

**De keerzijde  
van ons klimaat**

**De keerzijde van ons klimaat**



# De keerzijde van ons klimaat

# De keerzijde van ons klimaat



Ministerie van Verkeer en Waterstaat

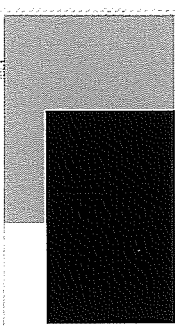
Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ

Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling/RIZA



**IMAU**

Instituut voor Marien en Atmosferisch Onderzoek (Universiteit Utrecht)



- 1. Inleiding 4**
- 2. Wat is klimaatverandering? 5**
  - Het klimaatsysteem 5
  - De broeikasproblematiek 6
  - Natuurlijke variabiliteit in het klimaat 7
- 3. Veranderingen in het verleden 8**
  - Temperatuur 8
  - Afvoeren 8
  - Zeespiegelstijging 10
  - Getijverandering 14
  - Stormen en stormvloedden 15
- 4. Verwachtingen voor de toekomst 17**
  - Het IPCC 17
  - Modellen 17
  - Temperatuur 18
  - Afvoeren 19
  - Zeespiegelstijging 21
  - Onzekerheden zeespiegelstijging 23
  - Getijverandering 24
  - Windkracht en windrichting 25
  - Stormen en stormvloedden 26
- 5. Implicaties voor het beleid 27**
  - Luctor et emergo 27
  - Wet op de waterkering 28
  - Het rivierengebied 29
  - Rivierbeheer - integrale aanpak 30
  - Ruimte voor de rivier 31
  - 'No-regret' maatregelen 31
  - Het zandige kuststelsel 32
  - Planologische reserveringen 32
  - Toekomstig onderzoek en beleid 33

# Inleiding

'... En de weersverwachting voor de komende eeuw is: hogere temperaturen afgewisseld met nattere perioden. Op de meeste plaatsen worden verhogingen van de waterstanden verwacht ...'

De kans dat Erwin Krol dit ooit in zijn weerpraatje zal zeggen, is nihil. Toch is bovenstaande voorspelling niet eens zo ver verwijderd van een wetenschappelijk onderbouwde langetermijnverwachting. Dat het klimaat verandert, staat vast. Dat dit de kust- en riviergebieden van Nederland niet onveranderd zal laten, is evenmin een kwestie van koffiedik kijken. Zo kwetsbaar als het land altijd al is geweest, kunnen zeespiegelstijging, veranderingen in afvoerregimes en verandering van de stormintensiteit de kans op overstroming alleen maar doen toenemen. Nederland zou het wel eens zwaar te verduren kunnen krijgen. Zekerheid hierover hebben we alleen niet. Het klimaat verandert, maar hoe het precies zal veranderen, blijft ondanks alle mogelijke berekeningen onvoorspelbaar. Juist daarom moeten we op alles zijn voorbereid.

Uiteraard denken we dan allereerst aan bescherming tegen overstroming. Maar er staat meer op het spel. Een klimaatwijziging kan verstreckende gevolgen hebben voor de aarde als ecotoop. In Nederland alleen al kunnen zeespiegelstijging en getijverandering zorgen voor veranderingen in gebieden waar dieren en planten afhankelijk zijn van een specifiek getijregime. Je hoeft alleen maar te denken aan de platen en oevers die regelmatig droogvallen en overstromen en voor vogels een onmisbare bron van voedsel zijn. Grotere neerslagpieken beïnvloeden de rivierafvoer en daarmee het natuurlijke karakter van de rivieren en de uiterwaarden, schakels in de ecologische hoofdstructuur. Ook veranderingen in de grondwaterstanden leiden van de duingebieden tot de Veluwe tot verstoringen van het ecosysteem.

Deze brochure gaat nader in op de wetenschappelijke voorspellingen, de eventuele gevolgen van klimaatverandering en de wijze waarop waterbeheerders alvast rekening kunnen houden met deze zekerheden en onzekerheden, in aansluiting op zaken zoals Deltaplan Grote Rivieren, Vierde Nota Waterhuishouding en de Kustnota.

## Het klimaatsysteem

Van oudsher wordt onder klimaat verstaan: het weer gemiddeld over dertig jaar. Zolang uit dit gemiddelde de jaarlijkse en dagelijkse gang (het verschil tussen de extremen) zijn op te maken, is het een bruikbare definitie.

Bij het begrip klimaatverandering hoort een tweede tijdschaal, namelijk een die weergeeft over welk tijdvak veranderingen worden bekeken. Dit kan variëren van enkele eeuwen (Kleine IJstijd, broeikas-effect) tot tienduizenden jaren (ijstijden). In deze brochure zal worden gekeken naar klimaatveranderingen op een tijdschaal van één tot twee eeuwen. Een tijdvak dus waarin continenten niet verschuiven, de afstand tussen aarde en zon vrijwel constant blijft en ook de vorm van de grote ijskappen van Antarctica en Groenland maar weinig zal veranderen. Een tijdvak waarin echter wel de samenstelling van de atmosfeer wezenlijk is veranderd, gletsjers zich wereldwijd hebben teruggetrokken en de zeespiegel is gestegen.

Het klimaatsysteem is ingewikkeld. Gedurende deze eeuw is veel kennis vergaard over het gedrag van de atmosfeer, de oceanen en de cryosfeer (ijs en sneeuw). Vooral over de wetmatigheden die de luchtstroming en de globale energiebalans bepalen, is men veel te weten gekomen. De afgelopen jaren is echter duidelijk geworden dat er nog veel vragen bestaan over de wisselwerking tussen de verschillende componenten, inclusief een aantal belangrijke biochemische en geochemische kringlopen. Juist hier ligt de sleutel tot een beter begrip van klimaatveranderingen.

Er zijn verschillende factoren die mogelijk klimaatveranderingen op een tijdschaal van eeuwen veroorzaken. Daartoe worden gerekend: explosieve vulkaanuitbarstingen, kleine verschuivingen in de energie-uitwisseling tussen oceaan en atmosfeer, zonne-activiteit en veranderingen in de samenstelling van de atmosfeer (van natuurlijke en antropogene oorsprong). Al deze factoren beïnvloeden de stralingsbalans van het aardoppervlak en van de atmosfeer.

## De broeikasproblematiek

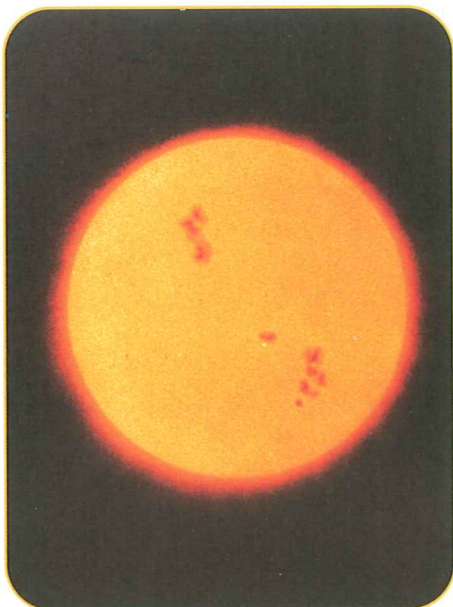
Het klimaatsysteem kent van nature een sterk broeikaseffect. Hiermee wordt bedoeld dat de uitstraling van energie door het aardoppervlak naar de ruimte buiten de atmosfeer in sterke mate wordt belemmerd. Zonder broeikaseffect zou het zo'n dertig graden kouder zijn aan het aardoppervlak.

Het belangrijkste broeikasgas is waterdamp, gevolgd door kooldioxide ( $\text{CO}_2$ ), methaan, en een aantal andere 'sporengassen'. Uit de analyse van luchtbelletjes in fossiel ijs is gebleken dat gedurende de laatste 140.000 jaar de  $\text{CO}_2$ -concentratie schommelde tussen 200 en 300 ppm (parts per million; 1000 ppm is 0,1%). De laagste waarden traden op tijdens ijstijden en de hoogste tijdens warme perioden. Min of meer parallel hieraan traden schommelingen op in het methaangehalte. In het Holoceen (de tijd na de laatste ijstijd; ruwweg de laatste 10.000 jaar) is de  $\text{CO}_2$ -concentratie vrij constant geweest (tussen 275 en 300 ppm).

Het staat vast dat onder invloed van de mens de samenstelling van de atmosfeer wezenlijk verandert. Voorzover het broeikasgassen betreft, zijn het onder andere  $\text{CO}_2$ , methaan, ozon en CFK's die door menselijke activiteit worden geproduceerd. Zo is de  $\text{CO}_2$ -concentratie



Vulkaanuitbarstingen leiden tot een (tijdelijke) afname van de gemiddelde temperatuur.



Sommige onderzoekers zijn van mening dat de zonnevlekkencyclus een merkbare invloed heeft op het klimaat.

in de atmosfeer sinds het einde van de vorige eeuw gestegen van ongeveer 280 tot 360 ppm. Dit is een resultaat van de verbranding van fossiele brandstoffen. Deze stijging is in de laatste decennia overigens het meest drastisch toegenomen.

Maar er zijn ook andere antropogene effecten. Zo menen sommige onderzoekers dat de uitstoot van zwaveldioxide, en de daarmee samenhangende vorming van kleine zwavelzuurdruppeltjes (aërosolen) in de atmosfeer, zo groot is dat dit verschijnsel het mondiale klimaat beïnvloedt. Deze aërosolen vergroten namelijk het vermogen van de atmosfeer om zonlicht te reflecteren. Een grotere emissie van zwaveldioxide leidt daarom tot afkoeling.



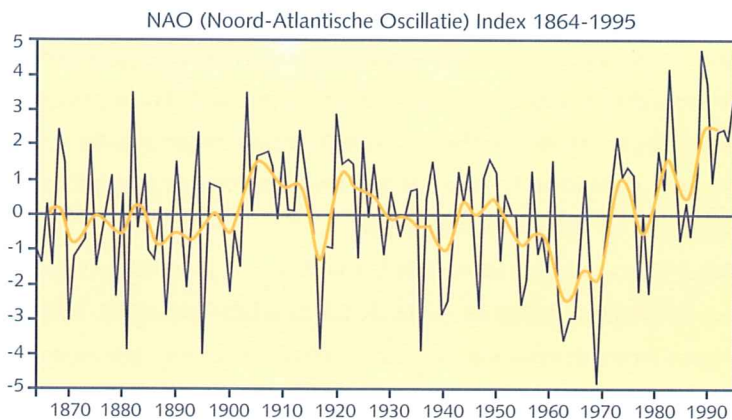
## Natuurlijke variabiliteit in het klimaat

Ook zonder externe veranderingen (frequentie van vulkaanuitbarstingen, toename van broeikasgassen) is het klimaat niet altijd hetzelfde. Er doen zich in het klimaatsysteem allerlei schommelingen voor op kleinere en grotere tijdschalen. Een hele bekende is bijvoorbeeld El-Niño, die met een periodiciteit van ongeveer vier jaar terugkeert en invloed heeft op het klimaat in de tropen. In onze omgeving bestaan dit soort fenomenen eveneens. De laatste jaren is steeds meer bekend geworden over NAO, de Noord-Atlantische Oscillatie (schommeling).

De NAO is een quasi-periodieke schommeling van de noord-zuid luchtdrukverdeling boven de Noord-Atlantische Oceaan die voor een belangrijk deel verantwoordelijk is voor temperatuur- en neerslagveranderingen in Europa op een tijdschaal van decennia.

Tijdens de 'positieve' fase van de NAO is het luchtdrukverschil tussen IJsland en de Azoren erg groot, waardoor westenwinden zachte en vochtige oceaanolucht tot diep in Europa kunnen meevoeren. De winters van Noordwest-Europa zijn in deze fase dan ook zacht en regenrijk. Dit was het geval in de recente periode 1981-1994. De 'negatieve' NAO-fase wordt gekenmerkt door een zwakkere luchtdrukgradiënt boven de Atlantische Oceaan. De zwakkere westenwind gaat meestal gepaard met zogenaamde blokkeringen, die de winters boven Europa een meer continentaal karakter geven. De winters na 1994/95 zijn daar een goed voorbeeld van. Het verloop van de toestand van de NAO in de winters van de afgelopen eeuw is te zien in nevenstaand figuur. Toppen in de figuur zijn dus op te vatten als perioden met een sterke westcirculatie boven de Atlantische Oceaan.

De relatie tussen de NAO en het storm- en neerslagklimaat in onze omgeving is nog niet goed bekend. Onderzoeksresultaten wijzen er echter op dat de koers van depressies op de Noord-Atlantische Oceaan wel degelijk door de NAO wordt beïnvloed.





# Veranderingen in het verleden

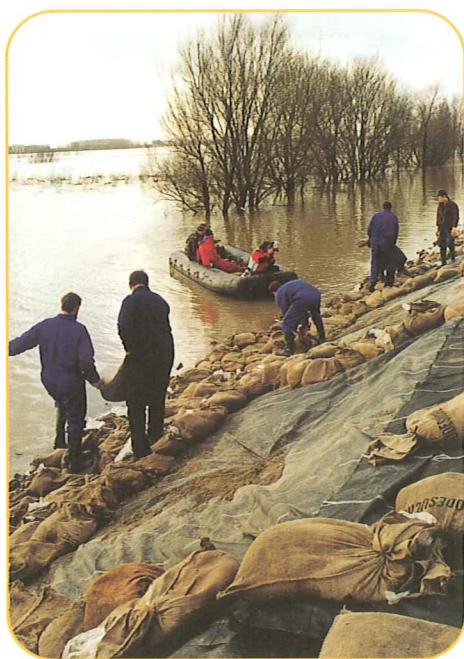
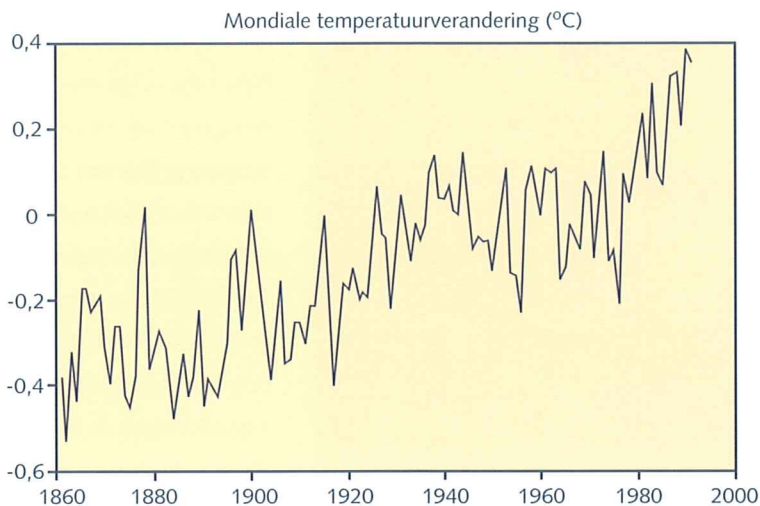
## Temperatuur

Uit de analyse van vele metingen is gebleken dat de temperatuur op Aarde de laatste honderd jaar gestegen is met ongeveer 0,6 °C. Over een langere periode is op grond van instrumentele waarnemingen geen uitspraak te doen. Er zijn enkele langere reeksen voorhanden, maar van een redelijk mondiaal overzicht is geen sprake. In de figuur is de mondiaal gemiddelde temperatuurverandering weergegeven als functie van de tijd.

De sterkste stijging van de temperatuur trad op in de periode 1920-1940 en vanaf 1975.

