



Koninklijk Nederlands
Meteorologisch Instituut
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

Het gebruik van de ECMWF seizoens- verwachtingen voor het berekenen van de klimatologie van extreme waterstanden langs de Nederlandse kust

H.W. van den Brink

De Bilt, 2020 | Technisch rapport ; TR-385

Het gebruik van de ECMWF seizoensverwachtingen voor het berekenen van de klimatologie van extreme waterstanden langs de Nederlandse kust

Henk van den Brink
KNMI

24 april 2020

Samenvatting

De gecombineerde seizoensverwachtingen van het ECMWF leveren een wereldwijde dataset van meteorologische gegevens op die voor de huidige SEAS5 versie resulteren in 7780 jaar. Deze verwachtingen zijn geïnitieerd over de periode 1981-2018, en beschrijven dus het huidige klimaat.

De temporele en ruimtelijke resolutie van SEAS5 is suboptimaal voor de berekening van extreme waterstanden. Daarom zijn een 37-tal relevante stormen gedownscaled met het operationele weermodel HARMONIE, zodat uurlijkse uitvoer op een resolutie van 2,5km beschikbaar is. We hebben deze velden stapsgewijs teruggebracht naar de SEAS5 resoluties. Door alle varianten opnieuw door te rekenen met het waterstandsmodel DCSM5 is de invloed van de verschillende resoluties gekwantificeerd: de 35km resolutie van SEAS5 geeft een reductie van de opzet van 1,5%, de 6-uurlijkse invoer een reductie van 3,5%. Gebruik van DCSM6 (de opvolger van DCSM5 met een factor 5 hogere resolutie) geeft een toename van de opzet van 2,5%.

Hoewel er na bovengenoemde correcties een gemiddelde onderschatting van de observaties met 3,5% blijft, concluderen we dat de SEAS5 dataset een goed alternatief biedt voor de waarnemingen. De meerwaarde van de SEAS5 dataset is namelijk niet alleen gelegen in de 50-100 keer langere reeks dan de lengte van de waarnemingen, maar ook in de toepasbaarheid in de modellentrein om vanuit de meteorologische gegevens de ontwerpcriteria voor de dijken te bepalen. Daarnaast biedt de dataset relevante kennis over de meteorologische omstandigheden

waaronder de maatgevende stormvloedden zich voordoen. Zo blijkt dat de maatgevende stormen in Harlingen groter en noordelijker gelegen zijn dan die van Hoek van Holland. Ook blijkt dat opeenvolgende depressies door interactie-verschijnselen aanzienlijk hogere opzetten kunnen genereren dan individuele depressies. Dit betekent dat kennis over de voorgeschiedenis van extreme depressies belangrijk is om de juiste waterstand te kunnen bepalen. Dit heeft ook implicaties voor het extrapoleren.

Executive Summary

The combined seasonal forecasts of the European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) provide a global dataset of meteorological data that cumulate (for the current so-called SEAS5 version) to 7780 years in length. These forecasts describe the current climate, as they are initialized over the period 1981-2018.

The SEAS5 dataset is suboptimal in its temporal and spatial resolution. In order to quantify the resolution effects, 37 relevant storms¹ are downscaled with the operational Numerical Weather Prediction model HARMONIE. This supplies all required fields with an hourly resolution and a gridsize of only 2,5km.

We downgraded those fields stepwise to the SEAS5 resolutions of 35km and 6 hours. By calculating the corresponding surges for all variants, we have quantified the influence of the resolution. It shows that the 35km resolution of SEAS5 induces a decrease in surge of 1.5%, whereas the 6-hourly input causes a decrease of an extra 3.5%. Replacing DCSM5 with its successor DCSM6 (with a factor 5 higher resolution) increases the surges with 2.5%.

Although - after above mentioned corrections - an average underestimation of 3.5% compared to the observations remains, we nevertheless conclude that the SEAS5 dataset provides a good alternative for the observational series. The added value of the SEAS5 dataset is namely not only due to its 50-100 times longer length, but also in the applicability in the desired model-train in order to derive the dike design criteria from the meteorological data. Additionally, the dataset supplies important information about the meteorological circumstances during relevant storm situations. It shows that the relevant depressions in Harlingen are larger and situated more northerly than those in Hoek van Holland. There are also indications that succeeding depressions due to interaction effects may lead to considerable higher surges than by individual depressions. This implies that it is important to know the history of extreme depressions in order to derive the correct sea levels. It also has implications for the extrapolation.

¹These storms are selected from 2416 years from the Ec-Earth model for which the necessary boundary conditions are available.

Inhoudsopgave

1	Inleiding	5
2	Modelbeschrijving en waarnemingen	6
2.1	Meteorologische modellen	6
2.1.1	ECMWF seizoensverwachtingen	6
2.1.1.1	SEAS5	6
2.1.1.2	System4	7
2.1.2	EC-Earth	8
2.1.3	ERA-Interim	8
2.1.4	ERA5	9
2.1.5	RACMO	9
2.1.6	HARMONIE	9
2.1.7	SPEEDY	11
2.1.8	Overzicht meteorologische modellen	11
2.2	Hydrologische modellen	13
2.2.1	WAQUA-DCSM5 model	13
2.2.2	WAQUA-DCSM6 model	14
2.2.3	Overzicht hydrologische modellen	14
2.3	Waarnemingen	15
2.3.1	Waterstandsmetingen	15
3	Methodologie	18
3.1	Gedownscaledde stormen	20
4	Validatie en verificatie	22
4.1	Wind en pseudowind	22
4.2	MSLP	23
5	Resultaten	25
5.1	Scheve opzet versus waterstand	25
5.2	Scheve opzetten van DCSM5	26
5.3	Effecten van DCSM versies op extreme waterstanden	28
5.3.1	Effecten per locatie	28
5.3.2	Effecten per storm	31
5.4	Afschatting van integrale effecten	35
5.5	Getransformeerde waterstanden	38
6	Overige bevindingen	42
6.1	Invloed van voorgeschiedenis	42
6.2	Classificatie van extreme stormvloedden	45
6.3	SPEEDY runs	46
7	Conclusies en discussie	48
7.1	Conclusies	48
7.2	Discussie en vooruitblik	49
A	Synoptische karakterisering en opzetreeksen van de geselecteerde stormen	53

B Scheve opzetten uit ERA5/DCSM5	73
C Beschrijving van het Timmerman opzet-model	76

1 Inleiding

Voor de ontwerpcriteria van de dijken langs de Nederlandse kust is kennis van de wind boven de Noordzee van groot belang. De wind zorgt immers zowel voor de golven als voor de opstuwing van het water tegen de kust, en is daarmee de dominante grootte die de hoogte van de dijken bepaalt.

De ontwerpcriteria zijn gebaseerd op waterstanden die tot eens in de 10^7 jaar voorkomen (Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017, Bijlage III). Eén aanpak is om vanuit de gemeten waterstanden (die ruim 100 jaar in lengte zijn) via de theorie van extreme waarden tot de eens-in-de- 10^7 -jaar waarden te komen. Dit brengt echter aanzienlijke onzekerheden met zich mee, omdat het niet eenduidig is hoe de extrapolatie gedaan moet worden (Van den Brink en Können, 2008).

In dit rapport onderzoeken we in hoeverre lange tijdreeksen van weer- en klimaat-modellen kunnen dienen om de invloed van de statistische extrapolatie te verkleinen.

In de afgelopen jaren is binnen Werkpakket 1 van het WBI2023 project gewerkt aan het analyseren en doorrekenen van de System4 (≈ 6800 jaar) en SEAS5 (≈ 7800 jaar) seizoensverwachtingen van het ECMWF. Een aanzienlijk deel van deze data zijn doorgerekend met het waterstandsmodel DCSM5, waardoor lange reeksen van waterstanden beschikbaar zijn voor onder andere extreme-waarden analyse (Van den Brink en De Goederen, 2017; Van den Brink, 2018).

De vraag is echter in hoeverre de beperkte resoluties in tijd (6-uurlijks) en ruimte (80km voor System4, 35km voor SEAS5) de extreme-waarden analyse en extrapolatie beïnvloeden.

