

# **Inzet van klimaatmodellen bij bepaling van Hydraulische Randvoorwaarden voor primaire waterkeringen**

D. Dillingh

Opdrachtgever:  
Rijkswaterstaat - Waterdienst

# **Inzet van klimaatmodellen bij bepaling van Hydraulische Randvoorwaarden voor primaire waterkeringen**

D. Dillingh

Rapport

Maart 2009

<b>Opdrachtgever</b>	Rijkswaterstaat - Waterdienst						
<b>Titel</b>	Inzet van klimaatmodellen bij bepaling van Hydraulische Randvoorwaarden voor primaire waterkeringen						
<b>Samenvatting</b>							
<p>Volgens de Wet op de Waterkering van 1996 dient elke vijf jaar de veiligheid van de primaire waterkeringen te worden beoordeeld op het vereiste niveau van veiligheid. Voor deze beoordeling zijn hydraulische randvoorwaarden nodig: waterstanden en golven die de waterkering nog veilig moet kunnen keren.</p> <p>De vereiste waterstanden worden afgeleid uit de basispeilen, welke een terugkeerperiode van 10.000 jaar hebben. De basispeilen 1985 zijn bepaald door statistische extrapolatie op basis van meetreeksen met een lengte van orde 100 jaar. Bij statistische extrapolatie van extreme-waarden verdelingen tot buiten het bereik van de waarnemingen wordt aangenomen dat de statistische verdeling van nog nooit opgetreden waarden gelijk is aan de verdeling die hoort bij de hoge waargenomen waarden. Er wordt daarbij dus geen rekening gehouden met beschikbare fysische kennis omtrent de factoren die deze verdeling beïnvloeden.</p> <p>Een mogelijk alternatief is het gebruik van numerieke modellen die het klimaat en de resulterende stormvloedpeilen beschrijven. Daarmee kunnen in principe voor een duur van 10.000 jaar, of zolang als gewenst, windvelden boven de Noordzee en waterstanden aan de kust worden gegenereerd. Een vergelijkbare aanpak kan in beginsel ook voor boven het land worden gevolgd. Met het doel om draagvlak te creëren voor een dergelijke aanpak en de mogelijkheden te inventariseren om deze aanpak toe te passen bij de bepaling van hydraulische randvoorwaarden, is op 11 november 2008 een workshop georganiseerd met als titel "Kunnen klimaatmodellen helpen de dijkhoogtes te bepalen?".</p> <p>Verwacht mag worden dat de inbreng van fysica via de modellen en de lengte van de gesimuleerde tijdreeksen leiden tot betrouwbaarder hydraulische randvoorwaarden. De vraag is dan of deze verwachting terecht is. De algemene conclusie uit de workshop is dat inzet van klimaatmodellen zeker potentie heeft, maar dat er nog veel uitgezocht moet worden. De workshop kan zodoende gezien worden als het startpunt van een mogelijk lange-termijn traject in de bepaling van hydraulische randvoorwaarden.</p>							
<b>Referenties</b>			Programmaplan SBW 2008; Projectplan SBW-Belastingen				
<b>Ver</b>	<b>Auteur</b>	<b>Datum</b>	<b>Opmerk.</b>	<b>Review</b>	<b>Goedkeuring</b>		
1	D. Dillingh	December 2008	Concept	B. v.d. Hurk	M.R.A. van Gent		
2	D. Dillingh	February 2009	Aangepast concept				
3	D. Dillingh	Maart 2009	Definitief	B. v.d. Hurk	M.R.A. van Gent		
<b>Projectnummer</b>		H5098.80					
<b>Trefwoorden</b>		Hydraulische randvoorwaarden, klimaatmodellen, waterstanden					
<b>Aantal bladzijden</b>		69					
<b>Classificatie</b>		Geen					
<b>Status</b>		Definitief					

## Inhoud

<b>1</b>	<b>Inleiding</b> .....	<b>1</b>
1.1	Kader .....	1
1.2	De basispeilen .....	2
1.3	Mogelijk alternatief voor het extrapoleren op basis van metingen alleen .....	2
1.4	Doelstelling .....	3
1.5	Aanpak.....	4
1.6	Opzet van het rapport.....	4
<b>2</b>	<b>Presentaties</b> .....	<b>5</b>
2.1	Welkom en toelichting op de workshop vanuit de ervaring met het basispeilenonderzoek .....	5
2.2	Bepaling van hydraulische randvoorwaarden in de Waddenzee .....	14
2.3	Het toekomstig klimaat volgens klimaatmodellen .....	23
2.4	Resultaten van ensemble klimaatmodelruns met daaraan gekoppeld het waterbewegingsmodel WAQUA; onderzoek t.b.v. de Deltacommissie .....	33
2.5	Hoe goed zijn klimaatmodellen eigenlijk? .....	44
<b>3</b>	<b>Discussie</b> .....	<b>55</b>
3.1	De koppeling van klimaat- en waterbewegingsmodellen .....	55
3.2	Parameterisaties.....	56
3.3	Statistiek versus modelinformatie bij extrapolatie .....	57
<b>4</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b> .....	<b>59</b>
4.1	Conclusies .....	59
4.2	Aanbevelingen .....	60
<b>5</b>	<b>Literatuur</b> .....	<b>63</b>
<b>Appendices</b>		
<b>A</b>	<b>Deelnemerslijst workshop</b> .....	<b>65</b>
<b>B</b>	<b>Programma workshop</b> .....	<b>67</b>

# 1 Inleiding

## 1.1 Kader

Volgens de Wet op de Waterkering van 1996 dient elke vijf jaar (1996, 2001, 2006, 2011, etc.) de veiligheid van de primaire waterkeringen te worden beoordeeld op het vereiste niveau van veiligheid. Voor deze beoordeling zijn hydraulische randvoorwaarden nodig, waterstanden en golven die de waterkering nog veilig moet kunnen keren, met terugkeerperioden van 250 (Maas ten zuiden van Nijmegen) tot 10.000 (Centraal Holland) jaar, afhankelijk van het gebied dat door de waterkeringen beschermd wordt. Deze hydraulische randvoorwaarden moeten dan ook elke vijf jaar opnieuw worden vastgesteld. Het Ministerie van Verkeer en Waterstaat is voor deze vaststelling verantwoordelijk.

Met het doel de witte vlekken in de kennis voor het vaststellen van de sterkte en de belastingen op te vullen is het lange termijn onderzoeksproject Sterkte en Belastingen Waterkeringen (SBW) opgezet, gefinancierd door de Waterdienst van Rijkswaterstaat.

Het SBW-programma omvat thans negen projecten, waarvan er zeven betrekking hebben op de sterkte van de waterkeringen en twee op de belastingen erop. Eén van die laatste twee is het project SBW-Waddenzee, dat startte in 2006. Het doel van dat project is om de kwaliteit van de rekenmodellen en –methodes vast te stellen en waar nodig te verbeteren, zodat in 2011 en later betere hydraulische randvoorwaarden voor het Waddenzee-gebied kunnen worden vastgesteld. Het project SBW-Waddenzee richt zich vooral op de golfmodellering, waarvan in 2006 was uitgezocht dat dit de zwakste schakel vormde in het bepalen van de hydraulische randvoorwaarden in dit gebied.

Terwijl SBW-Waddenzee zich richt op de Waddenzee en de hydraulische randvoorwaarden voor 2011, is het andere SBW-project dat betrekking heeft op de belastingen, aangeduid als SBW-Belastingen, breder georiënteerd en kijkt het verder vooruit. Het project startte medio 2008 en kijkt in beginsel naar alle zoet- en zoutwatersystemen. Momenteel wordt een inventarisatie gemaakt van de nog ontbrekende kennis, waarna een onderzoeksplan zal worden opgesteld, gericht op het leveren van richtlijnen voor het vaststellen van nauwkeurige hydraulische randvoorwaarden voor de Nederlandse primaire waterkeringen. De tijdhorizon van SBW-Belastingen is 2016.

In 2008 zijn in het kader van het project SBW-Belastingen een aantal “no-regret”-acties uitgevoerd. Dit document rapporteert over één van deze acties. De “no-regret”-acties zijn uitgevoerd om meer inzicht te krijgen in methoden, modellen en technieken die relevant zijn voor het korte termijn project WTI (Wettelijk Toets Instrumentarium). Het WTI is gebaseerd op de Hydraulische Randvoorwaarden (HR) en het Voorschrift Toetsen op Veiligheid (VTV). Het onderhavige project is een eerste stap in een onderzoekstraject gericht op het verbeteren van modellen en methoden voor het vaststellen van statistieken van extreme belastingen op waterkeringen, alsmede het uiteindelijk toepasbaar maken ervan voor WTI.

## 1.2 De basispeilen

Basispeilen zijn per definitie stormvloedpeilen met een terugkeerperiode van 10.000 jaar. Hiervan afgeleid zijn de ontwerppeilen, die dienen als uitgangspunt voor het ontwerpen van waterkeringen langs de Nederlandse kust en de estuaria. De huidige basis- en ontwerppeilen zijn geldig voor het jaar 1985. Voor de hydraulische randvoorwaarden voor het toetsen van de waterkeringen worden ze elke vijf jaar aangepast op de stijging van de gemiddelde hoogwaterstanden sinds 1985, teneinde de toetspeilen te verkrijgen.

De basispeilen 1985 zijn bepaald door statistische extrapolatie op basis van meetreeksen met een lengte van orde 100 jaar (voor de westelijke Waddenzee orde 50 jaar vanwege de Afsluitdijk), waarbij voor de onderlinge samenhang van de verschillende stations gebruik is gemaakt van relaties tussen stormvloedstanden van de verschillende stations, bepaald op basis van simulaties met waterbewegingsmodellen van gemanipuleerde opgetreden stormen.

Bij statistische extrapolatie van extreme-waardenverdelingen tot buiten het bereik van de waarnemingen wordt aangenomen dat de statistische verdeling van nog nooit opgetreden waarden gelijk is aan de verdeling die hoort bij de hoge waargenomen waarden. Er wordt daarbij dus geen rekening gehouden met beschikbare fysische kennis omtrent de factoren die deze verdeling beïnvloeden. Het is bijvoorbeeld denkbaar dat de fysica aangeeft dat de verdeling en de bijbehorende betrouwbaarheidsintervallen niet zondermeer statistisch mogen worden geëxtrapoleerd, bijvoorbeeld omdat er bovengrenzen zijn. De forse statistische extrapolatie levert dan ook een relatief grote onzekerheid.

Het in de toekomst opnieuw vaststellen van basispeilen en bijbehorende betrouwbaarheidsintervallen op basis van langere meetreeksen heeft alleen zin als de reeksen aanzienlijk langer zijn, bijvoorbeeld 2 keer zolang als nu (en zelfs dat stelt op logaritmische schaal niet veel voor), of als de statistische inzichten zijn verdiept. Wat de meetreeksen betreft betekent dit, dat we nog zo'n 100 jaar of langer zouden moeten wachten alvorens een hernieuwd statistisch onderzoek zinvol is. Dat is onaanvaardbaar lang.

## 1.3 Mogelijk alternatief voor het extrapoleren op basis van metingen alleen

Een mogelijk alternatief is het gebruik van numerieke modellen die het klimaat en de resulterende stormvloedpeilen beschrijven. Daarmee kunnen in principe voor een duur van 10.000 jaar, of zolang als gewenst, windvelden boven de Noordzee en waterstanden aan de kust worden gegenereerd. Daarmee zijn niet alle onzekerheden verdwenen, maar kan de statistische onzekerheid door de extrapolatie aanzienlijk worden verminderd. Tevens is automatisch de fysische samenhang tussen de verschillende stations gegarandeerd, kunnen ook voor tussengelegen punten tijdreeksen worden gegenereerd, en kan de beste fysische kennis van extreme stormen in de modellen worden gebruikt (zowel wind als water). Uiteraard heeft deze methode ook zijn beperkingen. Zo zijn de modellen altijd afgeregeld op reeds opgetreden stormen en is verificatie van mogelijke stormen in de toekomst per definitie onmogelijk. Het resultaat zal zo goed zijn als de modellen die gebruikt worden. Het verhogen van de statistische betrouwbaarheid door uitbreiding van het aantal (synthetische) waarnemingen gaat dus gepaard met de introductie van een nieuwe onzekerheid, een

onbekende modelfout. Dit is een belangrijk dilemma. Het is een nieuwe aanpak die nog het nodige draagvlak zal moeten verdienen en zich zal moeten bewijzen.

In het voorgaande ligt het accent op stormvloeden langs de kust. Dit is ook het makkelijkst voor te stellen en toe te passen, immers de stormvloeden ontstaan door hoge windsnelheden boven de Noordzee met zijn relatief eenvoudige geometrie. Het modelleren van stormvloeden kent al een lange traditie. Verder hebben de huidige generatie mondiale klimaatmodellen (GCM's, General Circulation Models) waarmee lange klimaatruns kunnen worden gedraaid, resoluties die nog te grof zijn voor regio's en regionale wateren binnen Nederland, maar wel geschikt voor de modellering van stormvloeden op de Noordzee. Naast waterstanden kunnen ook golven worden meegenomen in de modellering.

Voor toepassing op het land zijn fijnere regionale klimaatmodellen nodig, die wel in ontwikkeling zijn, maar mogelijk nog niet toereikend voor het onderhavige doel.

Waterstanden en golven op de binnenlandse wateren (de modellering van de land-waterovergangen moet wel goed genoeg zijn), alsmede neerslag en rivierafvoeren kunnen in beginsel worden gemodelleerd, denk ook aan de combinatie van rivierafvoeren met de zeestanden voor het benedenrivierengebied. Ook extreme windstatistiek kan worden verkregen. Verder kunnen ook de effecten van klimaatverandering worden bestudeerd door de klimaatmodellen te voeden met verhoogde concentraties van broeikasgassen en kan men leren van de omstandigheden voorafgaande aan een bijzonder extreme gebeurtenis; dat laatste is nuttig voor het tijdig zien aankomen daarvan door de waarschuwingdiensten.

Het lijkt een heel aantrekkelijke aanpak. Het eerste onderzoek in die richting is gedaan door Henk van den Brink (thans KNMI) in zijn promotie-onderzoek (Extreme winds and sea-surges in climate models, maart 2005).

#### 1.4 Doelstelling

Met het doel om draagvlak te creëren voor bovengenoemde aanpak is op 11 november 2008 een workshop gehouden met als titel "Kunnen klimaatmodellen helpen de dijkhoogtes te bepalen?".

De doelstelling van de workshop kan als volgt worden omschreven:

- Het verkrijgen van draagvlak voor een aanpak, waarbij lange tijdreeksen van hydraulische parameters gegenereerd worden met behulp van gekoppelde atmosferische en waterbewegingsmodellen,
- Het inventariseren van de mogelijkheden om deze aanpak toe te passen bij de bepaling van hydraulische randvoorwaarden,
- Het formuleren van nog te beantwoorden onderzoeksvragen.

Verwacht mag worden dat de inbreng van fysica via de modellen en de lengte van de gesimuleerde tijdreeksen leiden tot betrouwbaarder hydraulische randvoorwaarden. De vraag is dan of deze verwachting terecht is. De workshop kan zodoende gezien worden als het startpunt van een mogelijk lange termijn traject in de bepaling van hydraulische randvoorwaarden.

## **1.5 Aanpak**

Voor de workshop zijn een aantal experts op het gebied van meteorologie, hydrodynamica, extreme-waardenstatistiek en probabilistiek uitgenodigd, met ervaring op het gebied van klimaatmodellen en/of hydraulische randvoorwaarden. De deelnemerslijst is weergegeven in Bijlage A.

De workshop is georganiseerd door Douwe Dillingh (Deltares) met inbreng van Bart van den Hurk, Henk van den Brink (beiden KNMI), Sofia Caires en Jacco Groeneweg (beiden Deltares). Bart van den Hurk trad op als dagvoorzitter.

In een aantal korte presentaties van Douwe Dillingh, Jacco Groeneweg (beiden Deltares), Rein Haarsma, Andreas Sterl en Henk van den Brink (alle drie KNMI) is de mogelijke rol van klimaatmodellen in de HR-bepaling uiteengezet en zijn de sterke en zwakke punten van klimaatmodellen belicht. Dit heeft gedurende de presentaties en na afloop tot nuttige discussies geleid. Het programma van de workshop is vermeld in Bijlage B.

## **1.6 Opzet van het rapport**

In hoofdstuk 2 worden de presentaties uitgebreid besproken. Omwille van de leesbaarheid en ter voorkoming van veel bladeren is ervoor gekozen alle gebruikte dia's in hoofdstuk 2 op te nemen in plaats van in een aparte appendix. Een samenvatting van de discussie is gegeven in hoofdstuk 3. Conclusies en aanbevelingen volgen in hoofdstuk 4.



## 2 Presentaties

### 2.1 Welkom en toelichting op de workshop vanuit de ervaring met het basispeilenonderzoek



The slide is a presentation slide for Deltares. It features a header with the Deltares logo and the tagline 'Enabling Delta Life'. The main content is a title in blue text: 'Kunnen klimaatmodellen helpen de dijkhoogtes te bepalen?'. Below the title is the name 'Douwe Dillingh' and the date '11 november 2008'. The background of the slide is a photograph of a coastal landscape with a dike and water.

Douwe Dillingh heet de aanwezigen van harte welkom. De aanwezigen zijn uitgenodigd op basis van hun deskundigheid van klimaatmodellen, extreme-waardenstatistiek en/of betrokkenheid bij de hydraulische randvoorwaarden voor de primaire waterkeringen in Nederland. De doelstelling van de workshop is het verkrijgen van draagvlak voor een aanpak, waarbij lange tijdreeksen van relevante hydraulische parameters gegenereerd worden met behulp van gekoppelde atmosferische en waterbewegingsmodellen.

Vier jaar geleden presenteerde Henk van den Brink zijn promotie-onderzoek "Extreme winds and sea-surges in climate models" bij DGW (Directoraat-Generaal Water) van V&W. De mogelijkheid de nauwkeurigheid van de overschrijdingslijnen te verbeteren met behulp van fysisch mathematische hydrodynamische modellen sprak zeer aan. Men zag toen een mogelijke toepassing bij het probabilistisch ontwerpen van nieuwe havenhoofden bij IJmuiden. Ook bij het optimaal ontwerpen van waterkeringen lijkt dat belangrijk, al zit op dit moment de onzekerheid van de overschrijdingslijnen langs de kust nog niet de berekeningen van het project VNK (Veiligheid van Nederland in Kaart). Door DGW werd toen al de wens geuit om voor een dergelijke aanpak draagvlak te verkrijgen in de wetenschappelijke wereld en bij betrokken deskundigen en belanghebbenden. De waterbewegingsmodellen hebben al een lange geschiedenis en worden uitvoerig afgeregeld en gevalideerd. Hoe dat met de klimaatmodellen zit was

echter onduidelijk. Deze workshop is georganiseerd in het kader van de projecten SBW-belastingen (Deltares) en Klimaat voor Ruimte – Tailoring Climate Scenarios/CS7 (KNMI).



The slide features a header with two images: a bridge and a coastal landscape. The main content is a white box with a blue title and a bulleted list. The Deltares logo is in the bottom right corner, and the date '11 november 2008' is at the bottom center.

## De basispeilen langs de Nederlandse kust

- Statistisch onderzoek
- Fysisch onderzoek
- Basispeilen voor de hoofdstations
- Ruimtelijke verdeling en overschrijdingslijnen

11 november 2008

**Deltares**

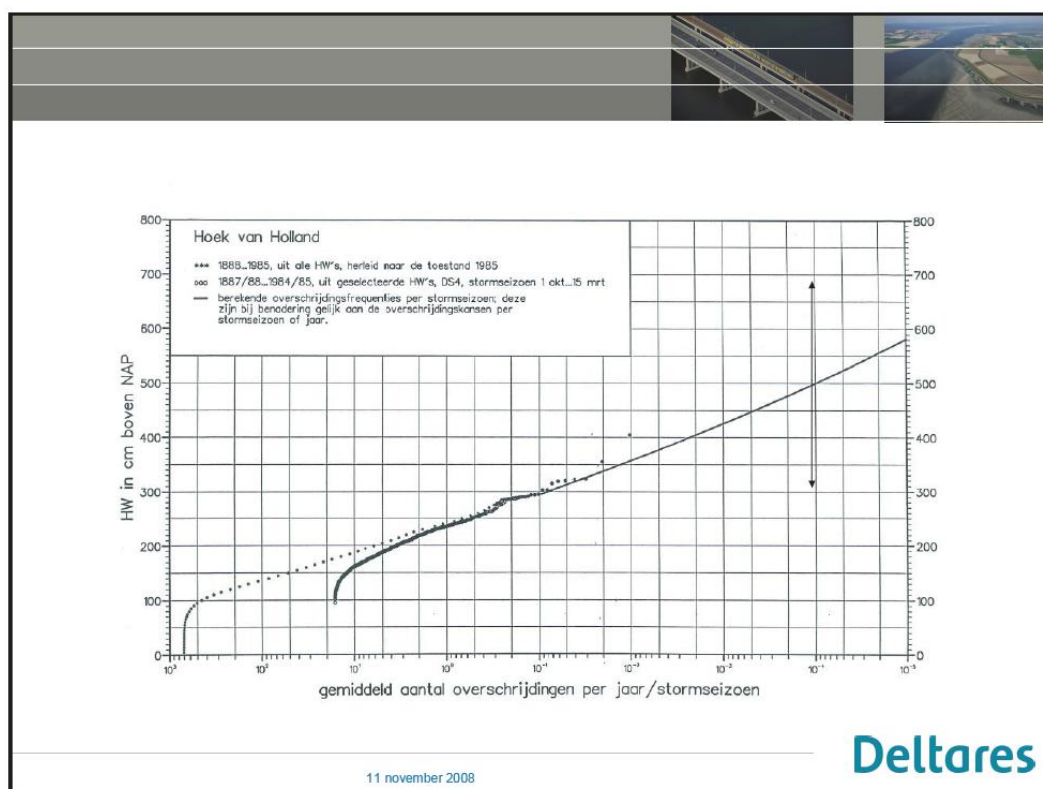
Dillingh licht de behoefte aan met klimaatmodellen gegenereerde stormvloedstanden toe aan de hand van zijn ervaringen met het basispeilenonderzoek.

Basispeilen zijn per definitie peilen met een terugkeerperiode van 10.000 jaar. Begin negentiger jaren van de vorige eeuw werden de basispeilen opnieuw vastgesteld, nadat de Deltacommissie dat voor het eerst had gedaan in het "Rapport Deltacommissie" van 1960. Het hernieuwde onderzoek kan worden onderverdeeld in vier hoofdonderdelen: het statistisch onderzoek, het fysisch onderzoek, het vaststellen van de basispeilen voor de hoofdstations en de ruimtelijke verdeling van de basispeilen langs de kust en estuaria en de overschrijdingslijnen voor de peilmeetstations.

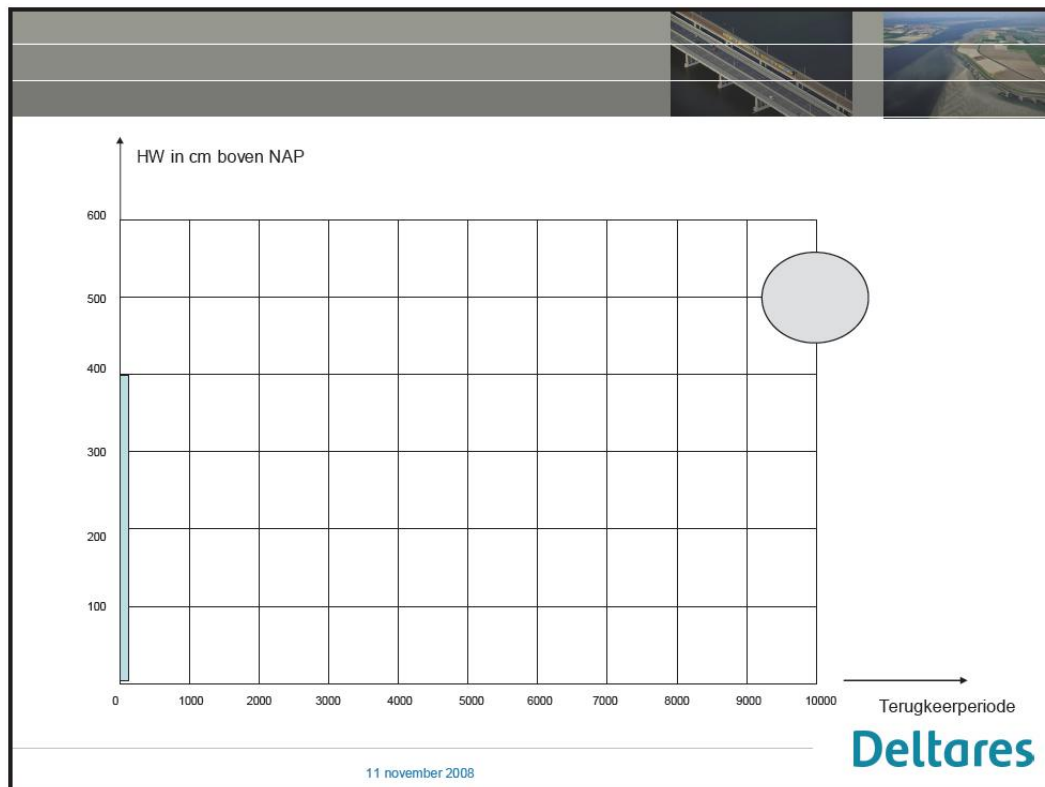
Het statistisch onderzoek was volledig gebaseerd op de extreme-waardentheorie. Eerst werden de data uitvoerig voorbereid ten einde zo goed mogelijk gelijkverdeelde en onafhankelijke waarnemingen te verkrijgen. Te denken valt aan een uniforme wijze van het berekenen van het astronomisch bepaalde deel van de waterstanden, correcties voor de stijging van het gemiddelde hoogwater (d.i. inclusief de gemiddelde zeespiegelstijging), selectie door keuze van drempels, keuze van een stormseizoen en voor verwijdering van autocorrelatie (onafhankelijkheid).

