ice shelves*). Op Groenland ligt de ablatiezone van het ijs wel op het land.



Valleigletsjer



Piedmontgletsjer



Ijskap

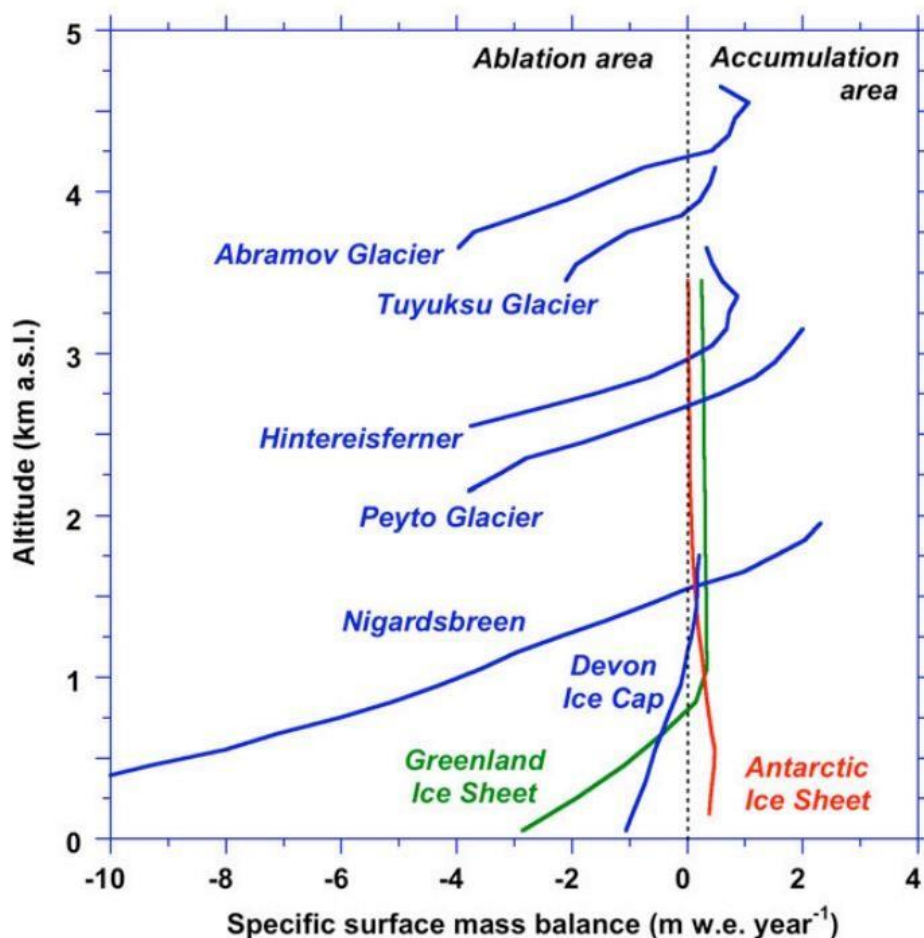
De ijskappen op Antarctica eindigen in de oceaan. De evenwichtslijn is daar door de lage luchttemperaturen op zeeniveau nog niet bereikt en het ijs vloeit de oceaan in. Dit gebeurt in de vorm van **ijsplaten** (*ice shelves*). De ijsplaten drijven op het zeewater. Dit kan omdat de dichtheid van water groter is dan die van ijs. Een bijzonder kenmerk van water. Bij vrijwel alle stoffen die in de natuur voorkomen, is de dichtheid van de vaste fase groter dan die van de vloeibare fase. Water wijkt hiervan af doordat er bij het bevriezen juist meer ruimte in het kristalrooster wordt gemaakt.

De ijsplaat kan een flink eind de oceaan in vloeien, tot vele honderden kilometers. De **grounding line** verbindt de punten waar de ijsplaat van de vaste, rotsige ondergrond loslaat. De ijsplaat kan dicht bij de *grounding line* zo'n 1000 meter dik zijn. Naarmate de ijsplaat uitvloeit over de oceaan wordt hij dunner, tot typisch 200 m aan de rand. Uiteindelijk breken er stukken van de ijsplaat af en ontstaan er (platte) ijsbergen, die ook wel tafelijsbergen worden genoemd, die dus zo'n 20 m boven het wateroppervlak uitsteken. Deze zijn karakteristiek voor de wateren rondom Antarctica.

Het zeewater stroomt onder de ijsplaat door. In de contactzone van het zeewater en de onderzijde van de ijsplaat vindt smelt plaats. Door de toevoeging van het zoete water uit de gletsjer neemt direct onder ijsplaat het zoutgehalte, en daarmee ook de dichtheid van het water af (zoet water heeft een kleinere dichtheid dan zout water). De ijsplaat draagt dus zelf bij aan het ontstaan van dichtheidsverschillen in het zeewater. Deze leiden tot een stroming, die ook wel de **ijspomp** wordt genoemd. Het zeewater welt daarbij op in de buurt van de grounding line en stroomt onder de ijsplaat door. Dit vergemakkelijkt het warmtetransport van het zeewater naar het ijs en versnelt daarmee het afsmelten van de ijsplaat. De ijsplaat wordt dunner en uiteindelijk zullen er platte (tafel)ijsbergen van de ijsplaat afkalven en de oceaan indrijven.

Vanaf de ijskap op Groenland stroomt ook ijs de Atlantische Oceaan in. Dit is veel minder dan bij de Antarctische ijskappen in de oceaan stroomt. Een groot deel van de gletsjers die op de Groenlandse ijskap beginnen, eindigen op land. In tegenstelling tot de Antarctische ijskappen is er op Groenland dus duidelijk sprake van een ablatiezone: een zone waar op jaarbasis netto meer ijs verdwijnt dan er bij komt. In Bron 6 is de oppervlakte massabalans van enkele gletsjers en ijskappen afgezet tegen de hoogte. Voor Groenland komt het er gemiddeld op neer dat het deel van de ijskap dat zich boven 750 meter boven NAP bevindt de accumulatiezone vormt. Daar vindt netto aangroei van ijs plaats (smelt groter dan sneeuwval). Het deel waar het ijsoppervlak zich onder 750 meter NAP bevindt vormt de ablatiezone, waar netto verlies aan ijs plaatsvindt (smelt groter dan sneeuwval). Het oppervlak van de ijskap van Antarctica is één grote accumulatiezone. De ablatiezone bevindt zich immers pas op de ijsplaten in de oceaan, waar de ijsbergen afbreken. De grens waar de oppervlakte-massabalans nul is, noemen we de evenwichtslijn. De waarde van 750 meter boven NAP voor Groenland is een

gemiddelde. In het noorden, waar het kouder is, ligt de evenwichtslijn lager dan in het zuiden.



Bron 6: Accumulatie- en ablatiezone van gletsjers en ijskappen naar hoogte.

Abramov gletsjer en Tuyuksa gletsjer (Centraal-Azië), Hintereisferner (Oostenrijk), Peyto gletsjer (Canada), Nigardsbreen (Noorwegen), Devon ijskap (Canada). In deze bron is de invloed van de breedteligging te zien. De evenwichtslijn ligt lager in gebieden die verder van de evenaar verwijderd liggen (bijvoorbeeld Noorwegen) dan in gebieden die dicht bij de evenaar liggen (bijvoorbeeld Centraal-Azië). De gestippelde lijn (oppervlakte massabalans = 0) is de evenwichtslijn.