Een tweede - samenhangende -vraag is hoe de waarden zouden zijn als niet de combinatie van seizoensverwachtingen en DCSM5 gebruikt zou zijn, maar de operationele meteorologische uitvoer van HARMONIE (uurlijkse velden op 2.5km resolutie) in combinatie met DCSM6 (de opvolger van DCSM5, met een 5 keer hogere ruimtelijke resolutie). Deze vraag is niet alleen van belang voor betere resultaten, maar ook om toe te werken naar een identieke modellen-trein voor het onderzoek en voor de operationele praktijk.

Idealiter zouden we duizenden jaren meteorologische data op HARMONIE resolutie door willen rekenen met DCSM6. Dat is om meerdere redenen niet mogelijk. Allereerst bestaan dergelijke lange reeksen op 2.5km resolutie niet. Ook zijn ze niet te genereren, omdat dit te veel rekenkracht kost. Ook het doorrekenen van de lage-resolutie meteorologische ECMWF data met DCSM6 is rekentechnisch niet haalbaar, en heeft geen toegevoegde waarde omdat de kleinschalige meteorologische fenomenen die verschillen opleveren met versie DCSM5 ontbreken in de ECMWF uitvoer.

In dit rapport kiezen we daarom een andere aanpak. We downscalen een 40-tal relevante extreme stormen met HARMONIE naar een resolutie van 2.5km, die we vervolgens doorrekenen met DCSM6. Vergelijking van de gevonden maxima in waterstand van de HARMONIE+DCSM6 combinatie met de resultaten van ECMWF+DCSM5 geeft een kwalitatief beeld van de effecten die verandering in de modellen-trein heeft op de extreme waarden.

Het uiteindelijke doel is om de ECMWF+DCSM5 resultaten met een statistische transformatie te vertalen naar de vermoedelijke uitkomst van de HARMONIE+DCSM6 combinatie, en zo tot verbeterde schattingen van extreme waterstanden te komen.

In dit rapport wordt deze werkwijze toegelicht, en de uitkomsten gepresenteerd. Ook worden de meteorologische eigenschappen van de meest extreme stormen beschreven. Daarnaast worden de resultaten gepresenteerd van de extreem lange reeks van 400.000 jaar die met het klimaatmodel SPEEDY zijn gegenereerd.

2 Modelbeschrijving en waarnemingen

In dit hoofdstuk beschrijven we de modellen die in het onderzoek gebruikt zijn. De meteorologische gegevens zijn gegenereerd met de seizoensverwachtingen van het ECMWF (paragraaf 2.1.1). Van de seizoensverwachtingen zijn wel de oppervlakte-parameters gearchiveerd die als invoer dienen van de hydrologische modellen. Maar om specifieke stormen te downscalen naar hoge resolutie zijn de 3D-velden nodig om het regionale meteorologische model aan de randen te voeden. Deze zijn niet gearchiveerd voor de seizoensverwachtingen omdat dit te veel data omvat.

Daarom is voor het downscalen gebruik gemaakt van het EC-Earth model (paragraaf 2.1.2). Hiervoor is wel de benodigde 3D-informatie beschikbaar.

Het hoge-resolutie model HARMONIE (paragraaf 2.1.6) is gebruikt om te onderzoeken in hoeverre de relatief lage resolutie van het ECMWF model van invloed is op de verkregen resultaten. Uit technisch oogpunt is als tussenstap het regionale klimaatmodel RACMO (paragraaf 2.1.5) gebruikt.

Het waterstandsmodel DCSM5 (paragraaf 2.2.1) is gebruikt om vanuit de meteorologische gegevens de waterstanden langs de Noordzeekust te berekenen. Om te onderzoeken in hoeverre de ruimtelijke resolutie van DCSM5 van invloed is op de waterstanden, is voor een beperkt aantal stormen de waterstand ook berekend met DCSM6 (paragraaf 2.2.2). Voor de samenhang van al deze modellen voor de huidige studie verwijzen we vast naar Figuur 6 in Hoofdstuk 3. In dit hoofdstuk worden de functies van de modellen ook verder toegelicht.

In paragraaf 2.3 bespreken we de gebruikte waarnemingen van de waterstand.

Om te onderzoeken of de ontwerpcriteria beïnvloed worden door onvoorziene afwijkingen bij de extrapolatie, is met een laag-resolutie klimaatmodel (SPEEDY, paragraaf 2.1.7) een extreem lange reeks gegenereerd.

2.1 Meteorologische modellen

2.1.1 ECMWF seizoensverwachtingen

2.1.1.1 SEAS5 Vanaf november 2017 maakt het ECMWF elke maand een ensemble van 51 globale seizoensverwachtingen van 7 maanden vooruit, dus ver voorbij de 2 weken horizon waarop (op onze breedten) er voorspelbaarheid in de verwachting zit. Over de periode 1981-2017 zijn hindcasts² gemaakt om het systeem te kalibreren. Voor de maanden Februari, Mei, Augustus en November zijn ook 51 leden gegenereerd, voor de andere maanden 25. Deze versie wordt SEAS5 genoemd. We gebruiken deze dataset om extreme windsnelheden boven de Noordzee te analyseren. Hiervoor is de data geïnterpoleerd naar een regelmatig rooster met een resolutie van 0.25° . De eerste maand van elke verwachting wordt niet gebruikt, om afhankelijkheid tussen de onderlinge ensemble leden te voorkomen. Van den Brink et al. (2005) laten zien dat de correlatie van de Noord-Atlantische Oscillatie (NAO) index voor verwachtingen van 1 maand of meer verwaarloosbaar is ($\rho \leq 0.34$). Door verwachtingen die een half kalenderjaar in startdatum verschillen te combineren, kunnen volledige kalenderjaren geconstrueerd worden.

²Een hindcast is een verwachting die in het verleden ligt. Dit biedt de mogelijkheid om de verwachting te vergelijken met het opgetreden weer, zodat ijking mogelijk is.

Tabel 1: Combinatie van individuele ensemble leden om een 7780-jarige tijdreeks te construeren. De nummers in de tweede kolom geven de maand en jaar aan waarin de run start (jan-jun en 1981-2018) gevolgd door het ensemble nummer (0-24 of 0-50).

year	eerste half jaar		tweede half jaar
1	jan 1981-0	+	jul 1981-0
2	jan 1982-0	+	jul 1982-0
⋮			
38	jan 2018-0	+	jul 2018-0
39	jan 1981-1	+	jul 1981-1
⋮			
976	jan 2018-50	+	jul 2018-50
977	feb 1981-0	+	aug 1981-0
⋮			
7780	jun 2018-50	+	dec 2018-50

Tabel 1 laat zien hoe de combinaties zijn gemaakt. Door deze combinatie-keuzes is de dataset zo continue mogelijk. Toch zijn er nog een paar discontinuïteiten. Allereerst is er een discontinuïteit bij elk concatenatie, die de temporele correlatie in de meteorologische situatie onderbreekt. De correlatie in het astronomisch getij wordt echter wel behouden. Omdat de opeenvolgende jaren de historische orde volgen voor elk perturbatie nummer wordt ook de 18.6-jarige maancyclus in het astronomisch getij gehandhaafd. De enige discontinuïteiten in de beginsituaties vinden plaats als het jaar 2018 is bereikt en het volgende jaar weer begint met 1981 (van jaar 38 naar 39 in Tabel 1).

Discontinuïteiten in het kalenderjaar worden gemaakt als het perturbatie nummer terug-springt van 24 of 50 naar 0. In dat geval wordt een kalendermaand overgeslagen (van jaar 976 naar 977 in Tabel 1). De discontinuïteiten blijken geen systematisch effect te hebben op de uitkomsten.

2.1.1.2 System4 In eerder onderzoek (bijvoorbeeld Van den Brink en De Goederen, 2017; Van den Brink, 2018) is gebruik gemaakt van de vorige versie van de seizoensverwachtingen, System4. Onderstaande Tabel 2 geeft de belangrijkste verschillen weer tussen System4 en SEAS5:³

³zie ook <https://confluence.ecmwf.int/display/FCST/Implementation+of+Seasonal+Forecast+SEAS5>

Tabel 2: Belangrijkste verschillen tussen System4 en SEAS5.