Datasets van ruim 100 jaar waren beschikbaar voor een aantal stations, voor de westelijke Waddenzee was dat niet meer dan orde 50 jaar vanwege de effecten van de afsluiting van de Zuiderzee in 1932. Gegeven de datasets werd per station noodzakelijkerwijs op basis van de extreme-waardentheorie statistisch geëxtrapoleerd. De volgende opmerkingen kunnen daarbij worden geplaatst:

Extrapolatie gaat ervan uit dat het statistisch gedrag van extreme stormvloed en in het geëxtrapoleerde domein gelijk is aan dat van het aantal hoogste waarnemingen waarop de extreme-waardenverdeling is geschat; De extrapolatie is sterk, waardoor het betrouwbaarheidsinterval van de kwantielschattingen ook groot is; Die extreme-waardenverdeling is gekozen waaraan zo weinig mogelijk aannames ten grondslag liggen en waarbij zoveel mogelijk waarnemingen konden worden gebruikt. Dat laatste betekende dat de voorkeur werd gegeven aan een POT-methode (peaks over threshold) boven een methode gebaseerd op stormseizoenmaxima. Ook werden aan de extreme-waardenindex op voorhand geen beperkingen opgelegd, maar werd deze volledig bepaald door de gegevens.



Als voorbeeld wordt de overschrijdingslijn van Hoek van Holland getoond. De extreme-waardenindex is hier licht positief, wat betekent dat in de getoonde figuur de overschrijdingslijn naar rechts omhoog kromt. Het getoonde 95%-betrouwbaarheidsinterval van 95 cm is een normale benadering; in werkelijkheid is dat interval scheef ten opzichte van de kwantielschatting zelf. Uit de figuur valt ook duidelijk af te leiden dat bij nog eens 100 jaar waarnemingen de mate van extrapolatie nog bijna even sterk is. De grens van het waarnemingendomein schuift op van  $10^{-2}$  naar  $5 \cdot 10^{-3}$ . Met een lineaire (frequentie)schaal is nog eens extra goed te zien hoe het waarnemingsgebied (blauwe balk) zich verhoudt tot het gebied waarin men geïnteresseerd is (grijze ovaal) en kan men direct zien hoe weinig een verdubbeling van de waarnemingsperiode nu nog de afstand tot het interessegebied verkleint.

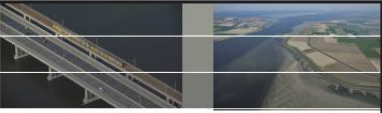


De eindresultaten van het statistisch onderzoek voor de getoonde peilmeetstations zijn berekend met de zogenaamde verdelingsvrije methode. Voor de stations in de westelijke Waddenzee is een correctie toegepast voor de relatief korte periode (orde 50 jaar) ten opzichte van de andere stations (orde 100 jaar). De correctie volgde uit de vergelijking van de resultaten op basis van de lange periode en de korte periode (vanaf het stormseizoen 1932/1933) voor hetzelfde station. De stations zijn afzonderlijk geanalyseerd.

Opvallend aan de resultaten van het statistisch onderzoek was dat de uitkomsten voor de westelijke Waddenzee beduidend lager waren dan die van het rapport van de Deltacommissie uit 1960. De Deltacommissie had destijds onvoldoende gegevens voor statistische analyse beschikbaar en leidde de basispeilen voor de westelijke Waddenzee af uit het vloeiend getrokken verloop van hoogten met een bepaalde overschrijdingsfrequentie (dit werd gedaan voor diverse overschrijdingsfrequenties) langs de gehele kust, uitgevoerd op de alle beschikbare stormvloed en op alleen de stormvloed van na 1932.

Door de resultaten van het statistisch onderzoek ontstond de behoefte aan een fysische check door de samenhang tussen de stormvloed van naburige stations te beschouwen.

Inmiddels waren goede fysisch-mathematische modellen voor de waterbeweging beschikbaar. Hiermee kunnen stormvloed worden gesimuleerd en kunnen bepaalde verbanden tussen de resultaten van stations worden gelegd. Hiertoe werden een aantal geselecteerde recente opgetreden stormen gemanipuleerd door ze op te blazen (hogere windsnelheden), uit te rekken (uitsmeren in de tijd), en te verschuiven in de tijd (andere fase met het astronomisch getij).



## Resultaten statistisch onderzoek

station	Statistiek (1)	Deltacomm. (2)	Hoogste (3)	Vershil (1) - (3)
Vlissingen	540 ± 70	565	466	79
Hoek van Holland	500 ± 95	500	402	98
Den Helder	425 ± 50	505	331	110
Harlingen	460 ± 40	580	379	122
Delfzijl	600 ± 75	640	480	133
West-Terschelling	405 ± 30	530	330	98

**Deltares**

11 november 2008



## Fysisch onderzoek

**Doel:**  
Toetsen van de uitkomsten van het statistisch onderzoek door de samenhang tussen de stations te beschouwen

**Werkwijze:**

- Relatie leggen tussen hoogwater resp. HW-opzet te Hoek van Holland en de andere (hoofd)stations m.b.v. de berekeningsresultaten van gesimuleerde stormen met fysisch-mathematische modellen
- Simulaties van “gemanipuleerde” opgetreden stormen
- Basispeil Hoek van Holland is NAP + 5.00 m
- Uit de betrekkingen met Hoek van Holland volgen overeenkomstige peilen met de stand van NAP + 5.00 m te Hoek van Holland

**Deltares**

11 november 2008

### Resultaten Fysisch onderzoek ( $10^{-4}$ -kwantiel $\pm \sigma$ )

station	opschalen	versch. '53	weging
Vlissingen	555 $\pm$ 30	555 $\pm$ 32	552 $\pm$ 30
Hoek van Holland	500	500	500
Den Helder	487 $\pm$ 30	396 $\pm$ 34	447 $\pm$ 30
Harlingen	569 $\pm$ 43	517 $\pm$ 53	548 $\pm$ 43
Delfzijl	665 $\pm$ 55	588 $\pm$ 67	634 $\pm$ 55
West-Terschelling	496 $\pm$ 34	409 $\pm$ 38	457 $\pm$ 34

11 november 2008

Deltares

### Weging statistiek en fysica ( $10^{-4}$ -kwantiel $\pm \sigma$ )

station	statistiek	fysica	weging
Vlissingen	540 $\pm$ 70	552 $\pm$ 30	545
Hoek van Holland	500 $\pm$ 95	500	500
Den Helder	425 $\pm$ 50	447 $\pm$ 30	441
Harlingen	460 $\pm$ 40	548 $\pm$ 43	501
Delfzijl	600 $\pm$ 75	634 $\pm$ 55	613
West-Terschelling	405 $\pm$ 30	457 $\pm$ 34	428

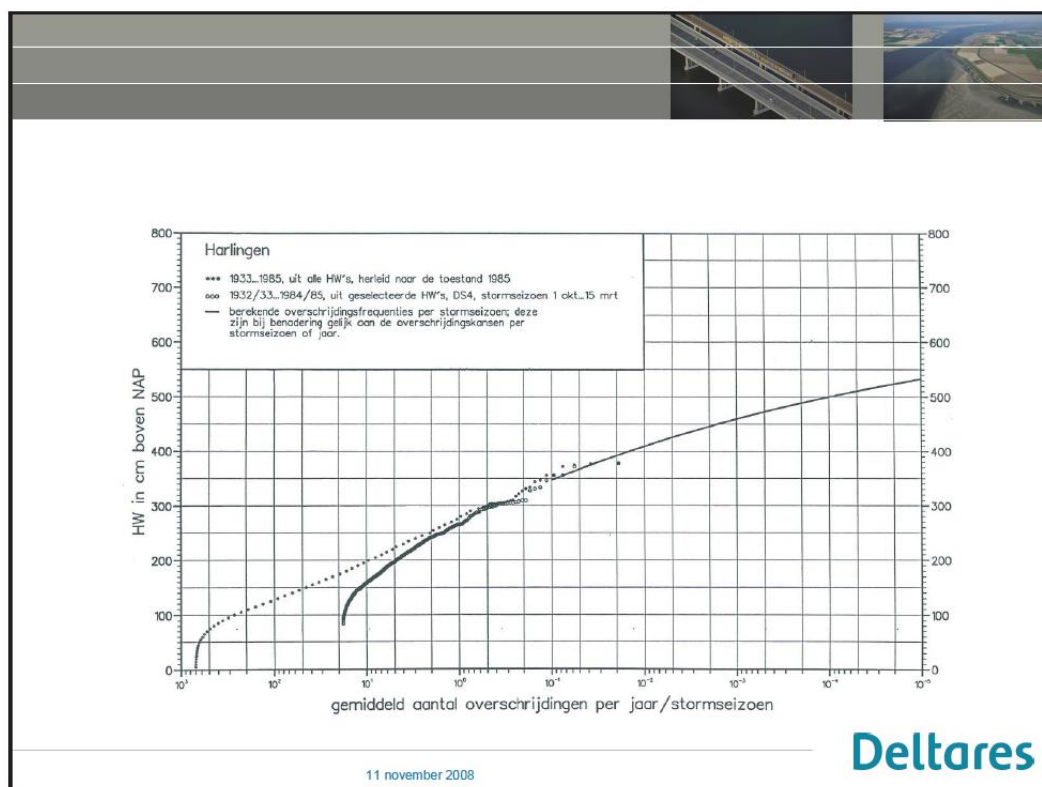
11 november 2008

Deltares

Uitgaande van een vastgesteld basispeil van NAP + 5,00 m te Hoek van Holland, werden met deze verbanden (betrekkingslijnen genoemd) per peilmeetstation peilen

afgeleid overeenkomend met de stand van NAP + 5,00 m te Hoek van Holland. Daarmee werd dus naast de schatting van het basispeil volgens de statistische extrapolatie ook een schatting verkregen via de betrekkinglijnen uit de modelsimulaties met Hoek van Holland. Een tweede set betrekkinglijnen met Hoek van Holland werd verkregen door de beruchte 1953-storm te verschuiven in de ruimte. Voor de volledige werkwijze bij het afleiden van de betrekkinglijnen wordt verwezen naar de literatuur.

De uiteindelijke basispeilen voor de hoofdstations werden verkregen door het wegen van de verschillende resultaten op basis van hun geschatte betrouwbaarheidsintervallen.



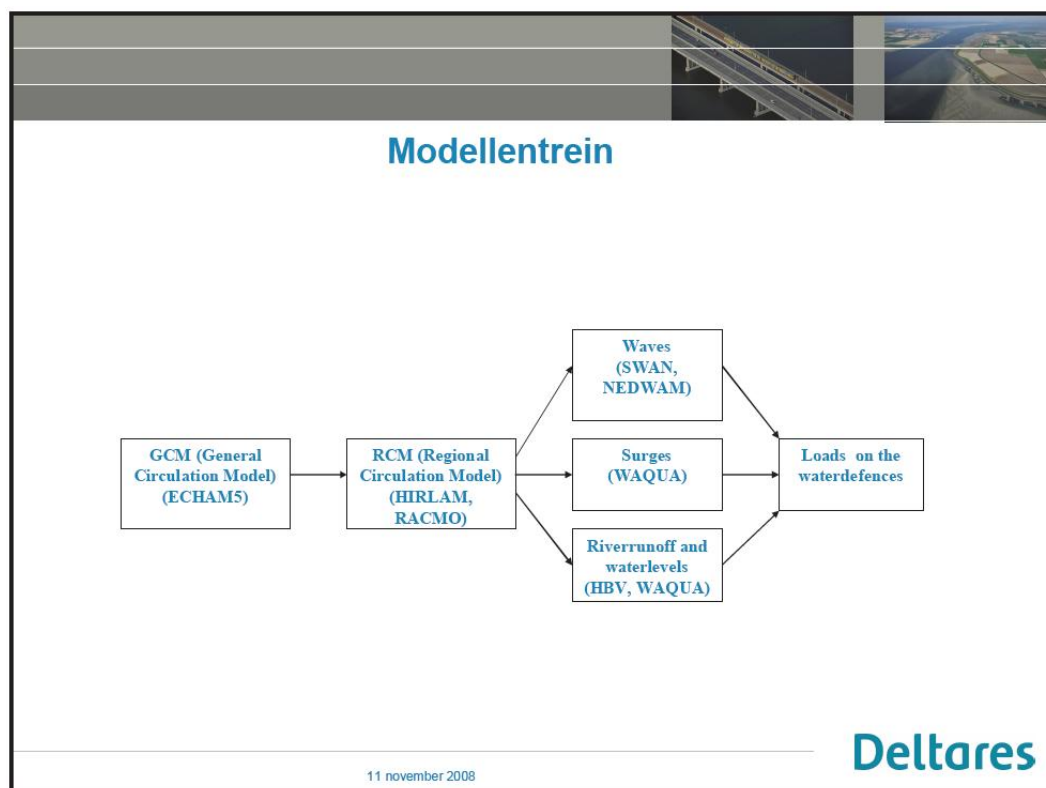
Als voorbeeld wordt de uiteindelijke overschrijdingslijn van Harlingen getoond. De schatting uit het statistisch onderzoek volgens de verdelingsvrije methode kwam uit op NAP + 405 cm. Toepassen van de correctie voor de lengte van de meetreeks leverde NAP + 460 cm. Het fysisch onderzoek met de fysisch-mathematische modellen gaf NAP + 548 cm. Het eindresultaat is geworden NAP + 501 cm. De formele uitgegeven waarde werd afgerond op NAP + 500 cm.

Na het vaststellen van de basispeilen voor de hoofdstations werden basispeilen afgeleid voor elk dijkvak door te interpoleren met behulp van de fysisch-mathematische modellen. Voor alle peilmeetstations werden overschrijdingslijnen afgeleid.

Het gebruik van fysische kennis naast de statistische analyse heeft dus al een lange geschiedenis. Geconstateerd kan worden dat de betrouwbaarheidsintervallen van de basispeilen groot zijn, maar de exacte grootte is onduidelijk door alle bewerkingen. Om deze betrouwbaarheidsintervallen kleiner te krijgen is dus behoefte aan meer data. Ook als nog 100 jaar langer wordt gemeten levert dat voor de betrouwbaarheidsintervallen

niet veel op. Het verkrijgen van gesimuleerde meetreeksen van stormvloed en met behulp van klimaatmodellen lijkt dus een aantrekkelijke optie. De simulaties kunnen in beginsel elke gewenste periode omvatten, de ruimtelijke consistentie langs de kust is gegarandeerd en andere relevante variabelen kunnen integraal mee worden beschouwd (multivariate analyse). De gesimuleerde data zijn bovendien homogeen, d.w.z. niet beïnvloed door veranderingen in de waterloopkundige toestand. Ook toekomstverkenning is mogelijk door de CO<sub>2</sub>-gehalten in de atmosfeer in de klimaatmodellen te forceren volgens te kiezen scenario's.

Tenslotte wordt schematisch weergegeven hoe de modellentrein er uit zou kunnen zien en worden vijf stellingen gepresenteerd, bedoeld om de discussie enigszins te structureren.





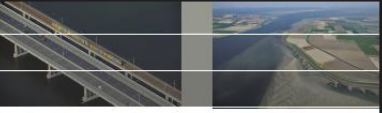


## Stellingen voor de discussie

1. De huidige generatie modellen in bovenstaande modellentrein zijn goed genoeg en geven realistische uitkomsten, ook voor nog nooit opgetreden zware omstandigheden.
2. De modellentrein GCM-RCM-Wave/Surge/Riverrunoff kan gebruikt worden voor simulatie over een periode van 10.000 jaar. Daarmee worden onzekerheden omtrent de statistische extrapolatie tot een aanvaardbaar niveau teruggebracht.
3. De enige manier om de effecten van klimaatverandering op het stormklimaat en de extreme rivierafvoeren te bepalen is via het gebruik van modellen.

11 november 2008

**Deltares**






4. De inbreng van fysica (via de modellen) en de lengte van de gesimuleerde tijdreeksen (orde duizenden jaren) leiden tot een acceptabele basis voor de bepaling van hydraulische randvoorwaarden.
5. Het is zinvol om de nieuwe methode te testen op zijn bruikbaarheid om de hydraulische randvoorwaarden beter te schatten, te beginnen met stormvloeden op de Noordzee.

11 november 2008

**Deltares**

## 2.2 Bepaling van hydraulische randvoorwaarden in de Waddenzee




### Hydraulic Boundary Conditions for the Wadden Sea dikes

(WTI - SBW)



Jacco Groeneweg (Deltares)

Workshop "Kunnen klimaatmodellen helpen de dijkhooges te voorspellen?", 11 november 2008

### Contents



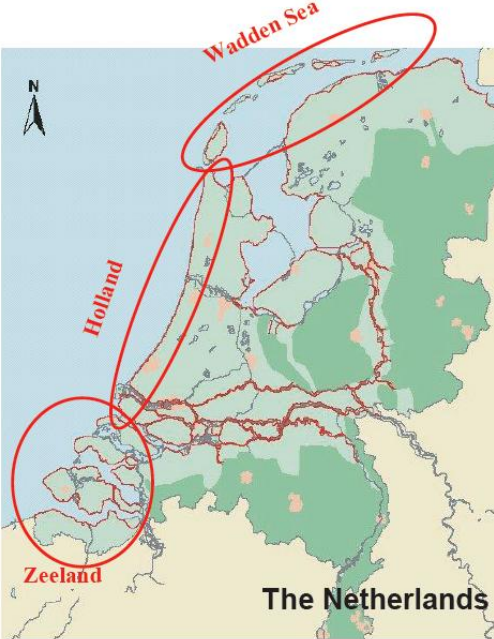
- Motivation and objectives SBW
- Present chain of methods for determination of HBC
- Importance of currents in Wadden Sea
- Effect of dynamical behaviour of a storm on water levels
- Inclusion of storm behaviour in probabilistic approach
- Conclusions



Ja

Jacco Groeneweg licht de behoefte aan de inzet van klimaatmodellen toe vanuit de hydraulische randvoorwaarden voor de Waddenzeedijken.

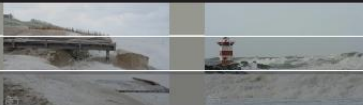
In het kader van de vijfjaarlijkse beoordeling van de primaire waterkeringen dienen voor de dijken ook de hydraulische randvoorwaarden aan de teen van de dijk vijfjaarlijks te worden vastgesteld. Voor de Hollandse en de Zeeuwse kust is het golfmodel SWAN gebruikt voor de “vertaling” van de beschikbare offshore golfstatistiek (dus elke vijf jaar aangepast) naar de kust toe. In de Waddenzee wordt echter nog getoetst op de bij het ontwerp gebruikte waarden, omdat voor dat gecompliceerde gebied geen data beschikbaar waren voor het verbeteren van de SWAN-modellen.

Motivation	
<p><b>Safety</b> level of Dutch Sea defences assessed every five years.</p> <p>Need <b>Hydraulic Boundary Conditions</b> (HBCs) at toe of dike.</p> <p>For Holland and Zeeland coasts <b>SWAN</b> is used for wave transformation offshore/nearshore.</p> <p>In <b>Wadden Sea</b> historic/design data are used instead. <b>REASON: No relevant data</b> available in Wadden Sea for testing and improving SWAN.</p>	

Het project SBW (Sterkte en Belastingen Waterkeringen) wil de gaten in de kennis voor het vaststellen van hydraulische randvoorwaarden opvullen, vooral voor de Waddenzee.



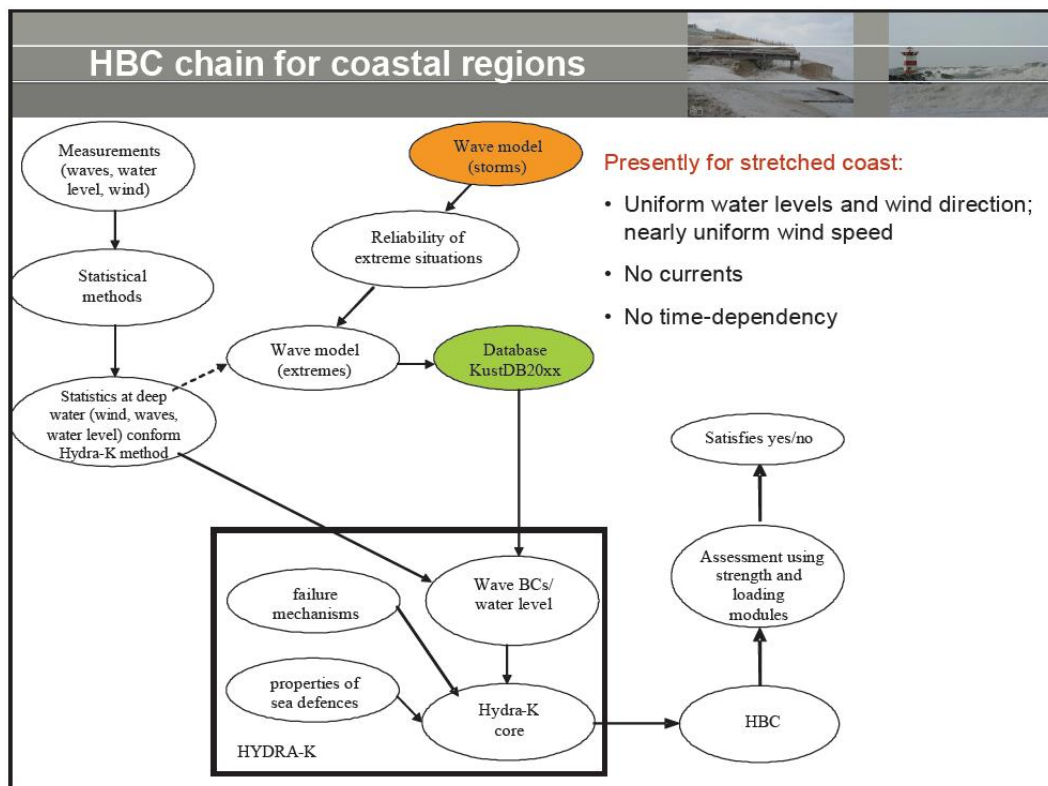
In 2002 werd een meetcampagne opgezet om goede gegevens te verkrijgen voor het verbeteren van het SWAN-instrumentarium. Inmiddels is daarmee veel inzicht opgedaan en is de golfmodellering in de Waddenzee sterk verbeterd. Er is echter meer aan de hand. Zo speelt de invloed van stroming op de golven bij de Hollandse kust een ondergeschikte rol, maar voor de Waddenzee kan dat effect niet worden verwaarloosd. Verder is het hele (hydro)dynamische gedrag tijdens stormvloed van belang voor het Waddengebied, veel meer dan voor de gesloten kust van Holland.

## Objectives SBW



**SBW** (Strength and Loads on Sea Defences) aims at filling knowledge gaps in the determination of **Hydraulic Boundary Conditions**, especially in the **Wadden Sea**:

- 2002: setup of measurement campaign (**SBW Veldmetingen**)
- 2003 (restart in 2006): SBW Boundary Conditions (nowadays known as **SBW-Waddenzee**)
- 2008: **SBW-Belastigen** (continuation of SBW\_Waddenzee)







Net als thans voor de Hollandse kust en Zeeland gebeurt, wordt ook voor de Waddenzee beoogd om de hydraulische randvoorwaarden op probabilistische wijze te

bepalen. Dit zit echter ingewikkeld in elkaar. Het rekenhart wordt gevormd door het softwareprogramma HYDRA-K. In dit programma worden voor een reeks locaties langs de kust alle mogelijke combinaties van waterstand en golfhoogte en hun bijbehorende kans van overschrijden berekend en daarmee de kans van falen volgens de gedefinieerde faalmechanismen van de waterkering. Input hiervoor zijn, naast sterkte-eigenschappen van de waterkering, de extreme-waarden statistieken van wind, golven en waterstand.