De temperatuurstijging werd onderbroken in de periode 1940-1975.

De gesimuleerde mondiale temperatuurstijging in de laatste vijftig jaar lijkt beter overeen te stemmen met de waarnemingen wanneer rekening wordt gehouden met een groter reflectievermogen van de atmosfeer door aërosolen (zwaveldioxide deeltjes). Door het afkoelende effect van aërosolen wordt de sterke temperatuurstijging in de periode 1920-1940 echter minder goed gesimuleerd.

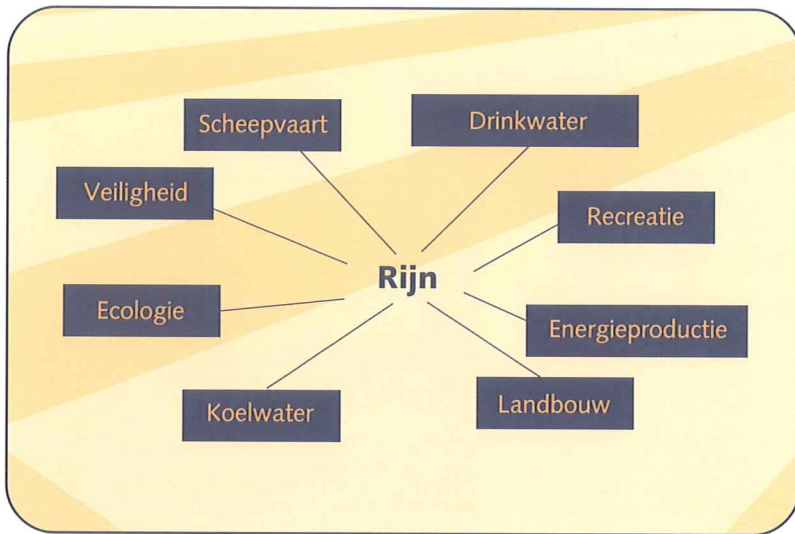


Tijdelijke versterking van zwakke delen van de rivierdijken met zandzakken tijdens hoogwater.

## Afvoeren

Uit historische gegevens blijkt dat sinds de Middeleeuwen geen eeuw voorbij is gegaan zonder dijkdoorbraken en overstromingen van Rijn en Maas. Deze overstromingen brachten met enige regelmaat schade toe aan de bewoners langs de rivieren. Overstromingen waren altijd het gevolg van grote neerslaghoeveelheden, sneeuwsmelt en het samenkomen van afvoerpieken uit de zijrivieren. Daarnaast zijn veel overstromingen veroorzaakt door ijssdammen die het rivierwater hoog opstuwden. Tegenwoordig komen ijssdammen vrijwel niet meer voor. De normalisatie van de rivieren in de 19<sup>e</sup> eeuw heeft ervoor gezorgd dat de afvoer van ijs is verbeterd, waardoor ijssdammen minder snel ontstaan. Bovendien heeft lozing van koelwater ervoor gezorgd dat de ijsvorming op rivieren is verminderd.

Kleine klimaatschommelingen in het verleden, zoals de Kleine IJstijd (een koude periode van de zestiende tot de achttiende eeuw), hebben volgens reconstructies weinig invloed gehad op extreme hoogwaters.



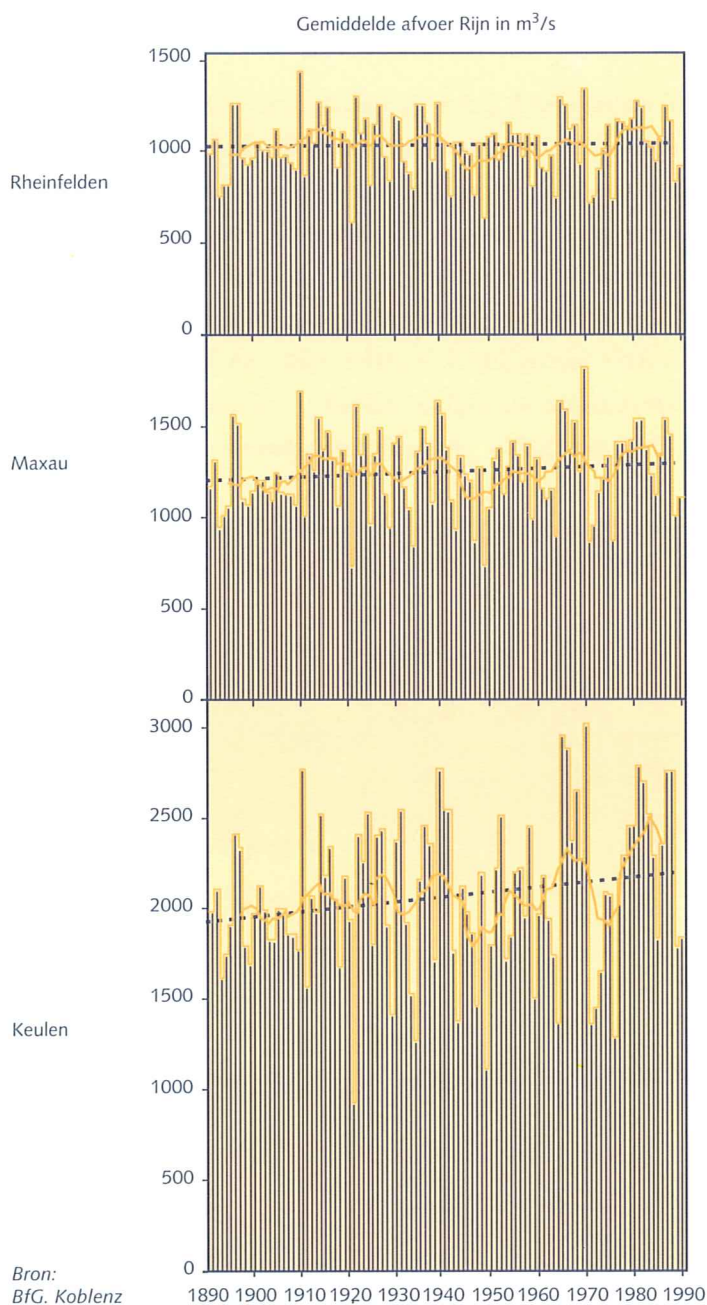
De Rijn vervult een groot aantal functies voor onze samenleving en economie.

Wel kwamen waarschijnlijk tijdens de Kleine IJstijd in de zomer vaker hoogwaterpieken voor. In de koude jaren rond het einde van de zestiende eeuw begon de sneeuw in de Alpen vermoedelijk pas laat in het voorjaar te smelten en zorgde dan voor grote hoeveelheden water in de Rijn. Veranderingen van klimatologische omstandigheden en rivierafvoeren sinds de afgelopen eeuw kunnen we onderzoeken met behulp van historische reeksen van metingen. Sinds het einde van de vorige eeuw is de gemiddelde jaarlijkse neerslaghoeveelheid in (verschillende delen van) het stroomgebied van de Rijn geleidelijk toegenomen.

Winterse taferelen tijdens de Kleine IJstijd.



Hierdoor vertonen de gemiddelde afvoeren en ook de afvoerpieken van de Rijn een stijgende tendens. Behalve klimatologische veranderingen hebben menselijke ingrepen in het stroomgebied de afvoer beïnvloed. Stedelijke gebieden zijn gegroeid, de drainage van landbouwgebieden is verbeterd en rivieren zijn genormaliseerd en gekanaliseerd. Tevens zijn veel overstromingsvlakten langs de rivieren kleiner geworden omdat ze bedijkt zijn. Dergelijke veranderingen leiden in het algemeen tot een verhoging van afvoerpieken.



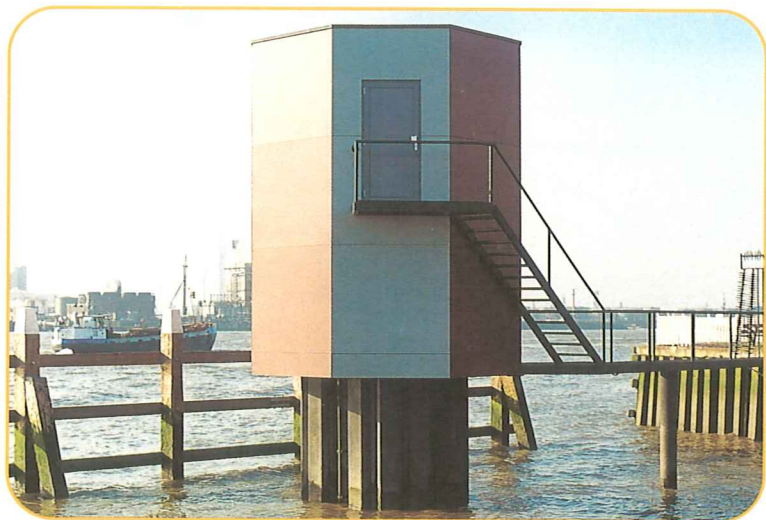
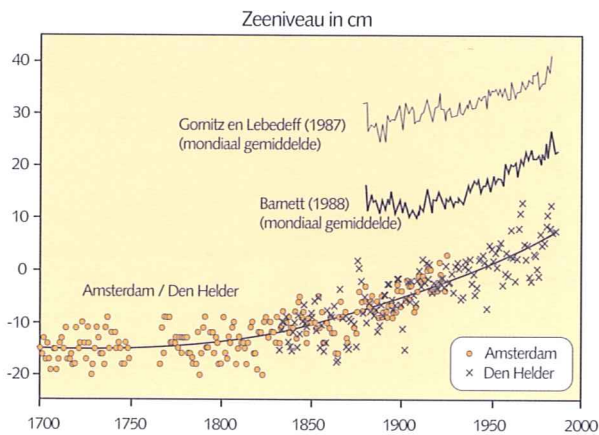
Hoogwater 1995: overlast.

## Zeespiegelstijging

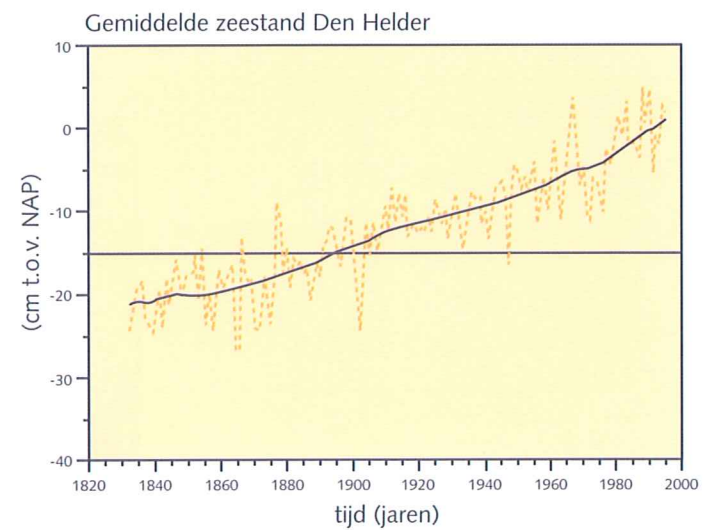
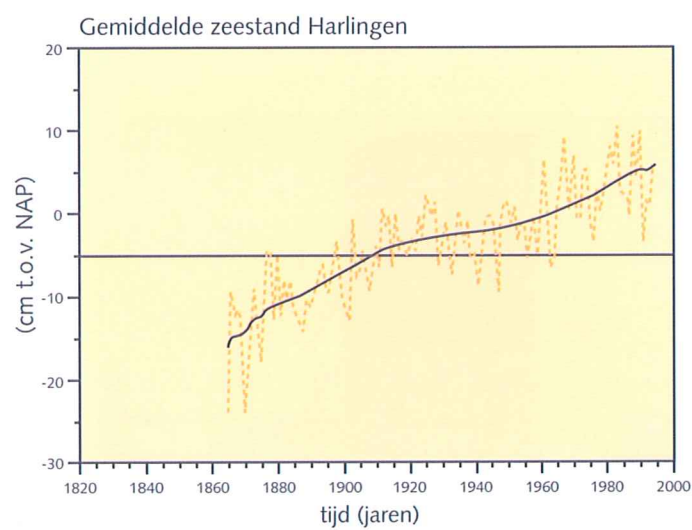
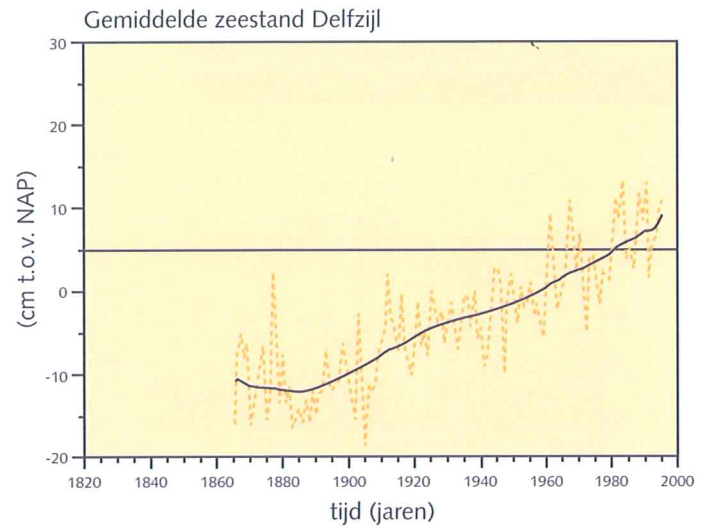
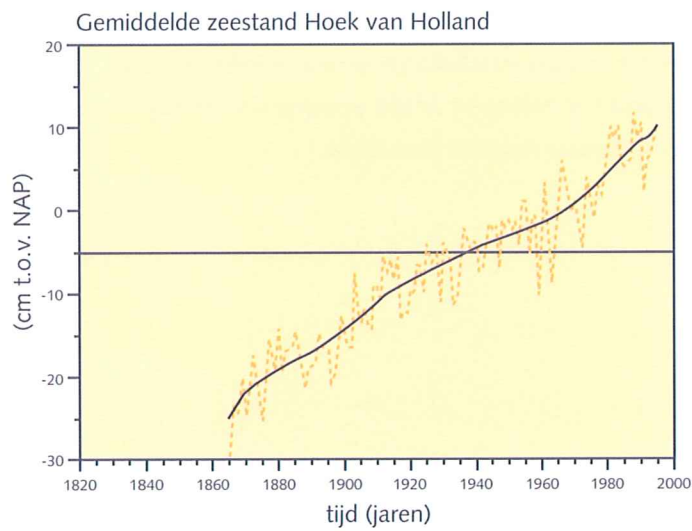
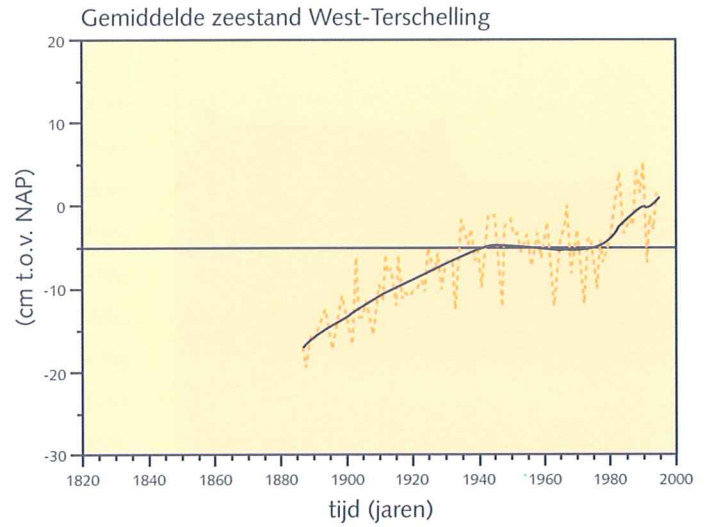
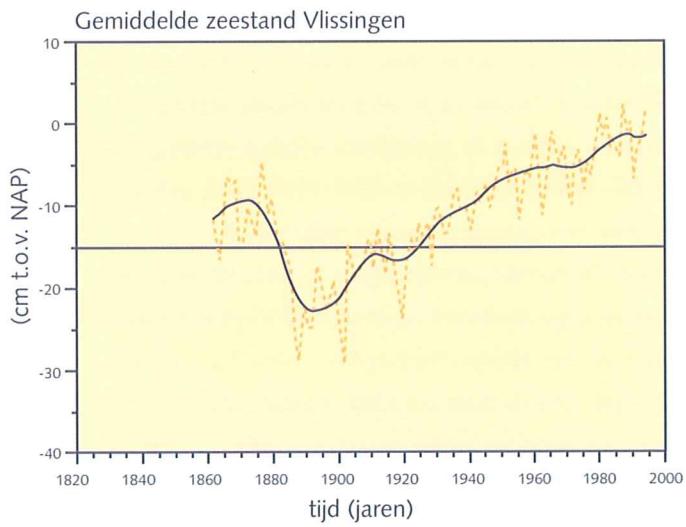
Langs de Nederlandse kust worden al meer dan honderd jaar stijgende waterstanden gemeten. Dit betreft zowel stijging van de gemiddelde waterstand als daling van de bodem. We spreken dan ook van relatieve zeespiegelstijging. De Amsterdamse reeks van waterstanden is de oudste ter wereld. De reeks begint in 1700. Toen in 1925 met de Zuiderzeewerken werd begonnen, nam de betekenis van de metingen af. Ook Den Helder kent een lange reeks. Door gebruik te maken van de periode van overlap (1832-1925) kunnen deze reeksen worden gecombineerd zoals in de figuur op pagina 11. De getrokken curve laat een parabolische aanpassing zien. In deze figuur zijn ook twee analyses weergegeven van de wereldgemiddelde zeespiegel. Opvallend is dat er vóór 1800 nauwelijks of geen sprake is van een zeespiegelstijging in de Amsterdamse reeks. De toename van de stijging na 1800 kan echter nog niets te maken hebben met