	System4	SEAS5
IFS Cycle	36r4	43r1
IFS horizontale resolutie	TL255	TCO319
IFS Gaussisch grid	N128 (80 km)	O320 (35 km)
geïnterpoleerde resolutie	0.5°	0.25°
Aantal leden	51	51
Re-forecast jaren	30 (1981-2010)	36 (1981-2016)
Aantal leden re-forecast	15 (of 51)	25 (of 51)
Calibratie periode	1981-2010	1993-2016
tijdstap	45min	20min
Tijdsresolutie van uitvoer	6 uur	6 uur

Daarnaast is een belangrijk verschil dat in SEAS5 ook de stress-componenten zijn gearchi-veerd, zodat niet langer aannames gedaan hoeven te worden over de relatie tussen wind en stress.

2.1.2 EC-Earth

EC-Earth is een wereldwijd klimaatmodelsysteem gebaseerd op het idee om het weersvoor-spellingsmodel van de ECMWF (European Center of Average Range Weather Forecast) te gebruiken als de basis van het klimaatmodel. Voor meer details verwijzen we naar www.ec-earth.org en naar Hazeleger et al. (2012).

In de huidige setting is gebruik gemaakt van 16 realisaties van de 1950-2100 periode die gedaan zijn met EC-Earth in het kader van de KNMI'14 scenario's (zie Sterl et al., 2015). Hierdoor is 2416 jaar beschikbaar. De ruimtelijke resolutie is 125km, met uitvoer per 3 uur. De drag boven zee is geparаметeriseerd volgens Charnock met $\alpha=0.018$.

Het EC-Earth model wordt in dit onderzoek gebruikt om de randen te leveren voor HARMONIE.

2.1.3 ERA-Interim

Het regionale model HARMONIE wordt aangedreven door de ERA-Interim analyses, berekend door het ECMWF. Deze analyses zijn beschikbaar vanaf 1979.

De kracht van de ERA-Interim dataset is dat het één van de toonaangevende weersver-wachtingsmodellen (het ECMWF model) combineert met een geavanceerd systeem om de observaties te assimileren (Dee et al., 2011). De resulterende analyses kunnen beschouwd worden als de best mogelijke weergave van de toestand van de atmosfeer, gegeven de model informatie en de observaties. ERA-Interim bevat 3D analyses van de atmosfeer op een resolutie van ongeveer 80 km. De tijdsresolutie van de analyses is 6 uur. Alle variaties in het weer die plaatsvinden binnen 80 km en/of 6 uur kunnen dus niet door ERA-Interim worden weergege-ven. Alleen de grootschalige weerfenomenen worden door ERA-Interim gerepresenteerd, zoals depressies en hogedrukpatronen. De bijbehorende kleinschalige fenomenen, zoals fronten en buien, zijn echter niet of nauwelijks in ERA-Interim waarneembaar.

2.1.4 ERA5

Het regionale model HARMONIE wordt aangedreven door de ERA5 analyses, berekend door het ECMWF. Deze analyses zijn beschikbaar vanaf 1979.

De kracht van de ERA5 dataset is dat het één van de toonaangevende weersverwachtingsmodellen (het ECMWF model) combineert met een geavanceerd systeem om de observaties te assimileren (Dee et al., 2011). De resulterende analyses kunnen beschouwd worden als de best mogelijke weergave van de toestand van de atmosfeer, gegeven de model informatie en de observaties. ERA5 bevat 3D analyses van de atmosfeer op een resolutie van ongeveer 35 km. De tijdsresolutie van de analyses is 1 uur.

2.1.5 RACMO

RACMO is een regionaal klimaatmodel dat gebaseerd is op het weermodel HIRLAM. De gebruikte resolutie van RACMO is 12km met een tijdstap van 5 minuten. Achtergrondinformatie over het RACMO model is beschreven in Van Meijgaard et al. (2008). De randvoorwaarden voor RACMO worden geleverd door EC-Earth. De uitvoer hiervan is 3-uurlijks. Het gebruikte domein van RACMO omvat 222x216 roosterpunten, en is weergegeven in Figuur 1.

Boven zee wordt de Charnock parameterisatie gebruikt met $\alpha=0.018$. Voor hoge windsnelheden wordt de oppervlakteruwheid z_0 aangepast volgens:

$$z_{0m} = \alpha \frac{u_{\text{lim}}^2 (1 - \exp(-u_* / u_{\text{lim}}))^2}{g} \quad (1)$$

met $u_{\text{lim}}=1 \text{ m/s}$.

2.1.6 HARMONIE

Sinds 2012 is HARMONIE (*HIRLAM ALADIN Research On Mesoscale Operational NWP in Europe*) één van de operationele weermodellen van het KNMI. Het is een regionaal model dat ontwikkeld is, en voortdurend verder ontwikkeld, gemonitord en verbeterd wordt door het HIRLAM consortium, waarin vele Europese landen participeren. Nauwe samenwerking met onder andere het ECMWF zorgt voor een continue borging en verdere verbetering van de kwaliteit.

HARMONIE is de opvolger van de HIRLAM en ALADIN modellen. De belangrijkste verschillen zijn dat HARMONIE rekent op een rooster met een zeer hoge resolutie (standaard met een roosterpuntsafstand van 2.5 km) en dat het een zogenaamd niet-hydrostatisch model is, wat betekent dat het een realistischere beschrijving geeft van de atmosferische processen, bijvoorbeeld door het berekenen van de verticale bewegingen⁴. Het HIRLAM-ALADIN consortium heeft het model uitvoerig getest. HARMONIE is ook bekend onder de naam 'AROME'. Meer details over het HARMONIE/AROME model zijn te vinden in Seity et al. (2011) en op www.hirlam.org.

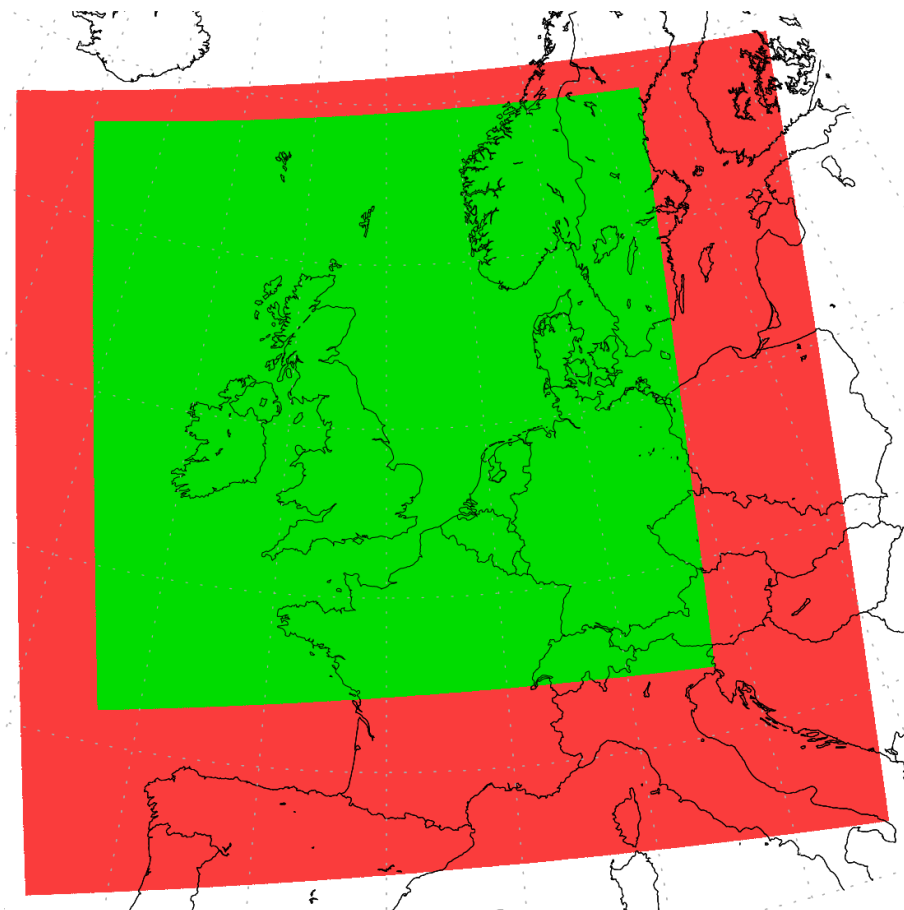
De belangrijkste elementen van de model-setup zijn:

- We gebruiken HARMONIE versie cy38h1.1 (vrijgegeven in Augustus 2012)⁵.

⁴Omdat dit rapport focust op zeewaterstanden en de bijbehorende grootschalige wind, is het aannemelijk om te veronderstellen dat de niet-hydrostatische effecten van HARMONIE uitmiddelen, en dus van ondergeschikt belang is voor de berekende waterstanden.