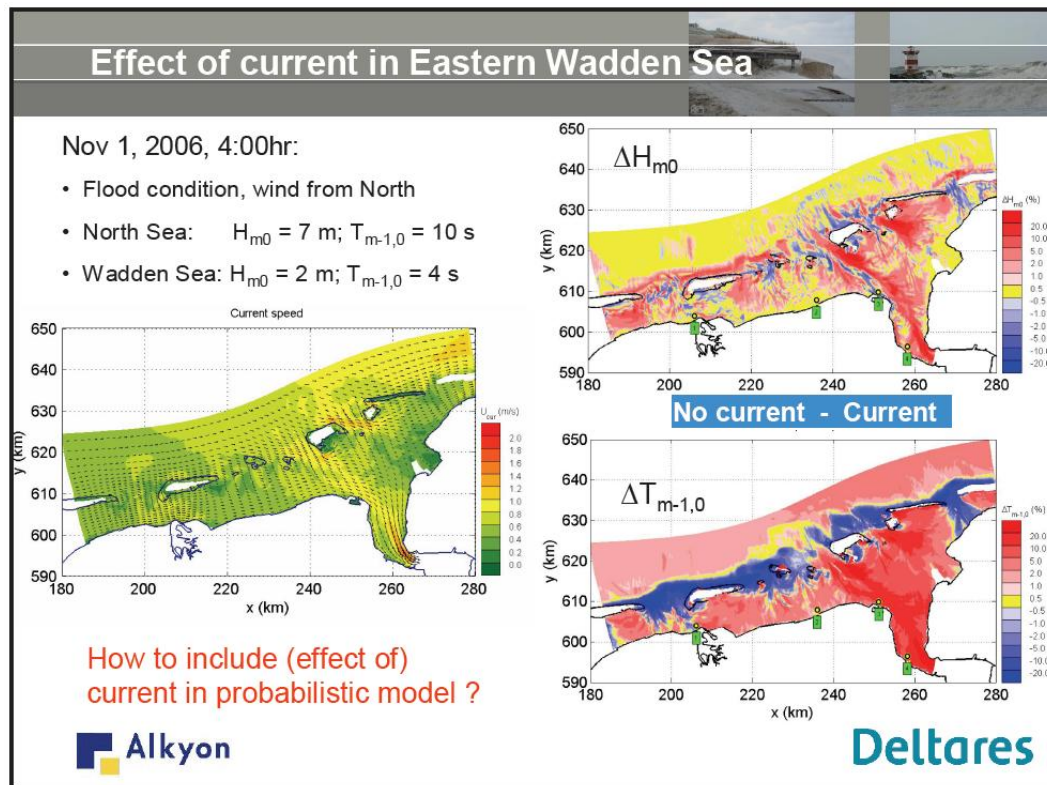
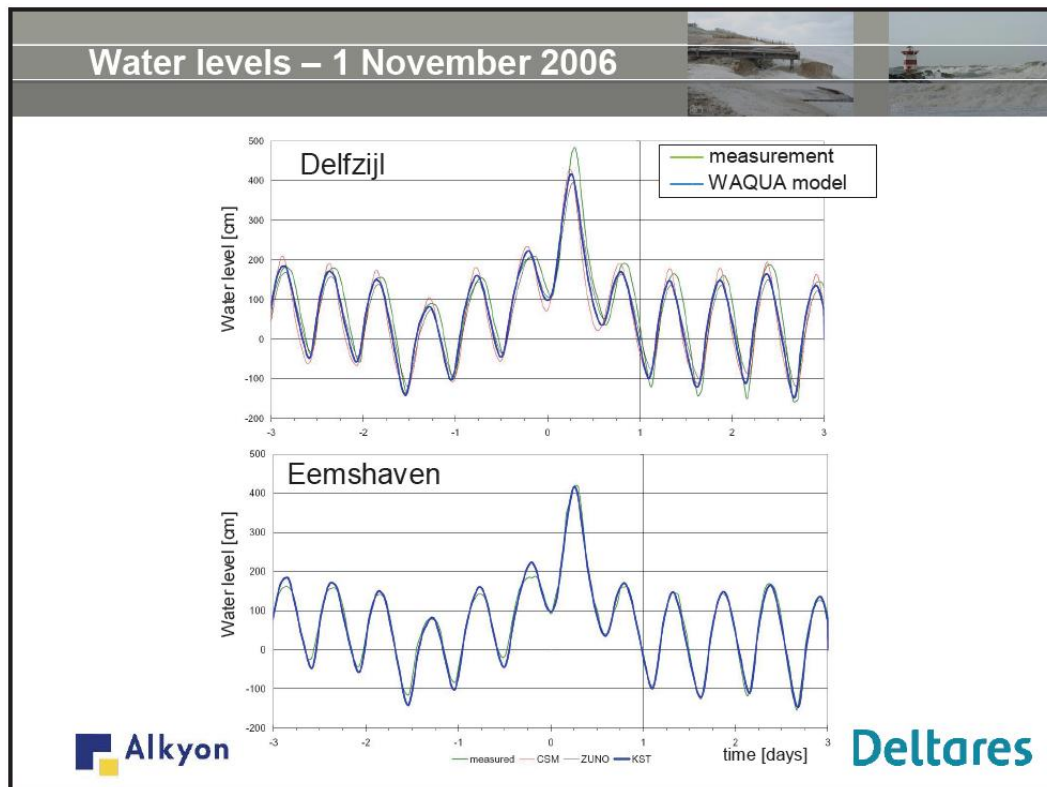
### Inclusion of currents in probabilistic model

- Forcing of currents in Wadden Sea by:
  - Tide
  - Wind
  
- Present probabilistic approach (Hydra-K):
  - Correlated statistics of wind and water levels
  - Conditions at maximum water level (**one instant !!**)
  - Transfer of statistics to nearshore locations applying SWAN in stationary mode
  
- Obvious approach: currents generated by steady, nearly uniform wind fields



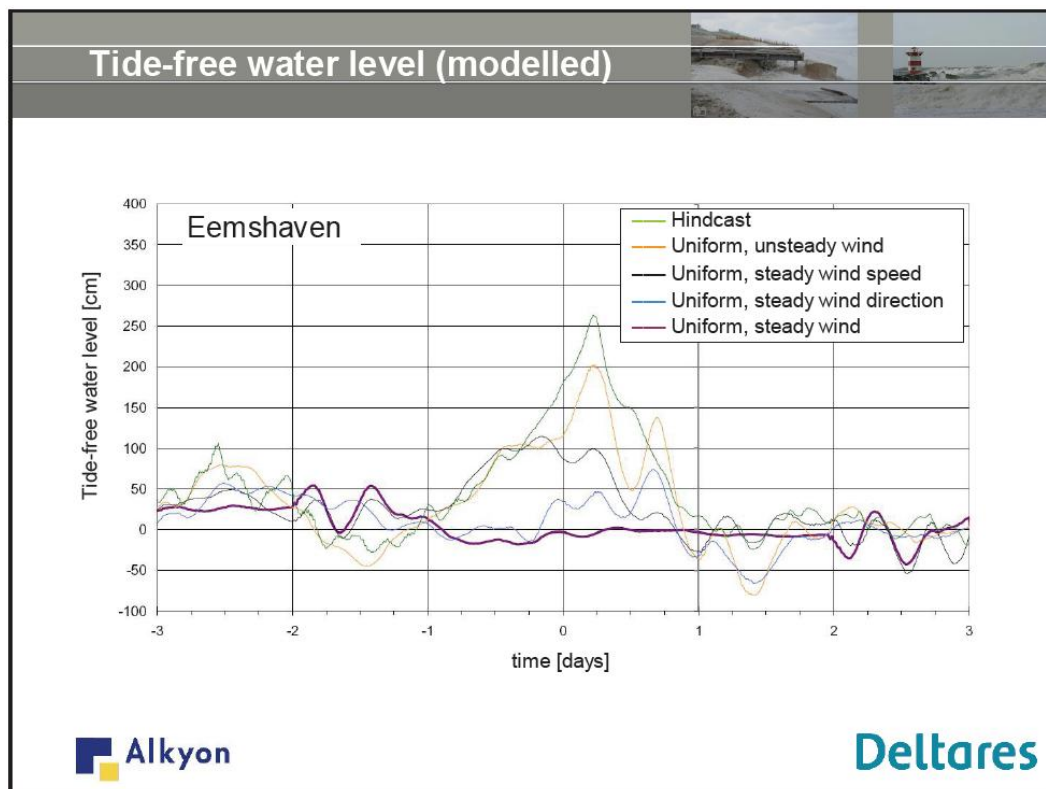
De vertaalslag van diep water naar de kering is gebaseerd op berekeningen met het golfmodel SWAN. Hierbij worden voor een gegeven rekenrooster langs de kust de diepwaterrandvoorwaarden voor een aantal vaste waarden voor windrichting, windsnelheid, waterstand en golfperiode omgerekend naar waarden voor de kering. Golfhoogte en golfrichting zijn daarbij direct gekoppeld aan golfperiode respectievelijk windrichting. Het resultaat is dus een 4-dimensionale matrix van hydraulische condities voor de kering. De matrix wordt opgeslagen in de zogenaamde KustDB20xx (voor HR2006 was dit dus KustDB2006). Bij deze berekeningen voor de gesloten kust is gebruik gemaakt van uniforme windrichtingen en snelheden, is de invloed van stroming buiten beschouwing gebleven en is het verloop in de tijd stationair.

Dat stroming wel degelijk van belang is voor de Waddenzee is getoond aan de hand van een simulatie van de storm van 1 november 2006. De met behulp van het gesimuleerde windveld berekende golfhoogten en -perioden kwamen daarbij voor de oostelijke Waddenzee tot 20% hoger of lager uit, afhankelijk van de beschouwde locatie en het tijdstip in de storm, wanneer de invloed van de stroomsnelheid van het water op de golven werd meegenomen. De boodschap hiervan is dat het meenemen van stroomsnelheden belangrijk is. De vraag is alleen hoe dat moet bij een probabilistische aanpak.



Wat het rekenen met stationaire wind betekent voor de waterstanden op de Waddenzee wordt geïllustreerd aan de hand van een hindcast van de storm van 1

november 2006 voor Eemshaven, waarbij het astronomisch getij is afgetrokken van de berekende waterstand. Daarbij werden achtereenvolgens de vrijheden van de wind steeds verder ingeperkt: uniforme wind, vaste windsnelheid, vaste windrichting tot uiteindelijk uniform en vast in richting en sterkte. De hoogste windopzet bij Eemshaven zakte daarbij steeds verder in.



Geconcludeerd kan worden dat het niet meenemen van de dynamica van een storm in het Waddengebied tot onrealistische resultaten leidt. Stormen met hoge waterstanden in de Eems-Dollard beginnen altijd met wind uit het (zuid)westen. Daarbij wordt het water in oostelijke richting gestuwd. Met het ruimen van de wind naar het noordwesten wordt het water landwaarts gedrukt en het Eems-Dollard estuarium in. Dit dynamische gedrag laat zich niet combineren met de huidige functionaliteit van HYDRA-K voor de gesloten kust.

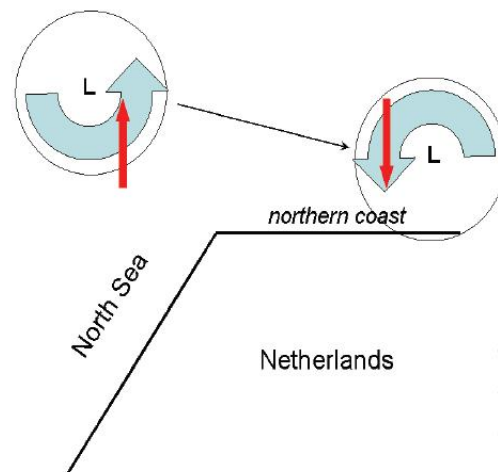
Metingen van stroomsnelheden zijn niet beschikbaar, maar de mismatch tussen gemeten en "stationair" berekende waterstanden suggereert ook een grote mismatch tussen "stationair" berekende en werkelijk optredende stroomsnelheden.

## Conclusions data analysis (Alkyon, 2008)

- Storms are dangerous on the Wadden Sea because of the way wind speeds up and turns in time
- Peak wind conditions are indicators, not warnings
- Water is accumulated into the WS (fluxes at tidal inlets), pushed against the coast (by turning wind) and filling the Eems-Dollard estuary
- No unambiguous storm profile that leads to extreme storm surge



## Inclusion of storm dynamics



Options:

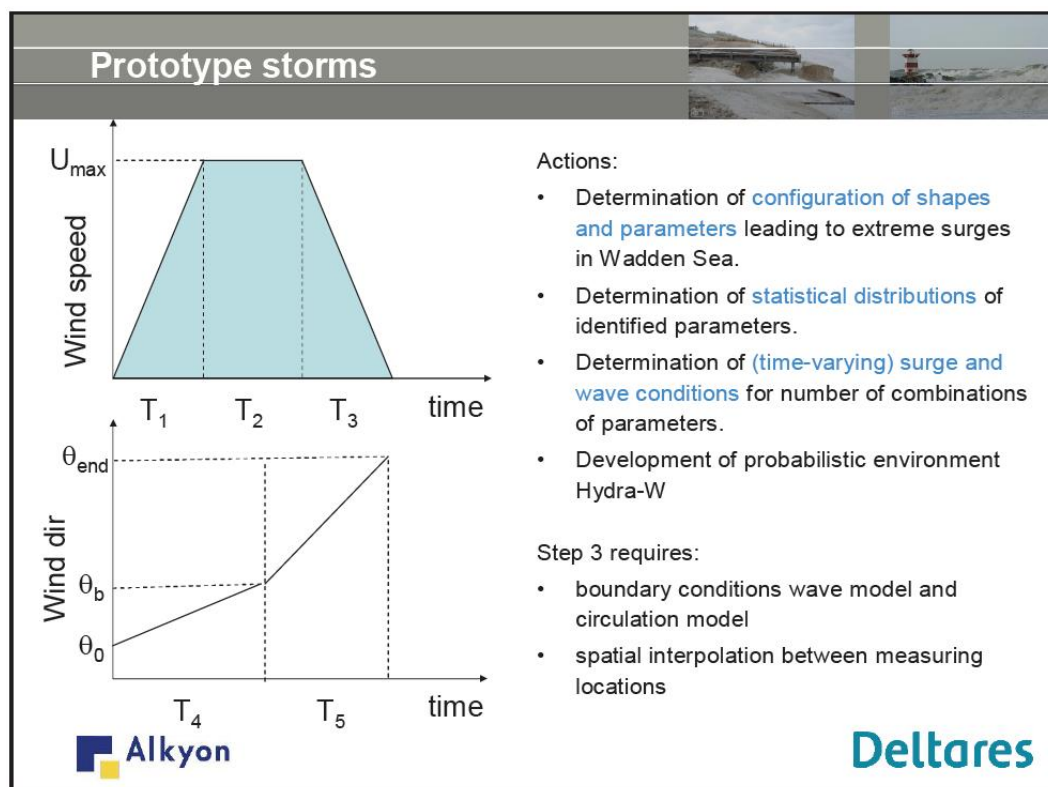
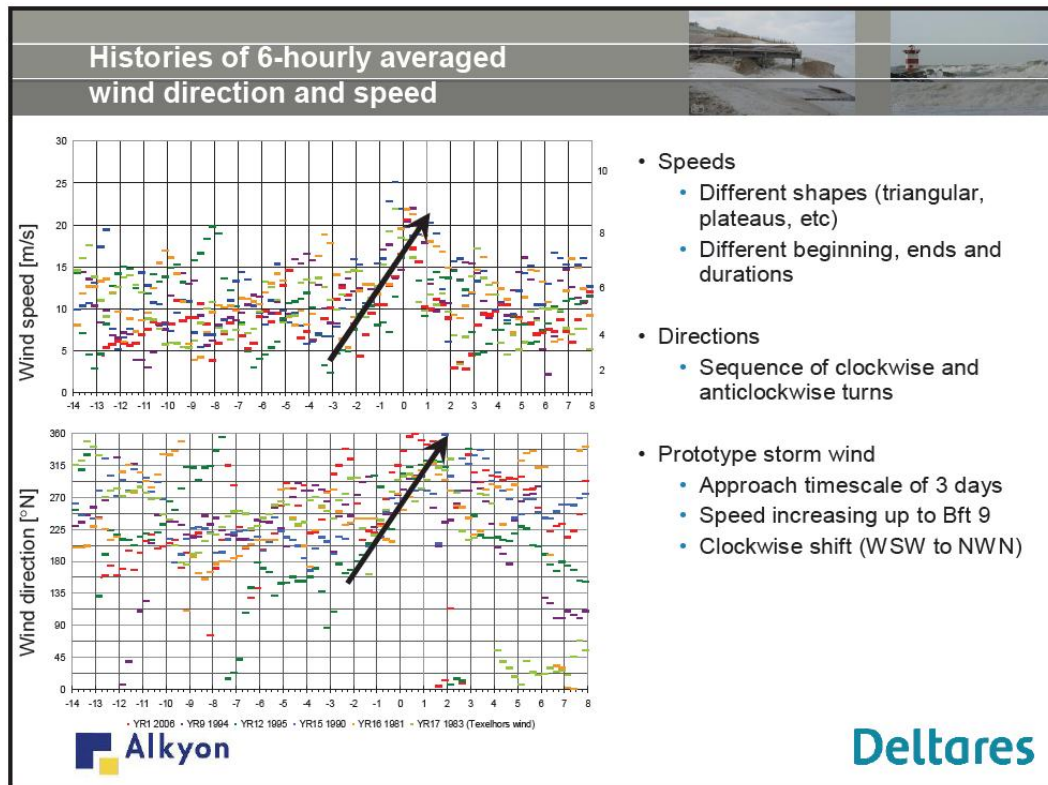
- Schematic prototype storms
- Climate model approach



Mogelijke opties zijn het werken met geschematiseerde "prototype" stormverlopen om het dynamisch gedrag te beschrijven, of het genereren van synthetische tijdreeksen



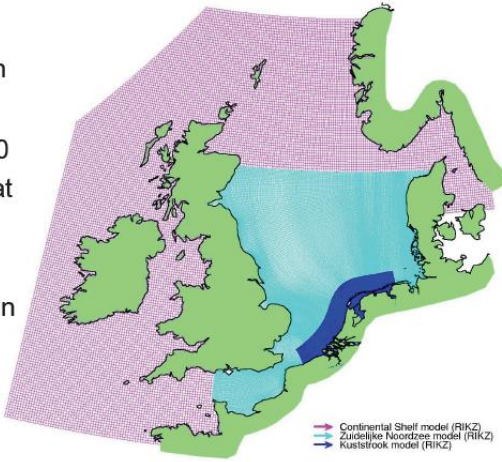
met behulp van klimaatmodellen, met daaraan gekoppeld waterbewegings- en golfmodellen. De prototype-aanpak wordt thans onderzocht. Resultaten van een aanpak met klimaatmodellen worden niet eerder dan voor de HR2016 voorzien.



### Climate model approach

- Generation of synthetic time series.
- Coupling of meteorological, circulation and wave models.
- Result: Long time series (order 10.000 years) of surge and wave conditions at arbitrary locations.
- Time series input for probabilistic model (say Hydra-W) for determination of HBC.

Not earlier than 2016 !!!



Alkyon Deltares

### Conclusions

- Currents should be included in the methodology of deriving HBC for the Wadden Sea
- Dynamical behaviour of storms should be included
- Several options:
  1. Hydra-K approach without currents (as for stretched coast): **not desired**
  2. Hydra-K approach with 'stationary' currents: **possible**
  3. New Hydra-W model with prototype storms: **presently investigated**
  4. New Hydra-W model with climate model approach: **not before 2016**

Alkyon Deltares

## 2.3 Het toekomstig klimaat volgens klimaatmodellen

Four blue dots in the top left corner.

KNMI logo in the top right corner.

Koninkrijk Nederlands Meteorologisch Instituut (written vertically on the right side)

# Het toekomstig klimaat volgens klimaatmodellen

Rein Haarsma KNMI

Four blue dots in the top left corner.

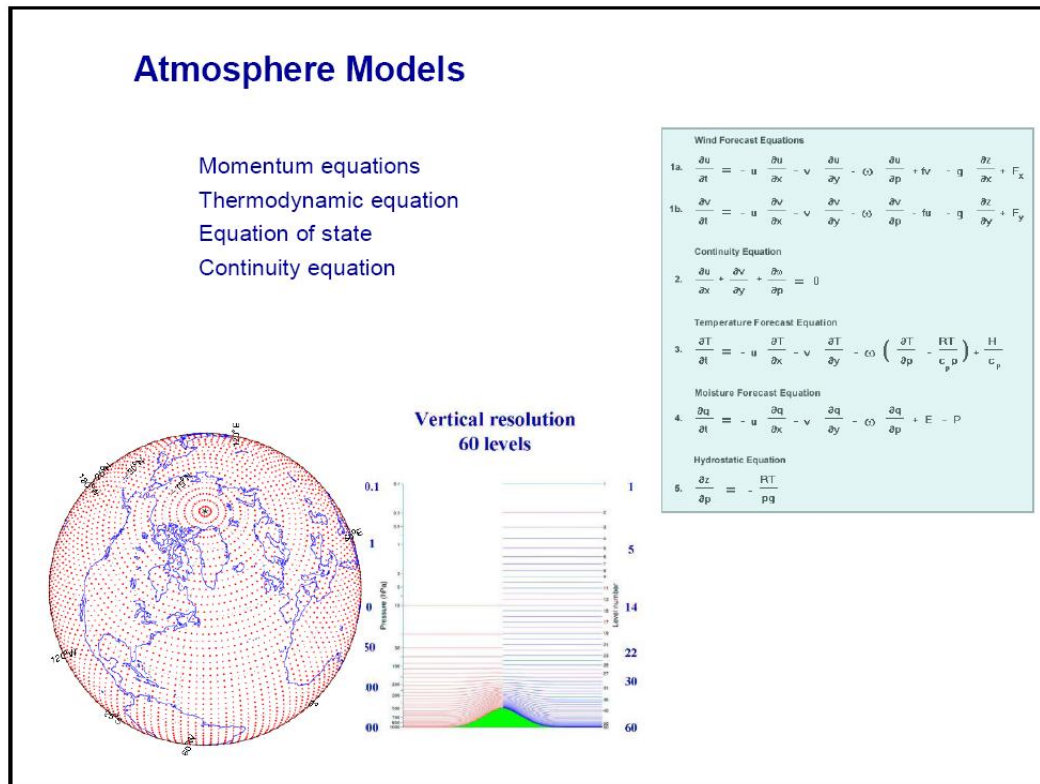
KNMI logo in the top right corner.

Koninkrijk Nederlands Meteorologisch Instituut (written vertically on the right side)

## Klimaat modellen

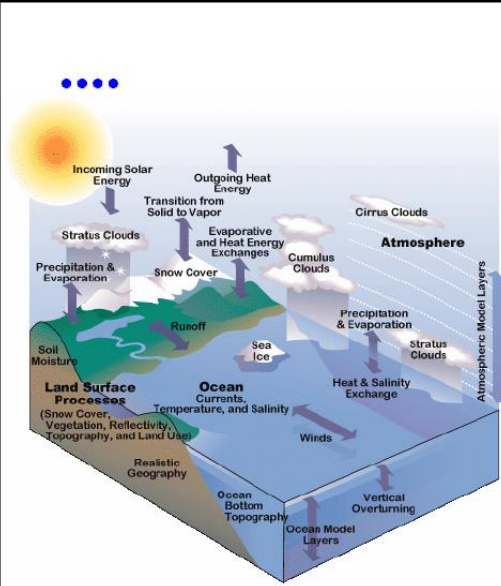
- Zal het aantal stormen toe of afnemen?
- Zullen de stormen sterker of zwakker worden?
- Zullen de banen van de stormen veranderen?

Rein Haarsma gaat in op de vraag wat klimaatmodellen zeggen over toekomstige stormen die voor Nederland van belang zijn: wat gebeurt er met het aantal stormen, de stormintensiteit en de stormbanen in een veranderend klimaat als gevolg van de opwarming van de aarde.



Voor een beter begrip wordt eerst aandacht besteed aan wat atmosferische modellen doen. In beginsel lossen de atmosferische modellen de zogenaamde Navier-Stokes vergelijkingen numeriek op. De modellen staan bekend als GCM's: Global Circulation Models. De rekenroosters voor de huidige generatie GCM's, zoals gebruikt voor het 4<sup>e</sup> IPCC Assessment Report hebben een roosterpuntafstand van ongeveer 100 tot 200 km en een verticale resolutie van 60 lagen tot in de stratosfeer.

Het grote probleem bij atmosferische modellen is het modelleren van processen die zich op een schaal afspelen die kleiner is dan de roosterpuntafstand. Dergelijke processen kunnen niet worden opgelost op het rooster en worden geparameteriseerd. Het vormen ook een soort afregelknoppen om de modelresultaten kloppend te krijgen. Voorbeelden zijn turbulente warmte transporten, bewolking, neerslag en albedo. Elke nieuwe generatie GCM's is weer beter dan de vorige, dankzij toegenomen kennis, maar ook dankzij fijnere roosters.



The diagram illustrates the complex interactions between the atmosphere, land surface, and ocean. It shows various processes such as incoming solar energy, outgoing heat energy, evaporation, precipitation, and wind. Key components include the atmosphere with different cloud types (Cirrus, Stratus, Cumulus), the land surface with soil moisture and vegetation, and the ocean with currents and salinity. The diagram highlights the need for parameterization in climate models.

**KNMI**

Important processes that must be parameterized:  
Turbulent transport (heat, momentum, trac.)

Clouds  
Precipitation  
Boundary Layer  
Radiation

Parameterization is a closure problem  
Main problem for climate models

Koninkrijk Nederlands Meteorologisch Instituut

Alvorens te kijken wat de klimaatmodellen zeggen over toekomstige stormen volgt eerst een algemene beschouwing over de globale luchtcirculatie en hoe op basis daarvan een hypothese gevormd kan worden over de verandering in depressie-activiteit.