de toeneming van het broeikaseffect. Het is vermoedelijk te wijten aan de overgang van de Kleine IJstijd naar de huidige, warmere tijd. De relatieve zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust bedroeg over de laatste honderd jaar zo'n 20 cm. In de tabel op pagina dertien is voor enkele Nederlandse stations de gemiddelde stijging weergegeven over de perioden 1888-1995, 1933-1995 en 1951-1995. Bij de eerste periode is gekozen voor een zo lang mogelijke reeks van de gezamenlijke stations. De tweede periode begint na 1933 vanwege de afsluiting van de voormalige Zuiderzee en de invloed hiervan op de gemiddelde zeestand bij Den Helder, Harlingen en West-Terschelling. De laatste periode is gekozen als maat voor het recente verleden. Trendberekeningen voor perioden korter dan zo'n veertig à vijftig jaar zijn weinig zinvol. Uit de resultaten volgt dat de getallen per station en per periode nogal kunnen verschillen. Dit is te wijten aan de grote fluctuaties (in plaats en tijd) van waterstanden die door op- en afwaaiing worden veroorzaakt. Voor betrouwbare resultaten moet dus naar langere perioden en naar verscheidene stations worden gekeken. Op pagina twaalf staat het verloop in de tijd weergegeven van zes stations die de grote variatie nog eens benadrukt.



Peilmeetstation van Rijkswaterstaat.



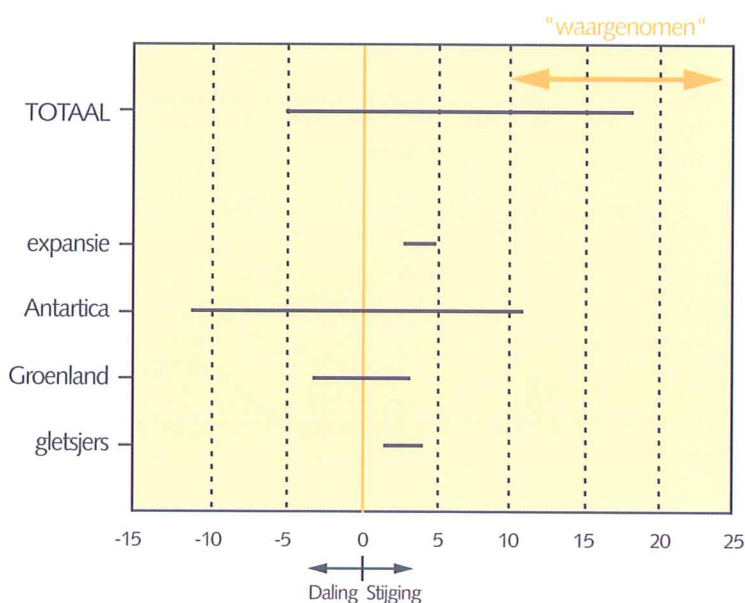
Uit de figuren lijkt te kunnen worden opgemaakt dat de relatieve zeespiegelstijging de laatste jaren is toegenomen. Gezien de grote fluctuaties is dit echter niet uit de getallen in de tabel af te leiden en zijn hierover geen betrouwbare uitspraken te doen. Verder is te constateren dat het verloop van de gemiddelde zeestand, met name voor 1890, tussen de diverse stations sterk verschilt. Een verklaring hiervoor is tot nu toe nog niet gevonden.

	1888-1995	1933-1995	1951-1995
Vlissingen	22	16	13
Hoek van Holland	23	25	31
Ijmuiden	21	19	16
Den Helder	14	19	20
Harlingen	12	15	16
West Terschelling	13	8	14
Delfzijl	19	21	25
gemiddeld	18	18	19

Gemiddelde relatieve zeespiegelstijging in cm per eeuw berekend over drie verschillende perioden

De wereldwijde stijging van de zeespiegel over de laatste 100 jaar wordt geschat op 10 á 25 cm. De belangrijkste factoren die hieraan bijgedragen hebben zijn thermische expansie van oceanwater en afname van de landijsmassa (zie onderstaand figuur).

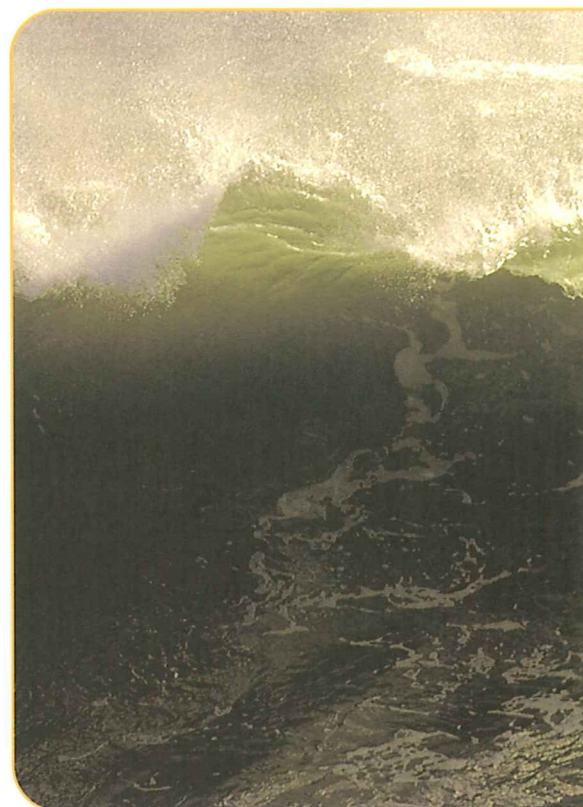
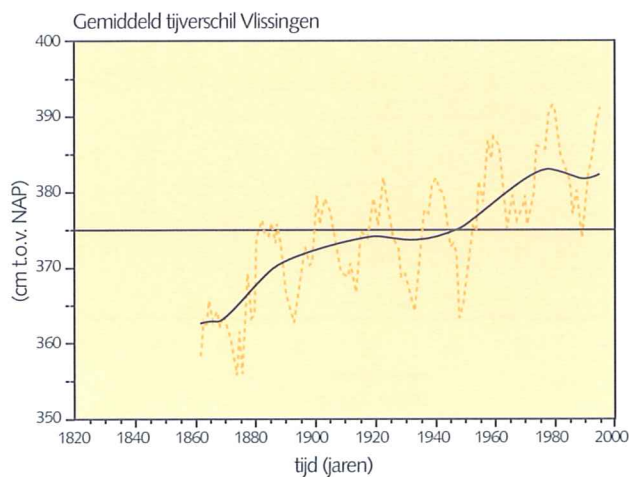
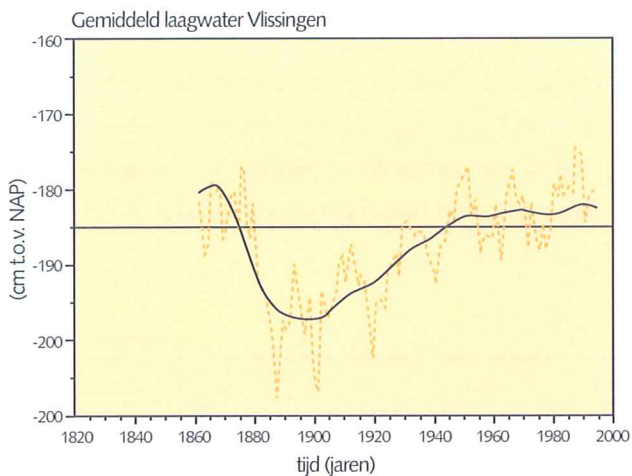
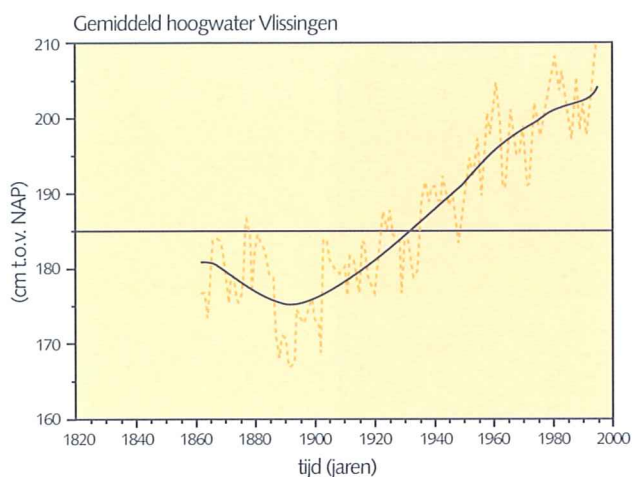
**In het recente verleden is geen significante versnelling van de (relatieve) zeespiegelstijging te constateren.**



Schattingen zeespiegelstijging (daling) per oorzaak in cm per eeuw

## Getijverandering

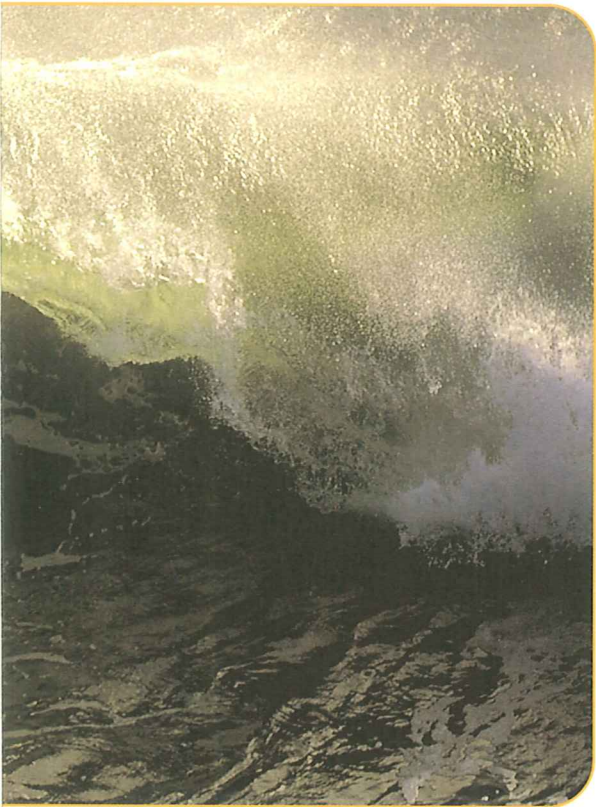
Niet alleen de gemiddelde zeestand maar ook het getij is aan verandering onderhevig. Het tijverschil (hoogteverschil tussen hoog- en laagwater) neemt op bijna alle plaatsen in Nederland toe. Het hoogwaterpeil stijgt sneller dan de zeespiegel, gemiddeld zo'n 5 cm per eeuw sneller. Het laagwaterpeil stijgt gemiddeld zo'n 5 cm langzamer dan de zeespiegel. Voor een groot gedeelte is dit te wijten aan menselijke ingrepen.



Voorspellingen over toekomstige veranderingen van stormen en stormvloed zijn nog niet betrouwbaar.

Het uitdiepen van de vaargeulen heeft een groter tijverschil tot gevolg. Dit speelt met name in de Eems-Dollard (het hoogwaterpeil stijgt gemiddeld zo'n 10 cm per eeuw sneller dan de zeespiegel) en in de Westerschelde (van 10 cm per eeuw sneller bij Vlissingen tot 30 cm per eeuw sneller bij de Belgische grens).

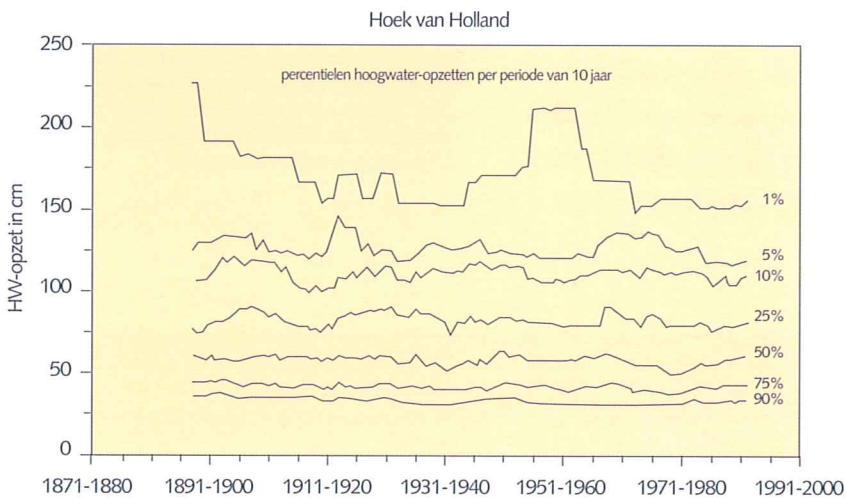
In nevenstaande figuur is voor Vlissingen het verloop uitgezet van gemiddeld hoogwater, laagwater en van het gemiddelde tijverschil. Hier valt het merkwaardige verloop op van de periode voor 1890. Hiervoor is tot nu toe geen enkele verklaring gevonden. Het laagwater is na 1950 nog nauwelijks gestegen terwijl het hoogwater juist sterk stijgt. Het tijverschil is dan ook zo'n 20 cm toegenomen gedurende de periode van de meting. Zoals gezegd, moet deze stijging grotendeels worden toegeschreven aan het uitdiepen van de Westerschelde en aan de morfologische aanpassingen van het systeem.