Groenland en Antarctica in vogelvlucht

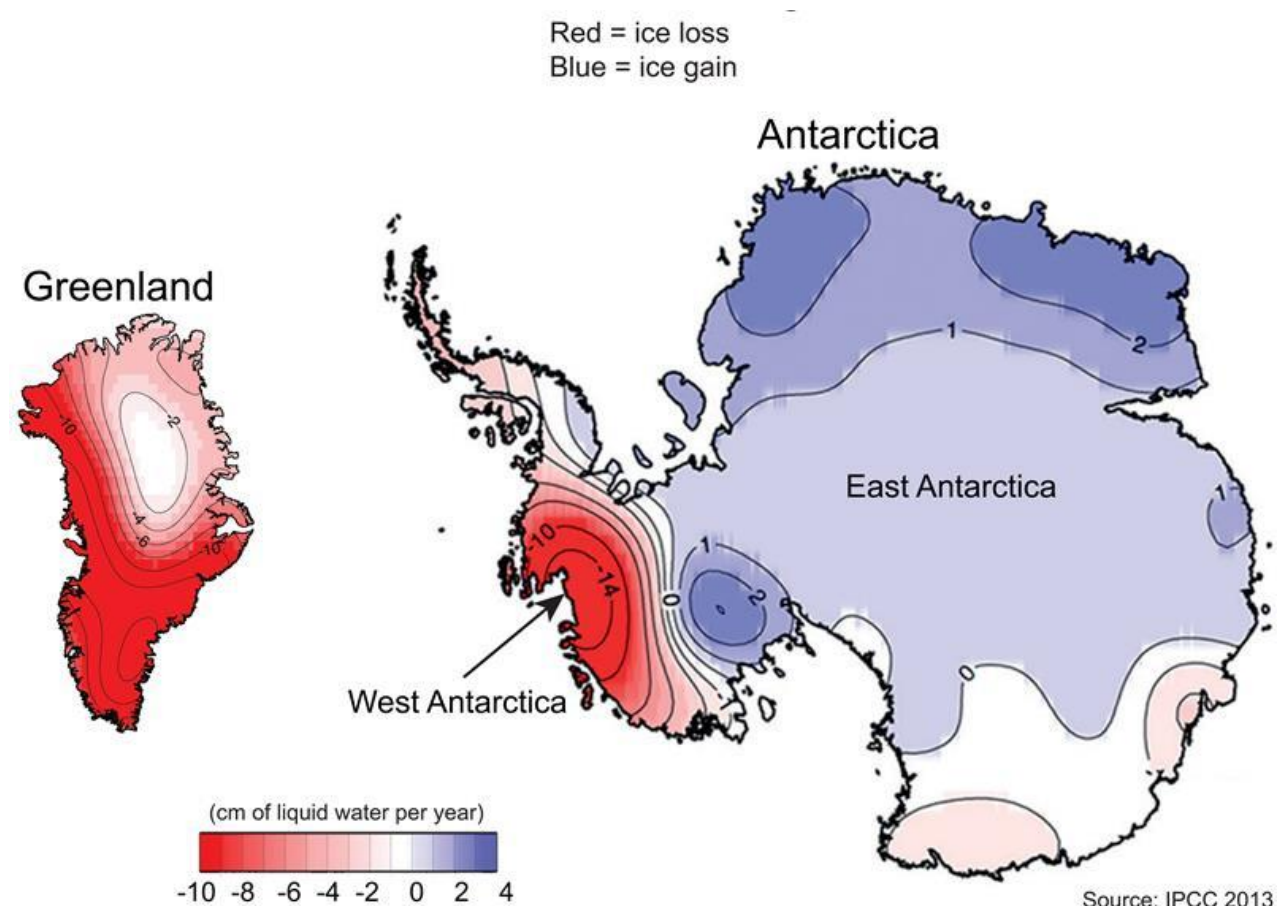
Go – no go

Bij deze module hoort het bestand tippingpointsonice.kmz waarin je een tour door Groenland en Antarctica gaat maken. Open dit bestand in Google Earth. In het menu "plaatsen" kun je het bestand terugvinden. Vouw het menu open en ga de verschillende plaatsen af. Je kunt de plaatsen daarvoor in het menu aanklikken. Afbeeldingen maak je zichtbaar door in het menu een vinkje te zetten voor de betreffende plaats.

Deze opdracht moet door je docent goedgekeurd worden, voordat je verder kunt.

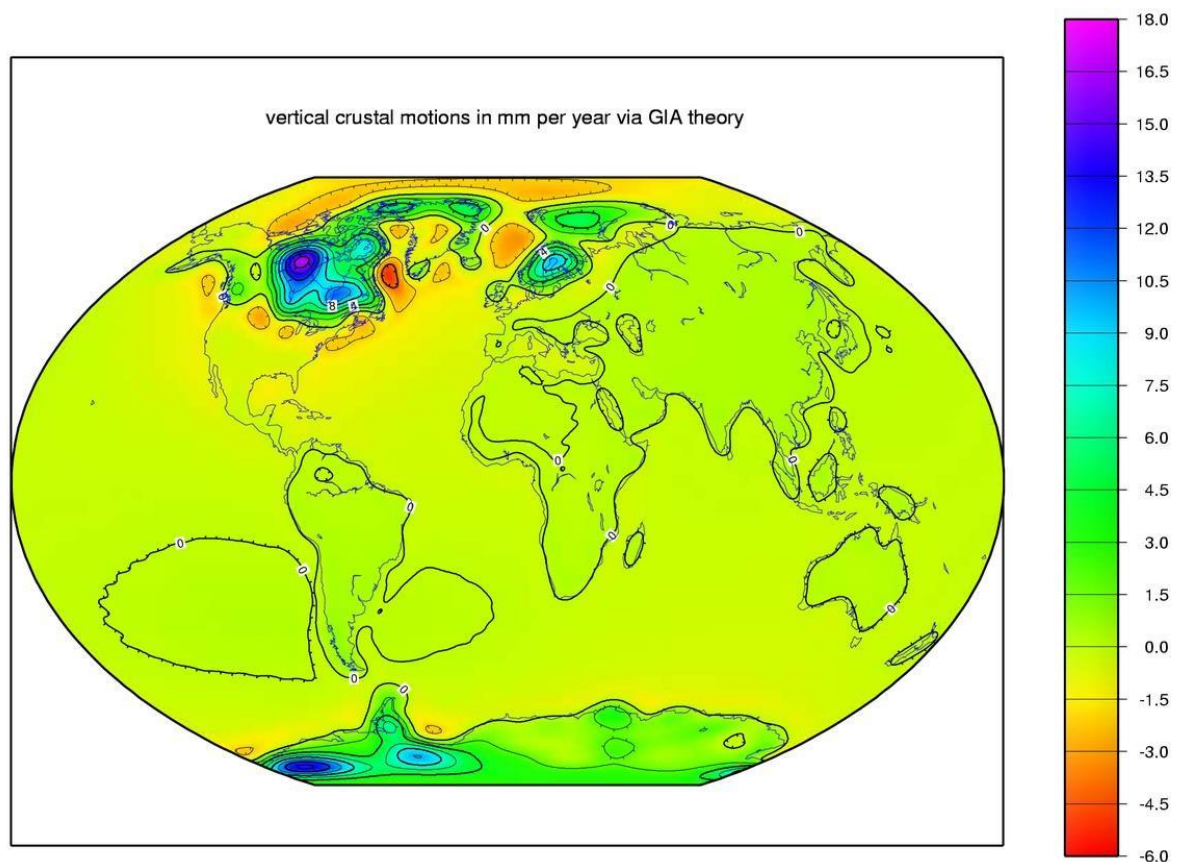
Hoofdstuk 3: Smeltende ijskappen en zeespiegelstijging

Als de ijskappen in het nieuws zijn, is dit meestal als gevolg van het smelten van het ijs en de daarmee samenhangende stijging van de zeespiegel. Er wordt dan vaak ingezoomd op een enkele gebeurtenis zoals het losbreken van een grote tafelijsberg van een Antarctische ijsplaat. Hoewel dit spectaculaire beelden kan opleveren, zijn er toch vraagtekens te plaatsen bij deze berichtgeving, zeker als dat gebeurt in verband met klimaatverandering. Het losbreken van ijsbergen is een normaal fenomeen dat regelmatig aan de rand van de ijskappen plaatsvindt. Immers, de ijskap verliest weliswaar ijs bij deze afkalving, maar door sneeuwval komt er ook nieuw ijs bij; als deze twee termen over een langere periode gemiddeld in evenwicht zijn, verandert de massa van de ijskap niet. Toch heeft de berichtgeving ook een positief effect. Het maakt een groot publiek bekend met de mogelijke impact die veranderingen in de omvang van de ijskappen kunnen hebben op de mensheid. Het draagvlak onder politici en burgers om meer onderzoek te doen wordt daardoor groter.



Bron 7: Veranderingen op de ijskappen van Groenland en Antarctica tussen 2003 en 2012 gemeten met de GRACE-satellieten. Bron: IPCC, 2013.

Er is trouwens wel degelijk sprake van massaverlies van de ijskappen. Sinds 2002 zijn er twee satellieten actief in een baan rond de aarde in het kader van GRACE (*Gravity Recovery And Climate Experiment*). Deze satellieten maken nauwkeurige metingen van de zwaartekracht. Boven gletsjers worden variaties in de zwaartekracht vooral bepaald door veranderingen in de ijsmassa. Een ijskap of gletsjer heeft immers veel massa en verhoogt dus regionaal de zwaartekracht. Bij ijsverlies neemt deze 'extra' zwaartekracht af. Met de GRACE-satellieten is duidelijk aangetoond dat er sprake is van ijsverlies op Groenland, West Antarctica en het Antarctisch Schiereiland. Het is de vraag of dit verlies een inleiding is op een nog veel groter massaverlies dat de komende tientallen jaren zal plaatsvinden. Die vraag is heel lastig te beantwoorden. Er spelen namelijk allerlei terugkoppelingseffecten die het massaverlies kunnen tegengaan of juist versterken.



Bron 8: Bodembeweging gemeten door de GRACE satelliet. Vooral in de poolgebieden vindt bodembeweging plaats. Bron: https://en.wikipedia.org/wiki/Post-glacial_rebound#/media/File:PGR_Paulson2007_Rate_of_Lithospheric_Uplift_due_to_PGR.png

Opdrachten

Opdracht 1

Bereken met hoeveel meter de zeespiegel wereldwijd zal stijgen als

- De Groenlandse ijskap helemaal afsmelt.
- De Antarctische ijskappen helemaal afsmelten.