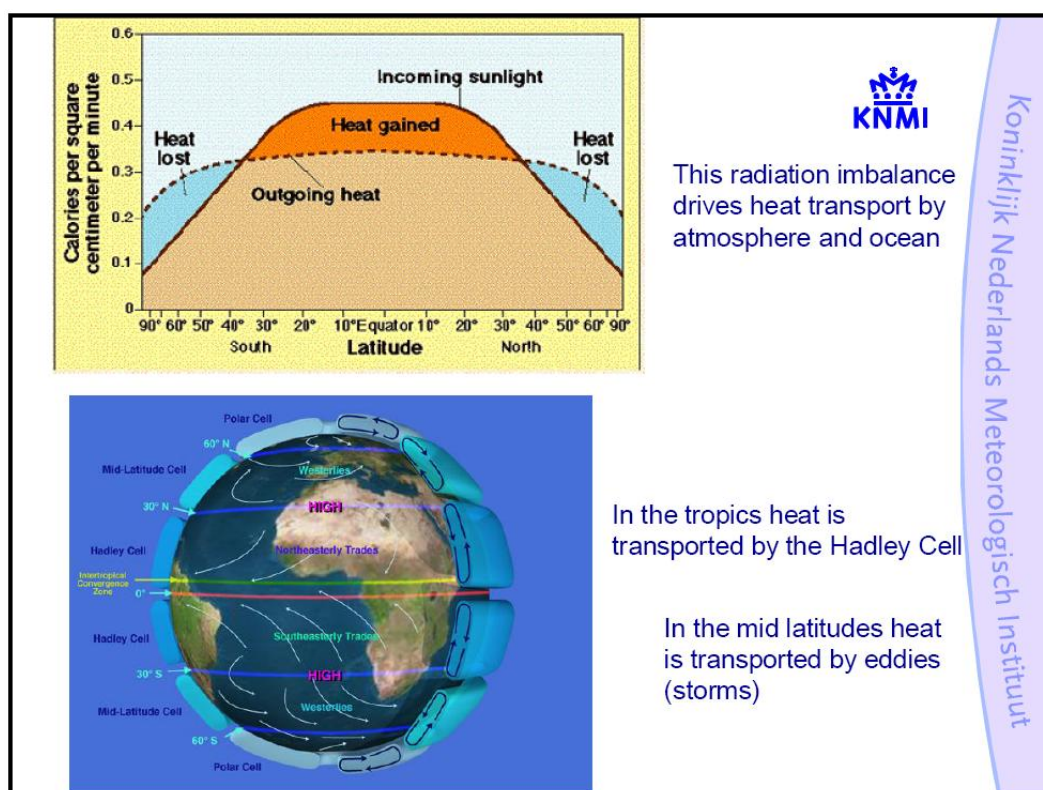
**KNMI**

Beschouwingen vooraf

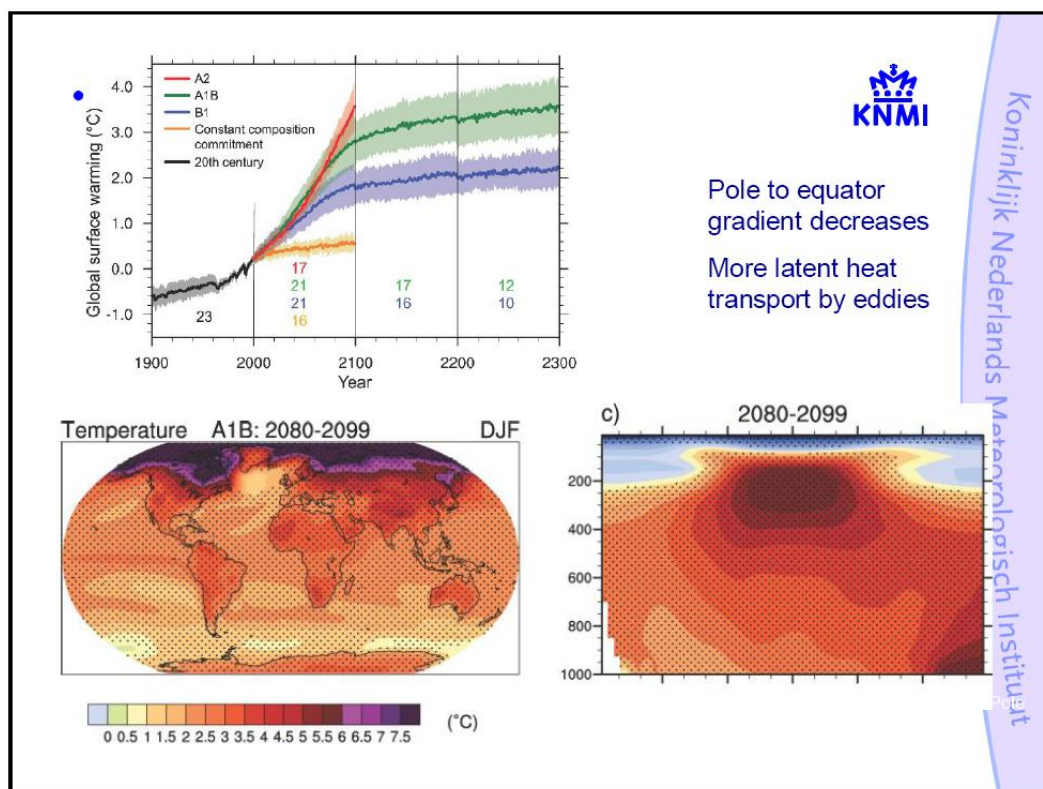
Waardoor ontstaan stormen?  
Hoe zal in een toekomstig klimaat dit veranderen?

Koninkrijk Nederlands Meteorologisch Instituut

Bij de evenaar bestaat een stralingsoverschot: er komt meer straling van de zon binnen dan de aarde aan warmte uitstraalt. Bij de polen is dat net andersom: meer uitgaande dan inkomende warmte. Deze imbalans leidt tot warmtetransport van de evenaar naar de polen. Door de warmte stijgt de lucht aan de evenaar op en moet dan uiteindelijk richting de polen wegvloeien. Zonder draaiing van de aarde zou de lucht rechtstreeks naar de polen stromen. Door het draaien van de aarde (corioliskracht) komt de lucht niet verder dan de 30° breedtegraad (Hadley Cells). De daar weer dalende lucht is relatief droog. Daardoor liggen de woestijnen rond deze breedtegraad. Het verdere warmtetransport naar ongeveer de 60° breedtegraad vindt plaats door instabiliteiten die leiden tot depressies. Ook de oceaan transporteert warmte, maar op hogere breedtegraden (> ca. 50°) is de atmosfeer de belangrijkste transporteur.

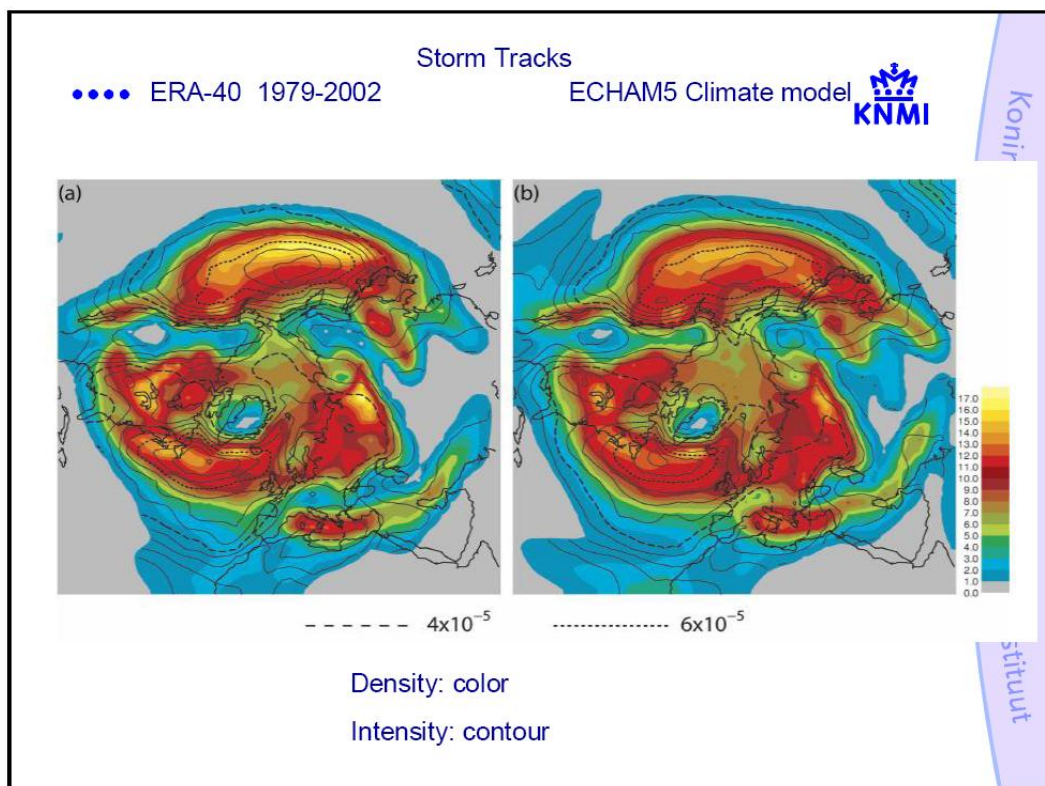
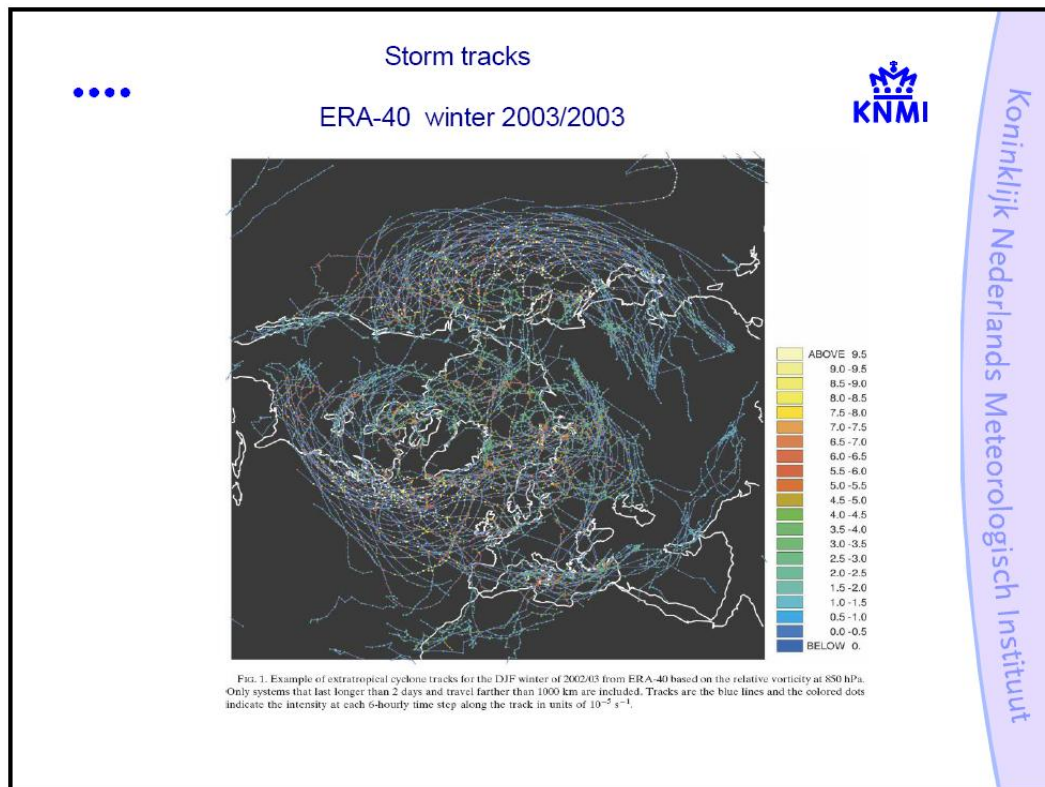


In het genoemde IPCC-rapport zijn voor verschillende emissiescenario's projecties gegeven voor de gemiddelde temperatuurstijging van de aarde over de komende 100, 200, 300 jaar. Het A1B-scenario is ongeveer het Business as Usual scenario; d.w.z. de huidige trends in de uitstoot van broeikasgassen zetten gewoon voort, de wereldeconomie blijft groeien en het intensieve gebruik van fossiele brandstoffen neemt navenant toe. De verdeling van de temperatuurstijging over 100 jaar over de aarde laat zien dat de temperatuurstijging bij de Noordpool meer is dan rond de evenaar en dat betekent dus dat de gradiënt afneemt. Dit heeft te maken met sneeuw- en ijssmelt, waardoor de albedo afneemt en de lokale temperatuur sterker stijgt. In de hogere luchtlagen is dat weer net andersom, maar het meeste transport vindt plaats in de onderste kilometers.



Uit deze regionale verschillen in temperatuurstijging kan op basis van de kennis omtrent de atmosferische circulatie een hypothese gevormd worden met betrekking tot de verandering in depressie-activiteit: Omdat de temperatuurstijging bij de Noordpool sterker is dan bij de evenaar zal het temperatuurverschil tussen de Noordpool en de evenaar afnemen. Die hoeft daarom minder warmte te transporteren. In de Nederlandse omgeving, waar het warmtetransport voor een groot deel door depressies verzorgd wordt, zal dit leiden tot een afname van de depressie-activiteit. Een belangrijk gedeelte van het warmtetransport vindt plaats d.m.v. latente warmte. Omdat een warmere atmosfeer meer vocht kan bevatten zal het warmtetransport per depressie toenemen, wat tot een verdere reductie van de depressie-activiteit leidt.

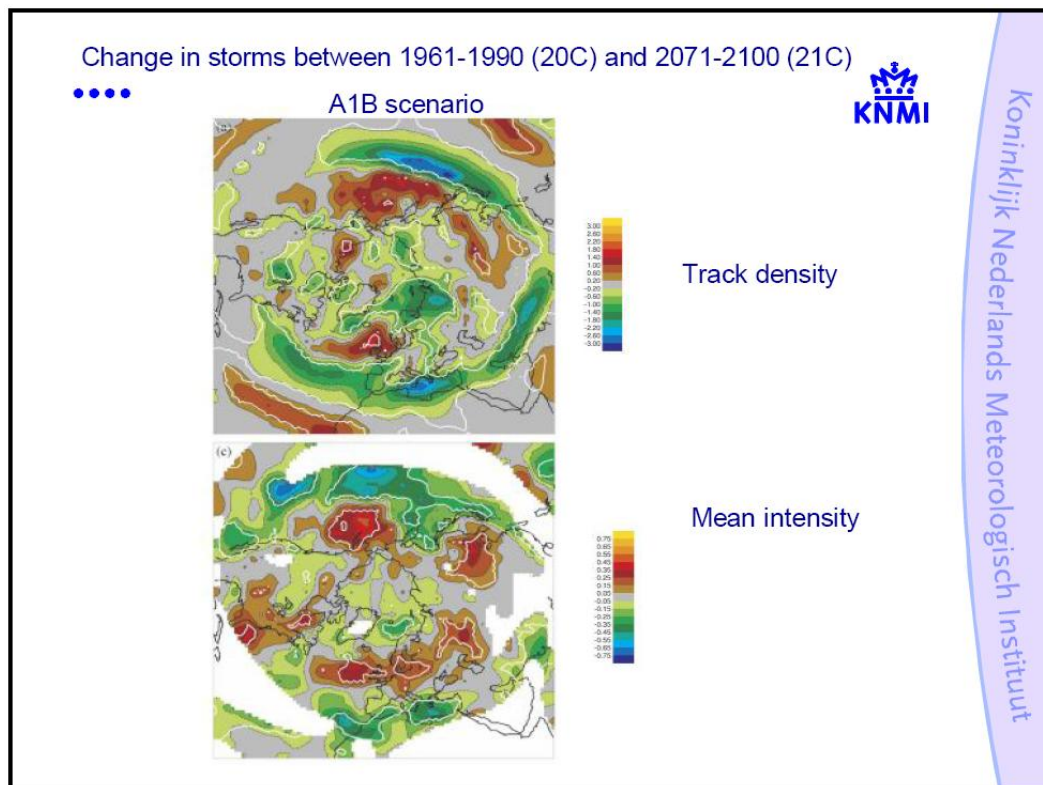
Alvorens na te gaan in hoeverre klimaatmodellen deze hypothese onderschrijven, moet eerst worden nagegaan hoe goed klimaatmodellen het stormklimaat simuleren. Daarvoor worden hun uitkomsten vergeleken met de ERA-40 dataset. De ERA-40 dataset is een analyse van de toestand van de mondiale atmosfeer en de condities aan het aardoppervlak, die teruggaat tot september 1957 en thans gaat t/m augustus 2002. De dataset is gemaakt door het ECMWF (European Centre for Medium-range Weather Forecasts) met een computermodel met een resolutie van 40 km. Er is gebruik gemaakt van allerlei soorten van waarnemingen. Het is de beste dataset die beschikbaar is van de toestand van de atmosfeer in het verleden. Uit de gegevens zijn banen van depressies afgeleid. Depressies die voor Nederland van belang zijn worden vaak gegenereerd voor de oostkust van Noord-Amerika en steken dan de Atlantische Oceaan over. Opvallend in het plaatje van de ERA-40 depressiebanen van de winter van 2003 is ook de concentratie van banen in het Middellandse Zeegebied, samenhangend met de ligging van de Alpen.



Hoe goed doen de huidige modellen het nu? Als voorbeeld worden twee figuren getoond die de dichtheid (aantal depressies per tijdeenheid) en de intensiteit van de



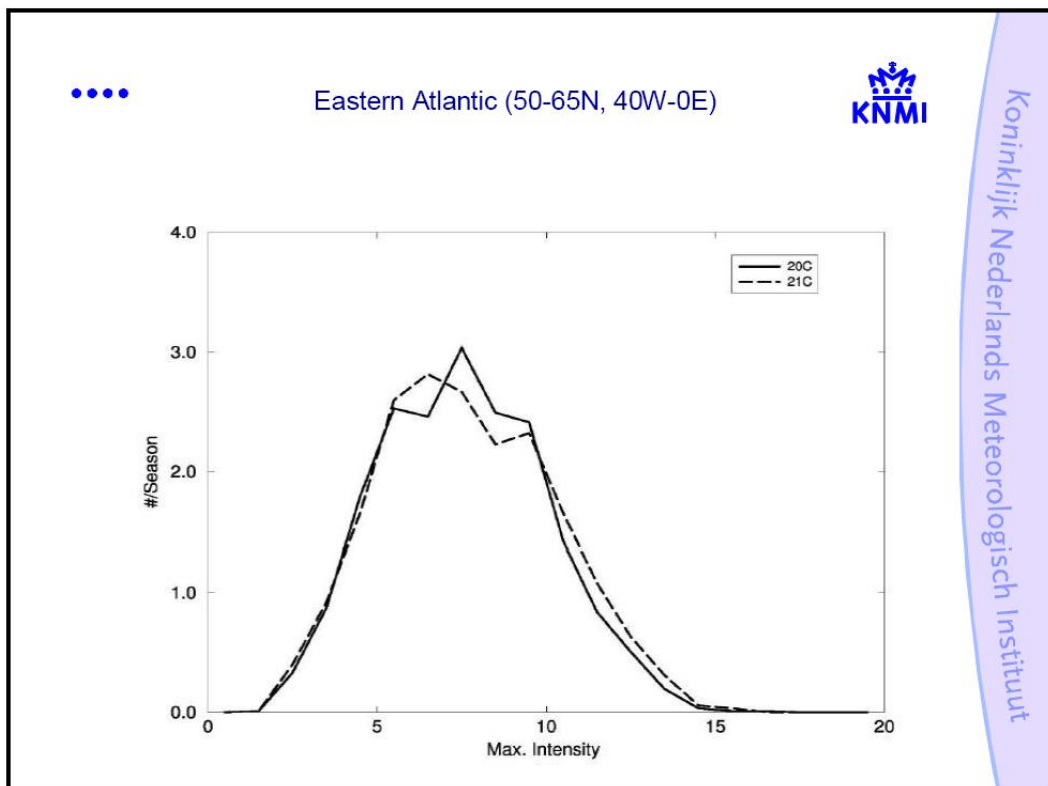
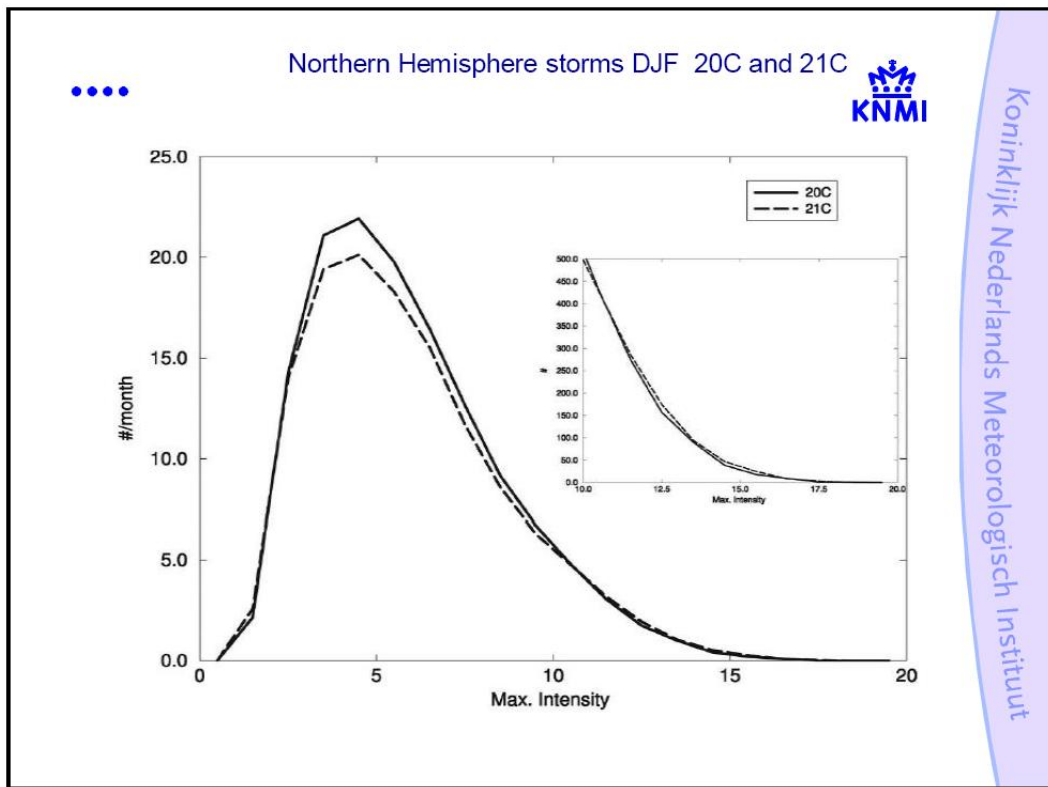
depressiebanen laten zien voor de ERA-40 data van 1979-2002 en voor het ECHAM5-model. Het ECHAM5-model is één van de beste GCM's voor ons gebied en is ook gebruikt bij het ESSENCE-project. Het patroon van de dichtheid en intensiteit van de depressiebanen wordt door het model heel goed weergegeven. Ook de depressiebanen voor het Middellandse Zeegebied worden goed gesimuleerd, hetgeen vertrouwen geeft in de kwaliteit van het model.

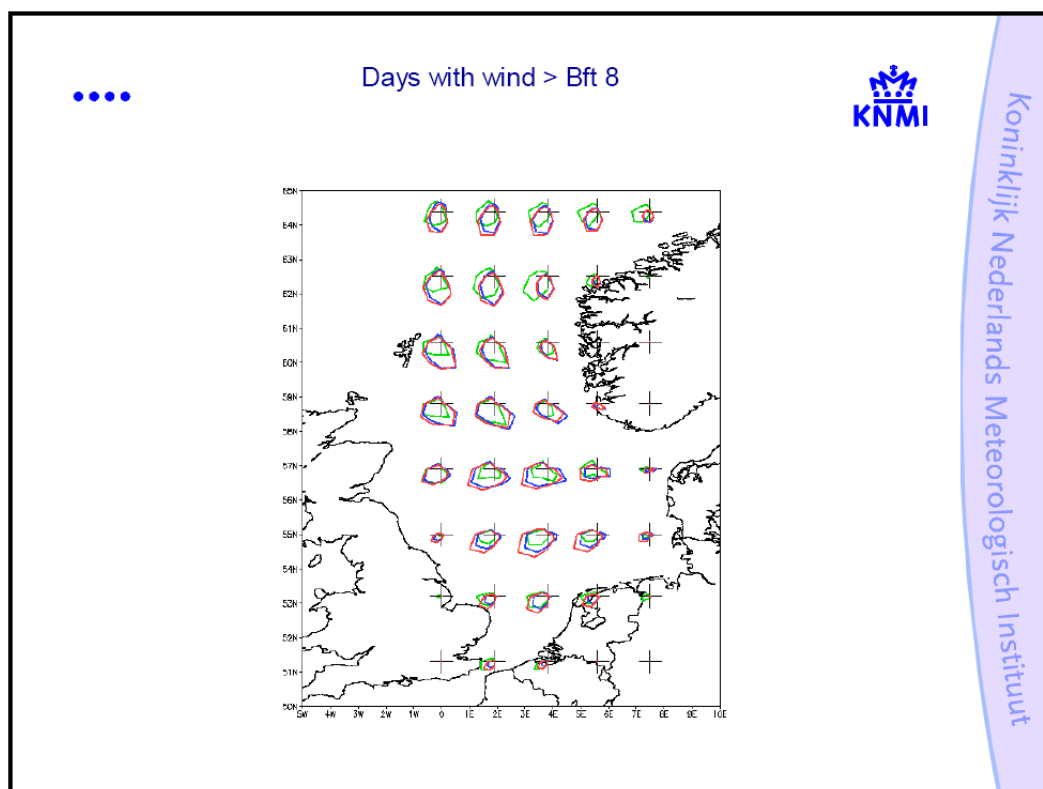


Om te zien hoe het stormklimaat volgens het ECHAM5-model gaat veranderen, zijn verschilplaatjes gemaakt voor dichtheid en intensiteit van stormen voor simulaties voor de periode 1961-1990 (aangeduid met 20C) en voor de periode 2071-2100 (aangeduid met 21C) onder het A1B-emissiescenario. De verkregen patronen zien er nogal rommelig uit. Er zijn gebieden waar dichtheid en intensiteit toenemen en waar ze afnemen. De grootste verschillen ontstaan door het veranderen van de depressiebanen.

Een histogram van de maximale stormintensiteiten laat zien dat er volgens het model sprake is van enige afname van stormintensiteiten voor de maanden december, januari en februari.



Ingezoomd op de oostelijke Atlantische Oceaan lijkt het aantal stormen met hoge intensiteit iets toe te nemen. Dit komt door een noordwaartse opschuiving van de depressiebanen die samenhangt met een verbreding van de Hadleycirculatie. Samengevat kan geconcludeerd worden dat er globaal een geringe afname van depressie-activiteit is, maar dat er lokaal significante veranderingen kunnen optreden die veroorzaakt worden door veranderingen in de depressiebanen.