⁵zie ook <https://hirlam.org/trac/wiki/ReleaseNotes/harmonie-38h1.1>

- We gebruiken (in overeenstemming met de standaard HARMONIE set-up) de ECUME ruwheids formulering (Weill et al., 2003) boven zee, en een Charnock formulering ($\alpha=0.015$) voor meren en rivieren.
- Het model is gerund op een domein van 800x800 roosterpunten op een Lambert-rooster. Dit houdt in dat de onderlinge afstanden naar de dichtstbijzijnde roosterpunten overal gelijk zijn. In dit geval van HARMONIE is deze roosterpuntsafstand 2.5x2.5 km. Het domein is gecentreerd op 55°N,0°O (zie Figuur 1). De positie is zodanig gekozen dat voor Nederland relevante depressies zo goed mogelijk binnen het domein van HARMONIE passen.
- Het aantal gebruikte verticale niveaus van HARMONIE is 65. Deze niveaus hebben dicht bij het oppervlak een kleine onderlinge afstand die toeneemt met de hoogte. Het onderste modelniveau volgt het aardoppervlak; hogere rekenniveaus volgen drukvlakken.
- Elk uur wordt het HARMONIE model aan de randen gevoed met gegevens uit RACMO.
- Uurlijkse velden van de 10m-wind, stress, en druk op zeeniveau zijn gearchiveerd.
- De tijdsresolutie van de modelberekeningen is 10 minuten, de uitvoer is uurlijks. De uitvoer representeert de modeltoestand op het aangegeven moment.



Figuur 1: Domein van RACMO (222x216 roosterpunten, rood) en HARMONIE (800x800 roosterpunten, groen) zoals gebruikt in de huidige set-up.

2.1.7 SPEEDY

SPEEDY is een vereenvoudigd *Global Circulation Model* (GCM) ontwikkeld op het ICTP door Franco Molteni en Fred Kucharski. SPEEDY staat voor *Simplified Parameterizations, primitive-Equation DYNamics* en is gebaseerd op een spectrale dynamische kern ontwikkeld op het *Geophysical Fluid Dynamics Laboratory*. Het is een hydrostatisch, *s*-coördinaat, *spectral-transform* model in de vorticity-divergentie vorm, met semi-impliciete behandeling van zwaartekrachtsgolven. Meer informatie is te vinden in Molteni (2003); Kucharski et al. (2006). De horizontale resolutie van SPEEDY is 3.75° , de tijdstap is 40 minuten. Het laagste van de 8 verticale niveaus is op 925hPa. De 10m-wind wordt gepresenteerd als 95% van de wind op 925hPa.

Het voordeel van SPEEDY is de korte rekentijd waardoor er lange tijdreeksen gemaakt kunnen worden. We hebben met SPEEDY 12.816 runs van 1979-2009 gedaan, met perturbaties in de initialisatie. Het eerste jaar 1979 is gebruikt voor spin-up, zodat er 30 jaar overblijven, met een totale lengte van 384.480 jaar. Van elk jaar is de maximale windsnelheid per roosterpunt gearchiveerd.

Het doel van deze lange reeks is niet om een vergelijking te maken met waarnemingen, maar om afwijkend gedrag in de staart van de verdeling te kunnen onderzoeken.

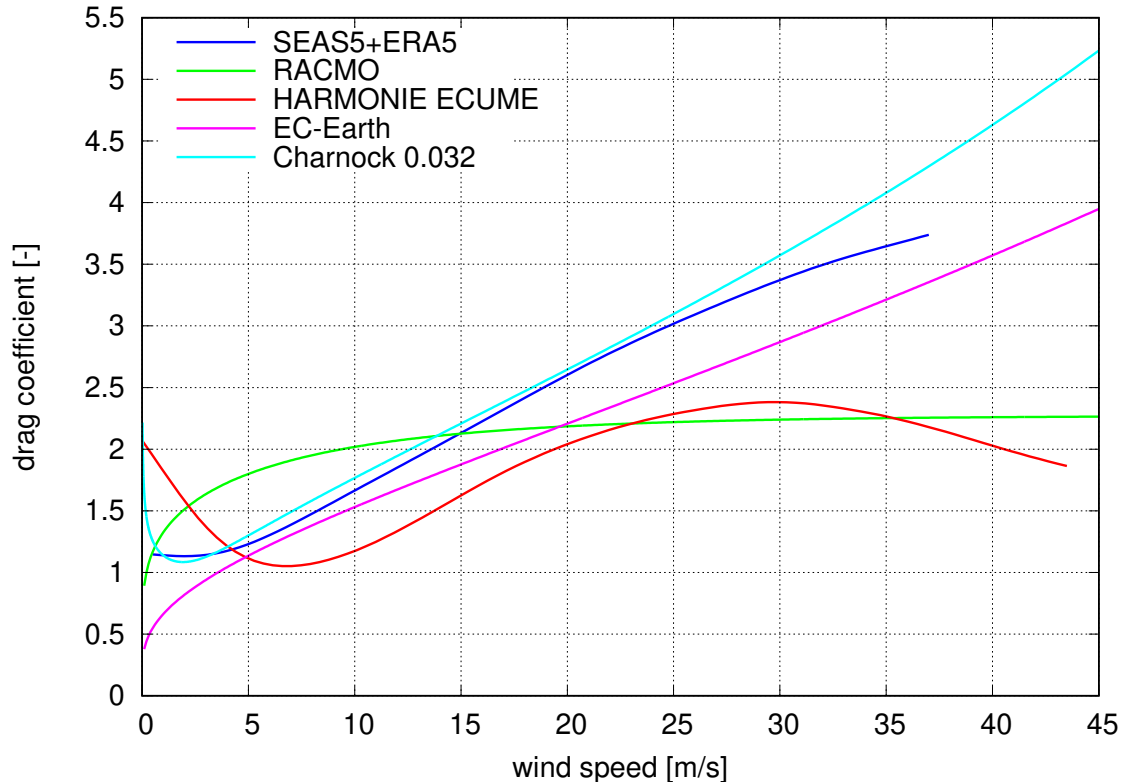
2.1.8 Overzicht meteorologische modellen

Tabel 3 geeft een kort overzicht van de belangrijkste verschillen tussen de meteorologische modellen die in het rapport aan bod komen.

Tabel 3: Overzicht van de karakteristieken van de verschillende gebruikte meteorologische modellen.

	aantal beschikbare jaren	horizontale resolutie	tijdsresolutie uitvoer	relevante parameters	opmerkingen
EC-Earth	2416	125km	3 uur	wind, stress, MSLP	input voor RACMO; 3D-randen beschikbaar; lage ruimtelijke resolutie
ECMWF System4	6282	80km	6 uur	wind, MSLP	opgevolgd door SEAS5; input voor WAQUA; geen 3D-randen beschikbaar; lage ruimtelijke resolutie
ECMWF SEAS5	7780	35km	6 uur	wind, stress, MSLP	opvolger van System4; input voor WAQUA; geen 3D-randen beschikbaar; hogere resolutie
ERA5	40	35km	1 uur	wind, stress, MSLP	opvolger van ERA-Interim; hogere resolutie; input voor HARMONIE
RACMO	2416	12km	3 uur	wind, stress, MSLP	gebruikt als schakel tussen EC-Earth en HARMONIE; input voor HARMONIE; hogere resolutie; input voor WAQUA
HARMONIE	-	2.5km	1 uur	wind, stress, MSLP	hoge resolutie; input voor WAQUA
SPEEDY	400K	375km	1 jaar	wind, MSLP	lage ruimtelijke resolutie; extreem lange tijdreeks

Figuur 2 geeft de (gemiddelde) drag coëfficiënten zoals deze gebruikt worden in SEAS5 en ERA5 (blauw), RACMO (groen), HARMONIE en EC-Earth (paars). Alleen HARMONIE laat een aftopping van C_d zien boven een windsnelheid van 30m/s, RACMO gaat naar een constante waarde van C_d , en de Charnock parameterisatie van EC-Earth ($\alpha=0.018$) blijft monotoon stijgen. Ook SEAS5 (en ERA5) vertoont een stijgend verloop. We merken op dat het SEAS5/ERA5 model voor elke tijdstap de effectieve ruwheid uitrekent als functie van windsnelheid, golfleeftijd, golfsteilheid etc. De getoonde lijn is de gemiddelde drag coëfficiënt.