Gebruik voor je berekening de volgende gegevens:

- Volume ijs op Groenland = $2,9 \times 10^6 \text{ km}^3$
- Volume ijs op Antarctica = $24,7 \times 10^6 \text{ km}^3$
- Gemiddelde diepte van de oceanen = 3,8 km
- Totale oceaanoppervlak = $3,62 \times 10^8 \text{ km}^2$

Opdracht 2

Gebruik Bron 8.

Leg uit waarom

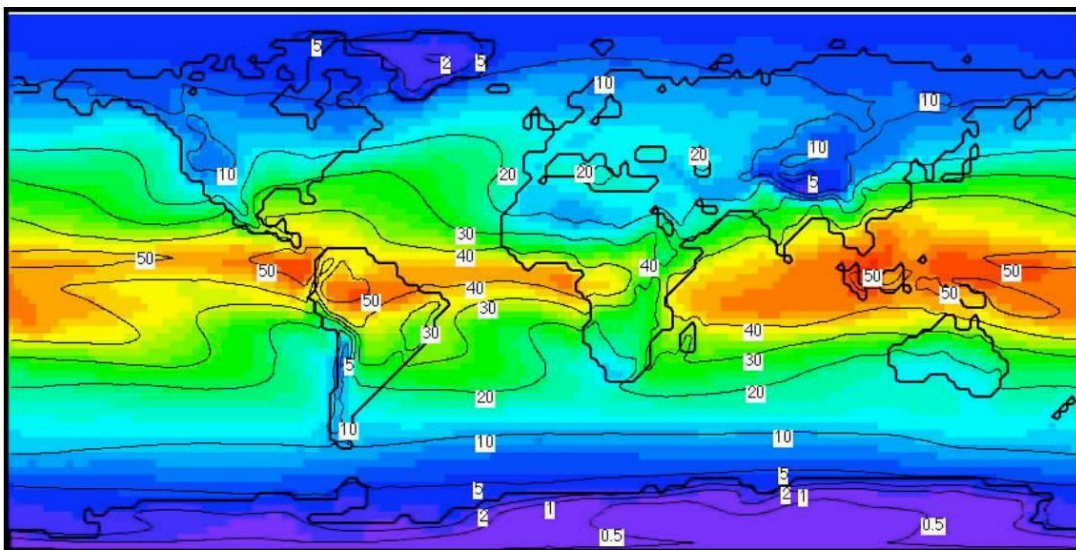
- de aardkorst in Canada en Scandinavië omhoog komt;
- de aardkorst in aangrenzende gebieden juist daalt.

De poolgebieden zijn gevoeliger voor klimaatverandering dan bijvoorbeeld gematigde of tropische gebieden. Dit heeft met een aantal factoren te maken. Allereerst is het land een groot deel van het jaar bedekt met sneeuw; als dat smelt zal het donkere land meer zonnestraling opnemen, waardoor de temperatuur verder stijgt (**albedo-temperatuur terugkoppeling**). In de poolgebieden is verder relatief weinig uitwisseling tussen de bovenlucht en de lucht aan het aardoppervlak, waardoor de laatste sneller kan opwarmen. De opwarming van de aarde is dan ook het sterkst in de poolgebieden. Dit kan een aantal belangrijke gevolgen hebben. Omdat bij een warmer klimaat veel zeeijs smelt zal er meer warmteafgifte van de oceaan aan de lucht plaatsvinden. Bovendien neemt een wateroppervlak, net als sneeuwvrij land, meer zonne-energie op dan een oppervlak dat bedekt is met zeeijs. Minder zeeijs betekent dus ook meer warmteopname en die warmte wordt weer verdeeld over een dunne luchtlag.

Hogere temperaturen leiden uiteraard tot meer smelt van ijs. Dit is vooral het geval op Groenland waar al een duidelijke ablatiezone is. Op Antarctica is het zo koud dat er weinig smelt optreedt, ook als de temperatuur iets stijgt. Smelt op Antarctica kan vrijwel alleen op het Antarctisch Schiereiland (de richting Zuid-Amerika uitstekende landpunt) plaatsvinden. De gemeten toename van de temperatuur is op Antarctica bovendien minder groot dan in het noordpoolgebied, en de zeeijsbedekking rondom Antarctica blijft vooralsnog stabiel. Waarschijnlijk heeft dit te maken met de

warmtecapaciteit en thermische isolatie door de enorme circumpolaire zeestromen op het zuidelijk halfrond.

Als de temperatuur van de lucht stijgt kan de lucht ook meer vocht bevatten, warme lucht kan immers meer vocht bevatten dan koude lucht. Hierdoor kan er bij een warmere atmosfeer meer neerslag vallen in de poolgebieden. Uit onderzoek is gebleken dat bij een temperatuurverandering van één graad Celsius de sneeuwval met ongeveer 5% toeneemt. Dat is niet genoeg om het smelten op Groenland te compenseren, maar het remt dat wel een beetje af. Op Antarctica zou meer sneeuwval in eerste instantie wel tot aangroei van het landijs kunnen leiden. Smelt speelt daar immers, met uitzondering van het Antarctisch Schiereiland, een relatief kleine rol. De grote onzekere factor in Antarctica is echter de stabiliteit van de ijsplaten aan de randen van het continent.



Bron 9: jaargemiddelde hoeveelheid vocht in de atmosfeer (in kg m^{-2}). In de koude poolgebieden kan de lucht veel minder vocht bevatten dan in de warme tropen.

Opdrachten

Opdracht 3

De huidige opwarming van de aarde is het sterkst merkbaar in het Noorpoolgebied. Geef met behulp van bovenstaande tekst aan

- welke drie factoren eraan bijdragen dat de opwarming juist daar merkbaar is.;
- op welke manier elk van deze factoren eraan bijdraagt dat juist daar klimaatverandering duidelijk merkbaar is.

Opdracht 4

Onderzoek naar klimaatverandering wordt gedaan door ijsboringen te analyseren. Leg uit dat door alleen te kijken naar de directe temperatuurmetingen van de afgelopen 150 jaar een onvoldoende compleet beeld ontstaat van klimaatverandering.

Bij het ijsverlies dat op Groenland optreedt, zijn twee terugkoppelingen van belang: de **hoogte-massabalans terugkoppeling** en de **albedo-massabalans terugkoppeling**.

Als een ijskap smelt zal de hoogte enerzijds afnemen, de ijskap wordt immers dunner, maar tegelijkertijd zal door de massa-afname de aardbodem omhoogkomen.

In het noorden van Zweden liggen plaatsen die honderd jaar geleden nog aan de Botnische Golf lagen en een haven hadden, nu kilometers verwijderd van het water. Hoe kan dit? Dat heeft alles te maken met het 'opveren' van Scandinavië. Gedurende de laatste ijstijd was Scandinavië bedekt door een dikke ijskap. Onder het gewicht van het ijs werd de aardkorst bij Scandinavië honderden meters naar beneden geduwd. Toen de ijskap tussen ongeveer 22.000 en 8.000 jaar geleden in zijn geheel afsmolt, nam de druk op de aardkorst af en sindsdien veert Scandinavië weer op. Je moet daarbij bedenken dat de aardkorst 'drijft' op het heet vloeibare gesteente (magma) in het binnenste van de aarde. Als de aardkorst onder het gewicht van een ijskap naar beneden wordt gedrukt, stroomt het magma op die plek weg. Is de druk verdwenen dan stroomt het magma weer terug. Dit proces speelt zich, zij het niet meer zo sterk als voorheen, nog steeds af. Langs de Botnische Golf ondervindt men het aan den lijve.

Ook op Antarctica en Groenland oefenen de kilometers dikke ijskappen druk uit op de onderliggende aardkorst. Deze aardkorst gedraagt zich elastisch en dus wordt bijvoorbeeld Groenland verder omlaag gedrukt als er meer ijs bijkomt en veert het wat op als er ijs smelt. Het huidige lokale opveren van de aardkorst door het smelten van ijs in de kuststreken van Groenland varieert van enkele tot meer dan 30 mm per jaar. Tegelijkertijd daalt het ijsoppervlak door smelt en versnellende gletsjers met enkele tot enkele tientallen centimeters per jaar, in sommige gevallen zelfs met enkele meters per jaar. De ijskap komt daardoor lager te liggen ten opzichte van NAP. Op geringere hoogte is het echter ook warmer, en hierdoor zal de smelt verder toenemen. Dit wordt de **hoogte-massabalans terugkoppeling** genoemd. Het is voor de smelt een positieve terugkoppeling. Dat houdt in dat dit proces het verdwijnen van een ijskap versnelt. Vanaf een bepaalde hoogtedaling kan de ijskap zich niet meer herstellen en zal in zijn geheel smelten: dit noemen we een *tipping point*.