Voor een aantal roosterpunten op de Noordzee is het aantal dagen uitgezet met een windkracht groter dan 8 Beaufort (blauwe lijntjes voor 20C, rode lijntjes voor 21C). De groene lijntjes geven de resultaten volgens de ERA-40 data weer. De aantallen zijn gebaseerd op een groot aantal ensemble-simulaties, waarbij telkens de startsituatie iets is gevarieerd. Het lijkt erop dat in de toekomst boven de Noordzee de zuidwestelijke winden zullen toenemen. Dit zijn in het algemeen niet de omstandigheden die tot de grootste stormopzetten leiden.

De hierboven gepresenteerde resultaten van klimaatmodellen zijn nog niet erg betrouwbaar. De verschillende modellen (hier zijn alleen resultaten van het ECHAM-5 model getoond) geven niet allemaal hetzelfde beeld. Een apart probleem vormen de kleine maar intensieve stormen. Een bekend voorbeeld is de Lothar storm van 24-26 december 1999, die in Centraal Europa veel schade veroorzaakte. Van dergelijke stormen weet men veel nog niet. Er zijn experimenten uitgevoerd met regionale modellen (met hoge resolutie) waarbij de vochtprocessen in het model zijn uitgeschakeld. Bij het "droge" model bleek de stormintensiteit aanzienlijk te worden gereduceerd ten opzichte van het "vochtige" model. Het vrijkomen van latente warmte bij regen blijkt dus een belangrijke rol te spelen. De waarnemingen lieten nog diepere depressies zien. Hoe dat uitpakt voor de toekomst is nog niet bekend. Wel kan gezegd worden dat dit type storm niet de grote opzetten veroorzaakt die voor de veiligheid van ons land van belang zijn.



CONCLUSIONS

- In general storminess reduces over the North Atlantic
- Over Eastern Atlantic it increases slightly
- In our region increase of south westerly winds
- Results are uncertain depend on small changes in the atmospheric circulation

Can we trust those results?  
What about small scale very intensive storms?

Koninkrijk Nederlands Meteorologisch Instituut

2.4 Resultaten van ensemble klimaatmodelruns met daaraan gekoppeld het waterbewegingsmodel WAQUA; onderzoek t.b.v. de Deltacommissie

••• **North Sea winds and storm surges** 

**Andreas Sterl**  
**Henk van den Brink, Reindert Haarsma,**  
**Erik van Meijgaard, Hans de Vries**

KNMI, De Bilt, Netherlands

- Dutch Delta Committee
- KNMI'06 scenarios
- ESSENCE/WAQUA simulations

••• 11.11.2008 A. Sterl, workshop klimaatmodellen, Deltares

Koninkrijk Nederlands Meteorologisch Instituut

••• **Dutch Delta Committee:** 

**What is the effect of global warming on**

- maximum wind speed
- wind directions
- wave heights
- storm surge levels?

**Approach**

- KNMI'06 scenarios
- other literature
- Essence + WAQUA

••• 11.11.2008 A. Sterl, workshop klimaatmodellen, Deltares

Koninkrijk Nederlands Meteorologisch Instituut

De presentatie van Andreas Sterl betreft het onderzoek dat is gedaan voor de Deltacommissie 2008. Dat onderzoek betrof vragen van de Deltacommissie over de effecten van de mondiale temperatuurstijging op maximale windsnelheden, windrichtingen, golfhoogten en stormvloedhoogten. De golfhoogten blijven in deze presentatie verder buiten beschouwing. Er zijn bij dit onderzoek twee sporen gevolgd: Het onderzoek ten behoeve van de KNMI'06 scenario's en de ESSENCE + WAQUA-simulaties.

Slide titled "KNMI'06 scenario's" with the KNMI logo and the text "Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut" on the right side. The slide contains the following information:

- AR4 models
- SRES A1b scenario
- those 4 with best circulation over Europe

**three:**

- more frequent westerly wind
- 50/100 year return value of annual-maximum daily-mean wind +0.5 – +1.5 m/s

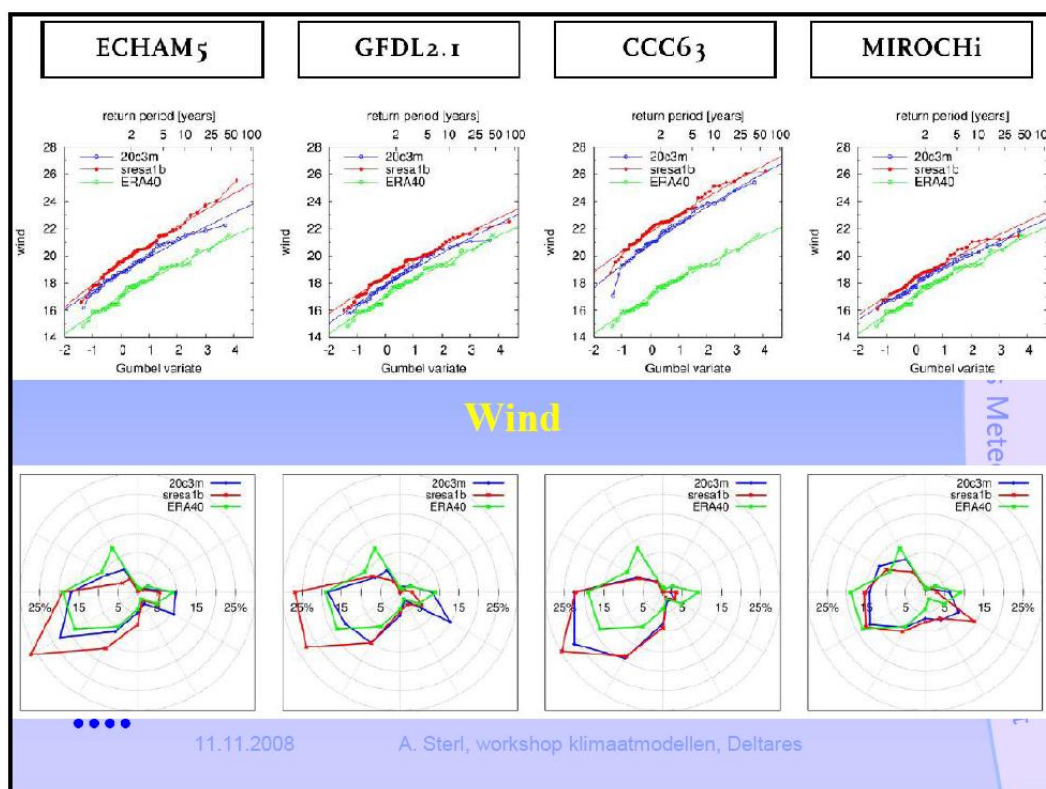
**one:**

- no changes

11.11.2008 A. Sterl, workshop klimaatmodellen, Deltares

#### KNMI'06- scenario's

Voor het afleiden van de KNMI'06 klimaatscenario's is gebruik gemaakt van simulaties van klimaatmodellen die ook voor het 4<sup>e</sup> Assessment Report van het IPCC (AR4) gebruikt zijn. Van de 16 à 17 modellen die daarin gebruikt zijn, zijn vier modellen geselecteerd die voor Europa de beste resultaten te zien gaven. Gekeken is naar de geschatte extreme-waardenverdelingen van het jaarlijkse maximum van de daggemiddelde oppervlaktewindsnelheid van een roosterpunt boven de Noordzee (2,5° OL, 55° NB). De blauwe lijn en punten hebben betrekking op de simulatie over de jaren 1961-2000 (de zogenaamde controleperiode), de rode lijn en punten op de jaren 2081-2100 (de scenario periode). Deze perioden worden ontleend aan één lange simulatierun, in dit geval volgens het A1B-scenario (zie ook de vorige presentatie). Een daaruit "gesneden" periode noemt men een "time slice". De groene lijn en punten zijn afgeleid uit de ERA-40 data.

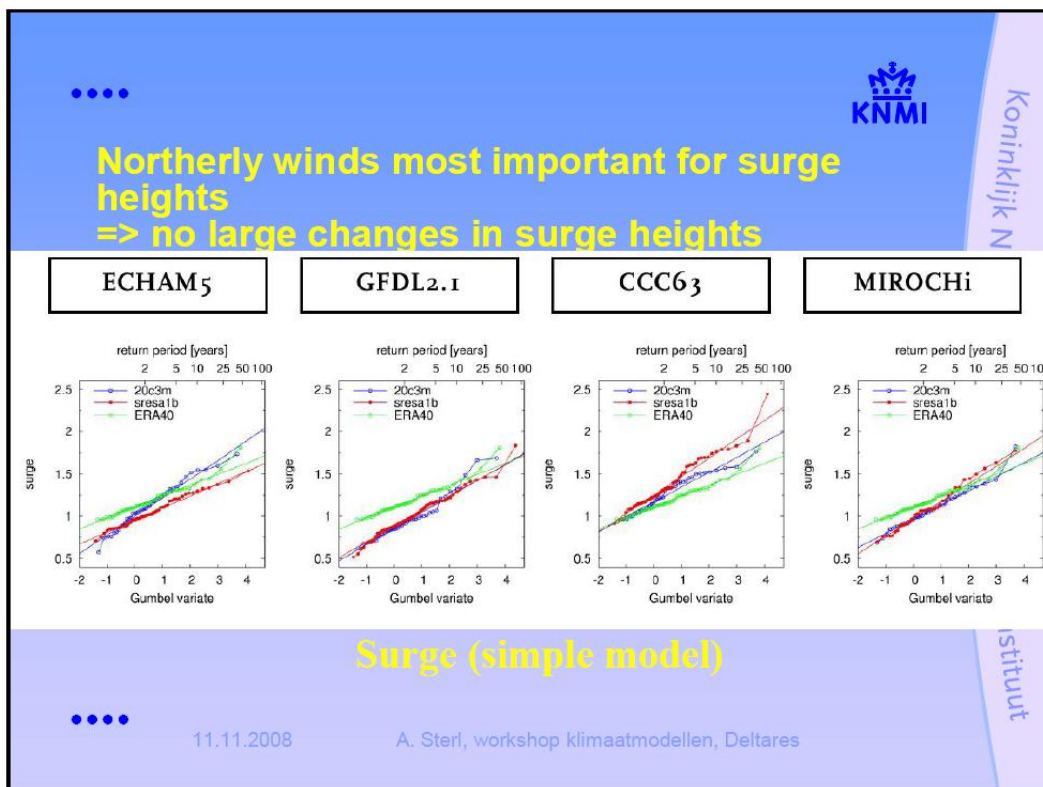


De rode en blauwe lijnen lopen vrijwel parallel, hetgeen betekent dat de absolute toename van de scenario-waarde ten opzichte van de controle-waarde redelijk constant is voor elke terugkeerperiode. De relatieve verandering neemt dus in de figuren naar rechts af.

Opmerkelijk is de bias ten opzichte van de ERA-40 data, maar ook die is voor de vier modellen constant over de terugkeerperioden. De conclusie lijkt gerechtvaardigd dat de relatieve jaarmaxima van daggemiddelde windsnelheden relatief (in procenten) weinig toenemen. Bij nog hogere jaarmaxima (en dus ook langere terugkeerperioden) wordt de relatieve toename nog minder.

Men kan zich afvragen waar de verschuiving ten opzichte van de ERA-40 data door veroorzaakt wordt. Ligt het probleem bij de modellen of bij ERA-40? De verschillen worden met name veroorzaakt door verschillende parameterisatie van de ruwheid. Daarnaast is uitgezet de relatieve verdeling over de windrichtingen van de gemiddelde dagelijkse windsnelheid die 10 keer per jaar wordt overschreden. Dit is gedaan voor dezelfde drie datasets: ERA-40, A1B-controle en A1B-scenario. Drie modellen laten meer west- tot zuidwestelijke winden zien in het veranderde klimaat, één model toont geen verandering van betekenis. Deze windrichtingen zijn voor de Nederlandse kust niet gevaarlijk (anders is dat voor bijvoorbeeld het IJsselmeer). Noordwestelijke winden geven weinig veranderingen te zien.

Met behulp van een eenvoudig parametrisch opzetmodel voor de Noordzee en de dagelijkse windgegevens voor een selectie van roosterpunten zijn overschrijdingslijnen van de stormopzet berekend voor de drie verschillende datasets. De resultaten van de vier modellen zijn niet helemaal consistent, maar de relatieve veranderingen lijken toch niet erg groot.



Voor de KNMI'06 scenario's werd daarom geconcludeerd dat de winden vooral uit zuidwestelijke richting iets zullen toenemen, maar dat de impact van de windtoename op de stormvloed en naar verwachting gering is.

**Essence**

- ECHAM5/MPI-OM
- 17-member ensemble
- 1950-2100, SRES A1b

**WAQUA**

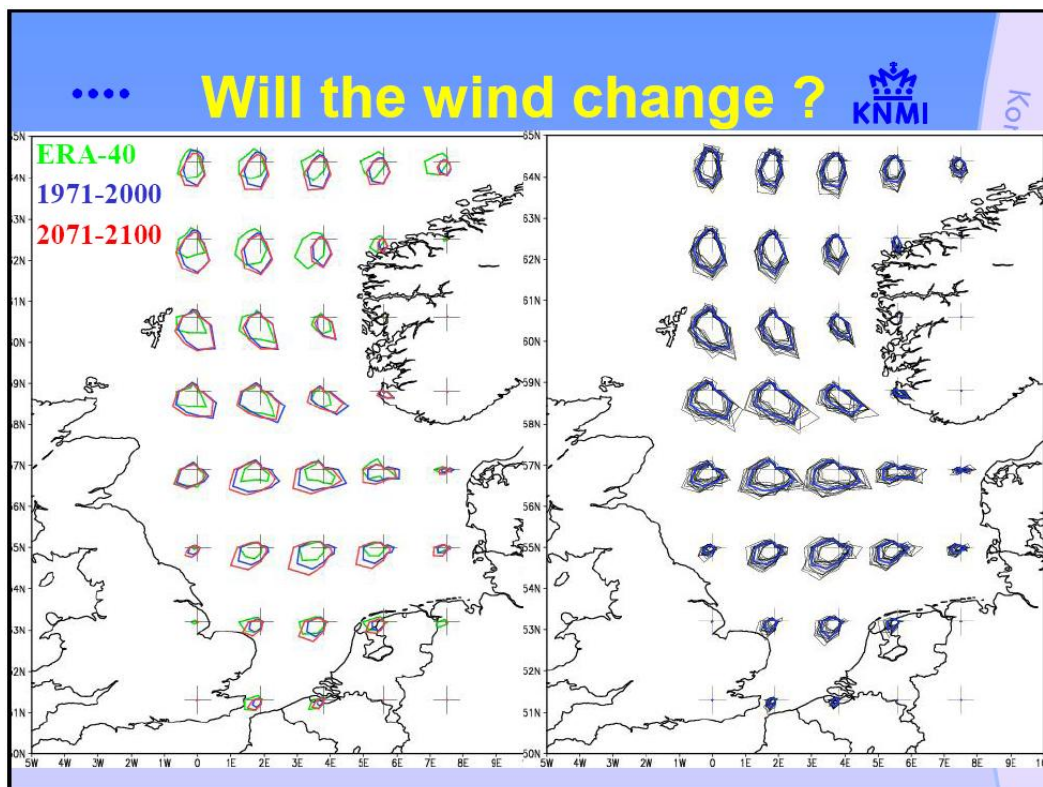
- storm surge model
- Northwest European shelf
- 8 km x 8 km
- output every 10 minutes



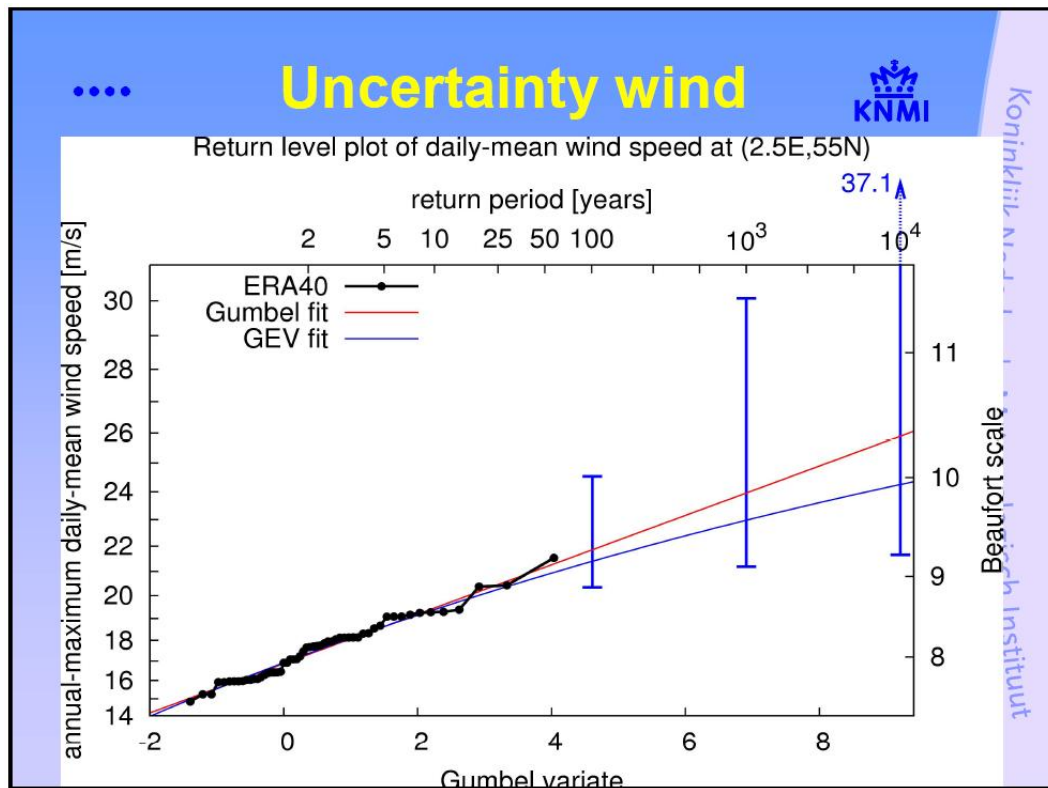
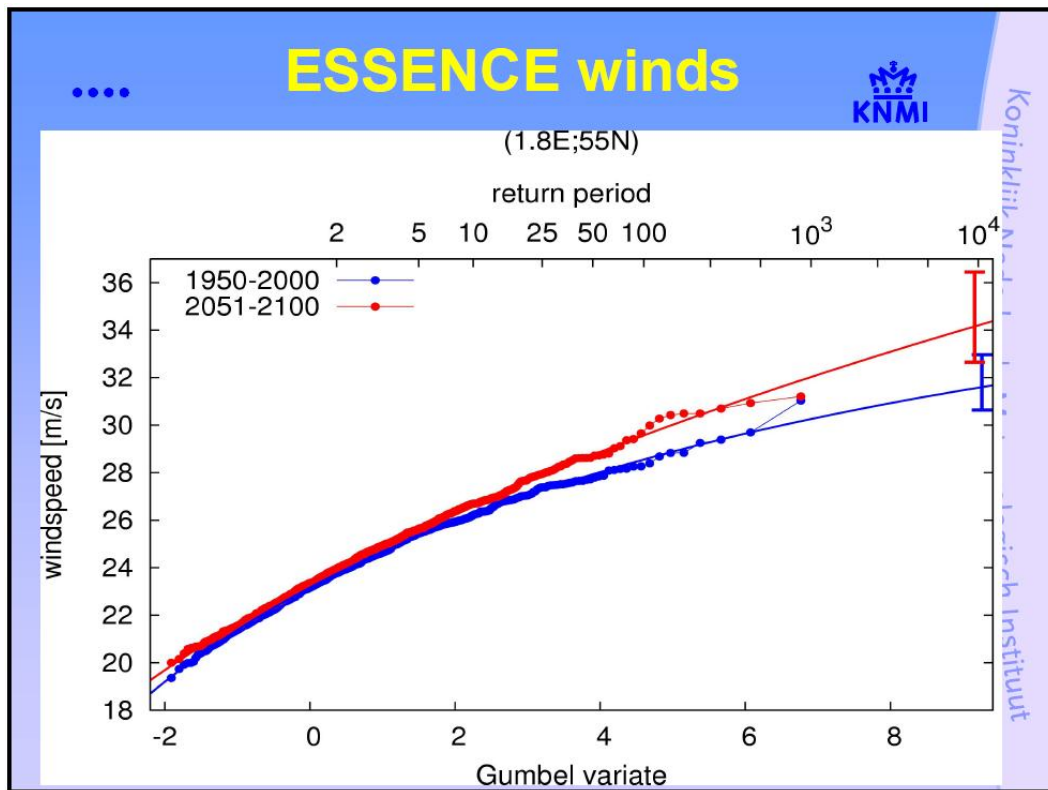
### ESSENCE + WAQUA

Het andere spoor dat gebruikt is voor het onderzoek ten behoeve van de Deltacommissie 2008 maakt gebruik van de resultaten van het ESSENCE-project (Ensemble SimulationS of Extreme weather events under Nonlinear Climate changeE). In dit project werd een ensemble simulatie van klimaatverandering uitgevoerd over de periode 1950-2100, vanaf 2000 onder het A1B-scenario, met gebruikmaking van het model ECHAM/MPI-OM. Het ensemble bestaat uit 17 runs.

WAQUA is het generieke hydrodynamische rekenmodel van Rijkswaterstaat. Het specifieke gebiedsmodel dat is gebruikt is het DCSM98-model (Dutch Continental Shelf Model van 1998). Met dit state-of-the-art model kunnen stormvloed op de Noordzee goed gemodelleerd worden. Het rekenrooster heeft een roosterafstand van 8 km. De uitvoer geeft waarden voor elke 10 minuten.



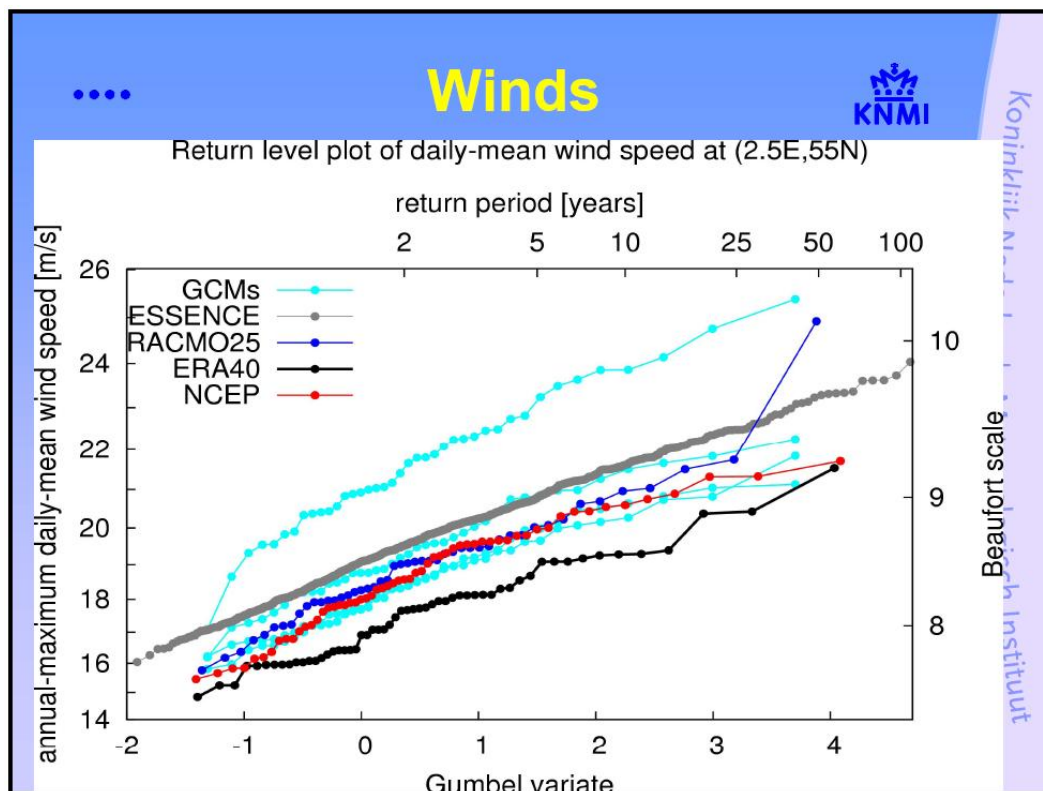
Voor de roosterpunten op de Noordzee is van het hele simulatie-ensemble per sector van 30° het gedeelte uitgezet dat hoger is dan 8 Bf (17 m/s). De blauwe lijnen geven het huidige klimaat (1971-2000), de rode het klimaat over 100 jaar (2071-2100). De groene lijnen volgen uit de ERA-40 data. Zie ook de presentatie van Rein Haarsma. Daarnaast zijn de plots van de afzonderlijke simulaties voor het huidige klimaat gegeven (zwarte lijnen). De verschillen tussen de blauwe (huidige klimaat) en rode lijnen (klimaat over 100 jaar) voor het hele ensemble zijn kleiner dan de variabiliteit van de zwarte lijnen (huidige klimaat) voor elke simulatie van het ensemble afzonderlijk. Dat relatieveert de suggestie van een verandering in het windklimaat.