## Stormen en stormvloeden

Zware stormen en stormvloeden behoren tot de meest desastreuze natuurverschijnselen van ons klimaat. Niet voor niets staat de stormramp van 1953 nog in vele geheugens gegrift. In kranten en wetenschappelijke tijdschriften zijn meermalen artikelen verschenen die aangeven dat het golfklimaat en het stormklimaat in de Noordzee en de Atlantische Oceaan de laatste jaren in intensiteit zijn toegenomen. Boven de Noord-Atlantische Oceaan zijn een aantal depressies met zeer lage kerndrukken waargenomen. Vreemd genoeg gingen deze niet gepaard met hogere windsnelheden. Alleen de omvang van de depressies werd groter. Hiervoor is tot nu toe geen bevredigende verklaring gevonden.

Instituten in West-Europa hebben intensief onderzoek gedaan naar tijdreeksen van luchtdruk, wind en golven in en rond de Noordzee. Dit onderzoek heeft aangetoond dat in de laatste honderd jaar de stormfrequentie niet is toegenomen. Wel lijken perioden van tien tot twintig jaar met meer of minder stormen elkaar af te wisselen. In breder verband lijkt die schommeling van tien tot twintig jaar samen te hangen met de Noord-Atlantische Oscillatie.



Er treden grote verschillen op in de percentielen per 10 jaar, een duidelijke trend is echter niet aanwezig.

Gemeten waterstanden langs de Nederlandse kust zijn over een periode van meer dan honderd jaar beschikbaar. Door van de gemeten waterstanden het astronomische getij af te trekken, houden we de zogenaamde 'opzetten' over. Een opzet is de door wind en luchtdruk veroorzaakte verhoging c.q. verlaging van de waterstand. Het astronomisch getij is berekend in blokken van tien jaar, zodat alle veranderingen in zeespiegel en getij hierin zijn meegenomen.



Dit willen we nooit weer!

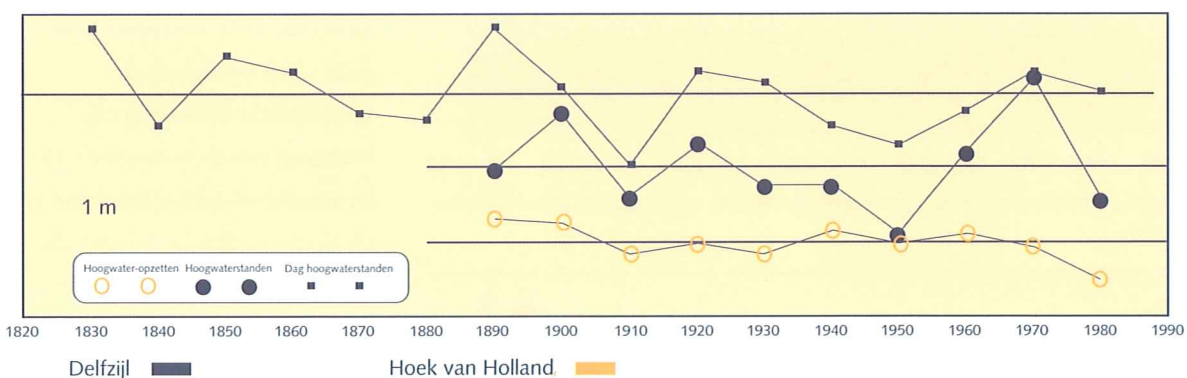


Indien er veranderingen in de opzetten worden geconstateerd, kunnen deze alleen worden toegeschreven aan veranderingen in het meteorologische deel (wind en luchtdruk). De figuur op pagina vijftien laat voor het station Hoek van Holland de percentielen per 10 jaar zien. Bijvoorbeeld het 1% percentiel is het niveau dat door 1% van de opzetten overschreden wordt. Uit deze figuur blijkt dat er van periode tot periode grote verschillen optreden zonder dat een duidelijke toename of afname valt te constateren.

Er is nog verder ingegaan op de extreme situaties waarbij vooral gekeken is naar de opzetten tijdens de hoogste stormvloed. In blokken van tien jaar is extreme-waardenstatistiek toegepast om het basispeil te berekenen. De verschillen ten opzichte van het officiële basispeil zijn uitgezet voor Hoek van Holland en Delfzijl in de figuur hieronder. Naast de grote fluctuaties - een basispeil is met gegevens over tien jaar niet nauwkeurig te bepalen - blijkt dat er absoluut geen sprake is van een toename. Bij Hoek van Holland zou men zelfs eerder van een afname kunnen spreken. Voor Delfzijl is een zeer lange reeks voorhanden van zogenaamde daghoogwaterstanden. In de periode 1820 - 1880 werden alleen bij daglicht, als de peilschaal af te lezen was, waterstanden genoteerd. Voor de vergelijkbaarheid is deze reeks uitgebreid tot 1990. Statistische toetsen laten bij Delfzijl geen significante trend zien, terwijl er voor Hoek van Holland een licht significante daling uitkomt.



Fabrieksschoorstenen stoten veel CO<sub>2</sub> uit waardoor het broeikaseffect toeneemt en de gemiddelde temperatuur stijgt. Daarnaast stoten ze veel stof en roetdeeltjes (aërosolen) uit waardoor een verlaging van de gemiddelde temperatuur wordt veroorzaakt.



Veranderingen in het basispeil berekend in blokken van 10 jaar. Het basispeil is de waterstand die een kans heeft van 1/10.000-ste per jaar waarmee dijken ontworpen worden.

**Het is duidelijk dat van een toename van stormen over de afgelopen honderd jaar geen sprake is.**

# Verwachtingen voor de toekomst



## Het IPCC

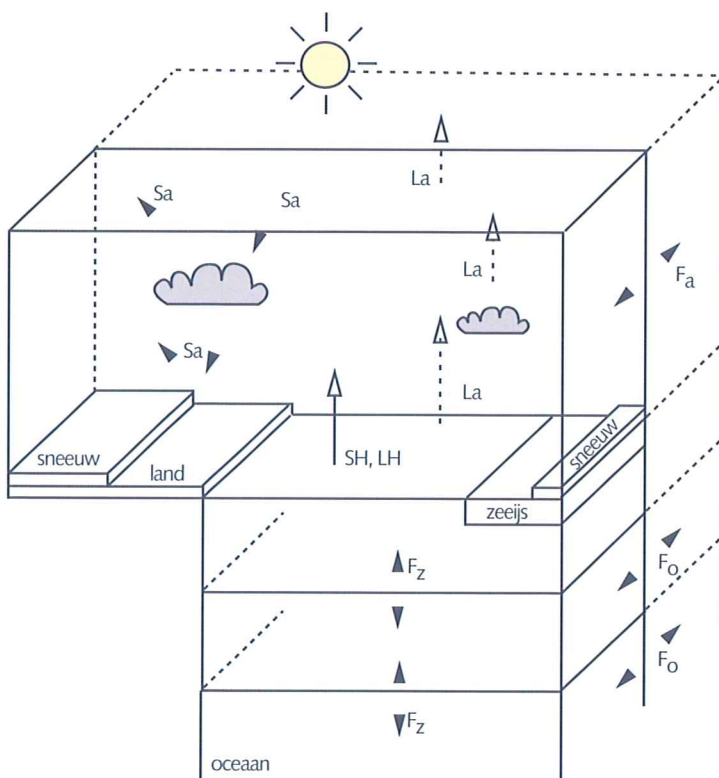
### (Intergovernmental Panel on Climate Change)

In het tweede IPCC-rapport, verschenen in 1996, staan verwachtingen van temperatuur en zeespiegel gepresenteerd voor de komende honderd jaar. Om tot dergelijke verwachtingen te komen, wordt eerst een schatting gemaakt van de toekomstige concentraties van broeikasgassen en van de stralingsforcering die daar uit volgt. Het meest complexe en onzekere deel van deze stralingsforcering wordt veroorzaakt door de mogelijke directe (reflectie en verstrooiing van zonlicht) en indirecte (invloed op wolkenvorming) effecten van aerosolen. De toename van aerosolen in de hogere luchtlagen is een gevolg van de verbranding van met name steenkool, bruinkool en hout. Ook door vulkaanuitbarstingen kunnen grote hoeveelheden aerosolen in de atmosfeer terechtkomen.

## Modellen

Om de onzekerheid ten gevolge van aerosolen in kaart te brengen, zijn voor elk emissiescenario twee varianten van de stralingsforcering bepaald. In de ene variant wordt uitgegaan van een toename in de aerosolconcentratie na 1990. In de andere variant worden deze veranderingen buiten beschouwing gelaten door te veronderstellen dat de emissie van zwaveldioxide na 1990 niet wijzigt. De respons van het aarde-atmosfeersysteem op de veranderende stralingsforcering wordt bepaald met klimaatmodellen. De temperatuur- en

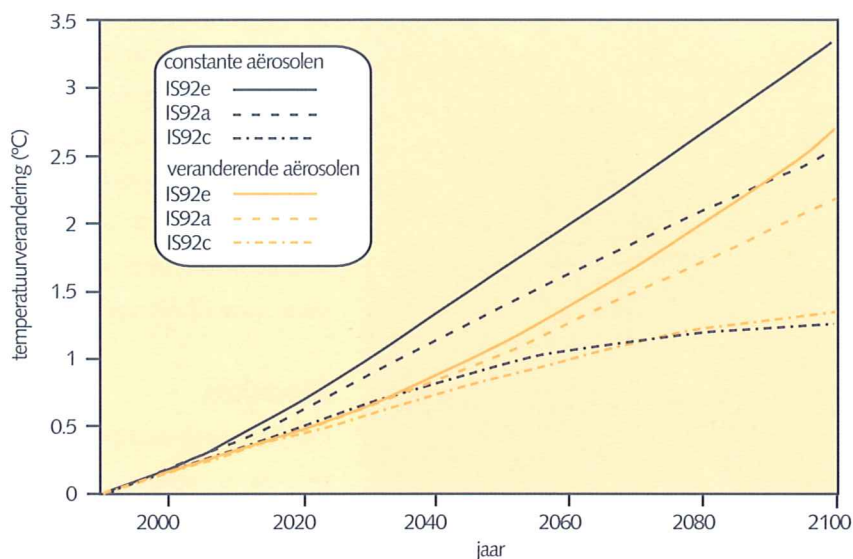
zeeniveauprojecties die in het IPCC-rapport worden gepresenteerd, zijn grotendeels gemaakt met een eenvoudig ééndimensionaal oceaanmodel, waarin alleen variaties in diepte worden beschouwd. De keuze voor dit model is in belangrijke mate bepaald door het feit dat hetzelfde model ook gebruikt is in eerdere IPCC-rapporten.



De schematisatie van een zonale strip met land, zee, zeeijs en sneeuwbedekking van het door het IMAU gebruikte model om de zeespiegelstijging uit te rekenen.

Gebruikmaking van een zonaal klimaatmodel, zonder daarbij onmiddellijk algemene circulatiemodellen te betrekken, draagt bij aan een betere methode. In zo'n model worden atmosfeer en oceaan afzonderlijk behandeld en wordt het transport van warmte in de oceanen in rekening gebracht. Het model simuleert tevens de seizoenen. De temperatuur is een functie van geografische breedte (en diepte in de oceaan). Op pagina zeventien staat een schematische weergave van een dergelijk tweedimensionaal model. In deze brochure zullen zowel resultaten worden getoond van het eenvoudige eendimensionale model, als van het zonale, tweedimensionale klimaatmodel.

Projecties van de mondiale en jaargemiddelde atmosferische temperatuurverandering voor het hoogste (IS92e), middelste (IS92a) en laagste (IS92c) emissiescenario. Getrokken lijnen geven het resultaat voor constante (1990) aerosolconcentraties, gestippelde lijnen voor veranderende aerosolconcentraties.

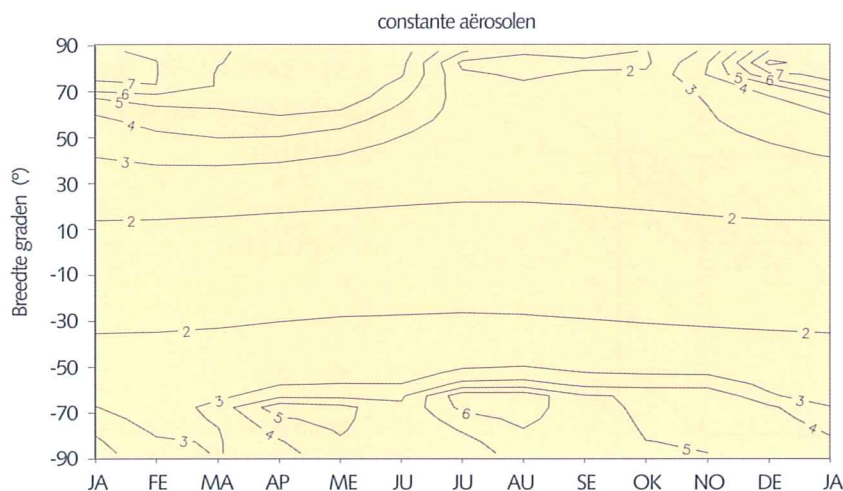


### Temperatuur

Bovenstaand figuur toont de mondiale temperatuurverandering voor het hoogste, middelste en laagste emissiescenario, zowel voor veranderende als voor constante (1990) aerosolconcentraties. Zelfs voor het laagste emissiescenario is de te verwachten temperatuurstijging voor de komende honderd jaar aanzienlijk groter dan de waargenomen temperatuurstijging in de afgelopen honderd jaar.

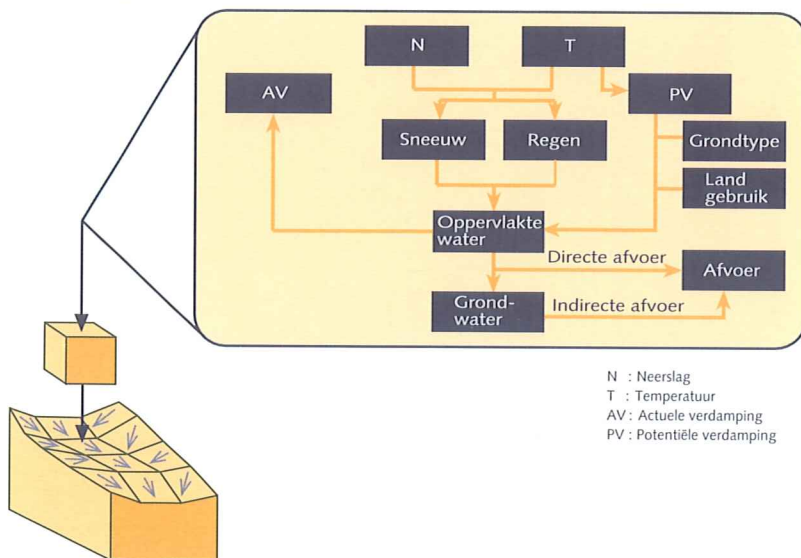
Lokale temperatuurveranderingen kunnen echter verschillen van het mondiaal gemiddelde. Op hoge geografische breedten zal de

Atmosferische temperatuurverandering in 2100 (t.o.v. 1990) voor het middelste scenario met constante aerosol concentratie.