Veldwerkopdracht Albedo**Go – No go**

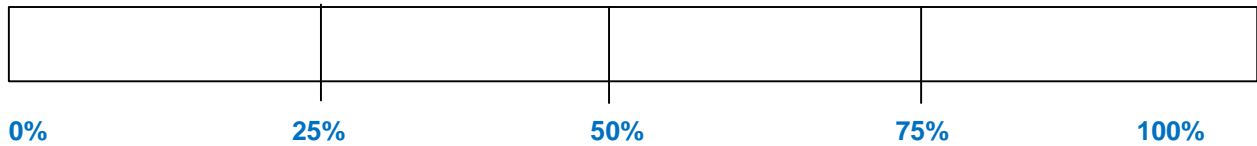
In deze opdracht ga je zelf het weerkaatsend vermogen van verschillende oppervlakken bepalen. Deze opdracht kun je niet op ieder gewenst moment doen. Je hebt er een albedometer voor nodig en die zal maar op een enkel moment in de klas aanwezig zijn. Je docent zal aangeven wanneer je deze opdracht gaat doen.

Zonnestraling die de aardse atmosfeer bereikt, wordt slechts voor een deel opgenomen. Er is ook een aanzienlijk deel dat door wolken of het aardoppervlak wordt terugkaatst. Dat deel wordt niet opgenomen maar weerkaatst naar de ruimte, en kan dus ook niet worden omgezet in warmte. Het **albedo** of weerkaatsend vermogen van de aarde is dan ook een belangrijke factor voor het klimaat op aarde. Het albedo is de verhouding tussen de zonnestraling die gereflecteerd wordt en de binnenkomende zonnestraling. Een oppervlakte-albedo van 0.7 betekent bijvoorbeeld dat 70% van de binnenkomende zonnestraling wordt gereflecteerd door het aardoppervlak. Slechts 30% van de zonnestraling wordt dan opgenomen door het aardoppervlak. Het albedo is afhankelijk van de kleur van het oppervlak, de ruwheid van het oppervlak (een glad oppervlak weerkaatst meer zonnestraling dan een ruw oppervlak) en de invalshoek waaronder de zonnestralen invallen. In deze opdracht onderzoeken we de invloed van de kleur van het aardoppervlak op het albedo.

- Meet met de albedometer het weerkaatsend vermogen van verschillende natuurlijke en niet-natuurlijke oppervlakken. Denk bijvoorbeeld aan gras, stoeptegels, aarde, water en asfalt. Vul je meetgegevens in, in onderstaande tabel.

Omschrijving van het oppervlak	Kleur van het oppervlak	Albedo (%)
gras		
water		
stoeptegels		

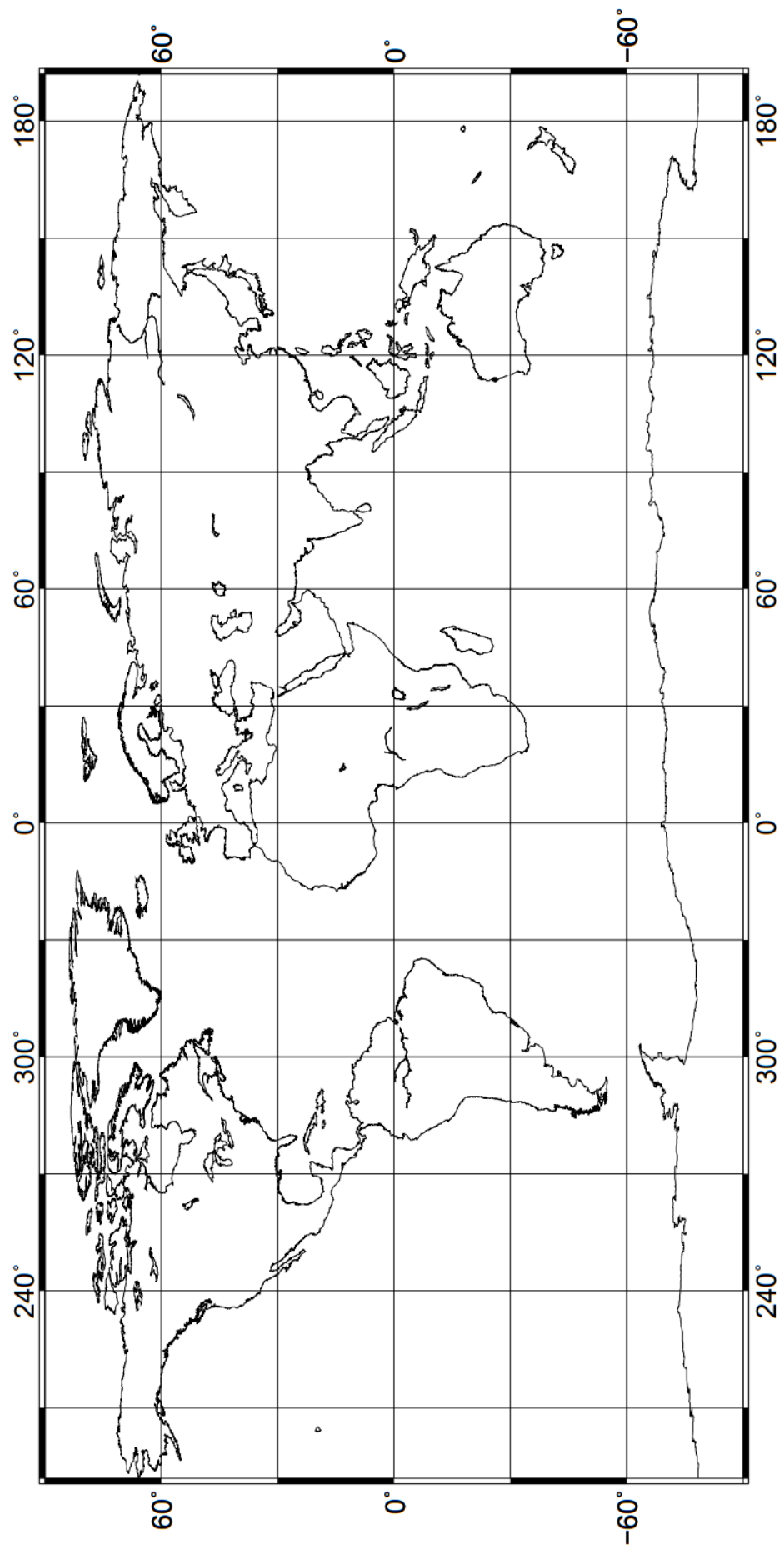
- Maak in onderstaande figuur een kleurenschaal. Geef daarbij aan welke kleuren er horen bij verschillende percentages weerkaatsend vermogen.



- Maak nu een wereldkaart van het albedo. Je kunt dat doen door de kaart oorspronkelijke plantengroei uit de Grote Bosatlas te gebruiken. Schat het albedo van de verschillende legenda-eenheden op deze kaart zo goed mogelijk met behulp van je eigen metingen. Gebruik de kaart op de volgende bladzijde voor je albedo-wereldkaart. Maak een legenda met oplopende kleuren.

Deze opdracht moet door je docent zijn goedgekeurd voordat je verder kunt werken in de module.





De hoogte-massabalans terugkoppeling is niet de enige terugkoppeling die actief is op Groenland. Sneeuw en ijs zijn witte oppervlakten. Deze reflecteren een groot deel (50-90%) van de binnenkomende zonnestraling. Deze zonnestraling wordt dan door het oppervlak van de ijskap niet opgenomen en kan ook niet worden omgezet in warmte of smelt. De mate van reflectie van een oppervlak wordt aangeduid als **albedo**. Sneeuw en ijs hebben een hoog albedo. Eerder al bespraken we dat als een deel van de sneeuw of het zeeijs smelt, de donkere ondergrond of zee die eerst door de sneeuw of het zeeijs bedekt was bloot komt te liggen. Deze ondergrond heeft een lager albedo. Meer zonnestraling zal dan opgenomen worden en omgezet worden in warmte. Ijskappen zijn honderden tot duizenden meters dik, dus de ondergrond komt daar niet zomaar tevoorschijn. Toch is de albedo-massabalans terugkoppeling ook voor ijskappen belangrijk. Als sneeuw smelt, neemt het albedo namelijk af, van ~ 0.85 voor droge verse sneeuw tot ~ 0.7 voor gesmolten sneeuw. Hierdoor verdubbelt de opname van zonnestraling en zal de smelt verder toenemen.

Ook de albedo-massabalans terugkoppeling is een voorbeeld van een positieve terugkoppeling. Het proces versterkt de ingezette verandering.

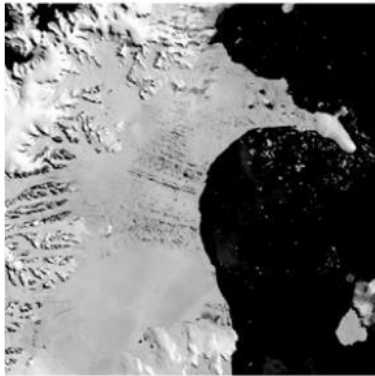
De twee genoemde positieve terugkoppelingen maken dat de Groenlandse ijskap zeer gevoelig is voor klimaatveranderingen. Met satellieten kan tegenwoordig nauwkeurig bepaald worden wat de hoogteveranderingen van de ijskappen zijn. Daaruit blijkt dat er duidelijk sprake is van ijsverlies, zowel op Groenland als Antarctica, maar de oorzaken van het massaverlies zijn voor beide ijskappen zeer verschillend. Ook willen we graag weten of het huidige massaverlies zal doorzetten of zelfs versnellen. Daarom worden er computermodellen gemaakt, die de werkelijkheid nabootsen. Als de uitkomsten van een model overeenkomen met de door satellieten gemeten veranderingen in de stroomsnelheid en hoogte van de ijskappen, kunnen we ervan uitgaan dat dit model ook bruikbaar is om verwachtingen op te stellen voor de toekomstige veranderingen. Voor het maken van een model is het weer nodig om veel wetenschappelijke kennis en meetgegevens te verzamelen over de ijskappen. Hieronder staat in het kort weergegeven wat de stand van zaken is met betrekking tot de kennis over de veranderingen in de massabalans in Antarctica en Groenland.