Figuur 2: Gemiddelde drag coëfficiënten C_d zoals deze gebruikt worden in SEAS5 en ERA5 (blauw), RACMO (groen), HARMONIE (rood) en EC-Earth (paars). De drag die gebruikt is in System4 is niet bekend. De Charnock relatie met $\alpha = 0.032$ is aangegeven in lichtblauw.

2.2 Hydrologische modellen

Hieronder bespreken we kort de gebruikte hydrologische modellen.

2.2.1 WAQUA-DCSM5 model

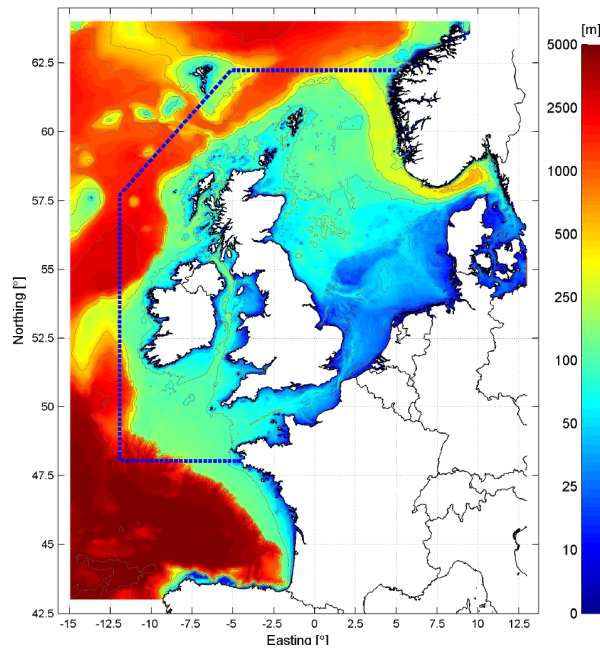
Om waterstanden in de Noordzee af te leiden van de meteorologische gegevens gebruiken we het *Dutch Continental Shelf Model* WAQUA-DCSM5 (Gerritsen et al., 1995). Dit model lost de 2-dimensionale ondiep-water vergelijkingen op op een $\frac{1}{8}^\circ \times \frac{1}{12}^\circ$ (ongeveer $8 \text{ km} \times 8 \text{ km}$) rooster. Het model wordt operationeel gebruikt door het KNMI om de waterstanden langs de Nederlandse kust te verwachten. De meteorologische invoer bestaat uit de druk op zeeniveau en de 10m-wind. De wind wordt vertaald naar stress via een Charnock relatie (Charnock, 1955) met een Charnock parameter die standaard ingesteld op 0.032.⁶

Het astronomisch getij wordt aan de randen voorgeschreven met behulp van 10 harmonische componenten ($O_1, K_1, N_2, M_2, S_2, K_2, Q_1, P_1, \nu_2$ en L_2) en propageert daarvandaan het model-domein in. De modeluitvoer bestaat uit de waterstand en de hoogte van het astronomisch getij in afwezigheid van meteorologische forcering. Het rekendomein van WAQUA-DCSM5 is weergegeven in Figuur 3.

⁶Deze relatief hoge waarde van de Charnock parameter komt deels voort uit tuning. De waarde is ook hoger dan het gemiddelde van het ECMWF model, waar de waarde gelijk is aan 0.0185, (Hersbach, 2010).

2.2.2 WAQUA-DCSM6 model

WAQUA-DCSM6 model is de opvolger van WAQUA-DCSM5, met een resolutie van $\frac{1}{40}^\circ \times \frac{1}{60}^\circ$ (ongeveer $1.6\text{ km} \times 1.6\text{ km}$). Dit is dus een factor 5 hoger dan de resolutie van WAQUA-DCSM5. Het model wordt operationeel gebruikt door RWS om de waterstanden langs de Nederlandse kust te verwachten. Het rekendomein van WAQUA-DCSM6 is weergegeven in Figuur 3.



Figuur 3: Rekendomeinen van WAQUA-DCSM5 (blauwe lijn) en WAQUA-DCSM6 (gekleurde domein).

2.2.3 Overzicht hydrologische modellen

Tabel 4 geeft een kort overzicht van de belangrijkste verschillen tussen de hydrologische modellen die in het rapport aan bod komen.

Tabel 4: Overzicht van de karakteristieken van de verschillende gebruikte hydrologische modellen.

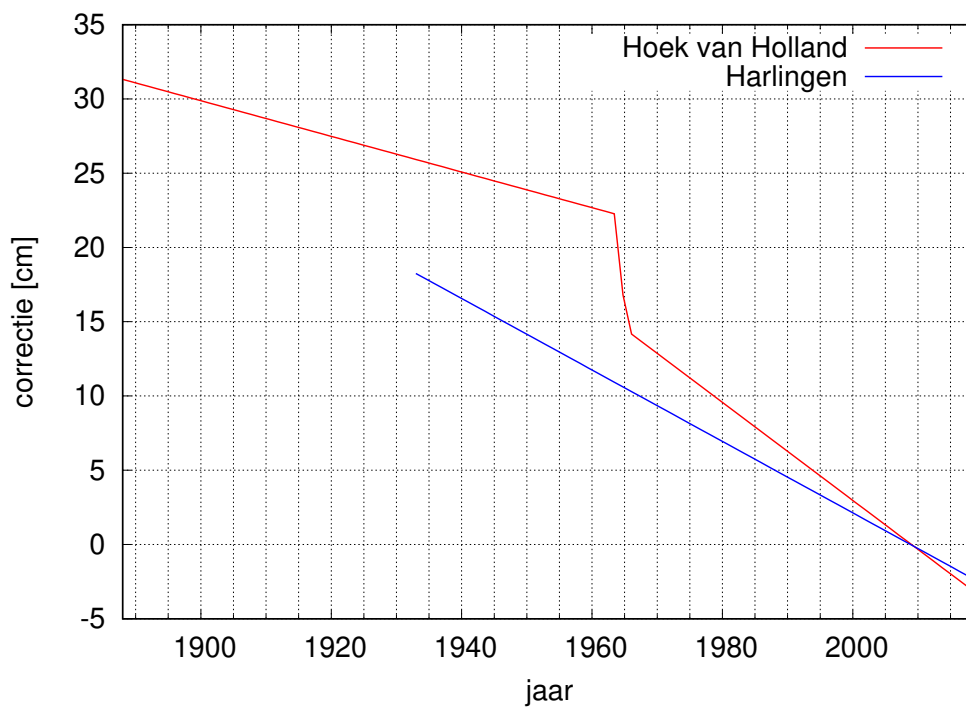
	horizontale resolutie	tijdsresolutie uitvoer	opmerkingen
DCSM5	8km	10min	+ goede resultaten; + operationeel; - redelijke representatie van getij; + redelijk snel
DCSM6	1.6km	10min	+ goede resultaten; + operationeel + goede representatie van getij - traag