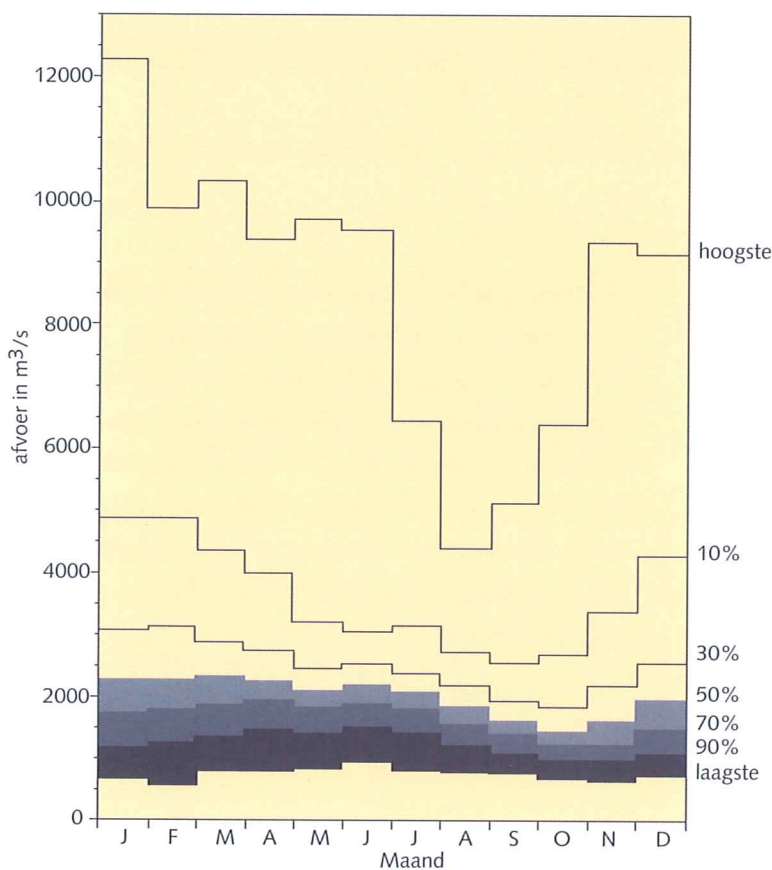


temperatuurstijging het grootst zijn, zoals in nevenstaande figuur is weergegeven. Daarnaast zal de opwarming van de aarde sterker zijn in de winter dan in de zomer. Algemene circulatiemodellen laten tevens een grotere opwarming zien boven land dan boven zee.

Stroomdiagram van het RHINEFLOW model



In het RHINEFLOW model wordt de hydrologische kringloop in het Rijngebied gerepresenteerd voor rastercellen van 3 km x 3 km. Het model rekent in tijdstappen van een maand.



Verdeling van de Rijnafvoer bij Lobith over het jaar

## Afvoeren

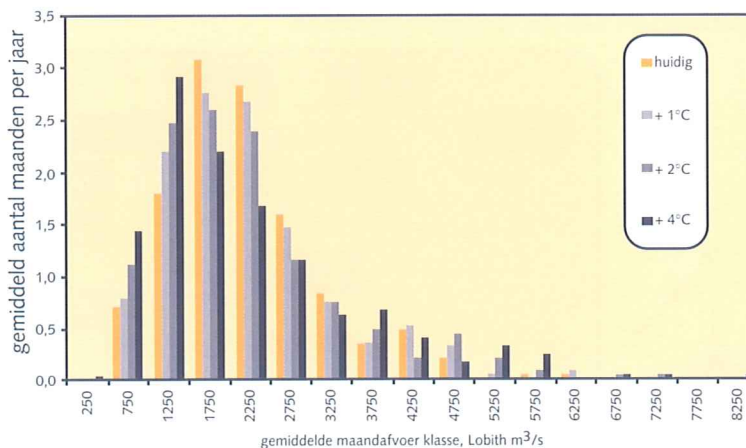
De gevolgen van klimaatverandering voor de afvoer van rivieren worden onderzocht met behulp van computermodellen die het neerslag- en afvoerproces nabootsen. Op internationaal niveau wordt dit onder meer door een samenwerkingsverband van de Internationale Commissie voor de Hydrologie van het Rijngebied gedaan, waarin onderzoeksinstituten van de Rijnsoeverstaten zitting hebben.

## Rijn

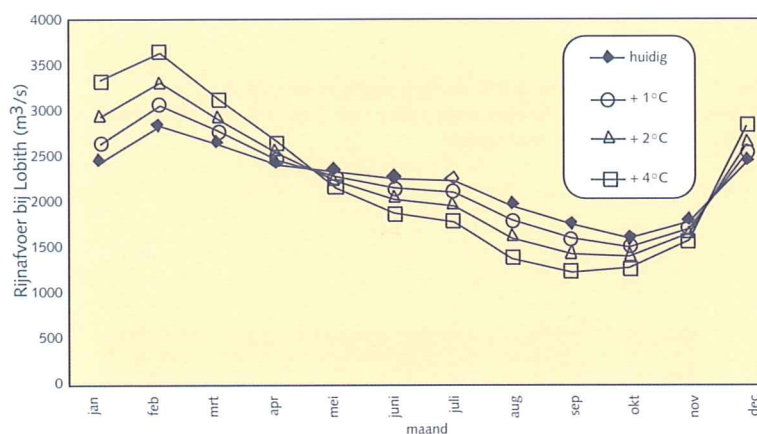
De Rijn is een gemengde regen- en smeltwaterrijver en voert water af uit een gebied met een oppervlakte van 185.000 km<sup>2</sup>. In het winterhalfjaar bestaat de afvoer voornamelijk uit regenwater. In de Alpen blijft een groot deel van de neerslag die 's winters valt gedurende enkele maanden als sneeuw liggen. Pas aan het einde van het voorjaar smelt de sneeuw. In de zomermaanden bestaat de Rijnafvoer vooral uit smeltwater uit de Alpen. De bijdrage van neerslag uit de rest van het stroomgebied is dan gering, als gevolg van de hoge verdamping in de zomer. Het gemengde waterregime bezorgt de Rijn een relatief regelmatig afvoerpatroon, waardoor de rivier het hele jaar bevaarbaar is. De gemiddelde afvoer van de Rijn bij Lobith bedraagt ongeveer 2200 m<sup>3</sup>/s. De hoogste Rijnafvoer bij Lobith bedraagt 12.600 m<sup>3</sup>/s, gemeten tijdens het hoogwater van januari 1926. De laagste afvoer ooit is 620 m<sup>3</sup>/s, gemeten in 1947.

Klimaatveranderingen zullen ertoe leiden dat het afvoerregime van de Rijn verandert. In de toekomst wordt het meer een regenrivier. Omdat het warmer wordt, zal er in de Alpen relatief minder sneeuw en meer regen vallen. De sneeuw die er valt zal eerder in het voorjaar smelten. In de wintermaanden zal de afvoer van de Rijn daardoor groter worden en in de zomermaanden kleiner.

Bovendien wordt in de zomer de verdamping groter, waardoor de zomerafvoer verder daalt. Op basis van huidige inzichten wordt geschat dat de afvoer waarop de veiligheid tegen overstromen is gebaseerd voor de Rijn in de loop van de komende eeuw met ongeveer 10% kan toenemen. De verwachting is dat in de zomer vaker perioden optreden met een erg lage afvoer, die gemiddeld langer zullen duren dan momenteel het geval is.



Verandering in gemiddelde maandafvoer van de Rijn bij verschillende klimaat-scenario's.



Verandering in maandelijkse afvoeren van de Rijn bij verschillende klimaatscenario's.

## Maas

Het stroomgebied van de Maas heeft een oppervlakte van ongeveer 33.000 km<sup>2</sup>. De Maas is een typische regenrivier, met een maximum afvoer in de winter en zeer lage afvoeren in de zomermaanden. Omdat de bodems in de Ardennen slecht vocht doorlaten, reageert de afvoer van de Maas relatief snel op neerslagpieken. Het afvoerverloop van de Maas is dan ook veel grilliger dan dat van de Rijn. Gemiddeld is de afvoer van de Maas bij Borgharen ongeveer 230 m<sup>3</sup>/s. De hoogste gemeten afvoer is 3.100 m<sup>3</sup>/s, tijdens het hoogwater van Kerstmis 1993. De laagste gemeten afvoer voor de Maas bij Borgharen is 0 m<sup>3</sup>/s.

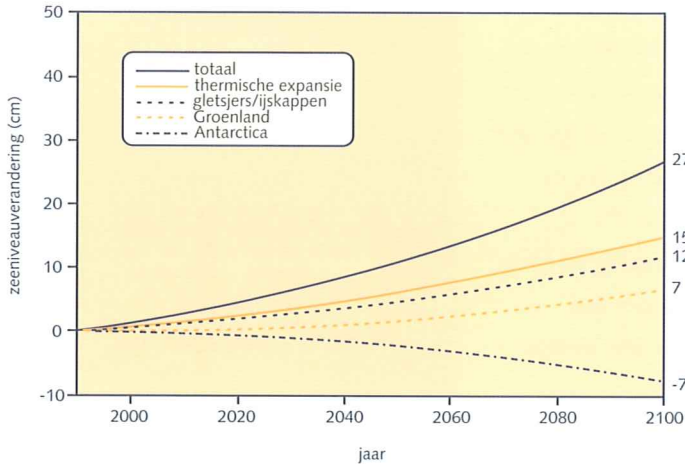
Veranderingen in de hoge afvoeren van de Maas zullen naar verwachting ruwweg gelijk opgaan met de neerslagveranderingen in het stroomgebied. Eerste schattingen geven aan dat afvoerpieken in de Maas in de komende eeuw met zo'n 20% kunnen toenemen. Het is nog niet precies duidelijk hoe de afvoer in de zomer zal veranderen. Dit hangt af van het samenspel tussen neerslagpatronen en verdamping bij een veranderd klimaat.

## Zeespiegelstijging

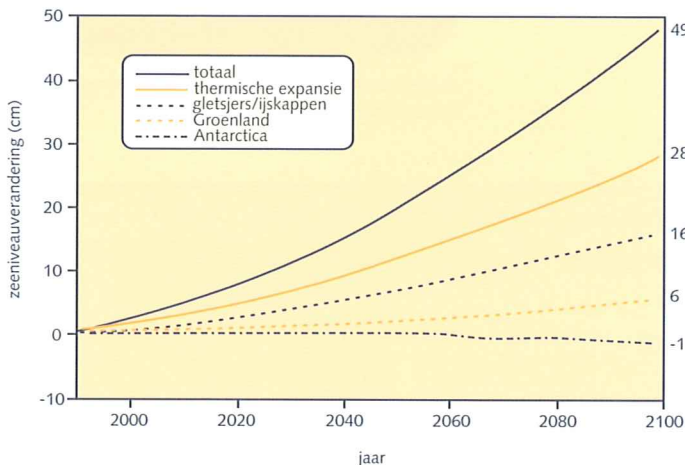
Veranderingen van het zeeniveau zijn gebaseerd op vier factoren:

- thermische expansie van oceaanwater;
- veranderingen in de massa's landijs van Groenland;
- veranderingen in de massa's landijs van Antarctica;
- veranderingen van de kleinere ijskappen en gletsjers.

Voorspelde zeespiegelstijging volgens het tweedimensionale IMAU-model



Voorspelde zeespiegelstijging volgens het één-dimensionale IPCC-model

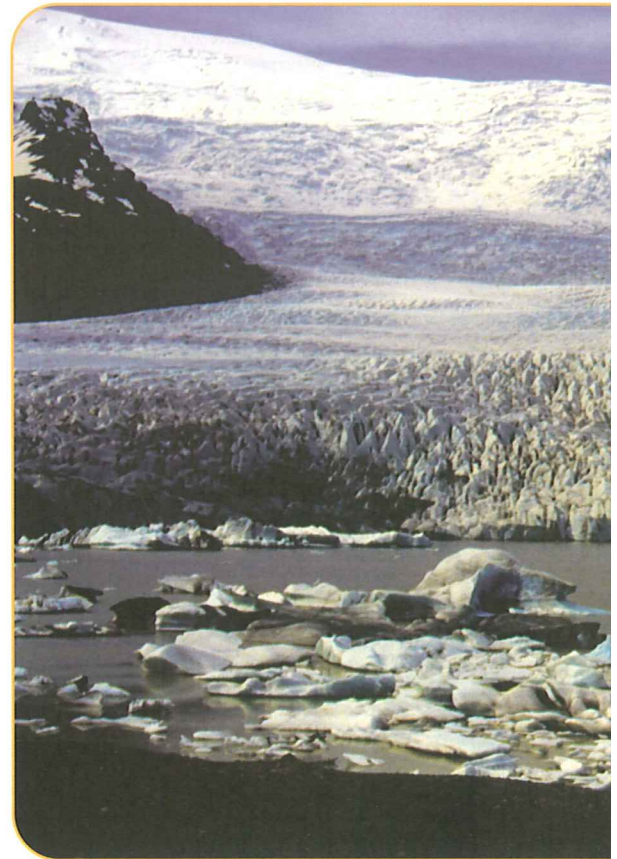


Afkalvende gletsjer op IJsland



Het zeespiegelniveau dat hier wordt gepresenteerd, is berekend met het eerder besproken tweedimensionale klimaatmodel. In dit zonale klimaatmodel wordt rekening gehouden met het feit dat de expansiecoëfficiënt in sterke mate niet-lineair afhankelijk is van de temperatuur van het oceaanwater. Veranderingen in de massa's landijs van Groenland en Antarctica zijn berekend met modellen die de dynamische respons van de ijskap verwerken. De bijdrage van gletsjers en kleinere ijskappen is op een eenvoudiger wijze berekend. Hier is gebruik gemaakt van statische gevoeligheden, waarbij in acht is genomen dat gletsjers in een maritiem klimaat gevoeliger zijn voor klimaatveranderingen dan gletsjers in een droog klimaat. De ijskap- en gletsjermodellen worden aangedreven door de temperatuurveranderingen die door het zonale klimaatmodel zijn berekend. De aldus verkregen resultaten zijn weergegeven in de bovenste figuur voor het IPCC-scenario met toenemende aerosolconcentraties.