Op Antarctica vindt ijsverlies vooral plaats in West Antarctica en op het Antarctisch Schiereiland (zie Bron 7). Het schiereiland ligt het verst van de zuidpool verwijderd en er vindt smelt plaats aan het oppervlak. Het smeltwater dat smeltwatermeren vormt op de ijsplaten (zwarte vlekken in Bron 10) drukt door zijn gewicht (denk aan de conclusies bij de startopdracht) scheuren in het ijs steeds verder uit elkaar. Hierdoor kunnen ijsplaten uiteindelijk geheel doorgekliefd worden en breekt de gehele ijsplaat in korte tijd op. Een duidelijk geval van een *tipping point* dat wordt overschreden!

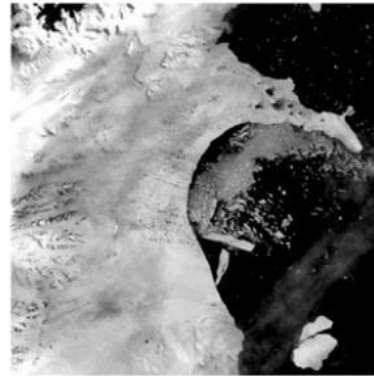
Daarnaast is er vooral in West Antarctica sprake van *basal melt*: de ijsplaat smelt aan de onderzijde en wordt dunner. Het dunner worden of opbreken kan de stroomsnelheid van gletsjers op het vasteland verhogen, omdat die minder of geen

weerstand van de ijsplaat meer voelen. Voor de rest van Antarctica geldt dat het er dermate koud is, dat oppervlaktesmelt vrijwel geen rol speelt en dat er door een toename van de sneeuwval zelfs extra accumulatie zou kunnen optreden. Het afsmelten van de hele Antarctische ijskap lijkt niet aan de orde te zijn, alhoewel er recent signalen zijn dat ook in Oost Antarctica gletsjers sneller zijn gaan stromen en dunner worden, net als in West Antarctica.

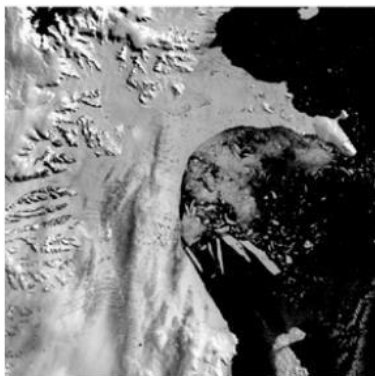
31 Jan. 2002



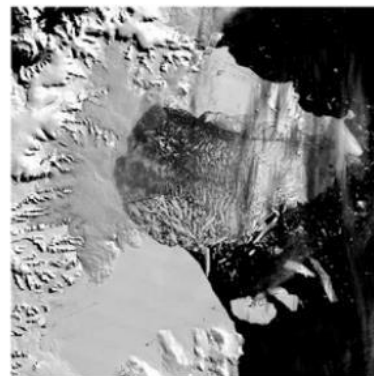
17 Feb. 2002



23 Feb. 2002



5 Mar. 2002



Bron 10: Het opbreken van de ijsplaat Larsen B in 2002 in vier fasen. Deze ijsplaat lag vast aan het Antarctisch Schiereiland. In de opname is te zien dat de ijsplaat precies daar afbrak waar zich smeltwatermeren op het ijs bevonden. Bron NSIDC.

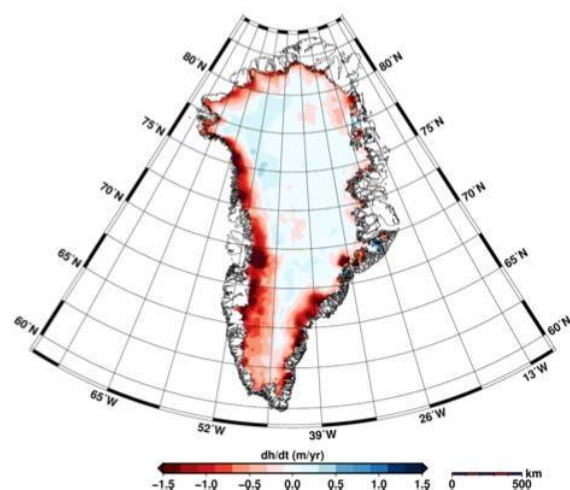
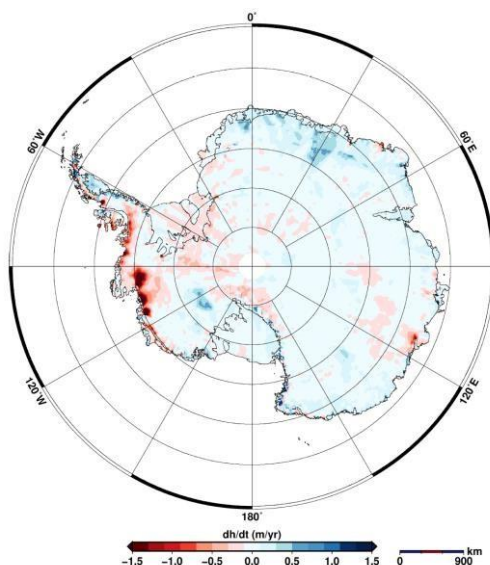
De Groenlandse ijskap smelt vooral vanaf de bovenkant. Het water stroomt vervolgens snel naar de bodem van de ijskap, honderden meters tot kilometers beneden het oppervlak. Dit gebeurt via verticale kanalen of **moulins** in het ijs. Het grote aanbod van smeltwater heeft geleid tot complete smeltwaterrivieren, smeltwatermeren en **subglaciale meren** (smeltwatermeren onder het ijs). Het smeltwater dat de bodem van het ijs bereikt, werkt als smeermiddel. De stroomsnelheid van het ijs neemt er tijdelijk door toe.



Bron 11: Moulins op Groenland, bron: R. Braithwaite en <http://antarcticsun.usap.gov> Bekijk de volgende visualisatie om een nog beter beeld te krijgen van een moulin: http://www.nytimes.com/interactive/2015/10/27/world/greenland-is-meltingaway.html?_r=1

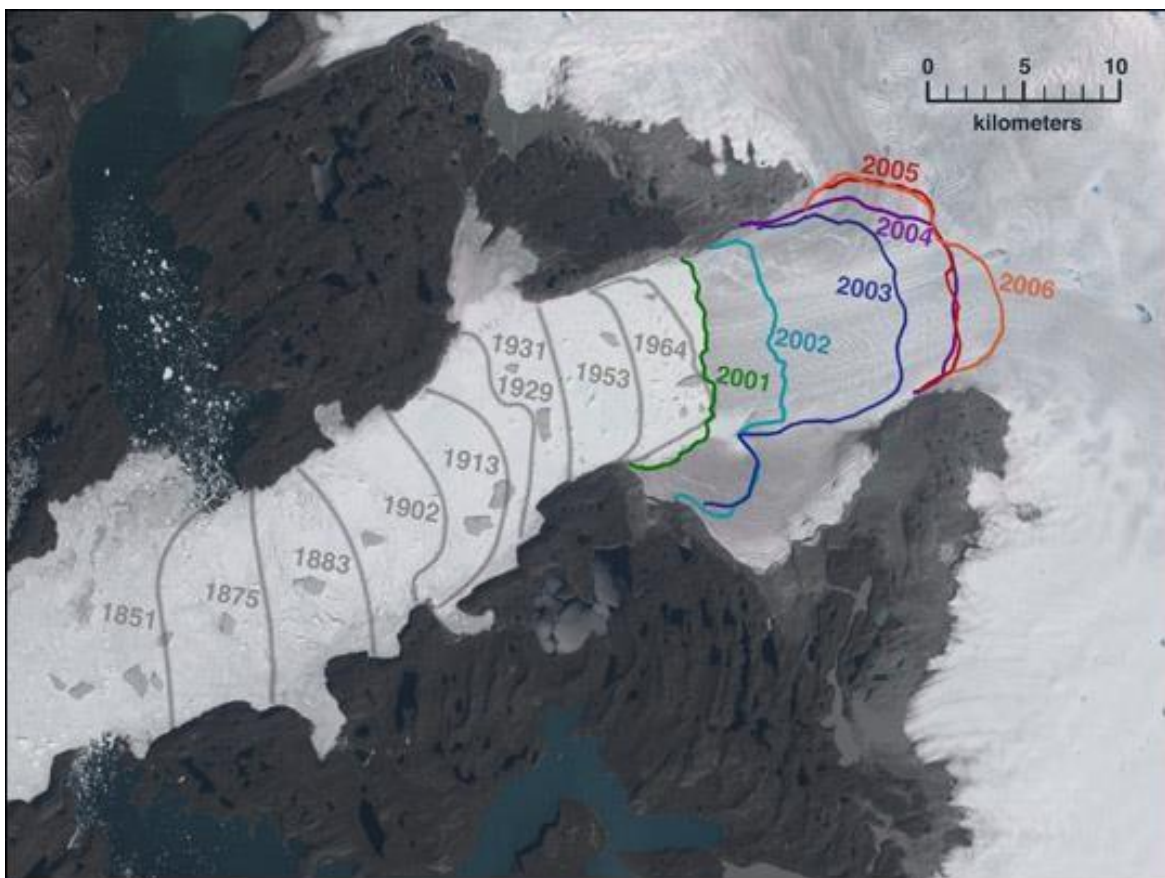
Je zou verwachten dat steeds meer smeltwater leidt tot steeds hogere stroomsnelheden. Als het smeltwater echter eenmaal 'tunnels' onder het ijs heeft gevormd, kan het relatief snel uit de ijskap stromen. Het smeermiddel is dan verdwenen.