2.3 Waarnemingen

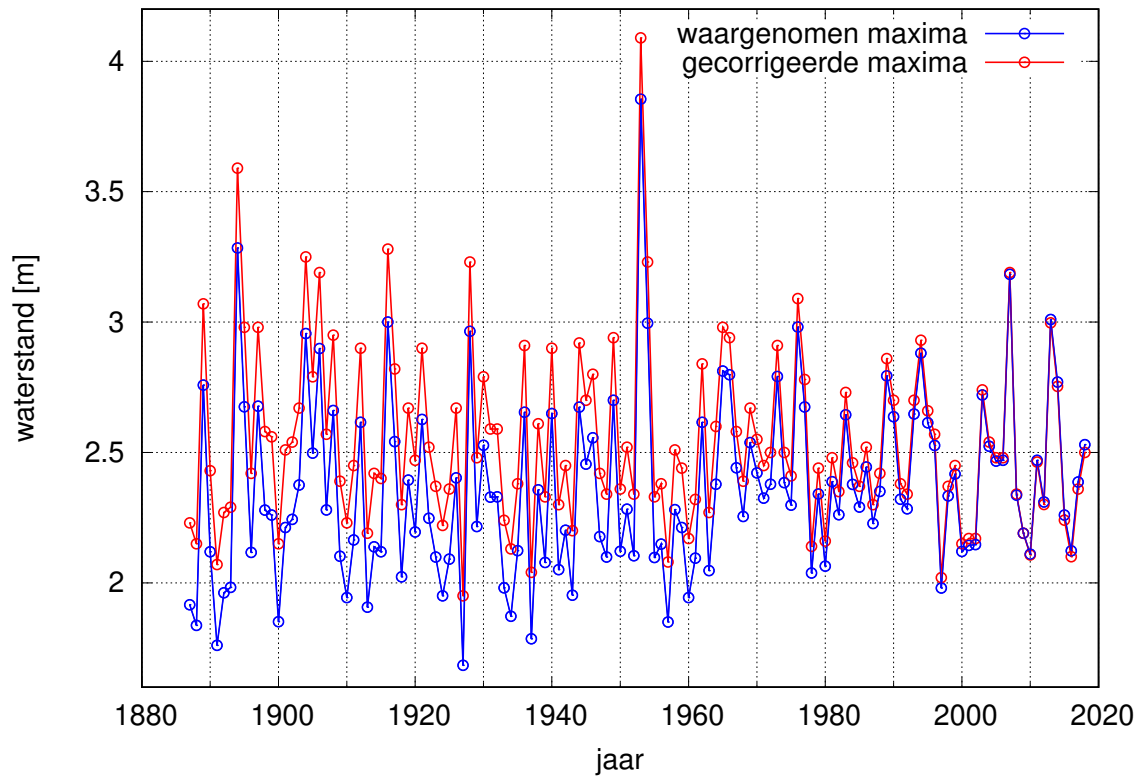
2.3.1 Waterstandsmetingen

De waarneemreeks van waterstanden in Hoek van Holland begint in 1864 (Holgate et al., 2013; PSMSL, 2017). Nauwkeurige waarnemingen zijn er vanaf Augustus 1887. We gebruiken de data vanaf 1888. De reeks van Harlingen begint in 1932, na de afsluiting van de Zuiderzee.

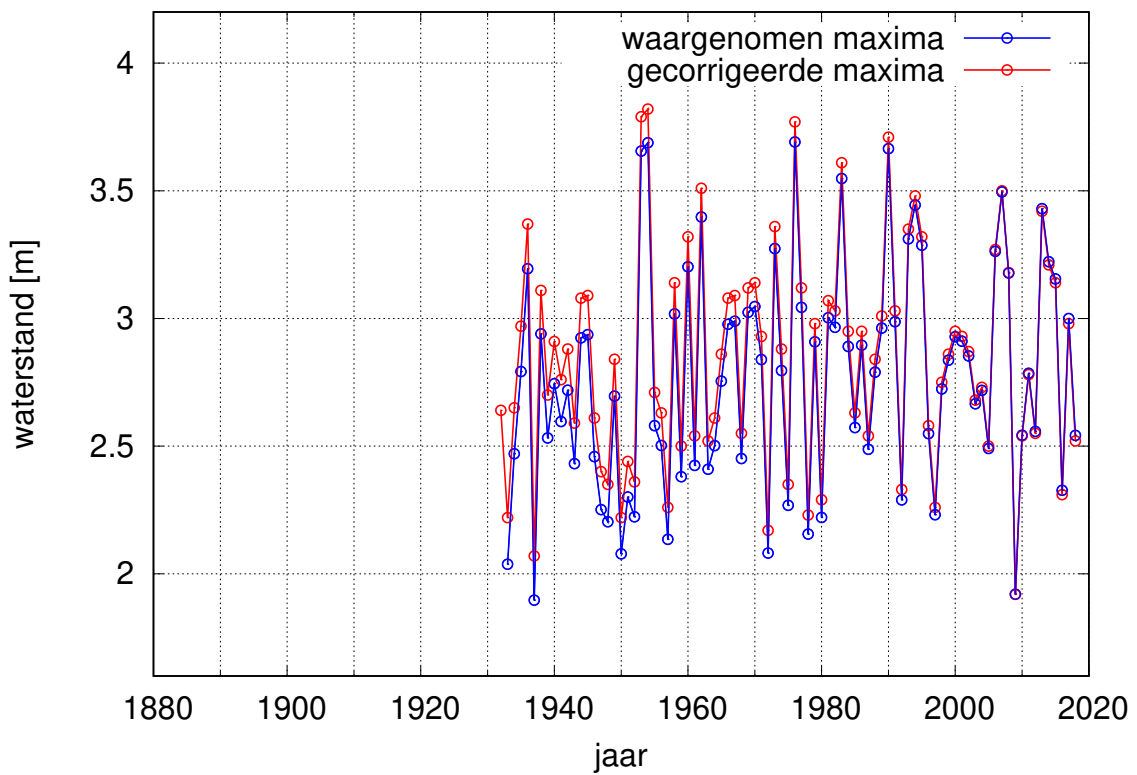
Vanwege zeespiegelstijging en landdaling dienen de reeksen gecorrigeerd te worden voor deze invloeden. Figuur 4 laat zien hoe de waarnemingen in Hoek van Holland en Harlingen aangepast zijn tussen 1880 en 2015 om representatief te zijn voor het jaar 2009. De correctie voor Hoek van Holland varieert tussen 31cm voor 1888 en -2cm voor 2015. Voor Harlingen varieert de correctie tussen 18cm en -2cm. De snelle verandering rond 1965 en de verandering in de helling in de correctie voor Hoek van Holland kan toegeschreven worden aan de uitbreiding van de Rotterdamse haven in westelijke richting (Dillingh et al., 1993; Hollebrandse, 2005; Becker et al., 2009). De (gecorrigeerde en ongecorrigeerde) jaarmaxima van de waterstand in Hoek van Holland en Harlingen zijn weergegeven in Figuur 5. Te zien is dat de correctie een aanzienlijke invloed heeft op de extremen. De vraag is of de correctie - die toegepast wordt op alle data - gelijk is voor zowel de gemiddelden als voor de extremen. Ook de (scheve) opzet vertoont een gelijksoortige trend (niet getoond). Onderzoek hiernaar gaat echter buiten de kaders van dit rapport.



Figuur 4: Aanpassing van de waargenomen waterstanden in Hoek van Holland (rood) en Harlingen (blauw) om te corrigeren voor zeespiegelstijging en landdaling. De waarnemreeks is aangepast om representatief te zijn voor de situatie in 2009.



(a) Hoek van Holland



(b) Harlingen

Figuur 5: Jaarmaxima van de waargenomen waterstanden in Hoek van Holland (a) en Harlingen (b). Correctie volgens de lijnen in Figuur 4 leidt tot de rode lijn.

3 Methodologie

In dit hoofdstuk bespreken we hoe we het effect van de beperkingen van de ECMWF seizoensverwachtingen en DCSM5 kunnen kwantificeren. Want uiteindelijk willen we weten in hoeverre de extreme waterstanden die berekend zijn met DCSM5 op basis van de ECMWF seizoensverwachtingen beïnvloed zijn door de beperkingen in de modellen-trein, en hier een correctie voor afleiden.

We onderscheiden de volgende invloeden:

- Effect van de ruimtelijke resolutie van het atmosferisch model op de extreme waterstand.
- Effect van de temporele resolutie van het atmosferisch model op de extreme waterstand.
- Effect van de keuze van het hydrologisch model op de extreme waterstand.

Als deze effecten systematisch en kwantificeerbaar zijn, kunnen de resultaten gebruikt worden om de bestaande ECMWF+DCSM5 reeksen te corrigeren en zo tot betere schattingen van hoge waterstanden te komen. Hiertoe doen we de volgende veronderstellingen:

- *De manier waarop SEAS5 reageert op resolutie-effecten is gelijk aan die waarop HARMONIE reageert.*

Hiermee veronderstellen we ondermeer dat het niet-hydrostatische karakter van HARMONIE geen significant effect heeft op de berekende extreme zeewaterstanden.

