



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

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

## 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 Infographic maken  ▶ Verwerkingsopdrachten + infographic
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)	

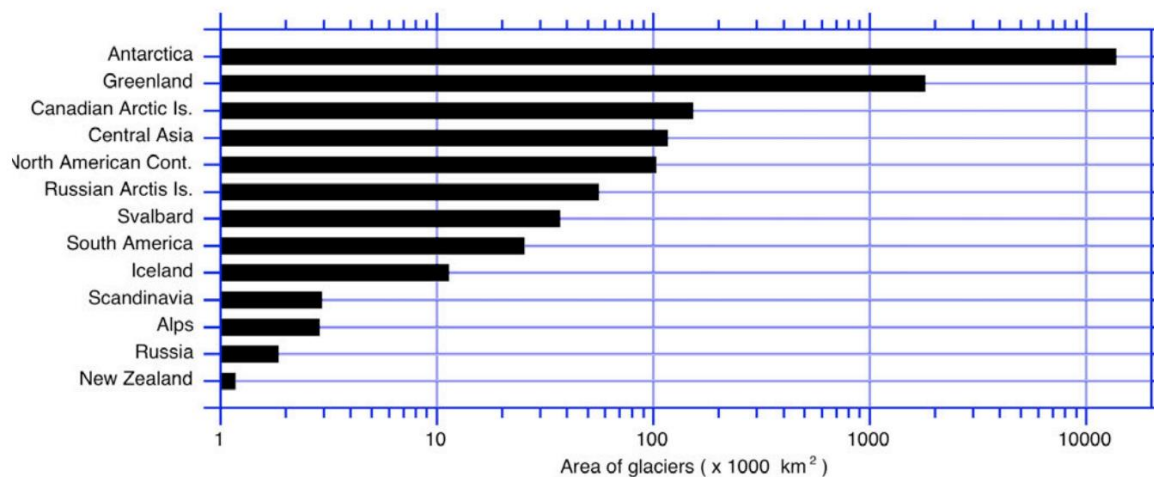
Trek op basis van dit experiment conclusies met betrekking tot

- 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 km<sup>2</sup> (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 km<sup>3</sup> 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

sneeuwkristallen. Wel 90% van de sneeuw kan bestaan uit lucht. Een sneeuwlaag werkt door de ingevangen lucht isolerend, vergelijkbaar met een vacht of verendek.

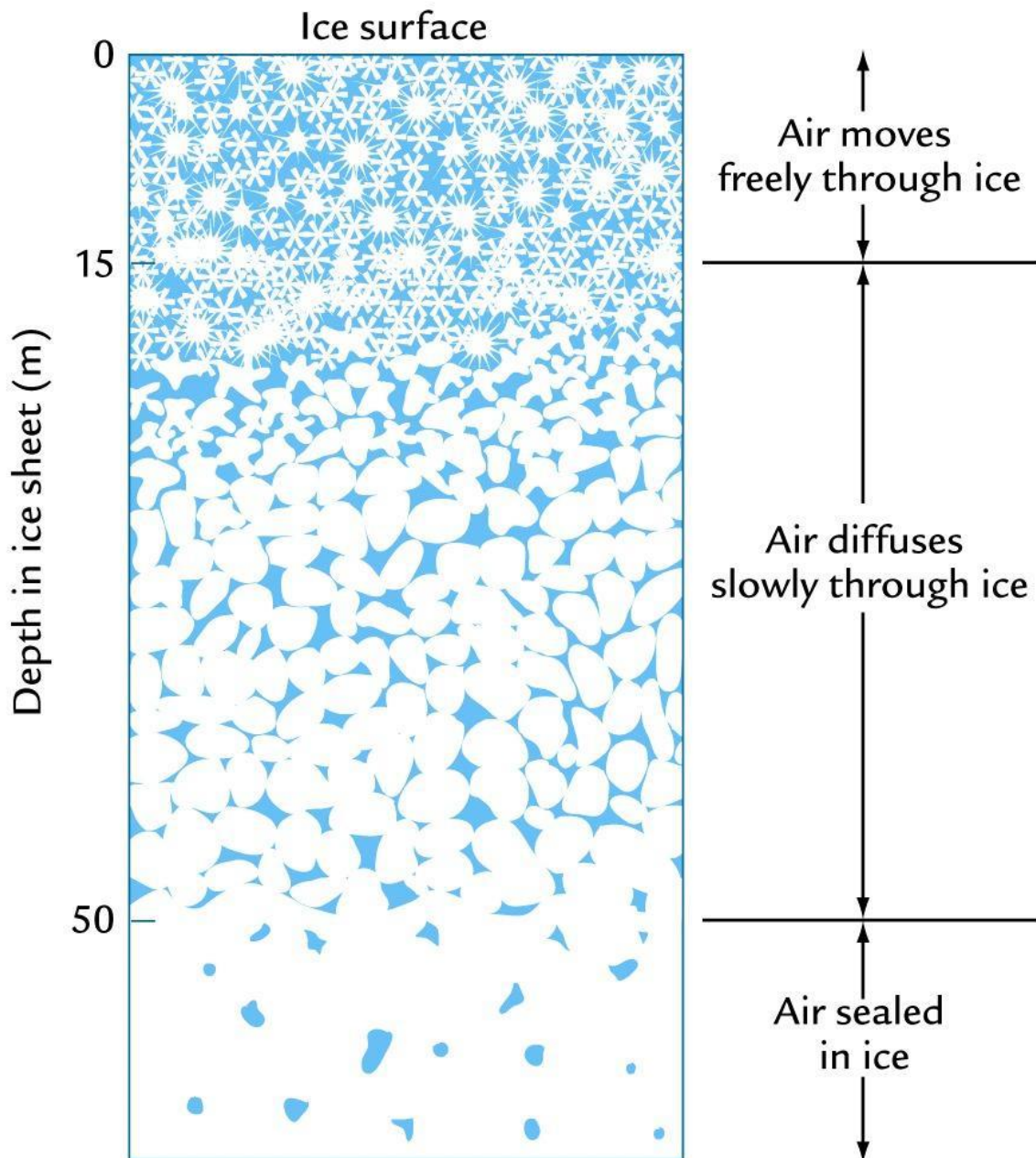
De meeste sneeuw die op aarde valt, smelt in de zomer weer snel. Alleen op grote hoogte én op hoge breedten kan sneeuw ook tijdens het zomerseizoen blijven liggen. De sneeuwlaag kan dan van jaar tot jaar aangroeien. Onder invloed van het eigen gewicht van de sneeuw en de groei van de sneeuwkristallen 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<sup>3</sup> tot de maximale dichtheid van 900 kg/m<sup>3</sup> 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 dichterbij 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 firn en gletsjerijs. In gletsjerijs zijn luchtbelletjes ingesloten.*

*Bron: <http://www.atmosedu.com>*

## 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 weggedreven 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 de bovenkant 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 is de omvang van Groenland en Antarctica sterk overdreven ingetekend. Via <http://thetruesize.com> kun je een 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 lage breedte een omvang heeft vergelijkbaar met Groenland;
- welk land op lage 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.