Het smeltwater heeft nog wel een belangrijk gevolg: als het water wegzakt in de firnlaag, kan het op enige diepte opnieuw gaan bevriezen. Hierbij komt veel warmte vrij. De temperatuur van de firn zal er door toenemen, waardoor het smeltwater dat in het volgende zomerseizoen wordt geproduceerd niet meer herbeviest en naar de zee wegstroomt. Ook hier is dus sprake van een (positieve) terugkoppeling.



Bron 12: Door CryoSat-2 gemeten hoogteveranderingen in m per jaar (2010-2014) met de grenzen van ijsbassins (stroomgebieden). Bron: The Cryosphere (2014) .

Nauwkeurige hoogtemetingen van de CryoSat-2-satelliet tonen het beeld zoals te zien is in Bron 12. De veranderingen zijn behoorlijk, vooral op de Groenlandse ijskap, maar wanneer het *tipping point* van de ijskap precies bereikt wordt blijft lastig vast te stellen. Wellicht zijn we het *tipping point* zelfs inmiddels gepasseerd. In dat geval moeten we ons gaan voorbereiden op een zeespiegelstijging die wel zeven meter kan bedragen, maar dit zal wel enkele duizenden jaren duren. De hoogteveranderingen in West Antarctica zijn niet veroorzaakt door smelt aan het oppervlak, daarvoor is de temperatuur te laag. Warm oceaanwater smelt de ijsplaten van onder, waardoor de gletsjers sneller gaan stromen. Hierdoor worden ze uitgerekt, en daalt het oppervlak. Dat dit precies hier gebeurt is geen toeval. De rotsbodem waarop de ijskap van West Antarctica rust ligt beneden zeeniveau, tot wel enkele kilometers. Als de ijskap zich door opwarmend oceaanwater eenmaal gaat terugtrekken, zijn er dus geen hoogvlakten waarnaar het ijs zich kan terugtrekken en komt steeds meer ijs in contact met de warme oceaan. Alhoewel er nog geen zekerheid over bestaat, heeft het er alle schijn van dat dit *tipping point* inmiddels is gepasseerd; als gevolg hiervan is het waarschijnlijk dat gedurende de komende eeuwen een groot deel van de ijskap van West Antarctica zal smelten, wat zal leiden tot een zeespiegelstijging van ongeveer drie meter.



Bron 13: Het terugtrekken van de Jakobshavn gletsjer in het westen van Groenland sinds 1851.

Bron: NASA

Opdrachten

Opdracht 5

Geef een verklaring voor de verschillen in de gemeten hoogteveranderingen op de Groenlandse ijskap in Bron 12.

Opdracht 6

In bovenstaande tekst worden verschillende terugkoppelingen beschreven. Geef deze terugkoppelingen schematisch weer. Doe dit bijvoorbeeld in de vorm van een eenvoudige *mindmap*, waarbij je de massabalans van de ijskap centraal stelt.

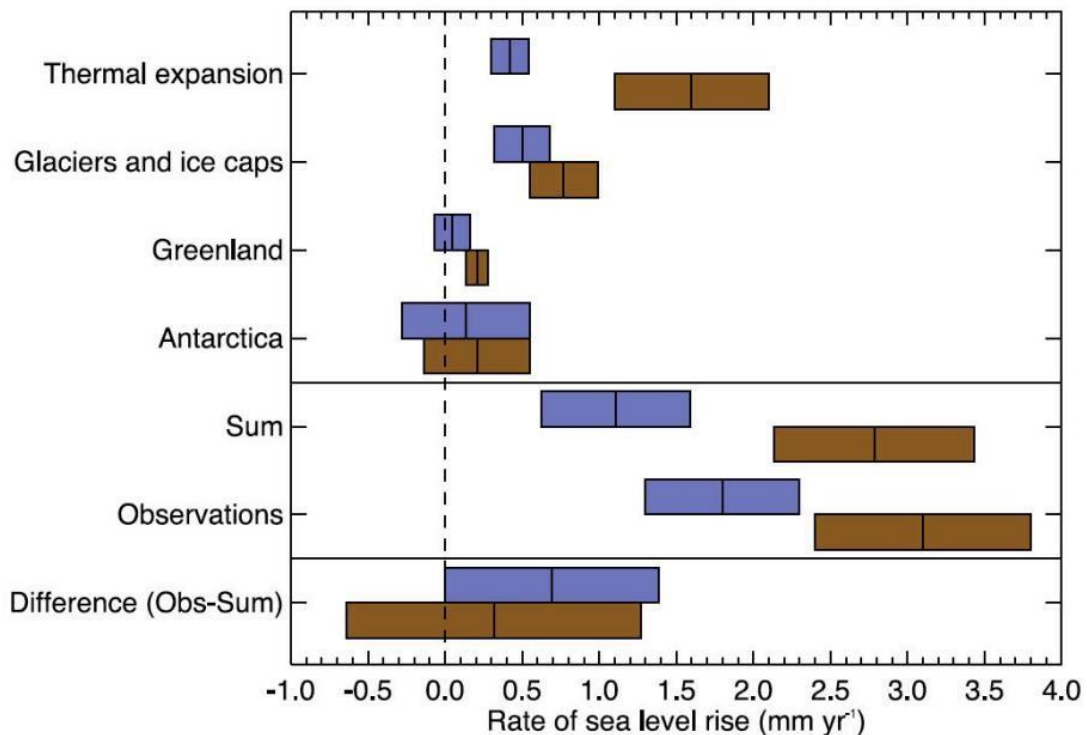
Opdracht 7

Stel op basis van de bovenstaande teksten en bronnen zelf een massabalans op voor de Antarctische ijskappen. Doe dit door aan te geven op welke manieren er aangroei en verlies van ijs plaatsvinden.

Stel ook een massabalans op voor de Groenlandse ijskap.

Opdracht 8

Bekijk het 5-minutendurende filmpje 'Smelt de Groenlandse ijskap?' van Tipping Point Ahead. Wat berekent het model van Sharon? En waarom probeert ze het verleden na te bootsen?



Bron 14 : Zeespiegelstijging onderverdeeld naar bron van herkomst. Blauw is de periode 1965-1993, bruin de periode 1993-2003. Bron IPCC (2007).

Zeespiegelstijging

Hoewel de grote ijskappen een zeespiegelstijging van vele meters kunnen veroorzaken, zijn zij zeker niet de enige veroorzakers van deze stijging. Hogere watertemperaturen leiden tot het uitzetten van het zeewater. Deze thermische expansie is in de recente zeespiegelstijgingen de grootste factor. Ook ijsverlies in vergletsjerde gebieden buiten Antarctica en Groenland, bijvoorbeeld in de Himalaya of de Alpen, draagt bij aan zeespiegelstijging. Ook het oppompen van drinkwater uit de bodem draagt bij aan zeespiegelstijging. Dit water was in de ondergrond voor lange tijd opgeborgen, maar komt na het oppompen versneld in de oceanen.