- *Het effect van de resolutie van het model is goed te schatten door de hoge-resolutie-versie te sub-samplen naar de lage-resolutie-versie.*

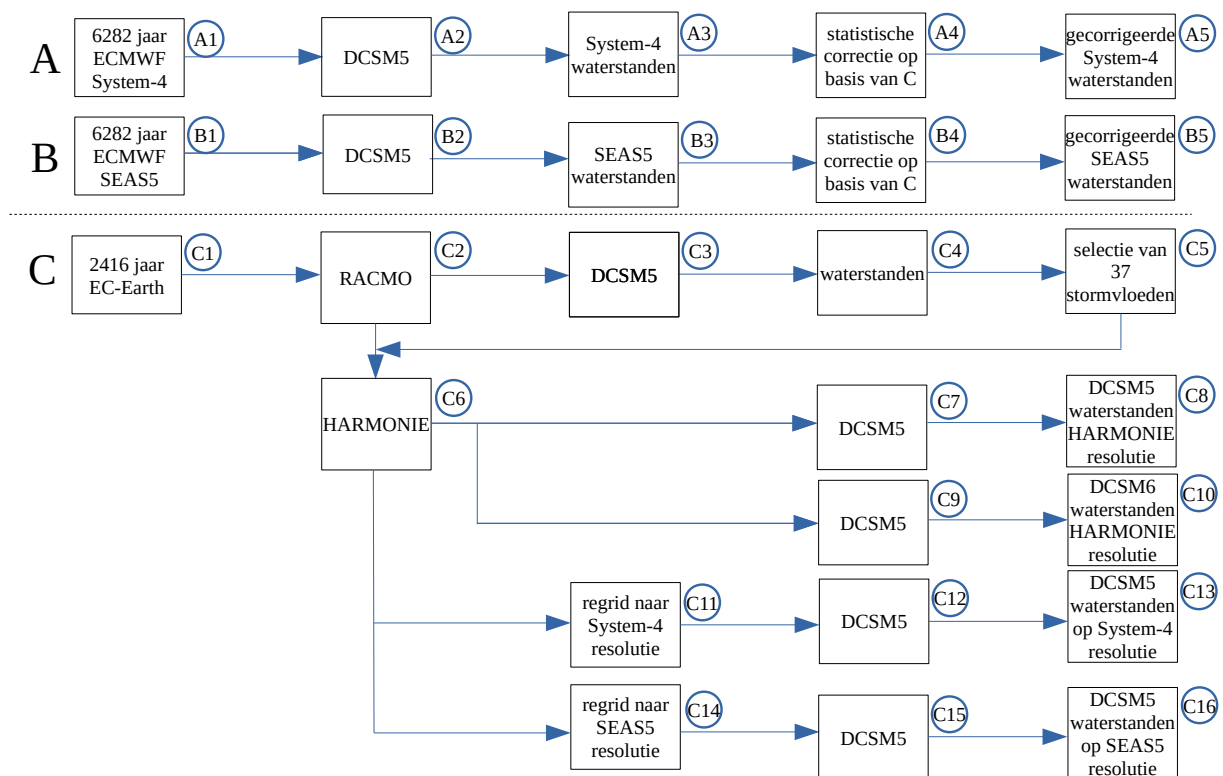
Hiermee veronderstellen we ondermeer dat fenomenen die opgelost kunnen worden door de hogere resolutie (zoals zeewind, convectie) geen systematische bijdrage leveren aan verhoging of verlaging van de extreme waterstanden.

Onder deze twee aannamen kan door HARMONIE te sub-samplen een idee gekregen worden hoe sterk de resolutie van SEAS5 doorwerkt in de extreme waterstanden.

Figuur 6 toont het stroomschema van de meteorologische en hydrologische berekeningen die (mogelijk) nodig zijn om tot een goede transformatie van de grove EC-Earth resultaten te komen. We lichten dit stroomschema hieronder toe:

- We onderscheiden twee modellentreinen: die uitgaan van de System4 seizoensverwachtingen (A) en die gebaseerd zijn op de SEAS5 seizoensverwachtingen (B). In beide modellentreinen wordt DCSM5 gebruikt om waterstanden af te leiden, en wordt er een statistische aanpassing gedaan om te corrigeren voor de beperkte temporele en spatiële resolutie.
- Voor het bepalen van deze statistische correctie kan - vanwege het ontbreken van de 3D-randvoorwaarden - niet gebruik gemaakt worden van de seizoensverwachtingen zelf. Daarom begint modellentrein C (die alleen dient om de statistische correcties af te leiden) met het EC-Earth model, waarvoor de 3D-randvoorwaarden wel aanwezig zijn. Hoewel de dataset van EC-Earth een factor 2 á 3 kleiner is dan resp. System4 en SEAS5, nemen we aan dat de schaling die afgeleid wordt op basis van de meest extreme stormen in de EC-Earth dataset ook toepasbaar is op de meest extreme stormen in de System4 en SEAS5 dataset⁷.

⁷We nemen dus aan dat de grovere resolutie van EC-Earth niet tot een ander type stormen leidt. Rechtstreekse effecten van resolutie en verschil in parametrisatie tussen System4/SEAS versus EC-Earth zijn hier niet belangrijk omdat de downscaling met RACMO en HARMONIE zorgt voor uniformiteit in resolutie en parametrisatie.



Figuur 6: Stroomschema van de meteorologische en hydrologische berekeningen die (mogelijk) nodig zijn om tot een goede transformatie van de System4 en SEAS5 resultaten te komen. Informatie over de meteorologische en hydrologische modellen is te vinden in resp. Tabel 3 en 4.

- De tweede stap in modellentrein C bestaat uit het downscalen van de gehele 2416-jarige EC-Earth dataset met het regionale klimaatmodel RACMO (C2).
- Vervolgens zijn alle 2416 jaar van RACMO gebruikt om DCSM5 aan te drijven (C3), waardoor een 2416-jarige dataset van waterstanden beschikbaar is (C4).
- De 20 hoogste stormvloed en de 21 (niet-overeenkomende) in Hoek van Holland zijn geselecteerd (C5). Er is gekozen voor deze twee stations om zowel de Hollandse kust als het Waddengebied te representeren.
- Deze bijbehorende stormen zijn - vanuit RACMO - gedownscaled met HARMONIE naar een resolutie van 2.5 km (C6). De lijst van deze stormen is weergegeven in Tabel 5.
- De HARMONIE velden zijn zowel met DCSM5 (C7) als met DCSM6 (C9) doorgerekend.
- Daarnaast zijn de HARMONIE velden via sub-sampling teruggebracht naar de (temporele en/of spatiale) resolutie van zowel System4 (C11) als SEAS5 (C14), en deze lage-resolutie velden zijn opnieuw doorgerekend met DCSM5 (C12/C15)⁸.
- Uit de verschillen van de maximale waterstanden tussen de DCSM5 (C8) en DCSM6 (C10) kan een (plaatsafhankelijke) correctie afgeleid worden die aangeeft wat de invloed is van het gebruik van DCSM5 in plaats van DCSM6 in de modellentrein van A en B.
- Uit de verschillen van de maximale DCSM5 waterstanden bepaald vanuit de ge-regridded en ge-resampled HARMONIE velden enerzijds (C13/C16) en de oorspronkelijke HARMONIE velden (C10) anderzijds kan een (plaatsafhankelijke) correctie afgeleid worden die aangeeft wat de invloed van de beperkte resolutie van System4 en SEAS5 is.
- Analyse van de verschillen in zowel het hydrologisch deel als in het meteorologische deel leidt tot statistische correcties in modellentreinen A en B, waarmee een waterstandsreeks gegenereerd wordt die geacht wordt gelijke klimatologische resultaten op te leveren als een volledige downscaling van de seizoensverwachtingen met HARMONIE en doorrekening met DCSMv6.
- Merk op dat we in dit stroomschema geen gebruik maken van de waarnemingen om de modellentrein A en/of B te corrigeren. We hebben er voor gekozen om de operationele modellentrein⁹ te gebruiken om de correcties te bepalen. Dit impliceert de veronderstelling dat operationele modellentrein geen systematische afwijkingen bevat - iets wat uiteraard niet vanzelfsprekend is.
- Om de overeenkomst tussen de modellentrein en de waarnemingen te onderzoeken, hebben we ook stress uit de ERA5 data gebruikt om met DCSM5 de waterstanden te berekenen. Vergelijking met de waarnemingen geeft een indicatie in hoeverre de modellen in staat zijn om de statistiek van de waargenomen extremen te reproduceren.

3.1 Gedownscalede stormen

De naam van storm is opgebouwd uit 3 delen: eerst een nummering, dan het member van de EC-Earth dataset (01-16), en dan de startdatum van de downscaling in YYYYMMDD. Elke downscaling heeft een duur van 11 dagen.