Voor het roosterpunt {1,8 OL; 55 NB} worden overschrijdingslijnen voor de omnidirectionele windsnelheid getoond, bepaald door een GEV-verdeling

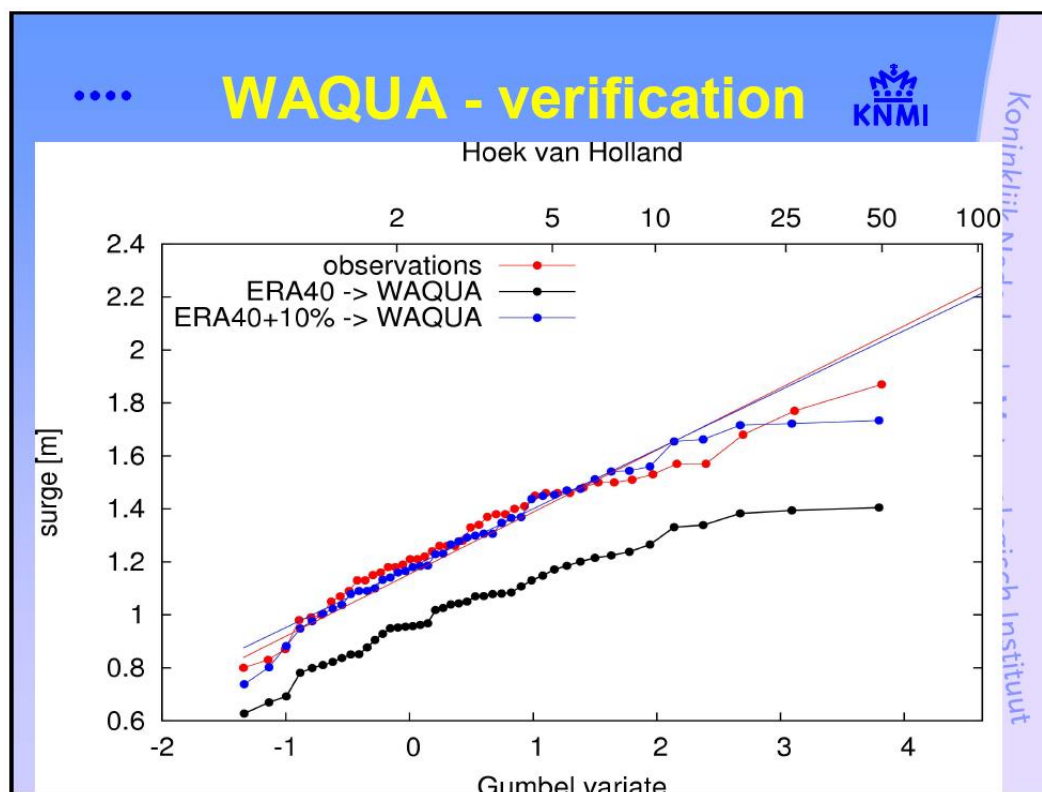
(Gegeneraliseerde Extreme-waardenVerdeling) op de jaarmaxima van de verzamelde ensembles te fitten. De gebruikte horizontale schaal, aangeduid met Gumbel variate, is ontleend aan de Gumbel-verdeling. Dit is een bijzonder geval van de GEV-verdeling, namelijk die waarvoor de zogenaamde extreme-waarden index van de GEV-verdeling (de vormparameter) exact gelijk is aan nul. In de figuren met de gebruikte schalen voor de assen geeft de Gumbel-verdeling een rechte lijn. De blauwe punten en lijn representeren weer het huidige klimaat, hier voor de jaren 1950-2000, de rode punten en lijn het toekomstige klimaat volgens het model en het A1B-scenario voor 2051-2100. De lijnen zijn dus berekend op basis van  $17 \times 50 = 850$  jaarmaxima. De rode ligt boven de blauwe lijn. De schatting voor de windsnelheid met terugkeerperiode van 10.000 jaar is voor de periode 2051-2100 iets hoger dan voor de periode 1950-2000; de scenario-schatting valt buiten het 95%-betrouwbaarheidsinterval van de controle-schatting.

De volgende figuur geeft de Gumbel-plots (d.w.z. Gumbel-schaal op de frequentie-as) van de jaarmaxima van de daggemiddelde windsnelheid voor het roosterpunt {2,5 OL; 55 NB}. De zwarte punten hebben betrekking op de ERA-40 dataset. Op deze punten zijn een Gumbel-verdeling (vormparameter=0) en een GEV-verdeling (vormparameter niet opgelegd) gefit. De Gumbelverdeling laat in deze figuur uiteraard een rechte lijn zien. De betrouwbaarheidsbanden van de GEV-fit zijn groot vanwege het vrijlaten van de vormparameter.



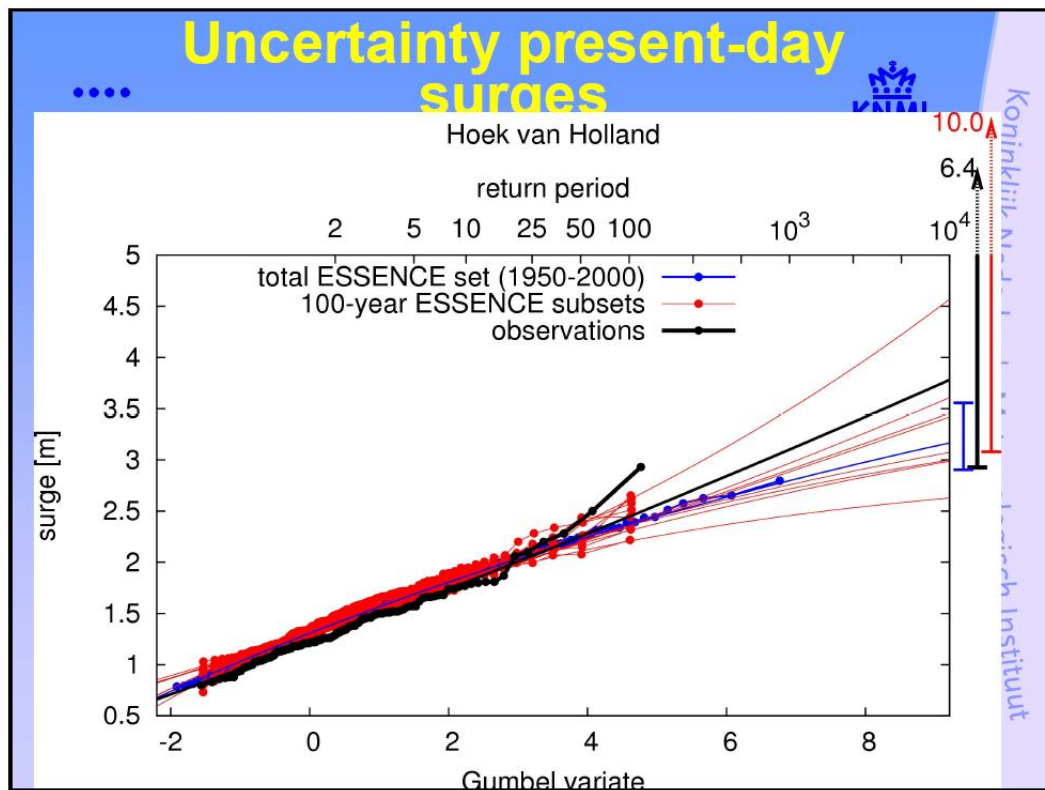
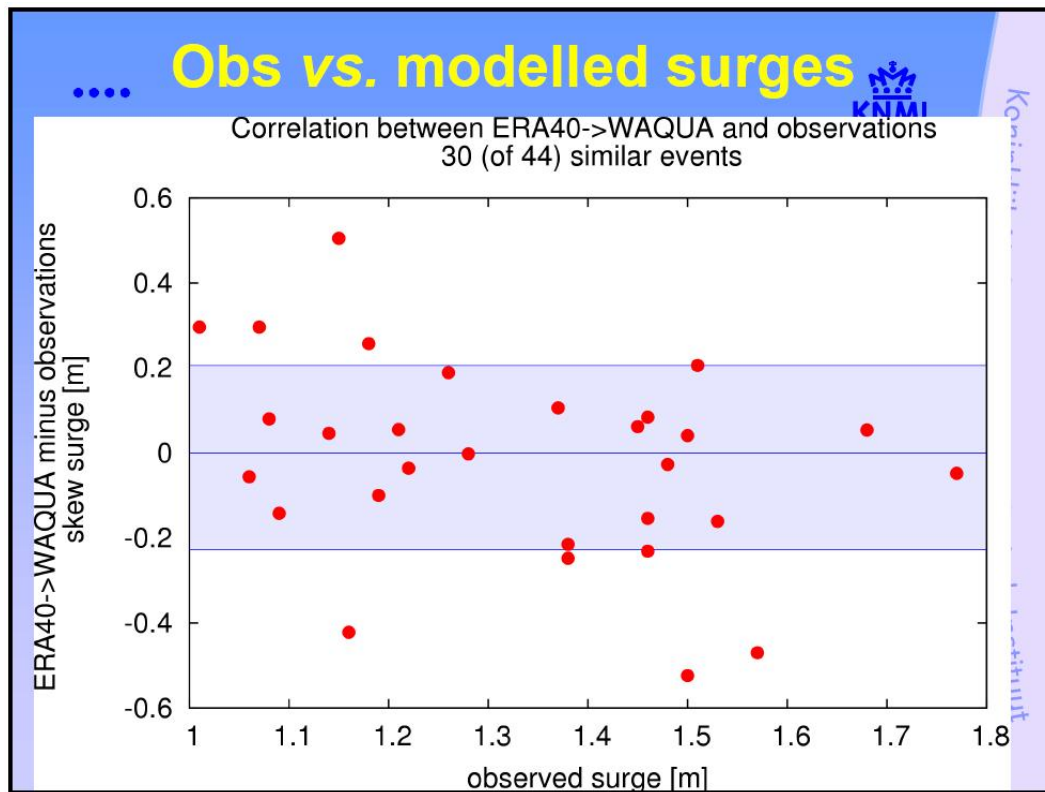
Vervolgens worden overschrijdingsfrequenties van windsnelheden getoond, bepaald met behulp van GSM's, de ESSENCE-set, ERA-40, RACMO25 en NCEP voor het roosterpunt {2,5 OL; 55 NB}. De GSM's zijn dezelfde vier modellen die gebruikt zijn bij de KNMI'06 scenario's (lichtblauwe lijnen). RACMO25 is een regionaal klimaatmodel, gedraaid op randvoorwaarden uit ERA-40. NCEP heeft betrekking op een heranalyse. De lijnen lopen parallel, maar wat is de goede? De afstanden tussen de lijnen worden

veroorzaakt door verschillende parameterisaties van de oppervlakteruwheid. Alle modellen lijken geschikt om veranderingen in extreme waarden te simuleren.



Gekeken is hoe goed de modellering van de windopzetten (surges) is met de ESSENCE-winden op een relatief grof rooster en daaraan gekoppeld het hoge resolutie DCSM-model. Daarvoor is gebruik gemaakt van de ERA-40 winden nadat ze zijn geïnterpoleerd naar ESSENCE-resolutie. Vanwege het eerder genoemde verschil in ruwheidsformulering zijn de ERA-winden met 10% verhoogd. De overschrijdingslijnen van de aldus gemodelleerde windopzetten en van de waargenomen scheve windopzetten (dit is het verschil tussen het hoogwater en bijbehorende astronomische hoogwater, ongeacht het tijdstip) te Hoek van Holland komen goed overeen.

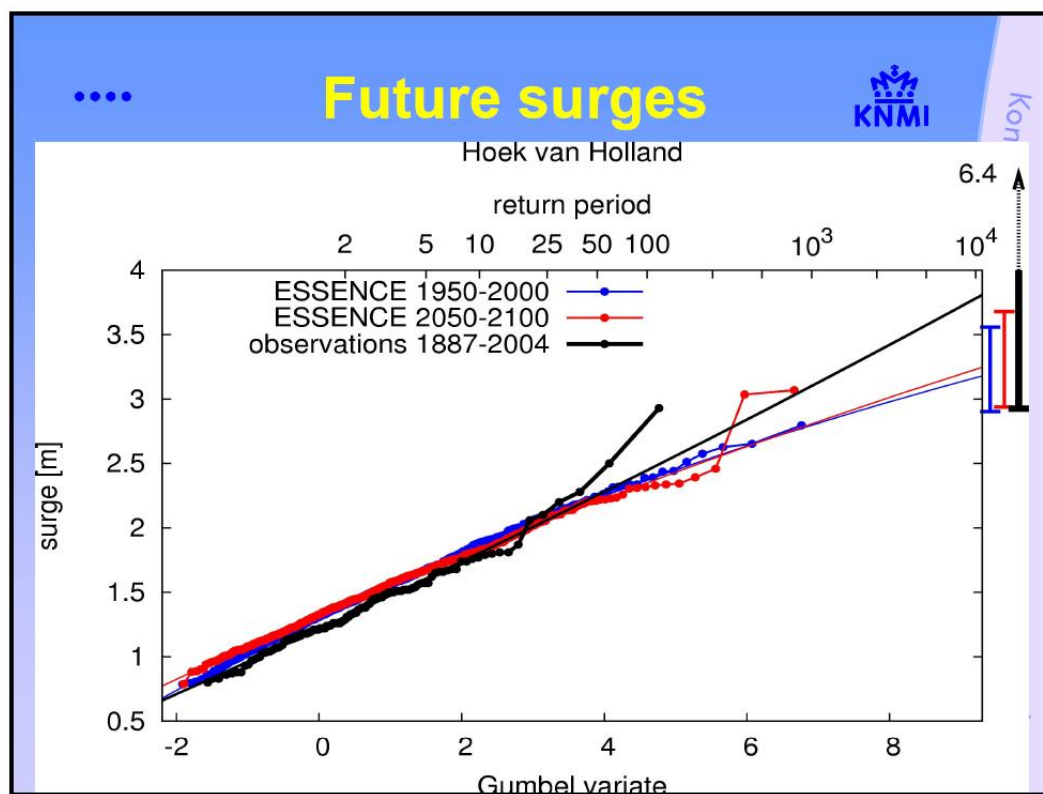
Vervolgens zijn de verschillen tussen de gemodelleerde en waargenomen scheve opzetten uitgezet tegen de waargenomen scheve opzet. Voor 30 van de 44 jaarmaxima betrof het jaarmaximum dezelfde gebeurtenis volgens het model en volgens de waarnemingen. De verschillen zijn niet groot, de correlatie is heel klein. Geconcludeerd wordt dat een fijne resolutie van de windmodellering op de Noordzee voor de stormvloedmodellering niet nodig is. Dat is in overeenstemming met het grootschalige patroon van depressies die grote windopzetten langs de Nederlandse kust veroorzaken.

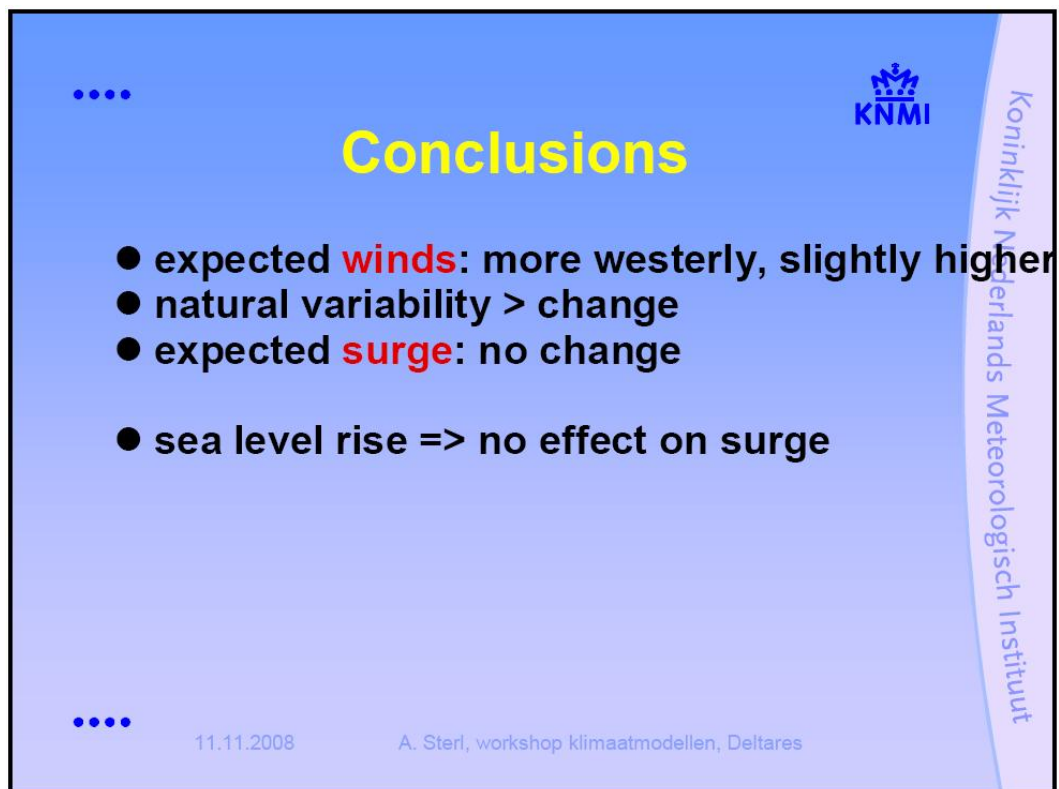


De ESSENCE-ensembles voor het huidige klimaat (1950-2000) lenen zich goed om de invloed van de grootte van de steekproef op windopzetten met een terugkeerperiode

van 10.000 jaar te bestuderen. Dat wordt getoond voor de opzetten van Hoek van Holland. De blauwe punten en lijn hebben betrekking op de jaarmaxima van de hele ESSENCE-set (17 simulaties). Daarnaast zijn er subsets gemaakt met een lengte van 100 jaar, vergelijkbaar met de beschikbare meetreeks. De rode lijnen zijn GEV-fits op deze subsets. De zwarte punten zijn de jaarmaxima van de waarnemingen (1887-2004). Duidelijk is dat het betrouwbaarheidsinterval van de hele ESSENCE-set veel kleiner is dan die van de waarnemingen en dat heeft alles te maken met de "lengte" van de ESSENCE-set: 17 x 50 jaarmaxima. Uit deze analyse volgt ook dat de effecten van klimaatverandering op de stormopzetten niet betrouwbaar bepaald kan worden uit korte tijdreeksen.

Het effect van klimaatverandering laat zich beter bepalen door te kijken naar de hele ESSENCE-set. In één figuur zijn de overschrijdingslijnen getekend voor het huidige klimaat (blauwe lijn), het klimaat over 100 jaar (rode lijn) en voor de waarnemingen (1887-2004). De rode en de blauwe lijn komen beide iets lager uit dan de zwarte lijn. De betrouwbaarheidsintervallen van de blauwe en rode lijn zijn aanzienlijk kleiner dan die van de zwarte en beter in staat een effect van klimaatverandering te laten zien. Voor dit specifieke geval is het effect van klimaatverandering nihil. Dat is in overeenstemming met de notie dat depressiebanen in een opgewarmd klimaat slechts een geringe verschuiving laten zien, met name de westelijke en zuidwestelijke winden iets toenemen, terwijl voor substantiële veranderingen in de noordwestelijke winden echt hele andere depressiebanen nodig zijn.





••••

**Conclusions**

- expected **winds**: more westerly, slightly higher
- natural variability > change
- expected **surge**: no change
  
- sea level rise => no effect on surge

••••

11.11.2008 A. Sterf, workshop klimaatmodellen, Deltares

KNMI  
Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut

## 2.5 Hoe goed zijn klimaatmodellen eigenlijk?

....

**Hoe goed zijn de klimaatmodellen  
eigenlijk?**

**Workshop "Kunnen klimaatmodellen helpen de  
dijkhoogtes te bepalen?"  
11 November 2008**

Henk van den Brink

KNMI

Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut




Hoe goed zijn de klimaatmodellen eigenlijk? – p.1

.... **Wanneer is een klimaatmodel goed?**

Als het:

- inzicht geeft in fysica
- goede getallen geeft voor extremen
- meer mogelijkheden biedt dan observaties

Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut



Hoe goed zijn de klimaatmodellen eigenlijk? – p.2



Volgens Henk van den Brink moet een goed klimaatmodel minimaal inzicht geven in de fysica, in de processen die van belang zijn. Dat kan zelfs al voor betrekkelijk eenvoudige modellen. Idealiter moet het model goede getallen geven voor extremen. Maar ook in minder ideale omstandigheden biedt het meer mogelijkheden dan waarnemingen door het genereren van veel meer extra informatie eromheen. Of een klimaatmodel goed (genoeg) is blijft een subjectief element houden.

.... **Waarom wel/niet klimaatmodellen gebruiken?**

- voordelen:
  - kleine statistische onzekerheid
  - (klimaat)projecties mogelijk
  - simultane gebeurtenissen
  - vergroot begrip van (extremen van) klimaatsysteem
- nadelen
  - (on)bekende modelonzekerheid

Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut

KNMI

Hoe goed zijn de klimaatmodellen eigenlijk? – p.3

Het voordeel van het gebruik van klimaatmodellen is dat de statistische onzekerheid kleiner kan worden gemaakt door de te simuleren reeks langer te maken. De statistische onzekerheid bij een extrapolatie naar gebeurtenissen met een terugkeerperiode van 10.000 jaar is veel kleiner wanneer 1000 in plaats van 100 jaarmaxima ter beschikking staan.

Verder maken modellen klimaatprojecties voor de toekomst mogelijk door forcering van de concentratie van broeikasgassen in de atmosfeer volgens gekozen scenario's, kunnen simultane gebeurtenissen worden gesimuleerd en kan het begrip van het klimaatsysteem en de optredende extremen worden vergroot. Wat dat laatste betreft is bijvoorbeeld een waterstand bij Hoek van Holland slechts een getal. Modellen kunnen de hele situatie weergeven, de ontwikkelingen die tot de extreme gebeurtenis leiden analyseren, e.d.

Het nadeel van het gebruik van klimaatmodellen is de introductie van de meestal onbekende modelonzekerheid. Eigenlijk is het kernprobleem van het gebruik van klimaatmodellen de afweging tussen het verkleinen van de statistische onzekerheid en de daarvoor in de plaats komende introductie van de modelonzekerheid. Het gaat om de balans tussen die twee onzekerheden.

.... **Specificering:**

- Welk klimaatmodel?
- Wat voor een klimaatmodel?
- Welke variabele?
- gemiddelden of extremen?
- kwantitatief of kwalitatief?
- Wanneer 'goed' (genoeg)?
- ...

Koninkrijk Nederlands Meteorologisch Instituut

KNMI

Hoe goed zijn de klimaatmodellen eigenlijk? – p.4

.... **Hoe test je kwaliteit van model?**

- *Niet* mondiaal, maar regionaal
- *Niet* op gemiddelden, maar op extremen
- *Niet* op te kleine (tijd en ruimte) schaal
- *Niet* (alleen) op wind, maar (ook) op bv MSLP

⇒ Kies dus goede grootheid om te beoordelen

Koninkrijk Nederlands Meteorologisch Instituut

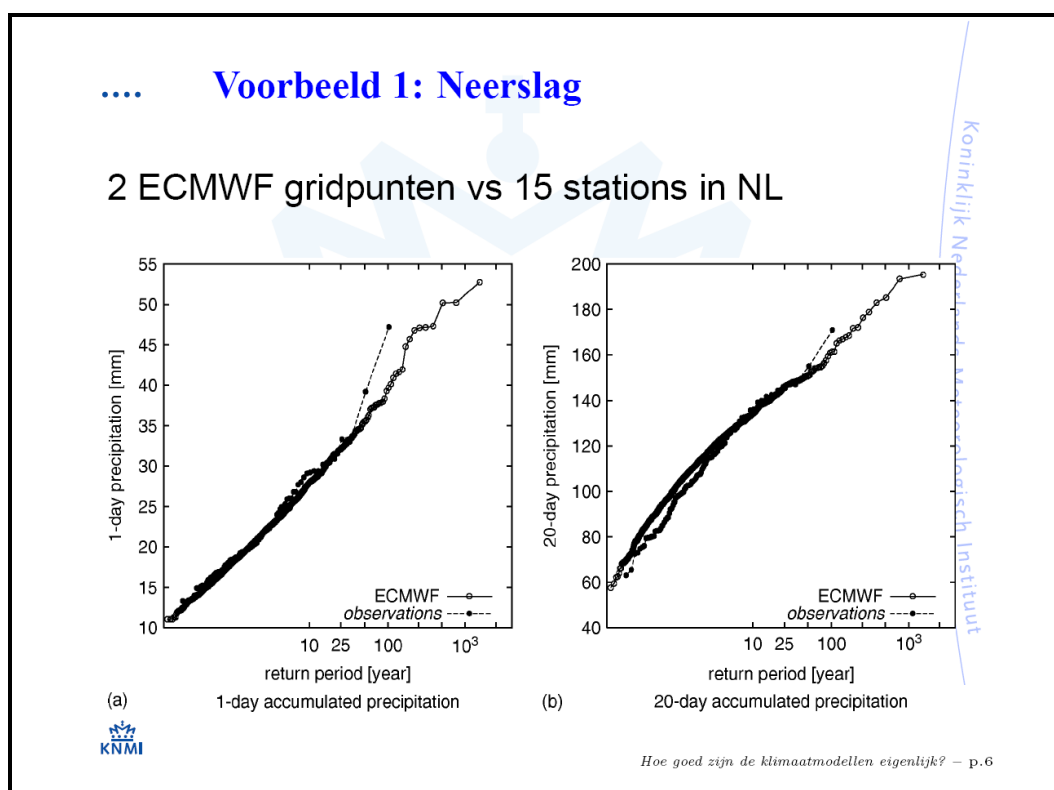
KNMI

Hoe goed zijn de klimaatmodellen eigenlijk? – p.5

Als tot het gebruik van een klimaatmodel wordt besloten, moeten nog een aantal keuzes worden gemaakt. Er moet bijvoorbeeld een klimaatmodel worden gekozen. Deze keuze is deels subjectief. Verder moet gekozen worden voor een mondiaal of een

regionaal model, moeten keuzes worden gemaakt voor de te bestuderen variabelen, voor gemiddelden of extremen daarvan, voor getalsmatige analyses of meer kwalitatieve uitspraken en voor wanneer “goed” goed genoeg is.