Uit de startopdracht weten we al dat het verdwijnen van zeeijs niet direct leidt tot een zeespiegelstijging. Indirect is hier echter wel sprake van omdat minder zeeijs, een lager albedo, en dus meer opname van zonnestraling betekent. De volgende animatie geeft een indruk van de verandering van het oppervlak zeeijs in het Noordpoolgebied:

http://assets.climatecentral.org/images/uploads/news/10_21_15_Brian_SealceAnimation.gif

De bijdrage van Antarctica en Groenland aan de zeespiegelstijging neemt toe. De zeespiegel stijgt al sinds ongeveer 1850. In de twintigste eeuw bedroeg de stijging ongeveer 12 centimeter. Op dit moment lijkt de stijging steeds sneller te gaan. Vrijwel alle wetenschappers zijn het erover eens dat dit te maken heeft met menselijk handelen. Een projectie van het IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) gaat uit van een zeespiegelstijging van maximaal ongeveer 1 meter in 2100. Dat lijkt weinig, maar het kan grote gevolgen hebben in de vele dichtbevolkte kustgebieden. De aarde heeft echter al eerder perioden meegemaakt met hoge zeespiegelstanden. In het Krijt (135-65 miljoen jaar geleden) stond de zeespiegel door ijssmelt, sedimentatie en een lichtere oceaankorst wel 200 meter hoger dan tegenwoordig en stonden grote delen van de continenten onder water. Niets nieuws dus voor het systeem aarde. Dat overleeft de zeespiegelstijging wel. Mensen zijn wel kwetsbaar, vooral omdat honderden miljoenen van ons afhankelijk zijn van laaggelegen vruchtbare kust- en deltagebieden.

Vaak wordt een onderscheid gemaakt tussen absolute en relatieve zeespiegelstijging. Absolute zeespiegelstijging is de stijging gemeten ten opzichte van een vast referentiepunt, bijvoorbeeld NAP. Relatieve zeespiegelstijging neemt ook de bodembeweging in de kustgebieden mee. In Nederland vindt in de veen- en kleigebieden bij de kust bodemdaling plaats. De relatieve zeespiegelstijging is in ons land daardoor nog groter dan de absolute zeespiegelstijging.

Een infographic maken**Go-No Go**

Visualisering van data is tegenwoordig heel belangrijk. Een mooie manier om veel data op een compacte en overzichtelijke manier weer te geven is een *infographic*. In deze opdracht ga je een *infographic* maken over één van de onderdelen van deze module. Dat kan bijvoorbeeld de Groenlandse of West-Antarctische ijskap of een onderdeel daarvan zijn, maar je kunt ook voor het thema zeespiegelstijging kiezen.

Het maken van een *infographic* is niet eenvoudig en wordt vaak uitbesteed aan professionele designers. Dat doen we hier niet. Er zijn een aantal gratis tools beschikbaar waarmee je zelf een *infographic* kunt maken. Hieronder volgen een aantal tips:

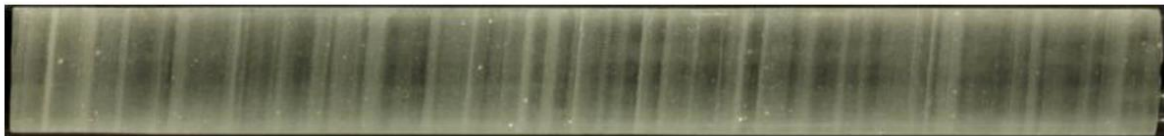
- Denk goed na over het thema dat je in een *infographic* gaat uitwerken (het moet niet te 'smal' zijn, maar ook niet allesomvattend).
- Leef je in in de doelgroep voor wie je de *infographic* maakt. In dit geval houden we het simpel. De doelgroep is een bovenbouw vwo-leerling.
- Begin niet meteen aan het eindproduct, maar maak eerst schetsen van de opbouw van je *infographic* en selecteer de data die je wilt weergeven en de manier waarop je dat wilt doen (welk type grafiek of tabel maak je).
- Realiseer je dat je niet alles in één enkele *infographic* kunt weergeven. Je kunt het beste 'pakkende' informatie nemen. Lezers die meer willen weten kun je doorverwijzen naar bijvoorbeeld een website als die van het NESSC of www.tippingpointsahead.nl.
- Ben terughoudend in kleurgebruik. Als standaard wordt vaak genoemd twee kleuren (waarvan je dan eventueel verschillende tinten kunt gebruiken). Te veel kleuren maakt je *infographic* onoverzichtelijk en schreeuwerig.
- Vraag anderen om je tijdens het proces enkele keren feedback te geven. Juist mensen die niet bekend zijn met het onderwerp geven vaak de beste feedback.

Bruikbare online tools zijn bijvoorbeeld: *Piktochart*, *Ease.ly*, *Google charts*, *Vennage*, *infogr.am*, of *infoactive*. Voor de meeste tools moet je je eerst als gebruiker registreren. Daarna kun je gebruiken van templates en de basishandelingen. Als je meer mogelijkheden wil, moet je vaak een vast maandbedrag betalen. Kies niet voor die optie. Voor deze opdracht is de premium versie niet nodig.

Deze opdracht moet door je docent zijn goedgekeurd voordat je verder kunt werken in deze module.

Hoofdstuk 4: Landijs als klimaatarchief

Ijskappen bestaan uit laagjes van sneeuw, firn en gletsjerijs. Elk jaar komt er een nieuw laagje bij. Een boring in een ijskap laat dan ook een grote hoeveelheid opeenvolgende laagjes zien (zie Bron 15). De gelaagdheid ontstaat door een verschil in dichtheid tussen de zomer- en de wintersneeuw. Net als bij boomringen kan in het ijs jaar voor jaar teruggeteld worden. Er zijn enkele zeer diepe boringen gedaan (de Vostok ijskernboring op Antarctica is 3.623 meter diep, de GISP2 ijskernboring op Groenland is 3.053 meter diep en is door het hele ijspakket heen geboord) waarbij zeer oud ijs is opgeboord. Het oudst opgeboorde ijs uit Antarctica is 860.000 jaar oud, dat op Groenland 123.000 jaar. De ijskernen bieden buitengewoon veel informatie over het klimaat in het verleden.

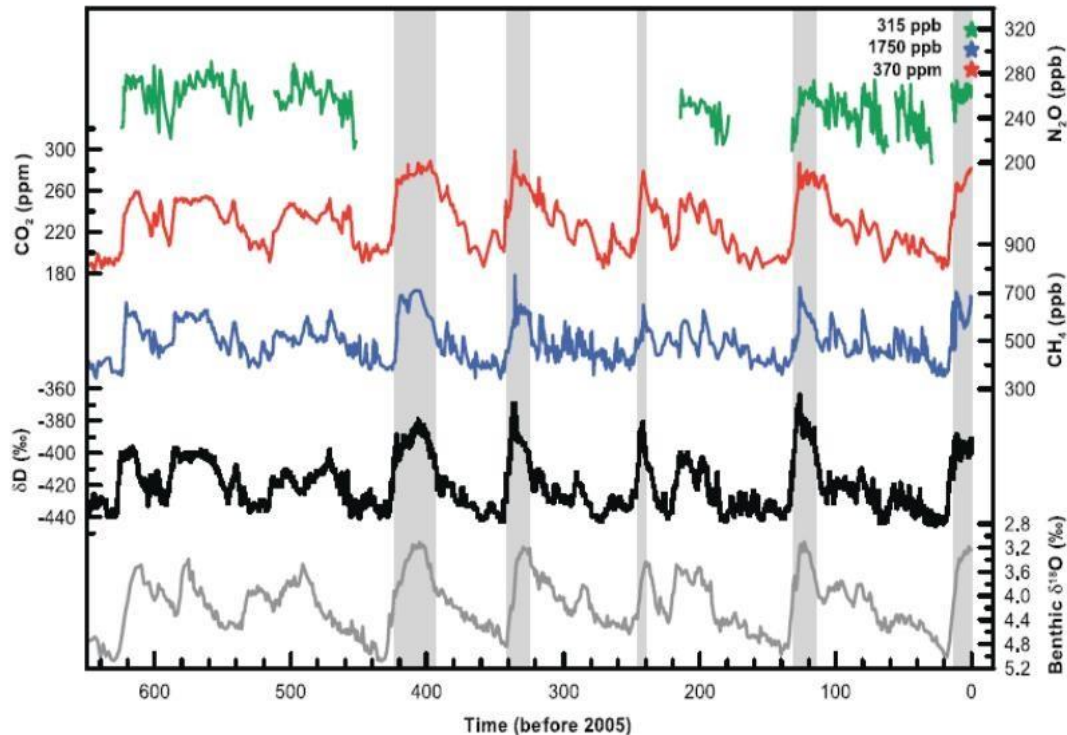


Bron 15: Een deel van een ijskern (GISP2 op Groenland tussen 1.837 en 1.838 meter diepte). Met een boor wordt een cilindervormig stuk ijs met een diameter van ongeveer 10 cm naar de oppervlakte gehaald. Als deze dwars wordt doorgesneden zijn de lijnen te zien die de verschillende jaren markeren. Bron: National Ice Core Laboratory, USGS.

In het gletsjerijs is lucht opgesloten. Deze lucht is iets minder oud dan de ijskristallen waarin ze opgesloten zit. De luchtbellens werden pas afgesloten van de atmosfeer op het moment dat firn overging in gletsjerijs (zie Hoofdstuk 1). De luchtbellens kunnen nauwkeurig geanalyseerd worden op bijvoorbeeld het gehalte CO₂, N₂O en CH₄. Op verschillende diepten in het ijs, blijkt het gehalte aan deze gasen heel anders te zijn.