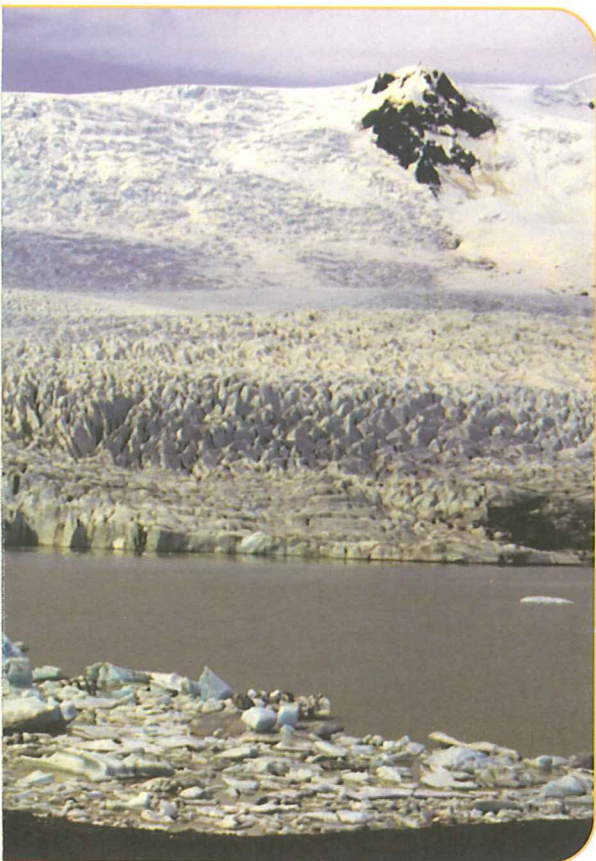
Behalve de projecties verkregen met het tweedimensionale model (ook opgenomen in het IPCC-rapport) worden ook resultaten getoond van het eendimensionale IPCC-model (onderste figuur). Hierbij is in feite hetzelfde model gebruikt als in het IPCC-rapport van 1990, zij het dat de modelparameters zijn aangepast. De bijdrage van thermische expansie wordt berekend met een kolommodel dat de hele oceaan representeert. Voor de bijdrage van gletsjers en kleine ijskappen is een mondiaal smeltmodel gebruikt. De bijdragen van de Groenlandse en Antarctische Ijskap zijn bepaald met statische gevoeligheden. Deze gevoeligheden zijn niet afhankelijk van de grootte van de temperatuurstijging. In deze aanpak is de geometrie van de ijskappen evenmin aan verandering onderhevig. Het blijkt dat in beide gevallen circa de helft van de zeespiegelstijging wordt veroorzaakt door thermische expansie. De bijdragen van gletsjers, kleine ijskappen en de Groenlandse ijskap zijn iets kleiner. De Antarctische ijskap wordt verondersteld bij te dragen aan een zeespiegeldaling, door een toename in de accumulatie van ijs. De verschillen in beide projecties zijn echter groot en worden ook gevonden indien van constante aërosolconcentraties wordt uitgegaan (zie onderstaande tabel).



Gletsjers en ijskappen spelen een belangrijke rol bij zeespiegelstijging.

model/ methode	thermische expansie	gletsjers, ijskappen	Groenland	Antarctica	totaal
IPCC - 1 dim: constante aërosolen	32	18	7	-2	55
IMAU-model: constante aërosolen	17	15	10	-8	34
IPCC - 1 dim: toenemende aërosolen	28	16	6	-1	49
IMAU-model: toenemende aërosolen	15	12	7	-7	27

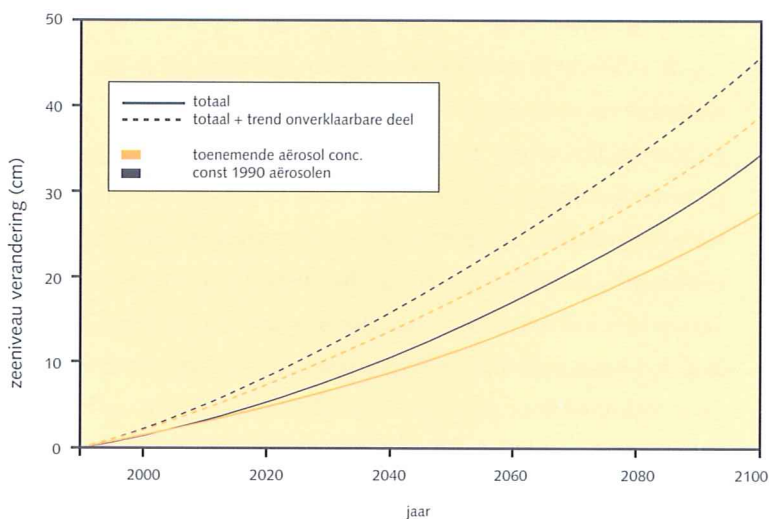
Berekende bijdragen en totale zeespiegelstijging voor de periode 1990-2100, met constante aërosolconcentraties en met toenemende aërosolconcentraties.



De door het eindimensionale model berekende zeespiegelstijging, die als gevolg van thermische expansie optreedt, is circa twee keer zo groot als de stijging waar het zonale klimaatmodel op uitkomt. Dit verschil wordt in belangrijke mate veroorzaakt door de manier waarop de temperatuurverandering van de oceanische menglaag wordt bepaald. Wat betreft Antarctica is in de IPCC-voorspellingen de mogelijke instabiliteit van de West-Antarctische IJskap meegenomen. Door het IMAU wordt een dergelijke instabiliteit in de komende eeuw niet waarschijnlijk geacht. Voor beide sets modellen zijn de projecties van de mondiale zeespiegelstijging voor het laagste, het middelste en het hoogste emissiescenario, zowel voor constante (1990) aerosolconcentraties als voor toenemende aerosolconcentraties bepaald.

De waarden van deze projecties voor de komende 100 jaar lopen van 23 tot 66 cm. Vrijwel alle projecties laten voor de komende eeuw een veel grotere zeespiegelstijging zien dan de waargenomen zeespiegelstijging in de afgelopen honderd jaar. Alleen het IMAU-model berekent voor het laagste emissiescenario een zeespiegelstijging die ongeveer even groot is als de waargenomen trend.

Zeeniveauprojecties voor het hoogste emissiescenario zijn in beide gevallen enkele malen groter. Het is duidelijk dat de onzekerheden in de zeeniveauprojecties groot zijn.



Voorspelde zeespiegelstijging volgens het IMAU-model met en zonder correctie voor het 'onverklaarbare deel'. De huidige modellen verklaren de gemeten zeespiegelstijging van de afgelopen 100 jaar slechts voor een gedeelte. De voorspelling voor de komende 100 jaar moet hiervoor gecorrigeerd worden.

## Onzekerheden zeespiegelstijging

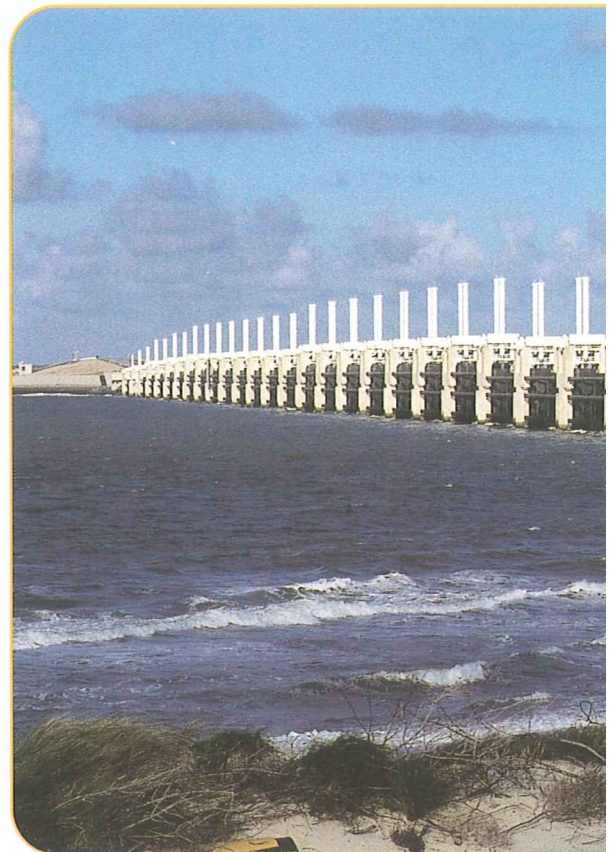
Een groot deel van de waargenomen zeespiegelstijging blijft nog onverklaarbaar. De beste schattingen van de (bekende) bijdragen aan de zeespiegelstijging in de afgelopen honderd jaar (thermische expansie en van de veranderingen in de massa's landijs) dragen samen slechts 8 cm bij aan de gemeten relatieve zeespiegelstijging van 18 cm. Een methode om het onverklaarbare deel van de historische trend in rekening te brengen is om deze trend te extrapoleren naar de toekomst. De projecties van de zeespiegelstijging die aldus verkregen worden met het IMAU-model voor het middelste emissiescenario staan in nevenstaande figuur weergegeven.



Deze projecties kunnen als 'beste schattingen' van dit moment worden beschouwd. Met constante aerosolen komt dit neer op een stijging van 45 cm voor 2100. Met toenemende aerosolen bedraagt het 38 cm.

Ten slotte moet er rekening worden gehouden met lokale veranderingen in de zeespiegel die sterk kunnen verschillen van het mondiaal gemiddelde door dynamische effecten op de oceaancirculaties. Resultaten van algemene circulatiemodellen laten regionale verschillen zien in de zeespiegelstijging die even groot zijn als de mondiaal gemiddelde waarde. Patronen van regionale zeespiegelvariëaties verschillen echter van model tot model. Zelfs worden voor eenzelfde model verschillende regionale zeespiegelvariëaties gevonden in verschillende experimenten. Gezien de grote onzekerheden handhaaft Rijkswaterstaat 60 cm als verwachte relatieve zeespiegelstijging in de komende eeuw.

## Rijkswaterstaat handhaaft 60 cm als waarde voor de verwachte (relatieve) zeespiegelstijging in de komende eeuw.



Bij de bouw van de Oosterscheldekering is rekening gehouden met toekomstige zeespiegelstijging.

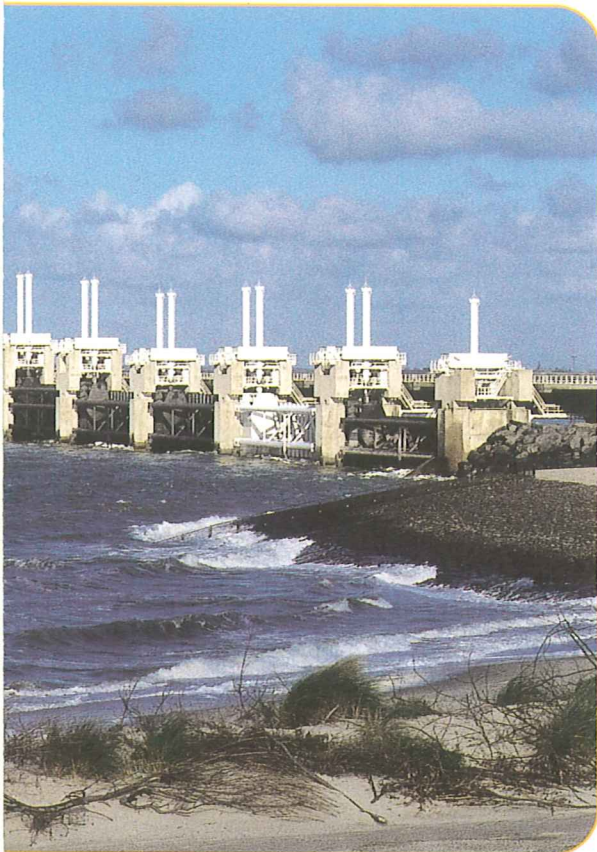


### Getijverandering

Op dit moment is moeilijk aan te geven hoe het getij in de toekomst zal veranderen. Het is zeer waarschijnlijk dat de getijverschillen verder zullen toenemen. Terwijl de morfologie nog geruime tijd nodig zal hebben om zich aan te passen aan in het verleden gemaakte veranderingen (verdiepingen, Deltawerken, Afsluitdijk etc.) liggen verdere verdiepingen in het verschiet. Tevens is er een toename van getijverschillen van 'buitenaf' die we nog niet kunnen verklaren. Hiervan moeten we aannemen dat dit in de toekomst door zal gaan. De rol die zeespiegelstijging hierin speelt is gering aangezien door een verhoging van de zeespiegel het getijverschil langs de Nederlandse kust slechts een enkele centimeter zal toenemen.

De verwachting is dat de veranderingen die zich de afgelopen honderd jaar hebben voorgedaan, de komende eeuw zullen voortzetten.

Door zeespiegelstijging zal het areaal intergetijdengebied afnemen, door de getijvergroting neemt het toe. Door morfologische aanpassingen zijn voorspellingen over de toekomst echter onzeker.



De mate waarin depressies en depressiebanen zullen veranderen, heeft grote consequenties voor de veiligheid van Nederland.

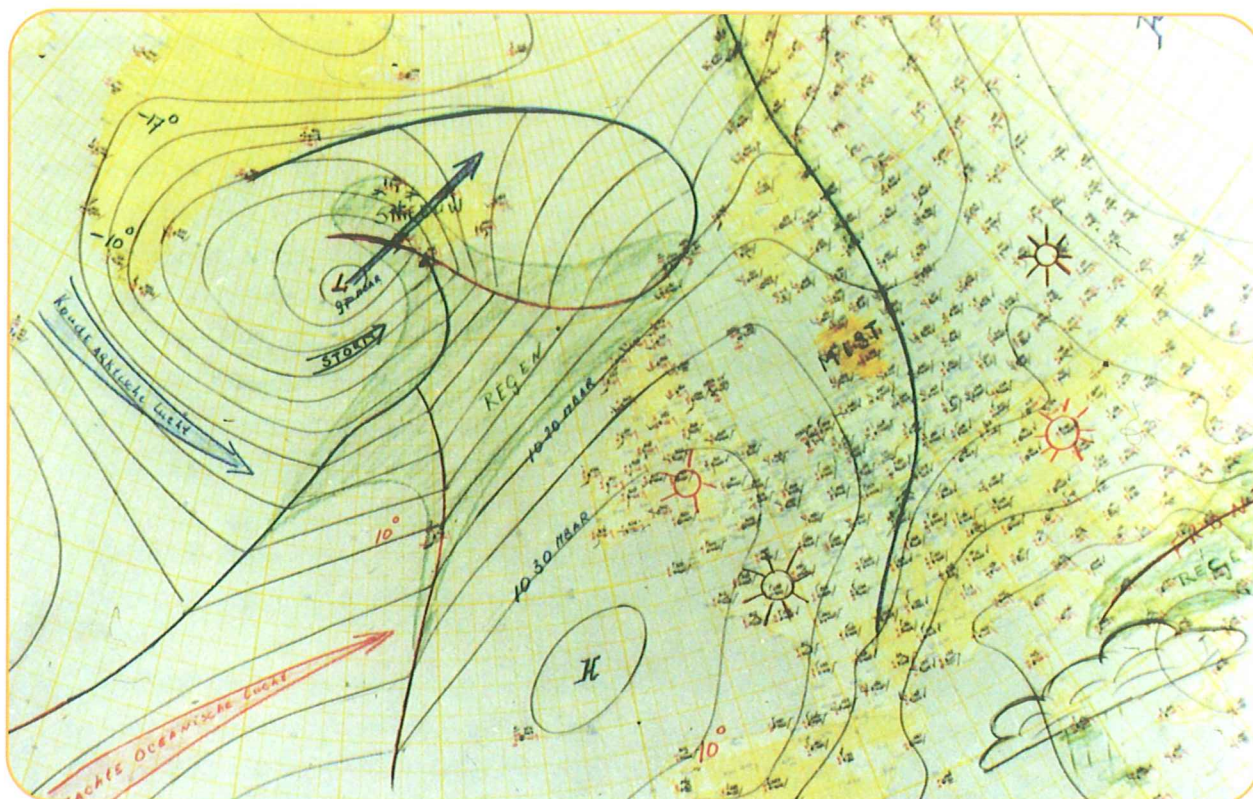
## Windkracht en windrichting

Naast veranderingen in het zeeniveau zijn eventuele veranderingen in het windsysteem van groot belang voor de Nederlandse kust. Analyses van wind en luchtdrukwaarnemingen van de afgelopen honderd jaar geven geen eenduidig beeld van een mogelijke historische trend in het voorkomen van stormen.

Sommige studies laten een kleine toename zien in de stormfrequentie boven de Noord-Atlantische Oceaan, maar het is onduidelijk in welke mate deze toename wordt veroorzaakt door veranderde waarnemingsmethodieken en in welke mate door de natuurlijke variabiliteit van het klimaat.