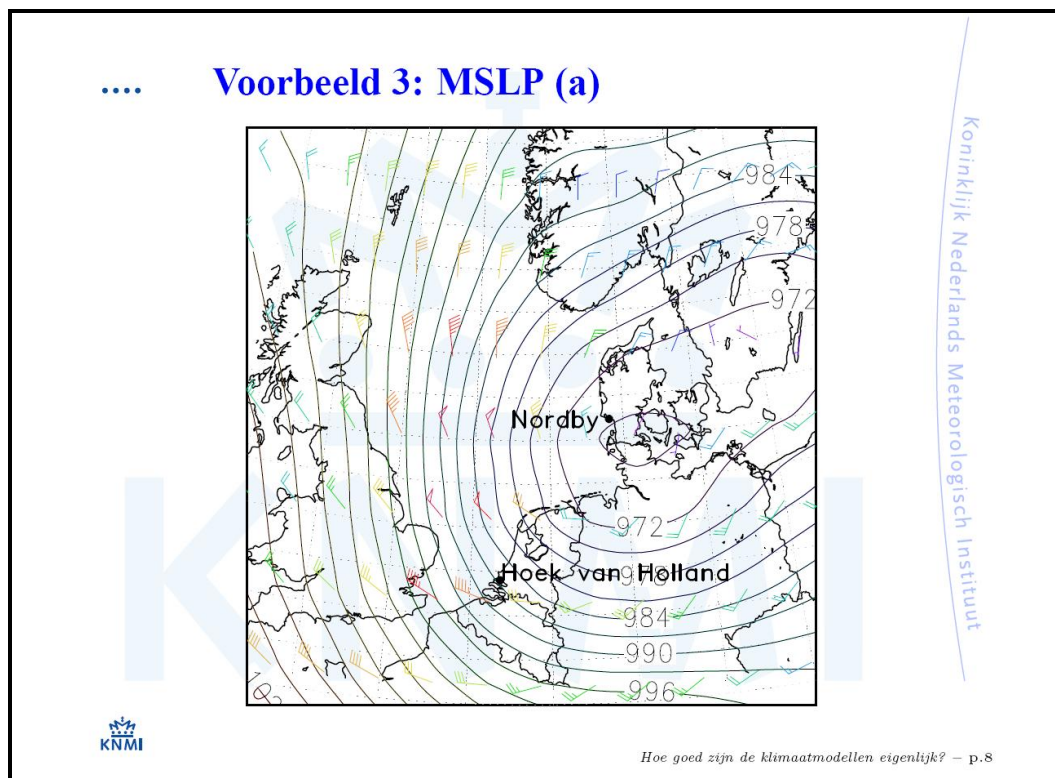
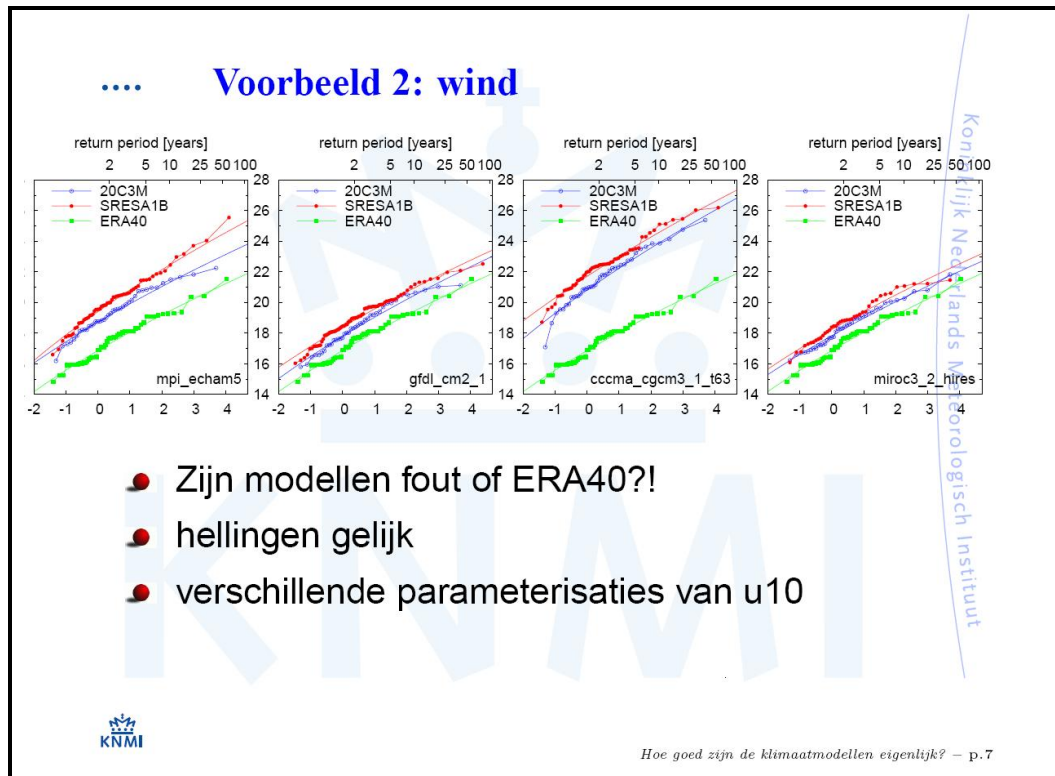
De kwaliteit van een klimaatmodel voor het aandachtsgebied van de workshop (extreme belastingen op waterkeringen) moet passen bij het te bestuderen proces. Het gaat dus om lokale extremen, niet om gemiddelden en daarvoor is een mondiaal model alleen niet voldoende. De tijd- en ruimteschaal moeten ook niet te klein zijn. Naast wind is het zeker verstandig om ook naar luchtdrukken te kijken. Het is dus van belang om het goede model en de goede grootheid te kiezen om te beoordelen of de kwaliteit van het model voldoende is voor het op te lossen probleem.

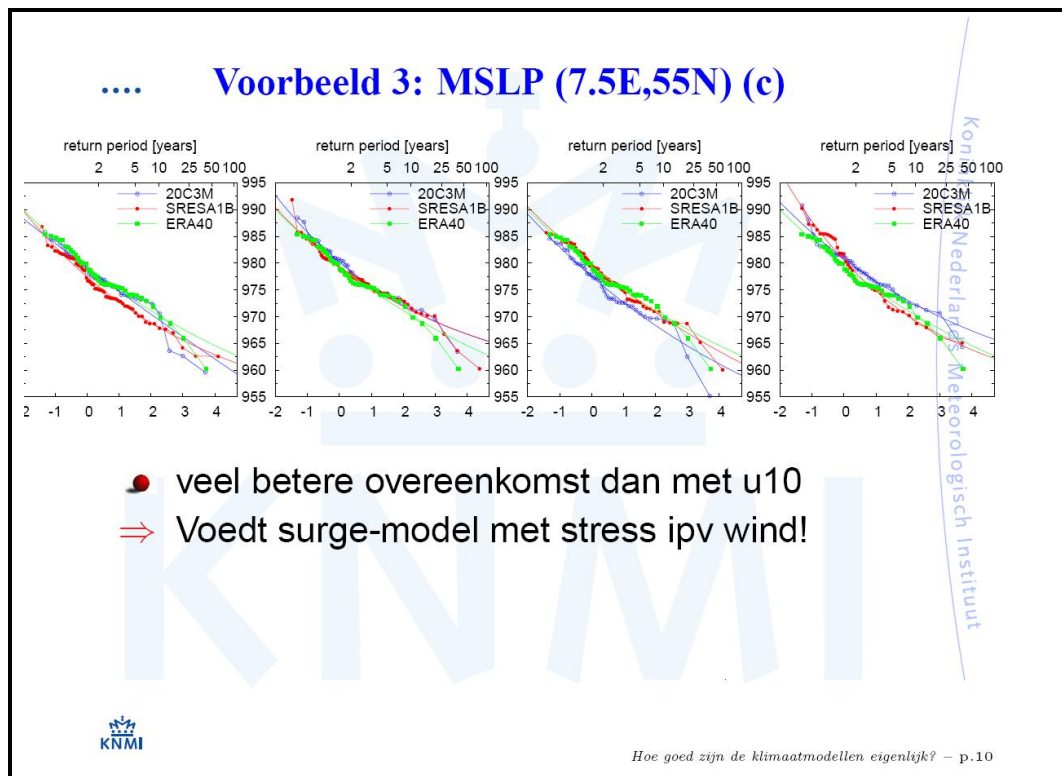
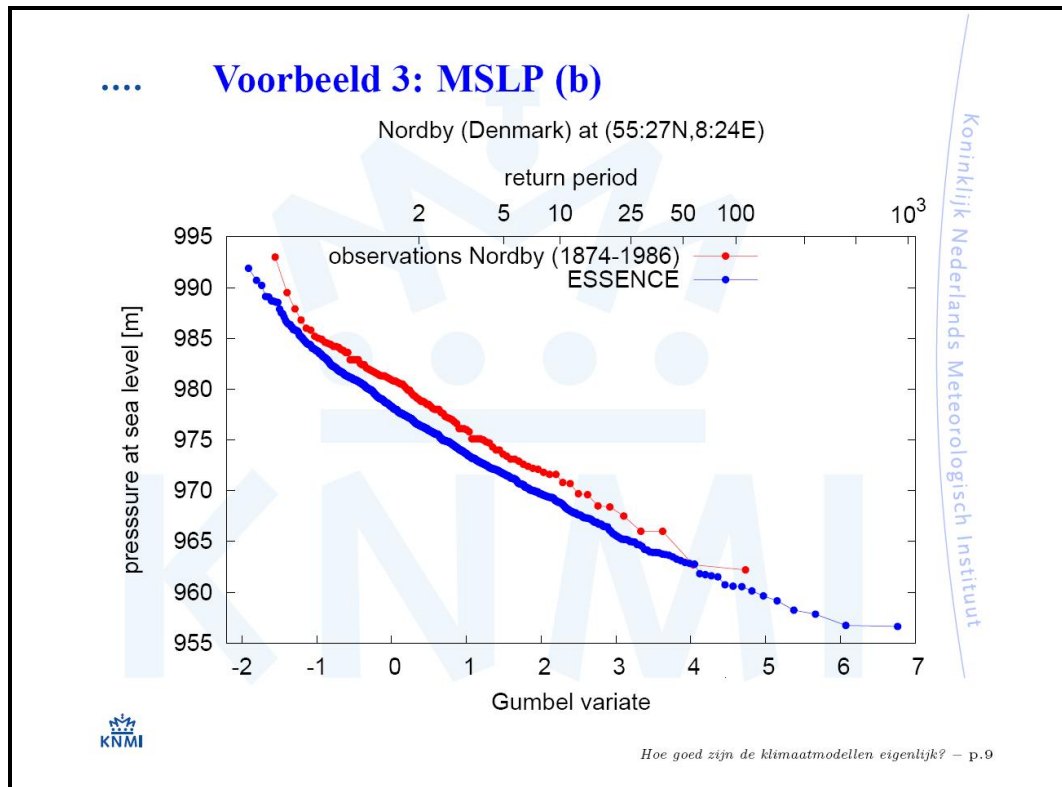


Het voorgaande wordt geïllustreerd aan de hand van een aantal voorbeelden. Het eerste voorbeeld betreft de neerslag boven Nederland. De resultaten voor terugkeerperioden van dagsom en van de 20-daagse som voor twee roosterpunten van het ECMWF-model zijn goed in overeenstemming met die van de gemiddelde waarden over 15 meetstations van overeenkomstige grootheden. Op de tijdschaal van 1 tot 20 dagen doet dit model het dus goed voor de gekozen grootheden. Als wordt vergeleken met één bepaald station, bijvoorbeeld De Bilt, dan zal de overeenkomst niet zo goed zijn. Het zelfde kan gezegd worden van kortere tijdschalen.

Het tweede voorbeeld is al ter sprake geweest bij de vorige presentatie: terugkeerperioden voor jaarmaxima van de windsnelheid volgens modellen die gebruikt zijn voor de KNMI'06-scenario's en volgens de ERA-40 data. Gekeken is naar de geschatte extreme-waardenverdelingen van het jaarmaximum van de daggemiddelde oppervlaktewindsnelheid van een roosterpunt boven de Noordzee (2,5° OL, 55° NB). De resultaten uit de modelsimulaties verschillen onderling, die uit de ERA-40 data liggen voor alle modellen eronder. Al eerder is gesteld dat dit te maken heeft met de

verschillende parameterisaties van de oppervlakteruwheid. Dat deze verschillen optreden wil echter niet zeggen dat de modelaanpak niet voldoet. Het verband tussen intensiteit en frequenties wordt kennelijk wel goed weergegeven; de hellingen zijn gelijk. De modellen zijn kennelijk in staat diepe depressies goed weer te geven.





Het derde voorbeeld betreft de luchtdruk op gemiddeld zeeniveau (MSLP). De hoogste stormopzet bij Hoek van Holland uit het ESSENCE-ensemble met WAQUA/DCSM98 (zie presentatie Andreas Sterl) werd veroorzaakt door een wind- en drukveld, waarvan de minimale luchtdruk op gemiddeld zeeniveau lag bij de Deense plaats Nordby {8,2 OL; 55,3 NB}. Een drukminimum aldaar geeft lange windbanen boven de Noordzee en dus hoge opzetten langs de Nederlandse kust. Overschrijdingsfrequenties van jaarlijkse luchtdrukminima op zeeniveau te Nordby uit de metingen (1874-1986) worden heel goed gereproduceerd door die uit de ESSENCE-verzameling. De lijnen lopen parallel. De modellen zijn dus kennelijk in staat de depressies en de bijbehorende frequenties goed te simuleren.

Als bij dezelfde modellen van het tweede voorbeeld de luchtdrukken worden geanalyseerd in plaats van de windsnelheden op 10 m hoogte, is de overeenkomst veel beter. De vertaling naar de windsnelheid op 10m hoogte is duidelijk nog modelafhankelijk. Voor de aansturing van WAQUA/DCSM98 is het wellicht beter om de stress te gebruiken in plaats van de windsnelheid op 10 m hoogte.

Als vierde worden twee voorbeelden van de statistiek van simultane gebeurtenissen gegeven. Het eerste is de combinatie van een hoge Rijnafvoer en een hoge stormvloedstand bij Hoek van Holland. Het sluiten van de Maeslantkering wordt bepaald door de stormvloedstand te Hoek van Holland en de simultane Rijnafvoer. De simulaties geven een grote hoeveelheid combinaties van beide grootheden. Ze vertonen geen enkele correlatie. Eenvoudig kan bepaald worden welke combinaties tot sluiten leiden. Hiermee kan de sluitfrequentie worden berekend. Door klimaatprojecties op basis van een emissiescenario kan ook het effect daarvan op de sluitfrequentie worden geschat. De voorspelfout die in de dagelijkse praktijk wel een rol speelt is hierbij overigens buiten beschouwing gebleven.

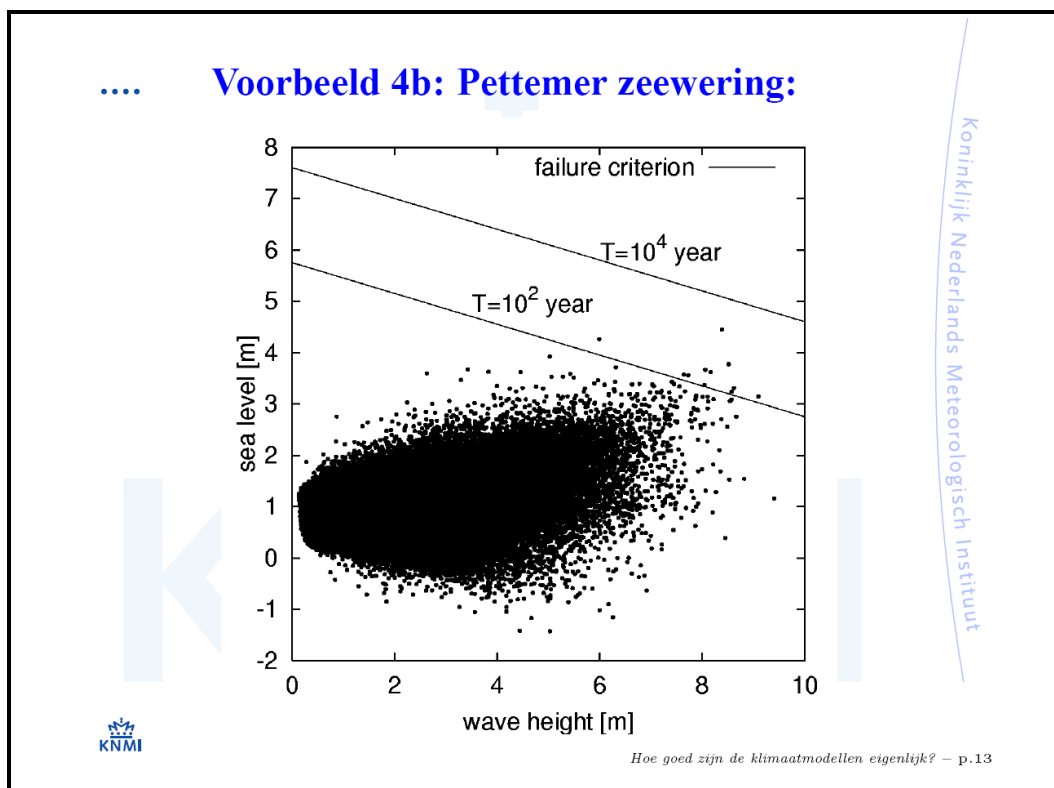
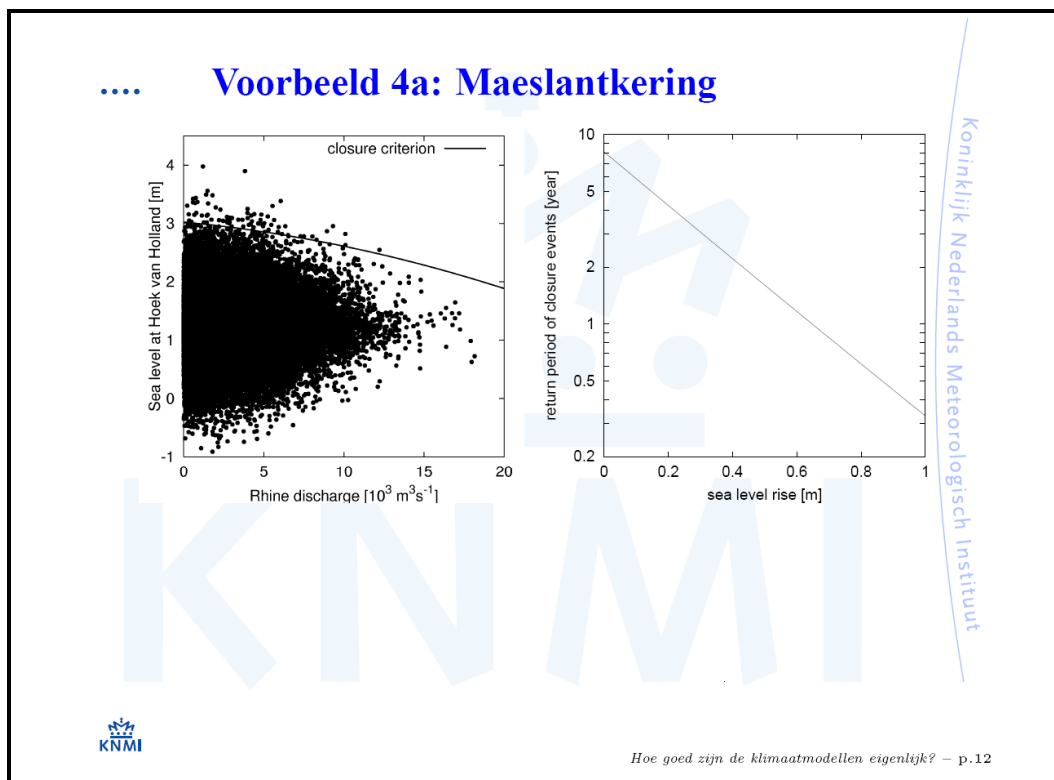
.... **Voorbeeld 4: simultane extremen**



Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut

KNMI

modellen eigenlijk? – p.11



Het tweede voorbeeld is de kruinhoogte van de Pettemer zeekering. Veel simultane combinaties van stormvloedhoogte en golfhoogte kunnen worden gegenereerd. Bepaalde combinaties leiden tot falen voor een gekozen golfloop- of -

overslagcriterium. Dit aantal ten opzichte van alle combinaties geeft een waarde voor de terugkeerperiode van het criterium. De kanttekening wordt gemaakt dat het hier een vereenvoudigd model betreft. De golfperiode is bijvoorbeeld buiten beschouwing gelaten. In beginsel kunnen meer simultane grootheden worden meebeschouwd.

.... **Valkuilen:**

- verwaarloosde effecten
  - tweeling-stormen
  - zeespiegelstijging op surge
- niet-lineaire effecten
  - getij-opzet interactie
- onbekende effecten
  - 'superstormen'

Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut

KNMI

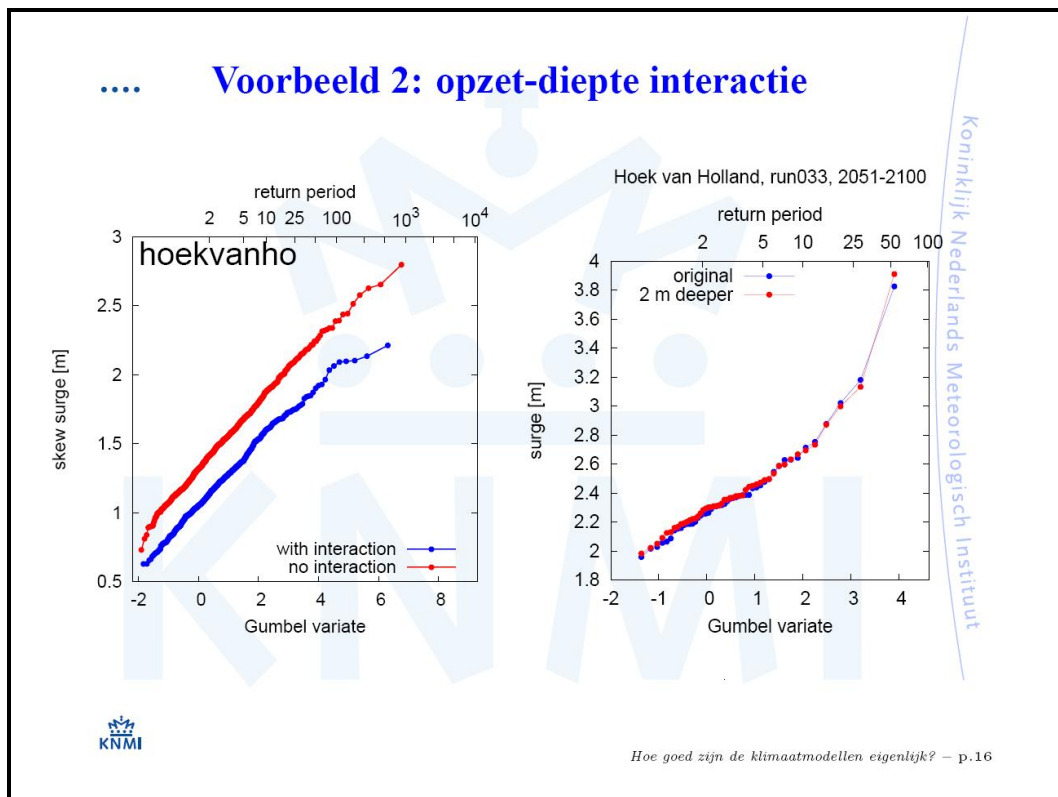
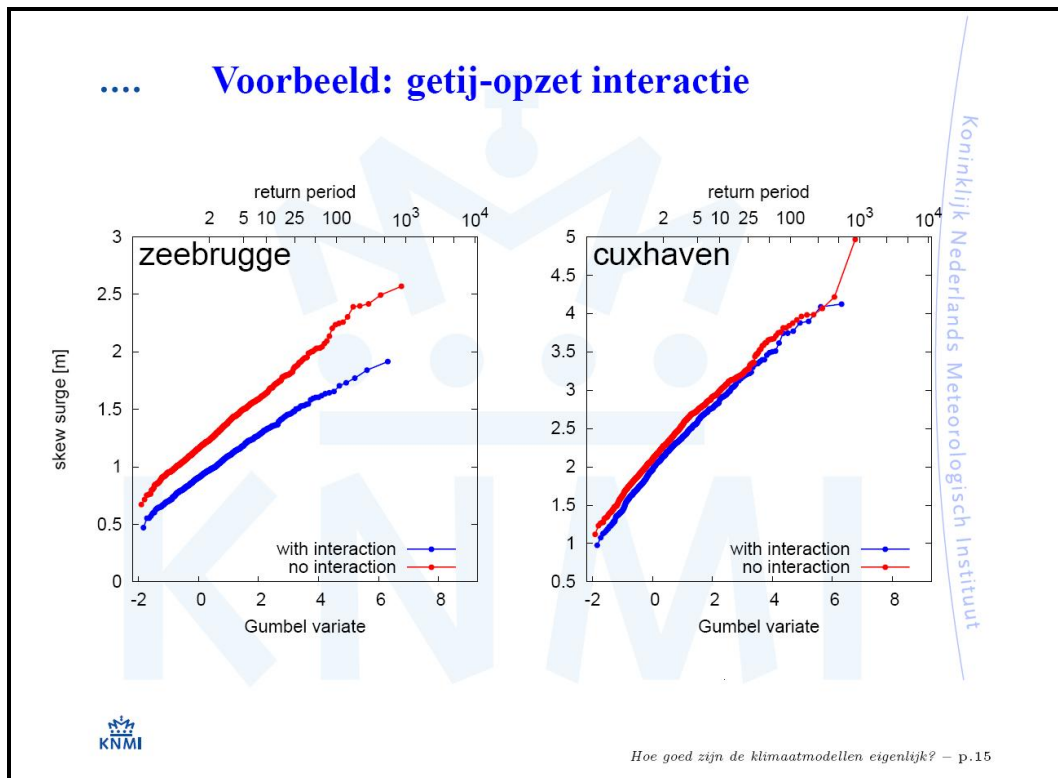
Hoe goed zijn de klimaatmodellen eigenlijk? – p.14

Er zijn ook valkuilen waarvoor men zich moet hoeden. Bepaalde effecten kunnen zijn verwaarloosd. Als voorbeelden worden tweelingstormen en de invloed van de zeespiegelstijging op de stormopzet genoemd. Twee lichtere stormvloedden kunnen mogelijk meer schade veroorzaken dan één zwaardere. De invloed van de zeespiegelstijging op de stormopzet wordt door een aantal aanwezigen verwaarloosbaar geacht. Daar is in het verleden ook onderzoek naar gedaan.