De sneeuw waaruit de ijskappen zijn gevormd, is grotendeels afkomstig van de oceaan. Zuurstof en waterstof bestaan in verschillende stabiele isotopen. Voor zuurstof zijn dit ¹⁶O, ¹⁷O, ¹⁸O. Een zuurstofatoom bevat in de kern altijd 8 protonen, maar het aantal neutronen kan variëren. Het massagetal geeft de som van het aantal protonen en neutronen weer. Op verschillende diepten in het ijs blijkt de verhouding tussen de isotopen anders te zijn. De zware isotopen verdampen minder snel uit de oceaan dan de lichte. In de atmosfeer bevinden zich dus meer lichte isotopen. Op het moment dat de lucht vanaf de oceaan richting de ijskap wordt getransporteerd treedt er voortdurend afkoeling en condensatie op, eerst vooral van de zware isotopen. Richting de ijskap wordt het aandeel lichte isotopen in de waterdamp in de lucht daardoor steeds groter. De isotopenverhouding wordt vastgelegd in het ijs als de sneeuw op een ijskap valt. Als er sprake is van een koude periode zullen er weinig zware en veel lichte isotopen worden vastgelegd. In een minder koude periode zullen er meer zware en wat minder lichte isotopen worden vastgelegd. Voor waterstof (daarvan bestaan twee stabiele isotopen: ¹H en

^2H) geldt iets soortgelijks. De maat die gebruikt wordt om deze verhoudingen aan te geven is de δ -waarde. Deze waarde is een maat voor het verschil in temperatuur tussen de oceaan (het brongebied) en het poolgebied. Nauwkeurige bepalingen van de δ -waarde in de jaarlagen van het ijs hebben temperatuurgrafieken van het verleden opgeleverd.



Bron 16: Reconstructie van de gehalten aan een aantal gassen en de δ -waarden voor waterstof (δD) en zuurstof ($\delta^{18}\text{O}$) uit een ijskern op Antarctica tot 650.000 jaar geleden. De grafieken vertonen veel overeenkomsten. De lage waarden geven ijstijden aan, de hoge waarden tussen-ijstijden. Bron: www.ipcc.ch

De isotopische samenstelling van het water in ijskernen is op deze manier een indicator van de temperatuur in het verleden. Dit wordt ook wel een *proxy* genoemd. Omdat de directe weermetingen slechts zo'n 150 jaar terug in de tijd gaan, zijn we voor het ontdekken van de grote schommelingen in het klimaat in het verleden aangewezen op *proxy's* als deze. De temperatuur is als het ware gearcheveerd in het ijs. De analyses laten een opeenvolging van ijstijden zien, afgewisseld met kortere tussen-ijstijden. Tijdens de ijstijden was het niet constant koud, maar traden juist grote variaties in temperatuur op. De temperatuur in Groenland kon gedurende de laatste ijstijd in een tijdbestek van maar 10-50 jaar met wel tien graden stijgen. Uit de analyses blijkt ook dat de laatste ijstijd (het Weichselien) zeer abrupt eindigde.

Opdrachten

Opdracht 1

Voor diepe ijsboringen worden bij voorkeur locaties midden op ijskappen uitgezocht. Geef drie voordelen die deze locaties bieden boven locaties meer aan de rand van de ijskappen.

Opdracht 2

Maak een schematische tekening waarmee je uitlegt hoe de verschillen in isotopensamenstelling ontstaan in een ijstijd en een tussen-ijstijd. Doe daarvoor het volgende:

- Teken links de oceaan en rechts een ijskap voor een ijstijd-situatie.
- Geef aan op welke manier de isotopenverhouding verandert als lucht stroomt van de oceaan richting de ijskap.
- Doe hetzelfde nog eens alleen dan voor een tussenijstijd-situatie.

Hoofdstuk 5: de eindopdracht

De eindopdracht van deze module luidt als volgt: maak een korte documentaire over het *tipping point* van de gletsjers in het Antarctisch Schiereiland of de ijskappen van West Antarctica of Groenland. Je maakt deze opdracht in een groep van 3 of 4 leerlingen.

Een goede documentaire maak je natuurlijk niet zomaar. Daar komt heel wat bij kijken. Allereerst moet je je natuurlijk goed verdiept hebben in het onderwerp. Als je deze module tot zover hebt doorgewerkt, weet je waarschijnlijk al heel wat van de massabalans van een ijskap en de terugkoppelingen die daarbij belangrijk zijn. Als je je inhoudelijk nog verder wilt verdiepen in de ijskap voordat je aan de documentaire gaat beginnen kan dat natuurlijk. Er is een selectie gemaakt van toegankelijke (populair) wetenschappelijke artikelen over het vele onderzoek dat wordt gedaan naar de ijskappen. Eén bron vermelden we hier alvast: het IPCC rapport uit 2013 (www.ipcc.ch). Het is ook mogelijk om een vraag te stellen aan één van de onderzoekers die voor NESSC onderzoek doen naar en op Groenland (www.tippingpointahead.nl).

Een goede documentaire heeft naast een goede inhoud ook een goede opbouw. Je moet dan ook niet zomaar beginnen met filmen, maar eerst een scenario schrijven. Dit scenario is zo'n belangrijk onderdeel in het maken van een documentaire dat je het samen met de eindopdracht moet inleveren.

Hieronder worden een aantal tips gegeven voor het schrijven van een scenario en het maken van een film.

- Stel vast welke doelgroep je voor ogen hebt. Dit bepaalt in belangrijke mate ook de toon van de film (serieus, grappig, emotioneel).
- Bedenk een presentatiewijze. Is er een presentator/verteller, maak je gebruik van een voice-over, gebruik je (compilaties van) interviews of toon je alleen tekst in beeld.
- Maak een opbouw in je verhaal. Je hebt doorgaans een inleiding, een verdiepend middendeel en een meer beschouwend afsluitend deel nodig. Probeer daarbij zoveel mogelijk visueel te denken. Vraag je zelf steeds af hoe het er op een televisiescherm uit komt te zien. Je verhaal wint aan kracht als er bijvoorbeeld een duidelijke centrale boodschap in naar voren komt of als er meerdere verhaallijnen elkaar 'kruisen'.
- Zorg daarna voor een opbouw van de film. Een film bestaat uit meerdere scènes. Een scène is een stukje van een film dat op één plaats en op één moment plaatsvindt en in principe met één camera opgenomen kan worden. Een aantal scènes die samen een afgebakend deel van het verhaal vertellen vormen samen een sequentie.

- Bedenk waar en hoe je de scènes wil filmen. Je kunt locaties bezoeken, maar het is natuurlijk ook mogelijk om een deel van een film vanaf een computerscherm te maken. Filmen op een ijskap behoort niet tot je mogelijkheden. Wees dus creatief in de keuze van je locaties.
- Je doet deze opdracht samen met twee of drie medeleerlingen. Werk goed samen en benut elkaars sterke punten. Durf in het proces ook kritisch naar elkaar te zijn. Accepteer feedback op je eigen werk en geef het ook zo goed mogelijk onderbouwd aan de anderen. Dat levert vaak het beste eindresultaat op.

Bronnenlijst:

- www.tippingpointahead.nl
- <http://www.ipcc.ch/>
- <http://geographical.co.uk/nature/climate/item/1337-could-the-day-after tomorrow-happen>
- <http://www.theguardian.com/environment/2015/oct/14/antarctic-ice-sheetsface-catastrophic-collapse-without-deep-emissions>
- <http://www.kennislink.nl/publicaties/de-ijskappen-smelten-echt>
- <http://www.kennislink.nl/publicaties/zeespiegel-rondom-zuidpool-stijgt-als-ijskap-groeit>

Beoordeling

Beoordelings model	Module:	Namen:					
Onderdeel	Te denken valt aan	score					
Het proces richting het eindproduct	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zijn de opdrachten gemaakt? ▪ Is er geconcentreerd gewerkt? ▪ Is er goed samengewerkt? ▪ In welke mate werd de module zelfstandig doorlopen? 	2	4	8	12	16	20
Infographic	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Is er een data-analyse aan voorafgegaan? ▪ Is de infographic overzichtelijk? ▪ Wordt er in de juiste mate (niet te veel en niet te weinig) gebruik gemaakt van tekst en cijfers? ▪ Is de infographic visueel aantrekkelijk? ▪ Wordt er op een juiste manier gebruik gemaakt van kaart/dwarsdoorsnede/grafiek 	2	4	8	12	16	20
Veldwerk	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Wat is de kwaliteit van de metingen? ▪ Is het kleurenschema en de kaart (met legenda) inhoudelijk juist. 	2	4	8	12	16	20
Eindproduct	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Is er een scenario opgesteld met scènes en sequenties? ▪ Vertelt de documentaire een duidelijk verhaal met opbouw? ▪ Is er voldoende research gedaan? (uit de module en uit andere bronnen) ▪ Is de documentaire inhoudelijk juist? ▪ Sluit de documentaire aan bij de doelgroep? ▪ Is de documentaire aansprekend? 	4	8	16	24	32	40
TOTAALSCORE							
Feedback beoordelaar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ ▪ 						
Feedback peerbeoordelaar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ ▪ 						
Leerpunten van de leerling zelf	<ul style="list-style-type: none"> ▪ ▪ 						