In studies toegespitst op het Noordzeegebied zijn geen veranderingen gevonden in de stormfrequentie van de afgelopen eeuw.

Met behulp van algemene circulatiemodellen zijn enkele studies verricht naar eventuele toekomstige veranderingen in windkracht en windrichting. De betrouwbaarheid van dergelijke modelresultaten is echter beperkt. Meteorologische fenomenen op synoptische of kleinere schaal worden in deze modellen nog onvoldoende weergegeven. Daarnaast verschillen de toekomstige veranderingen in stormlocatie en stormactiviteit van model tot model. Conclusies omtrent eventuele veranderingen in windkracht en windrichting zijn daarom erg onzeker.

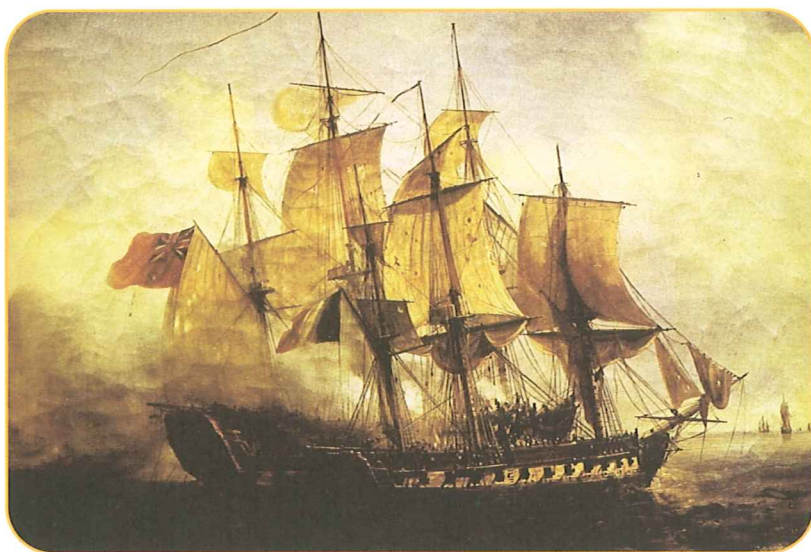


## Stormen en stormvloeden

Om iets te kunnen zeggen over het gedrag van stormen, golven en waterstanden in de volgende eeuw is het niet voldoende om naar de gegevens over de afgelopen eeuw te kijken. Ten eerste is uit historische gegevens bekend dat zich op tijdschalen van een eeuw of langer grote verschillen kunnen voordoen in de frequentie van stormen en stormvloeden. Daarnaast treden op mondiale schaal klimaatveranderingen op als gevolg van het toenemende broeikaseffect en andere menselijke invloeden. Deze antropogene effecten kunnen ook in onze regio tot veranderingen leiden. Hoe de natuurlijke variabiliteit en de veranderingen onder invloed van menselijke activiteiten elkaar beïnvloeden is volledig onbekend.

Uit historische gegevens is bekend dat lange tijdvakken van meerdere eeuwen kunnen passeren waarin de frequentie van stormvloeden langs de Nederlandse kust geringer is. Daar staat tegenover dat zich tussen de Middeleeuwen en circa 1600 ook een periode heeft voorgedaan waarin stormvloeden juist vaker voorkwamen. De reden voor deze natuurlijke variabiliteit kennen we niet. Waar moeten we dan voor de volgende eeuw rekening mee houden?

Als het verleden al onzeker is ten aanzien van stormintensiteit, des te onzekerder is de toekomst. Dat door een verandering in het klimaat ook het stormklimaat zal veranderen, staat vast. Op welke wijze is echter nog onmogelijk aan te geven. Berekeningen met klimaatmodellen waarin het toenemende broeikaseffect is verdisconteerd, leveren nog geen eenduidige resultaten op. Het IPCC concludeert op dit punt het volgende: 'Clearly there is little agreement

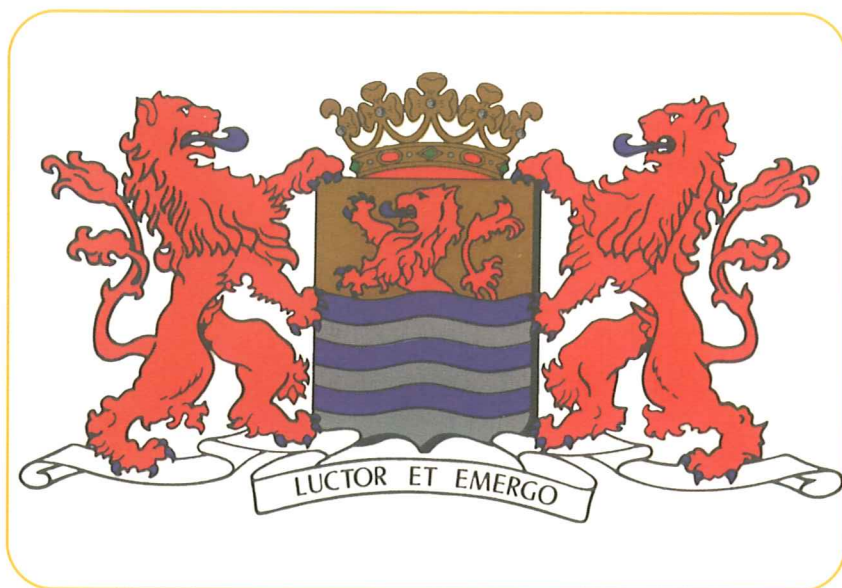


Een groot gedeelte van de Spaanse Armada werd op 21 september 1588 verwoest door een bijzonder zware storm. Er zijn aanwijzingen dat er gedurende deze periode (Kleine IJstijd) meer en zwaardere stormen zijn geweest dan in de huidige tijd.

between models on the changes in storminess that might occur in a warmer world. Conclusions regarding extreme storm events are obviously even more uncertain. (Er is weinig overeenstemming tussen modellen die de mogelijke veranderingen weergeven in stormfrequentie ten gevolge van een warme wereld. Conclusies over extreme stormen zijn met nog minder zekerheid te trekken.)' Toch zijn uit de beschikbare rekenresultaten wel enkele algemene

gevolgtrekkingen te maken. Algemeen wordt aangenomen dat door het toenemende broeikaseffect de continenten eerder opwarmen dan de oceanen.

De temperatuurgradiënt in onze omgeving zal zich daardoor zodanig wijzigen dat de wind meer uit noordwestelijke richtingen kan gaan waaien. Verkennde berekeningen die zijn uitgevoerd met behulp van stormvloedmodellen (gekoppeld aan geneste klimaatmodellen) laten een verandering in stormopzet zien van tien à dertig procent. Deze waarde is slechts indicatief. Het geeft eerder de gevoeligheid aan van het systeem dan dat het een voorspelling is.



## Luctor et emergo

Het 'luctor et emergo' (ik worstel en kom boven) van het Zeeuwse wapen geeft aan dat het water in Nederland gezien wordt als een erfvijand. De hoge rivierafvoeren in 1993 en 1995 hebben ons wederom duidelijk gemaakt dat we deze vijand nog altijd moeten duchten. Versnelde zeespiegelstijging en toename van rivierafvoeren en stormintensiteit zijn de nieuwste bedreigingen waarvoor een passend antwoord moet worden gevonden.

De stijging van de zeespiegel en de vergroting van het tijverschil zijn te meten en kunnen in de gaten worden gehouden, zodat maatregelen tijdig zijn te nemen. De Wet op de waterkering van 1996 schrijft een vijfjaarlijkse toetsing voor om de vereiste veiligheid te waarborgen. Indien echter extreme rivierafvoeren en/of stormintensiteit toenemen, is dit niet direct te meten. Detectie kan pas tien tot vijftig jaar na de verandering met voldoende zekerheid geschieden. Een constatering van een paar extreme afvoeren of stormvloed en zal als 'toeval' worden afgedaan. Als zich een structurele toename voordoet van rivierafvoeren

"Dijken zijn nooit af".  
Onze vijand blijft op de loer.

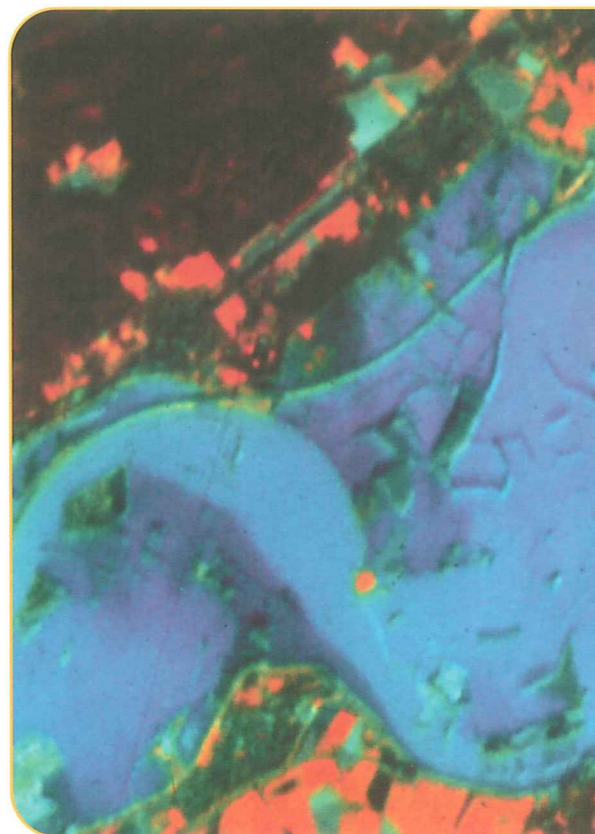


en/of stormintensiteit zal de bescherming tegen overstromen dus tijdelijk minder zijn dan we denken. De kans op een ramp is dan des te groter. Het is cruciaal dat deze extra risico's worden meegewogen in het ontwerp van dijken, duinen en overige vormen van hoogwaterverdediging.

Het huidige beleid geeft aan dat rekening moet worden gehouden met minimaal 20 cm zeespiegelstijging per eeuw. De extra stijging van het gemiddelde hoogwater door de toename van het getijverschil komt hier bovenop. Deze stijging bedraagt 5 cm per eeuw voor de kust en Waddenzee, 10 cm per eeuw voor de Eems-Dollard en voor de Westerschelde van 10 cm per eeuw bij Vlissingen tot 30 cm per eeuw bij de Belgische grens.

Bovendien moet in de ontwerpen van hoogwaterverdediging rekening worden gehouden met de verwachte zeespiegelstijging van 60 cm per eeuw. Als deze stijging niet direct wordt doorberekend in de constructie, moet worden aangetoond dat aanpassing - op economisch en technisch verantwoorde wijze - mogelijk is op een later tijdstip.

Dat bestaande waterkerende constructies voldoende veiligheid blijven bieden is geregeld in de Wet op de waterkering.



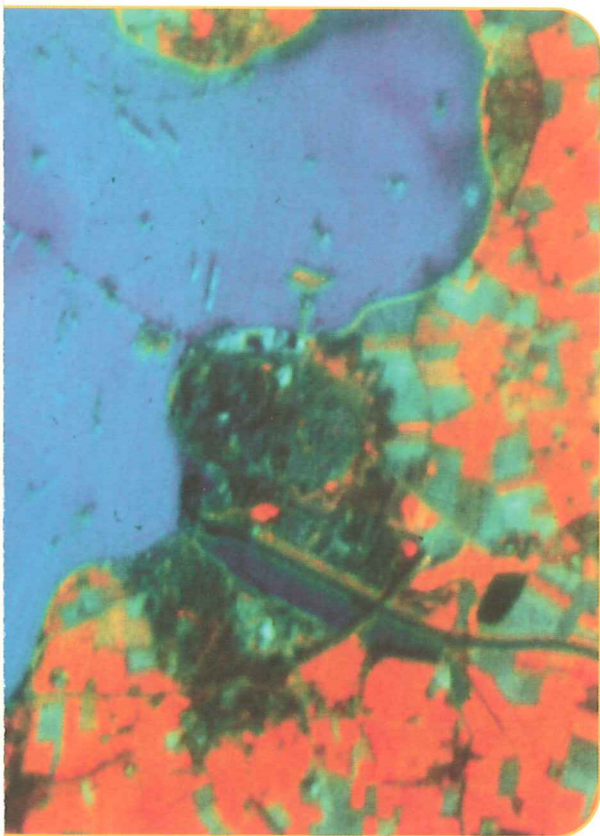
Satellietbeeld van het hoogwater in 1995.

## Wet op de waterkering

Om de veiligheid van de waterkering te toetsen, stelt de minister van Verkeer en Waterstaat de 'hydraulische randvoorwaarden' vast. Deze randvoorwaarden geven de (veranderende) omstandigheden weer waarmee de beheerders van de waterkering rekening moeten houden. De verwachte zeespiegelstijging is één van die randvoorwaarden. Door de randvoorwaarden elke vijf jaar aan te passen, wordt bij de toetsing van alle waterkeringen gebruik gemaakt van actuele inzichten over klimaatverandering.

De beheerder van de primaire waterkering voert deze toetsing iedere vijf jaar uit. Via Gedeputeerde Staten wordt aan de minister van Verkeer en Waterstaat gerapporteerd. Deze informeert de Tweede Kamer. Zodoende wordt de actuele staat van de veiligheid ten aanzien van overstroming regelmatig nagegaan. Tevens biedt een regelmatige toetsing de mogelijkheid om 'mee te groeien' met mogelijke wijzigingen in de randvoorwaarden.

Een en ander is bepaald in de Wet op de waterkering, die sinds 15 januari 1996 van kracht is. In deze wet zijn de veiligheidsnormen opgenomen waaraan een waterkering dient te voldoen. De norm varieert per gebied (dijkring) en ligt - uitgedrukt in overschrijdingskans - tussen de 1 op de 10.000 en de 1 op de 1.250 per jaar.



## Het rivierengebied

Als de afvoerpieken en dus de hoogwaterstanden toenemen, heeft dit gevolgen voor de veiligheid van het gebied achter de dijken. Naar de huidige inzichten wordt geschat dat zonder tegenmaatregelen in de loop van de komende eeuw de afvoer waarop de dijkhoogte is gebaseerd voor de Rijn met zo'n 10% kan toenemen, voor de Maas gaat het om zo'n 20%.

Klimaatveranderingen kunnen ingrijpende gevolgen voor de binnenscheepvaart hebben. Zeer lage afvoeren, vooral tijdens het zomerhalfjaar, zullen vaker en langduriger leiden tot beperking van de binnenscheepvaart. De Waal zal dan minder dan 95% van de tijd goed bevaarbaar blijven. Vooralsnog lijken de gevolgen voor de zeskakelvaart niet zo groot. De waterstanden, waarbij deze schepen kunnen varen, veranderen in de toekomst maar weinig. De extra kosten voor de binnenscheepvaart als geheel kunnen op den duur echter in de honderden miljoenen per jaar lopen.

De natuur in de uiterwaarden zal waarschijnlijk te maken krijgen met meer overstromingen in de winter. Hierdoor zullen sedimentatieprocessen versterkt worden. In de zomer kunnen langere perioden met droogte en lage (grond)waterstanden voorkomen. Bij hogere temperaturen wordt de biologische afbraak van plantenresten in kleine stilstaande wateren groter. Een sterke algenbloei kan tot zuurstoftekort in het water leiden. De directe gevolgen van klimaatveranderingen voor de natuur in de uiterwaarden zijn echter veel kleiner dan de veranderingen die zullen optreden als gevolg van de uitvoering van natuurontwikkelingsprojecten.