Verder worden niet-lineaire effecten genoemd, zoals de getij-opzet interactie. Deze interactie is plaatsafhankelijk, namelijk samenhangend de bodemligging. De interactie wordt namelijk bepaald door de voortplantingssnelheid van getijcomponenten en die wordt beïnvloed door de waterdiepte.

En dan zijn er nog de onbekende effecten. Modellen kunnen situaties simuleren die zo zeldzaam zijn dat ze nog nooit zijn waargenomen. Anderzijds moet ook gewaakt worden voor artefacten van de modellen, situaties die wel berekend worden maar in werkelijkheid niet voor kunnen komen, veroorzaakt door onvolkomenheden van het model.





.... **conclusie:**

# Klimaatmodellen hebben de toekomst!

mits:

- biases
  - verklaarbaar zijn
  - eenvoudig corrigeerbaar zijn
- afgezet tegen onzekerheden in huidige aanpak
- gebruikt voor goede grootheid
- gebruikt door slimme mensen

KNMI

Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut

Hoe goed zijn de klimaatmodellen eigenlijk? – p.17

Henk van den Brink concludeert dat het gebruik van klimaatmodellen bij het bepalen van de hydraulische randvoorwaarden voor de waterkeringen zeker de toekomst heeft. Er zijn wel een paar mitsen en maren: de afwijkingen ten opzichte van waarnemingen moeten verklaarbaar en eenvoudig corrigeerbaar zijn, de onzekerheid bij het gebruik van de klimaatmodellen moet beter zijn dan de onzekerheid bij de huidige aanpak, de modellen moeten voor de goede grootheid worden gebruikt en tenslotte moet altijd het verstand gebruikt blijven worden.

## 3 Discussie

In dit hoofdstuk wordt de discussie in hoofdlijnen beschreven. De volgorde is daarbij niet geheel chronologisch; er heeft enige hergroepering naar aandachtspunt plaats gevonden. Onderstaande stellingen hebben gediend om de discussie te structureren en hebben als zodanig hun dienst bewezen..

*Stelling 1:* De huidige generatie modellen in bovenstaande modellentrein zijn goed genoeg en geven realistische uitkomsten, ook voor nog nooit opgetreden zware omstandigheden.

*Stelling 2:* De modellentrein GCM-RCM-Wave/Surge/Riverrunoff kan gebruikt worden voor simulatie over een periode van 10.000 jaar. Daarmee worden onzekerheden omtrent de statistische extrapolatie tot een aanvaardbaar niveau teruggebracht.

*Stelling 3:* De enige manier om de effecten van klimaatverandering op het stormklimaat en de extreme rivierafvoeren te bepalen is via het gebruik van modellen.

*Stelling 4:* De inbreng van fysica (via de modellen) en de lengte van de gesimuleerde tijdreeksen (orde duizenden jaren) leiden tot een acceptabele basis voor de bepaling van hydraulische randvoorwaarden.

*Stelling 5:* Het is zinvol om de nieuwe methode te testen op zijn bruikbaarheid om de hydraulische randvoorwaarden beter te schatten, te beginnen met stormvloed op de Noordzee.

### 3.1 De koppeling van klimaat- en waterbewegingsmodellen

De presentaties hebben laten zien dat klimaatmodellen voor veel variabelen goed genoeg zijn om stelling 1 te onderschrijven. Daarbij moet worden aangetekend dat de meeste aandacht gericht was op windsnelheden en windopzetten (waterstandsverhogingen) boven de Noordzee. Er moet een goede relatie bestaan tussen de schaal van het model en de schaal van het bestudeerde effect. De waterbewegingsmodellen voor de Noordzee zijn goed ontwikkeld en uitvoerig getest.

Als één van de zwakste punten wordt de koppeling van de klimaatmodellen aan de waterbewegingsmodellen gezien, met name de impulsoverdracht van lucht naar water. De waterbewegingsmodellen (golven en waterstanden) krijgen hun windrandvoorwaarden opgelegd als windsnelheden op 10m hoogte. De relatie tussen de windsnelheid op 10 m hoogte en de windschuifspanning op het wateroppervlak wordt gelegd via een zogenaamde "winddrag"-formulering. Dat is in feite een parameterisatie van het zeer gecompliceerde proces van impulsoverdracht via de windschuifspanning. Een veelgebruikte formulering is die van Charnock, waarin de windschuifspanning afhankelijk is gemaakt van de leeftijd van de golven (wave age). De winddrag-formulering wordt vaak gebruikt als calibratie-gereedschap bij de afregeling van de modellen en is tot nu toe afgeregeld op gemeten stormen boven zee met windsnelheden tot 25 m/s. Daarbuiten is niet bekend of de impulsoverdracht goed

gemodelleerd is. In tropische orkanen zijn tweemaal zo hoge windsnelheden gemeten, maar deze orkanen werken toch anders dan de stormen op de Noordzee. Er zijn veel verschillende formuleringen voor de impulsoverdracht. Omdat afgeregeld wordt per bassin zijn ze ook per bassin verschillend. Inconsistentie ontstaat als de atmosferische modellen en de waterbewegingsmodellen voor een bepaald bassin met verschillende winddragformuleringen werken.

Als de fysische processen goed genoeg bekend zouden zijn, zou de formulering voor de impulsoverdracht bassin-onafhankelijk kunnen zijn. Bij de impulsoverdracht speelt de ruwheid van het water een belangrijke rol. Ook de golfleeftijd zou dus een rol moeten spelen bij de formulering van de impulsoverdracht, immers de ruwheid van het wateroppervlak is daarvan afhankelijk. De benodigde golfinformatie kan berekend worden met behulp van golfmodellen. Dat zou betekenen dat men met atmosferische modellen eerst golfmodellen aan zou moeten drijven alvorens de windopzet (surge) te kunnen berekenen. Een moeilijkheid daarbij is het scheiden van de energie-overdracht voor de golfopwekking en voor de surge-opwekking.

Op het punt van de impulsoverdracht is de modellentrein dus nog niet klaar. De koppelingen moeten in ieder geval consistent zijn, dat wil zeggen dat de atmosferische modellen dezelfde winddragformulering gebruiken als de waterbewegingsmodellen voor een bepaald bassin. Als dat niet het geval is leidt dat tot systematische fouten in de windopzetberekeningen, zoals duidelijk naar voren kwam bij het gebruik van de ERA40-winden. Het zou voor het vertrouwen in de modellen goed zijn de modellen die afgeregeld zijn op de Noordzee te verifiëren op bijvoorbeeld de Middellandse Zee of de Oostzee.

Klimaatmodellen schieten ook nog tekort in de interne energie-overdracht. Tropische orkanen kunnen nog niet met de huidige modellen worden gesimuleerd. Met de weersmodellen lukt dat wel.

### 3.2 Parameterisaties

Een ander belangrijk discussiepunt dat naar voren kwam is de invloed van parameterisaties in de klimaatmodellen op het voorkomen van extreme weersituaties. Processen die in het betrokken model niet goed beschreven worden, bijvoorbeeld omdat het proces te complex is, of omdat of de ruimtelijke schaal van het proces te klein is voor het gebruikte rekenrooster, worden geparаметeriseerd. De gekozen parameters worden afgeregeld op opgetreden situaties. Er zal daarbij altijd sprake zijn van een zekere afvlakking, bijvoorbeeld door middeling of door regressie. Er zal daarom nagegaan moeten worden welke parameterisaties in de modellen zitten en in welke mate ze gezochte extreme situaties beïnvloeden.

Bij wijze van gedachte-experiment wordt de uitbarsting van de Krakatau (1883) genoemd. Het gaat dan daarbij om de albedo, het weerkaatsingsvermogen, van de aarde na een dergelijke uitbarsting. Die is anders geworden door de grote hoeveelheid uitgestoten vulkaanstof. Zouden de gevolgen van zo'n uitbarsting in de geparаметeriseerde albedo terechtkomen, dan heeft dat invloed op de klimaatsimulaties en dus ook op de gegenereerde extreme situaties, terwijl de werkelijke extremen misschien bepaald worden door toevallige extreme afwijkingen van het albedo.

Het kan best zijn dat parameterisaties niet meer gelden in het extrapolatiegebied, Parameterisaties kunnen er dus ook voor zorgen dat extreme situaties, zoals bijvoorbeeld extreme windsnelheden, afgevlakt worden. Hier is overigens wel een check mogelijk, namelijk door met dezelfde parameterisaties simulaties van werkelijk opgetreden windsnelheden te vergelijken met de modelresultaten voor verschillende niveau's van windsnelheden.

De dragcoëfficiënt is al eerder genoemd als een parameterisatie voor de impulsoverdracht van lucht naar water. Het gedrag van deze coëfficiënt kan afwijken van het aangenomen gedrag in het gebied van de nog niet waargenomen windsnelheden. Dit kan weer leiden tot afwijkingen in de voorspelde extreme golfhoogten en waterstanden.

Vaak worden gevoeligheidsstudies voor bepaalde parameterisaties uitgevoerd. Hier zullen er nog veel meer van uitgevoerd moeten worden.

### 3.3 Statistiek versus modelinformatie bij extrapolatie

Er zou fundamenteel nagedacht moeten worden en objectiever moeten worden gemaakt dat het werken met klimaatmodellen sommige tekortkomingen van de huidige werkwijze met statistische extrapolatie ondervangt.

Wel kan worden gesteld dat de klimaatmodellen gebaseerd zijn op fysische principes die op alle plaatsen ter wereld opgaan en geverifieerd kunnen worden. Deze fysische principes of wetten zijn "beyond any doubt". Verder wordt in de klimaatwetenschappen veel gekeken naar paleoklimaten om de modellen in veel extremer omstandigheden dan het huidige klimaat te toetsen.

Modellen reproduceren omstandigheden zoals we die nu kennen. Bij extrapolatie naar een periode van 10.000 jaar kan zich een nog niet waargenomen omstandigheid voordoen, zoals eerder de zogenaamde superstorm, een samensmelting van twee depressies, uit simulaties tevoorschijn kwam met een eigen statistisch gedrag. Er is dan eerst theoretisch onderzoek nodig om na te gaan hoe zo'n storm in elkaar zit en of hier al dan niet sprake is van een artefact van het model, alvorens hier conclusies aan te verbinden.

Modellen zijn ook op te vatten als een laboratorium; in die zin zijn de superstormen wel waargenomen. Modellen kunnen dus de gebruiker op bepaalde sporen zetten en alert houden.

Voor de statistische extrapolatie dient eveneens uitgegaan te worden van waarnemingen van één proces. De extreme-waardentheorie vereist onafhankelijke en gelijk verdeelde (homogene) gegevens, bijvoorbeeld stormvloedstanden. In de dataset mogen zich dan geen hoge waterstanden bevinden die het gevolg zijn van een heel ander proces, zoals een aardbeving (tsunami) of landafschuiving (landslide).

Een belangrijk discussiepunt blijft de vraag of extrapolatie met modellen in de tijd naar orde 10.000 jaar realistischer resultaten oplevert dan de statistische extrapolatie naar terugkeerperioden van 10.000 jaar.

In de praktijk zouden beide aanpakken gevolgd moeten worden; gezamenlijk geven ze een beter resultaat.

Het is niet bekend wanneer precies de statistische extrapolatie uit de waarnemingen niet meer geldig is. Wel is uit vroegere modelberekeningen bekend dat er geen extreem zwaardere omstandigheden dan in 1953 nodig zijn om tot het huidige basispeil met een geschatte terugkeerperiode van 10.000 jaar te komen. Een wat hoger springtij, een wat diepere en/of uitgebreide depressie, gepaard met wat hogere windsnelheden was al voldoende. Dat betekent dat de fysica van deze geëxtrapoleerde omstandigheden waarschijnlijk niet wezenlijk verschilt van die van de waargenomen stormen.

Processen die in de afgelopen 100 jaar zijn opgetreden zullen een goede afspiegeling moeten zijn van de processen in de langere periode. Als de werkelijke extremen worden gedomineerd door processen die niet in de waarnemingen voorkomen, dan gaat er iets mits. Dat geldt overigens zowel voor de statistische als de klimaatmodelmatige aanpak, immers de modellen zijn opgesteld en afgeregeld op opgetreden en gemeten processen en bestaande kennis.

Bij klimaatsimulaties moet altijd achteraf gecheckt worden of de uitkomsten kloppen met wat verwacht wordt. Als de gevonden extreme situaties bijvoorbeeld erg afwijken van wat is verwacht en wat mogelijk is volgens de huidige kennis, dan is dat aanleiding voor verder fundamenteel onderzoek. Achteraf kan pas vastgesteld worden of er vertrouwen bestaat in de resultaten.

Inzicht hierover kan worden verkregen door ECMWF-simulaties door te rekenen.

Er kan ook andersom worden geredeneerd: ga uit van extreem hoge waterstanden en zoek dan terug naar stormen die dat opgeleverd hebben. Ook voor de Waddenzee is hier veel van te leren, al zijn er veel situaties mogelijk die eenzelfde waterstand opleveren. De schone kust van Holland zal het makkelijkst zijn.

Voor de Waddenzee is een dergelijke aanpak op dit moment nog niet rijp. Er is nu een nieuw model voor de Waddenzee in ontwikkeling. In 2010 is dat model afgeregeld.

Na het terugrekenen naar interessante stormen, kunnen deze stormen weer gebruikt worden om nieuwe ensembleberekeningen vooruit te maken. Dat levert weer veel nieuwe interessante cases, waar dan overigens geen frequenties van voorkomen aan gekoppeld zijn.

Daarnaast zijn fundamentele analyses nodig van wat men doet bij het opzetten, uitvoeren en interpreteren van simulaties met modellen.

Voor de Rijn zijn al eens Rijnafvoer-ensembles berekend op basis van ECMWF-ensembles. Met die resultaten is tot nu toe niets gedaan.

Een groot voordeel van het zoeken naar extreme nooit opgetreden situaties met behulp van modelsimulaties is het fysische inzicht dat de modellen leveren om tot die extreme situaties te komen. Ze geven daarmee een basis voor vertrouwen in het resultaat en eventueel aanwijzingen voor gericht verder onderzoek. Bij een puur statistische extrapolatie ontbreekt een dergelijke check.

## 4 Conclusies en aanbevelingen

### 4.1 Conclusies

- Er zijn goede argumenten voor het gebruik van klimaatmodellen:
  - De huidige meetreeksen zijn te kort voor de gewenste nauwkeurige statistische extrapolatie; modelsimulaties kunnen in beginsel zeer lange periodes omvatten,
  - De fysica van de Waddenzee is te complex om de huidige probabilistische aanpak voor de kust (HYDRA-K) toe te passen; zowel stroomsnelheden als het dynamische stormgedrag moeten worden meegenomen,
  - Met modelsimulaties worden de ruimtelijke samenhang en de correlatie tussen verschillende parameters impliciet in rekening gebracht,
  - Met modelsimulaties kunnen de effecten van klimaatverandering worden bestudeerd.
- Een groot probleem bij het gebruik van simulaties met atmosferische modellen is het modelleren van processen die zich afspelen op een schaal die kleiner is dan de roosterpuntafstand, of die door hun complexiteit nog niet goed gemodelleerd kunnen worden. Dit wordt over het algemeen opgelost door het parameteriseren van de processen. De invloed hiervan op het vinden van extreme situaties is onvoldoende bekend.
- Sommige van de huidige generatie klimaatmodellen, voor de Nederlandse situatie met name het ECHAM5-model, zijn al goed in staat het patroon van de dichtheid en intensiteit van de depressiebanen weer te geven. Kleine maar intensieve stormen vormen nog een apart probleem. Vochtprocessen spelen hierbij een belangrijke maar nog niet goed gekende rol. Voor de veiligheid van de Nederlandse kust zijn dergelijke stormen minder belangrijk; voor de Nederlandse meren ligt dat anders.
- Door opwarming van de atmosfeer nemen volgens het ECHAM5-model op het hele noordelijk halfrond in de wintermaanden (DJF) de stormintensiteiten enigszins af. Ingezoomd op de oostelijke Atlantische Oceaan lijkt het aantal stormen met hoge intensiteit iets toe te nemen door noordwaartse verschuiving van de depressiebanen. In samenhang daarmee lijkt het erop dat in de toekomst boven de Noordzee de zuidwestelijke winden zullen toenemen. Dit leidt niet tot de grootste stormopzetten. Voor de Nederlandse meren zijn zuidwestelijke richtingen wel van belang. De Noordwestelijke winden, van belang voor de hogere stormopzetten aan de Nederlandse kust, geven weinig veranderingen te zien. De natuurlijke variabiliteit is groter dan de effecten van een verandering in het windklimaat.
- In overeenstemming met het voorgaande laten simulaties met het waterbewegings-model WAQUA gekoppeld aan het Klimaatmodel ECHAM5 zien dat voor de Nederlandse kust het extreme stormopzet-“klimaat” niet verandert.

- Eén van de zwakste punten bij het toepassen van de modellentrein is de koppeling van de atmosferische modellen aan de waterbewegingsmodellen. Koppeling via de windsnelheid op 10m hoogte leidt vaak tot een systematische afwijking vanwege verschillen in de relatie tussen deze snelheid en de geparparameteriseerde windschuifspanning. De huidige formuleringen voor de energieoverdracht van lucht naar water met de zogenaamde dragcoëfficiënt zijn bassinafhankelijk, omdat deze gebruikt wordt als calibratieparameter. De gekoppelde atmosferische en waterbewegingsmodellen dienen consistent te zijn in hun winddragformulering.
- Een groot voordeel van het zoeken naar extreme, nooit opgetreden situaties met behulp van modelsimulaties is het fysische inzicht dat de modellen leveren om tot die extreme situaties te komen. Ze geven daarmee een basis voor vertrouwen in het resultaat en eventueel aanwijzingen voor gericht verder onderzoek. Bij een puur statistische extrapolatie ontbreekt een dergelijke check.

#### 4.2 Aanbevelingen

- De koppeling van atmosferische modellen en waterbewegingsmodellen dient niet plaats te vinden via de windsnelheid op 10m hoogte maar via een consistente winddrag-formulering. Verder onderzoek naar deze koppeling wordt aanbevolen.
- Verbeterde modellentreinen dienen te worden getest in een ander bassin dan waarvoor ze zijn afgeregeld. In het geval van afregeling op de Noordzee kan bijvoorbeeld gedacht worden aan toetsing op de Oostzee.
- Het gevoel voor de kwaliteit van atmosferische modellen zou verder moeten worden onderbouwd door de robuustheid van de resultaten voor aannames in de parameterisaties te testen d.m.v. gevoeligheidsstudies.
- Statistische downscaling wordt toegepast om bijvoorbeeld hoge resolutie windvelden te genereren uit hurricane-informatie (track, diepte, max. wind, afstand max. wind tot de kern). Hiermee worden goede resultaten bereikt. Wellicht is het van belang om extreme condities die in klimaatmodellen worden gevonden, maar nog nooit zijn opgetreden met een dergelijke downscaling, te koppelen aan hoge resolutie windopzetmodellen.
- Het wordt sterk aanbevolen met simulaties te zoeken naar extreme nog niet opgetreden situaties.
  - In de ensemble verwachtingen van het ECMWF zijn vele jaren situaties gesimuleerd die (nog) nooit zijn voorgekomen. Dit archief zou kunnen worden uitgediept. Ook zouden bij extreme gevallen eventueel nog verder verstoringen kunnen worden aangebracht om mogelijk nóg extremere gevallen te genereren.
  - Adjoint-technieken (modelexercities in omgekeerde volgorde) kunnen waarschijnlijk in relatief eenvoudige gevallen (zoals Hoek van Holland) gebruikt worden om te zoeken naar omstandigheden die bepaalde



extreme situaties kunnen hebben veroorzaakt. Complexe systemen als de Waddenzee lenen zich hier waarschijnlijk minder goed voor.

- De kwaliteit van extrapolaties op basis van modeloutput zijn zo goed of slecht als de gebruikte modellen. Gemeten extremen die (nog) niet modelmatig voorspelbaar zijn duiden op tekortkomingen in de modellen en verdienen dus bijzondere aandacht. Het maken van een overzicht van dergelijke situaties wordt aanbevolen.
- Hoewel er nog veel zaken fundamenteel uitgezocht moeten worden, wordt aanbevolen de aanpak van het verkrijgen van extreme-waardenstatistiek van hydraulische belastingen op waterkeringen d.m.v. lange runs met gekoppelde atmosferische en waterbewegingsmodellen te starten, om te beginnen voor de Noordzee (relatief eenvoudig). De ervaringen en inzichten die hiermee verkregen worden geven vertrouwen in de aanpak en/of aanleiding tot verder fundamenteel onderzoek.



---

## 5 Literatuur

De basispeilen langs de Nederlandse kust, Statistisch onderzoek, rapport DGW-93.023, D. Dillingh, L. de Haan, R. Helmers, G.P. Können en J. van Malde, Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren, 's-Gravenhage, april 1993.

De basispeilen langs de Nederlandse kust, Fysisch onderzoek, rapport DGW-93.025, M.E. Philippart, S.T. Pwa en J.G. de Ronde, Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren, Den Haag, april 1993.

De basispeilen langs de Nederlandse kust, Eindverslag van het onderzoek naar de kansen op extreem hoge waterstanden langs de Nederlandse Kust, Rapport DGW-93.026, A. van Urk, Rijkswaterstaat Dienst Getijdewateren, Den Haag, april 1993

De basispeilen langs de Nederlandse kust, de ruimtelijke verdeling en overschrijdingslijnen, rapport RIKZ-95.008, M.E. Philippart, D. Dillingh en S.T. Pwa, Rijkswaterstaat Rijksinstituut voor Kust en Zee, Den Haag, mei 1995.

Bengtsson, L., Hodges, K.I., and Roeckner, E., 2006, Storm Tracks and Climate Change, *Journal of Climate*, 19, 3518-3543.

Vellinga, P., Katsman C.A., A. Sterl and J.J. Beersma, (eds), 2008. Onderzoek naar bovengrensscenario's voor klimaatverandering voor overstromingsbescherming van Nederland: een internationale wetenschappelijke beoordeling, 2008 (De Nederlandse vertaling). Dit rapport is een publicatie van KNMI en Wageningen UR (Alterra, Earth System Science and Climate Change Group)

Van den Brink, H.W., 2005, Extreme winds and sea-surges in climate models, Proefschrift, Universiteit van Utrecht.



## A Deelnemerslijst workshop

Naam	Organisatie
Han Vrijling	TU Delft
Pieter van Gelder	TU Delft
Ton Vrouwenvelder	TNO
Andreas Sterl	KNMI
Rein Haarsma	KNMI
Gerrit Burgers	KNMI
Alexander Bakker	KNMI
Bart van den Hurk	KNMI
Henk van den Brink	KNMI
Hans de Vries	KNMI
Geert Groen	KNMI
Nander Wever	KNMI
Sofia Caires	Deltares
Hans de Waal	Deltares
Ferdinand Diermanse	Deltares
Herman Gerritsen	Deltares
Jacco Groeneweg	Deltares
Douwe Dillingh	Deltares
Houcine Chbab	Deltares
Jaap Kwadijk	Deltares
Robert Vos	RWS WD
Laurens de Haan	EUR



## B Programma workshop

# Workshop “Kunnen klimaatmodellen helpen de dijkhoogtes te bepalen?”

Dinsdag 11 november 2008  
Deltares, Rotterdamseweg 185, Delft  
Zaal: High Touch

- 13:00 Ontvangst met soep, broodjes en koffie
- 13:30 Welkom en toelichting op de workshop vanuit de ervaring met het  
basispeilenonderzoek  
*Douwe Dillingh, Deltares*
- 13:50 Bepaling van hydraulische randvoorwaarden in de Waddenzee  
*Jacco Groeneweg, Deltares*
- 14:10 Het toekomstig klimaat volgens klimaatmodellen  
*Rein Haarsma, KNMI*
- 14:30 Koffie/thee
- 14:45 Resultaten van ensemble klimaatmodelruns met daaraan gekoppeld het  
waterbewegingsmodel WAQUA; onderzoek t.b.v. de Deltacommissie  
*Andreas Sterl, KNMI*
- 15:05 Hoe goed zijn klimaatmodellen eigenlijk?  
*Henk van den Brink, KNMI*
- 15:25 Koffie/thee
- 15:40 Discussie
- 16:50 Samenvatting van de discussie en sluiting van de workshop door de  
dagvoorzitter,  
*Bart van den Hurk, IMAU/KNMI*
- 17:00 Borrel