Lage afvoeren en hogere watertemperaturen kunnen problemen veroorzaken voor het gebruik van koelwater.



Tijdens perioden met lage afvoer en hoge temperatuur in de zomermaanden is de vraag naar zoet water groot. Wanneer de zeespiegel stijgt en bovendien lage afvoeren vaker optreden, zal de zouttong vanuit de zee verder de rivieren binnendringen. Daardoor zal de waterinname in het beneden rivierengebied vaker beperkt zijn. Lage afvoeren in combinatie met hogere watertemperaturen zullen op den duur frequent tot beperkingen in de koelwatercapaciteit voor de energiecentrales leiden.

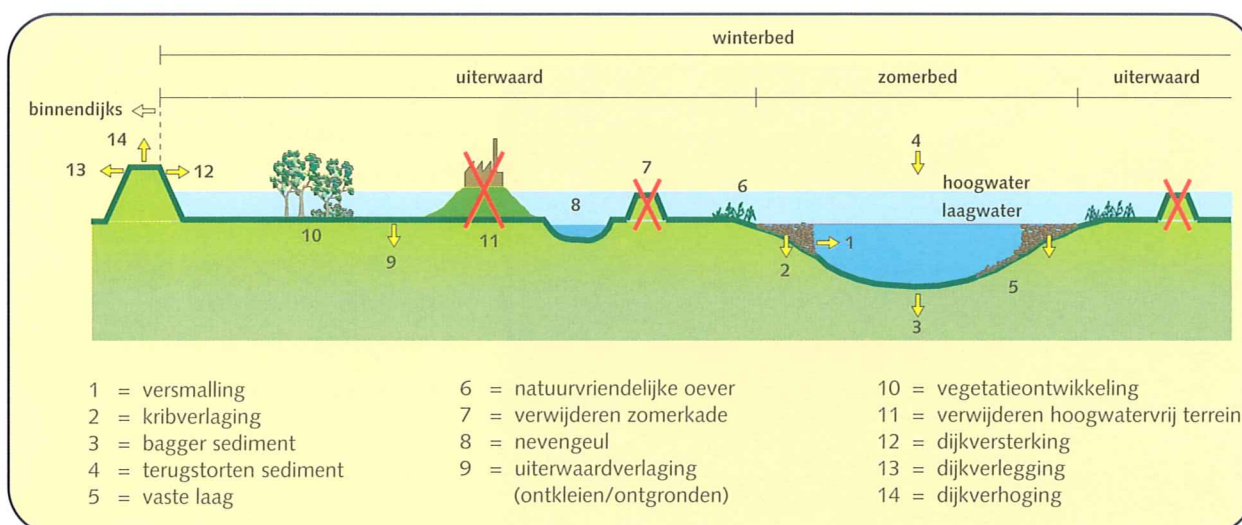
## Rivierbeheer - integrale aanpak

Bescherming tegen hoogwater betreft niet alleen Nederland, maar vergt maatregelen in het hele stroomgebied. Voor het Rijngebied (door de Internationale Rijncommissie, IRC) en onlangs ook voor het Maasgebied is een strategie opgesteld voor de bescherming tegen hoogwater. Daarbij zijn 'tien riviergeboden' geformuleerd met maatregelen ter voorkoming en beperking van schade door hoogwater:

### DE TIEN HOOGWATERGEBODEN

- 1) Water vasthouden, vergroten infiltratie en bergend vermogen, iedere kubieke meter is er een
- 2) Het verzekeren van de afvoer van water, ruimte voor de rivier
- 3) Bescherming tegen hoogwater, technische beschermingsmaatregelen (dijken, retentiebekkens) afgestemd op potentiële schade
- 4) Grenzen erkennen, absolute veiligheid bestaat niet, men moet zich bewust zijn van een restrisico
- 5) Onderhoud Beschermende voorzieningen, bestaande voorzieningen moeten goed onderhouden worden
- 6) Beperken potentiële schade, in overstroombare gebieden zorgvuldige ruimtelijke ordening die rekening houdt met hoogwatergevaar
- 7) Bewust maken van hoogwatergevaar, hoogwaters horen bij rivieren, het honderdjarige hoogwater kan volgend jaar optreden, en een jaar later weer
- 8) Waarschuwen tegen hoogwater, tijdig waarschuwen beperkt schade
- 9) Verbeteren van eigen voorzorgsmaatregelen, elk individu blijft zelf verantwoordelijk
- 10) Integrale aanpak

Voor de toekomstige inrichting van het rivierengebied is een integrale aanpak nodig, met een goede afweging van de belangen van verschillende functies van het riviersysteem. De komende jaren zullen maatregelen worden voorbereid voor de inrichting van het rivierengebied, waarbij de voor- en nadelen van verschillende koersen



Mogelijke maatregelen in het winterbed van de grote rivieren om de afvoer- en bergingscapaciteit te vergroten. Dijkverhoging is de sluitpost.

vergeleken worden. Voor het vergroten van de afvoercapaciteit van het winterbed, en het ontwikkelen van de natuur in de uiterwaarden en het vergroten van de berging staat ons een breed scala aan maatregelen ter beschikking.

Voorbeelden zijn: het verlagen van uiterwaarden; het verwijderen van hoogwatervrije terreinen; het verbreden van uiterwaarden; het aanleggen van nevengeulen; het verlagen van kribben en het verhogen of verplaatsen van dijken.

## Ruimte voor de rivier

Welk maatregelenpakket we ook kiezen, het zal flexibel moeten zijn, omdat in de toekomst meer 'Ruimte voor de Rivier' nodig is. In het project Integrale Verkenning inrichting Rijntakken (IVR) zijn daarom voor verschillende inrichtingsvarianten ook berekeningen uitgevoerd voor de situatie waarin de maatgevende afvoer tot 18.000 m<sup>3</sup>/s is toegenomen. Uit deze verkenningen blijkt dat de kosten van de inrichtingsvarianten maar weinig van elkaar verschillen. Opvallend is dat natuurvriendelijke varianten geen hogere kosten met zich meebrengen.

## 'No-regret' maatregelen

Naar aanleiding van de hoogwaters van 1993 en 1995 is het Deltaplan Grote Rivieren gestart, om het veiligheidsniveau van het rivierengebied versneld op peil te brengen. Tevens zijn voor de Rijntakken, de Maas en de stroomgebieden actieplannen ontwikkeld met maatregelen voor bescherming tegen hoogwater. Dijkverhoging is daarbij steeds het sluitstuk. Voor het handhaven van de veiligheid worden op de middellange termijn (ruwweg tot het jaar 2015) 'no-regret' maatregelen getroffen, gericht op het vergroten van de ruimte voor de rivier en een duurzame veiligheid. Hieronder vallen het verwijderen van obstakels in de uiterwaarden, uiterwaardverlaging en retentiebekkens. Met het oog op de onzekerheden rond de ontwikkeling van het klimaat dienen deze maatregelen flexibel te zijn. We moeten nu al rekening houden met de mogelijkheid dat we na

2015 nog meer ruimte voor de rivier nodig hebben, en daar bij de planvorming al op anticiperen. Bijvoorbeeld door nu al gebieden te reserveren die in de toekomst als extra ruimte ingezet kunnen worden. Zolang dit nog niet nodig is kunnen ze bijvoorbeeld als natuurgebied bestemd worden. Afhankelijk van de ontwikkelingen van het klimaat kunnen we in het winterbed dan geleidelijk meer ruimte voor de rivier beschikbaar maken. Mocht het met de klimaatverandering blijken mee te vallen, dan hebben we in elk geval nog aan natuur gewonnen.

Ruimte voor de rivier.





## Het zandige kuststelsysteem

Ons zandige kuststelsysteem is een dynamisch systeem. Het zoekt zelf naar een nieuw evenwicht als de randvoorwaarden zich wijzigen. Dit is de zogenaamde veerkracht van het systeem. Een versnelde zeespiegelstijging is zo'n wijziging. Indien er voldoende ruimte is voor dynamiek dan zal het kuststelsysteem streven naar een nieuwe ligging, die daardoor relatief goedkoop is om te onderhouden.

Behoud van veerkracht is dus de beste garantie voor een kuststelsysteem dat op lange termijn tegen relatief lage kosten kan worden gehandhaafd. De natuurlijke processen dienen hiertoe zo min mogelijk te worden verstoord.

Jaarlijks wordt circa 6 miljoen m<sup>3</sup> zand op de kust gesuppleerd om de kustlijn van 1990 te handhaven. Om bij een gemeten zeespiegelstijging van 20 cm per eeuw ook het zandverlies op dieper water te kunnen compenseren, is circa 5 miljoen m<sup>3</sup> zand extra nodig. Berekend is dat bij een versnelde zeespiegelstijging van 60 cm per eeuw zelfs 7 miljoen m<sup>3</sup> zand extra nodig is om het zandverlies in dieper water te compenseren. Voor de voorspelling van de kustontwikkeling wordt uitgegaan van 60 cm zeespiegelstijging in de komende eeuw.

Klimaatverandering heeft dus ook invloed op de hoeveelheid zand die we moeten suppleren om de vooroever van onze kust in de huidige vorm te kunnen handhaven.



Per jaar wordt 6 miljoen m<sup>3</sup> zand gesuppleerd om de kust in stand te houden. Door zeespiegelstijging en verstoring van de kust wordt dit mogelijk 13 miljoen m<sup>3</sup> zand.

## Planologische reserveringen

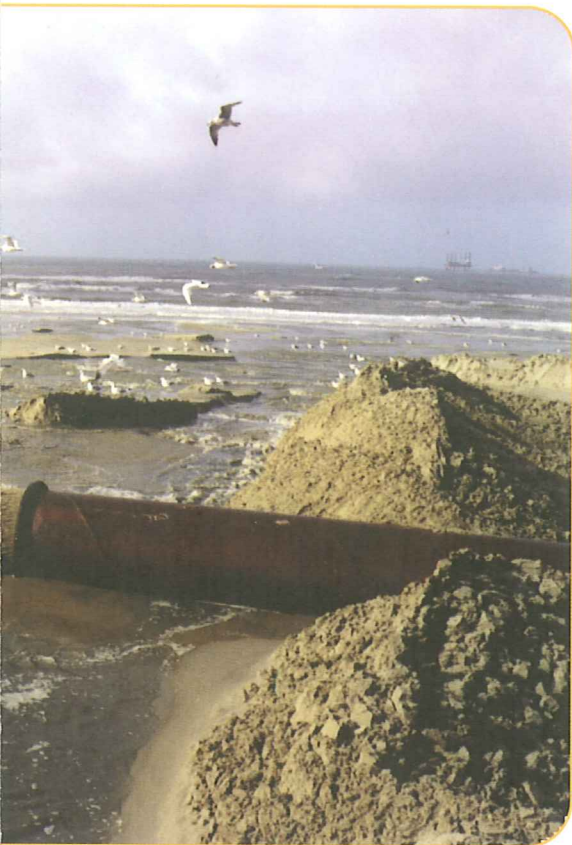
Ook aan de landzijde van de waterkering dient men rekening te houden met klimaatverandering. Dit kan in de vorm van een planologische reservering. Om de waterkering op sterkte te houden, moet de beheerder zonnig de waterkering landwaarts kunnen versterken. Als dan bijvoorbeeld bebouwing te dicht op de waterkering staat, is er te weinig fysieke ruimte om optimaal te

De zeewering bij Westkapelle.



kunnen werken. Ter bepaling van de te reserveren ruimte adviseert de TAW om voor de zandige kust uit te gaan van een pessimistisch scenario (85 cm zeespiegelstijging per eeuw en 10% windtoename per eeuw) voor een periode van tweehonderd jaar.

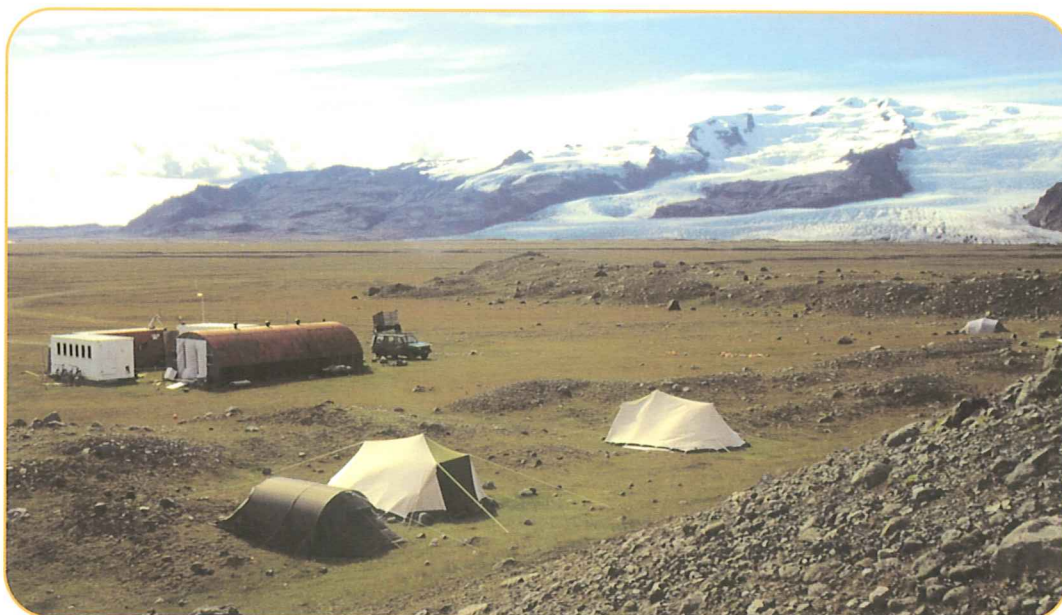
Het moge duidelijk zijn dat deze 'ruimtereservering' ook voor dijken broodnodig is. Het is derhalve van groot belang om dit in toekomstig beleid mee te nemen.



## Toekomstig onderzoek en beleid

Het is duidelijk dat ook op dit moment de onzekerheden rondom klimaatverandering nog erg groot zijn. Tegelijkertijd zijn de eventuele risico's die we lopen als gevolg van klimaatverandering eveneens groot. Voor een beter toekomstig beleid is het daarom noodzakelijk om enerzijds de onzekerheden te verkleinen en anderzijds de risico's beter in kaart te brengen en maatregelen te ontwikkelen die deze risico's beperken.

Voor de 'natte waterstaat' liggen de voornaamste onzekerheden in de verandering van extreme stormvloed en rivierafvoeren. Verder onderzoek hiernaar wordt door Rijkswaterstaat gestimuleerd. RIKZ en RIZA nemen deel aan internationaal onderzoek op dit terrein, evenals IMAU en KNMI die op dit vlak een belangrijke rol spelen.



Het basiskamp van de IMAU-onderzoekers op IJsland.

Aan deze brochure hebben meegewerkt:

### **RIKZ**

J.G. de Ronde (redacteur)  
P. Heinen

### **RIZA**

H. Middelkoop

### **IMAU**

Prof. J. Oerlemans  
Prof. C. Schuurmans  
J. de Wolde

### **Vormgeving**

RIKZ  
Afdeling visuele vormgeving

### **Tekstbewerking**

Direct Dutch, Den Haag

### **Fotografie**

J. de Wolde  
RIKZ  
RIZA  
FOTOstock  
Polyvisie  
Stichting Natuur en Milieu