Voor dit rapport beperken we ons de stormen die tot de hoogste waterstanden in Hoek van Holland en Harlingen hebben geleid. Hiervoor hebben we momenteel 37 stormen beschikbaar: 004-043 minus 011, 013 en 016 (die om technische redenen niet beschikbaar zijn).

⁸De ruimtelijke regridding is gedaan door middel *first order conservative remapping*.

⁹dat wil zeggen: van ECMWF model via HARMONIE naar DCSM6

Naam storm	Harlingen		Hoek van Holland	
	rangorde	waterstand	rangorde	waterstand
001_M13_20260115			1	3.64
002_M12_20720201				
003_M06_19530312				
004_M13_20641103	1	4.31	6	3.37
005_M10_20261107	2	4.27		
006_M07_19690114	3	4.09		
007_M12_20311226	4	4.08		
008_M12_20011125	5	4.08		
009_M02_20980208	6	4.04	13	3.31
010_M08_20660121	7	4.01		
011_M09_20011125	8	3.99		
012_M09_20201227	9	3.97		
013_M07_20130304	10	3.91		
014_M01_19640123	11	3.88		
015_M03_19980202	12	3.87		
016_M13_19571118	13	3.87		
017_M11_19810118	14	3.85	19	3.27
018_M07_19941029	15	3.85		
019_M05_20230201	16	3.84		
020_M12_20370129	17	3.83		
021_M16_20850121	19	3.83		
022_M14_20191006	19	3.81		
023_M10_20671103	20	3.81		
024_M16_19580131			2	3.52
025_M08_20670917			3	3.51
026_M04_19561029			4	3.48
027_M08_20990908			5	3.41
028_M05_20031223			7	3.37
029_M07_20961230			8	3.34
030_M11_19510103			9	3.34
031_M14_19631225			10	3.32
032_M04_19500228			11	3.32
033_M03_19701222			12	3.32
034_M04_20170211			14	3.31
035_M08_19790108			15	3.30
036_M06_19731123			16	3.29
037_M10_21001110			17	3.29
038_M14_20190115			18	3.28
039_M16_20851213			20	3.27
040_M14_20421203			21	3.26
041_M16_19871118			22	3.23
042_M07_20211203			23	3.21
043_M15_20130220			24	3.20

Tabel 5: Beschrijving van de geselecteerde stormen voor de downscaling. De genoemde waterstanden en windsnelheden zijn afkomstig uit de oorspronkelijke RACMO berekeningen. De naam van het storm is opgebouwd uit 3 delen: eerst een nummering, dan het member van de EC-Earth dataset (01-16), en dan de startdatum van de downscaling in YYYYMMDD.

4 Validatie en verificatie

Het stroomschema van Figuur 6 toont dat de correcties gebaseerd zijn op de operationele modellentrein¹⁰, en niet op waarnemingen. Dat maakt het extra belangrijk dat de meteorologische invoer vanuit System4 en SEAS5 vergeleken wordt met waarnemingen.

In dit hoofdstuk onderzoeken we hoe goed de extreme wind en MSLP uit System4 en SEAS5 in klimatologische zin overeenkomen met de waarnemingen.

4.1 Wind en pseudowind

Figuur 7 laat de Gumbelverdelingen zien van de jaarmaxima van de waargenomen wind voor Hoek van Holland (zwart), en voor roosterpunt (52°N,3.5°O) voor zowel System4 (rood) als SEAS5 (blauw). Dit roosterpunt is het zeepunt dat het dichtst bij Hoek van Holland ligt. Voor SEAS5 is vanuit de stress de pseudowind berekend onder de aanname dat de drag geparameteriseerd zou zijn volgens ECUME (lange streep) of volgens Charnock, $\alpha=0.032$ (korte streep). In formulevorm:

$$U_p = \sqrt{\frac{\tau}{\rho C_d}} \quad (2)$$

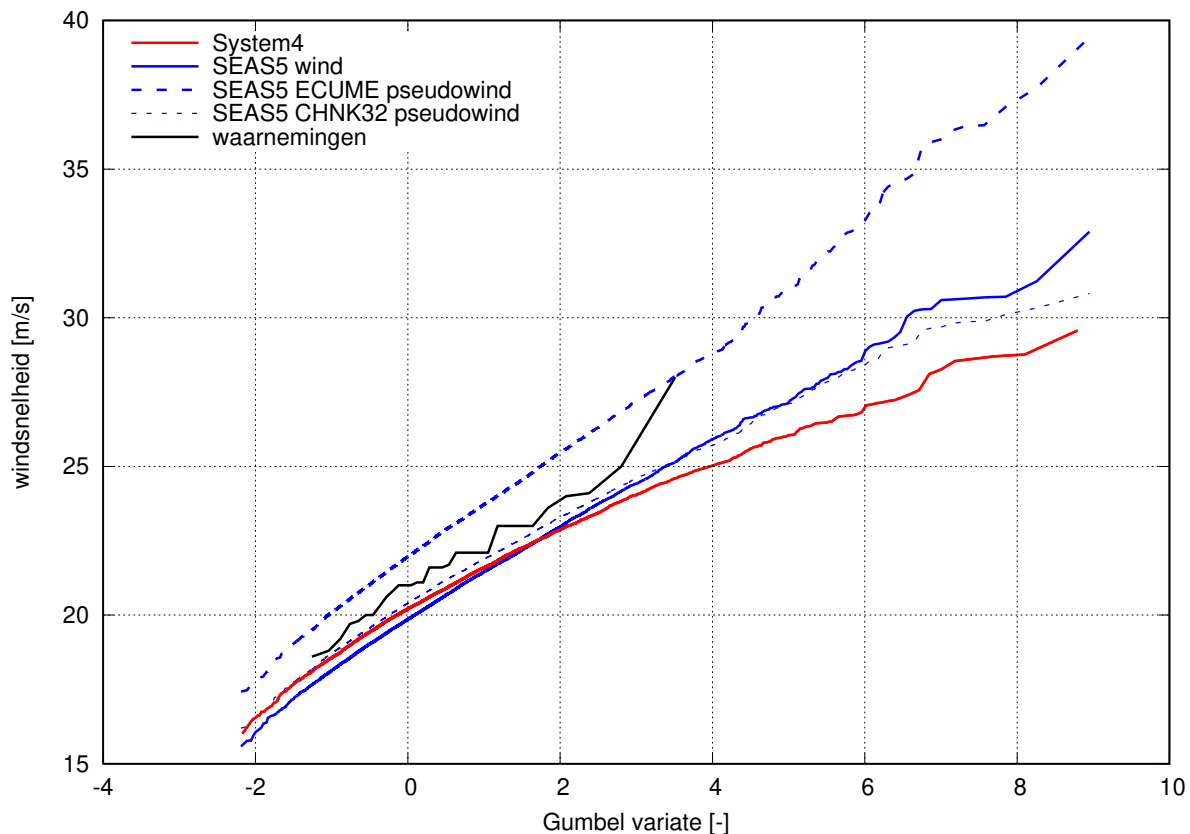
waarin U_p de pseudowind is, τ de stress uit SEAS5, en C_d de drag-coëfficiënt die voor ECUME en Charnock zijn gebruikt (zie ook Figuur 2).

We concluderen het volgende uit Figuur 7:

- De Gumbel verdelingen van System4 en SEAS5 kruisen elkaar. De meest extreme wind in SEAS5 is voor dit roosterpunt hoger dan System4. Dit hangt mogelijk samen met de lagere resolutie van System4.
- Ook blijkt dat de wind sterk afhankelijk is van de parameterisatie van de drag: de aanname van een Charnock parameterisatie met $\alpha=0.032$ levert ongeveer de oorspronkelijke wind op, terwijl de ECUME parameterisatie (die in HARMONIE wordt gebruikt) aanzienlijk hogere pseudowinden oplevert.
- De waargenomen wind ligt tussen de oorspronkelijke wind en de ECUME-pseudowind in, met een onderling verschil van 10-20%.

Er is op grond van deze gegevens geen eenduidige conclusie te trekken of de stress uit SEAS5 te hoog of te laag is. Wel kan gesteld worden dat informatie over de drag-parameterisatie cruciaal is om de waterstands-modellen aan te drijven als de wind gebruikt wordt als invoer (zie bijvoorbeeld van Nieuwkoop et al., 2015). Hiermee valt gebruik van System4 af, omdat hiervoor de informatie over C_d ontbreekt.

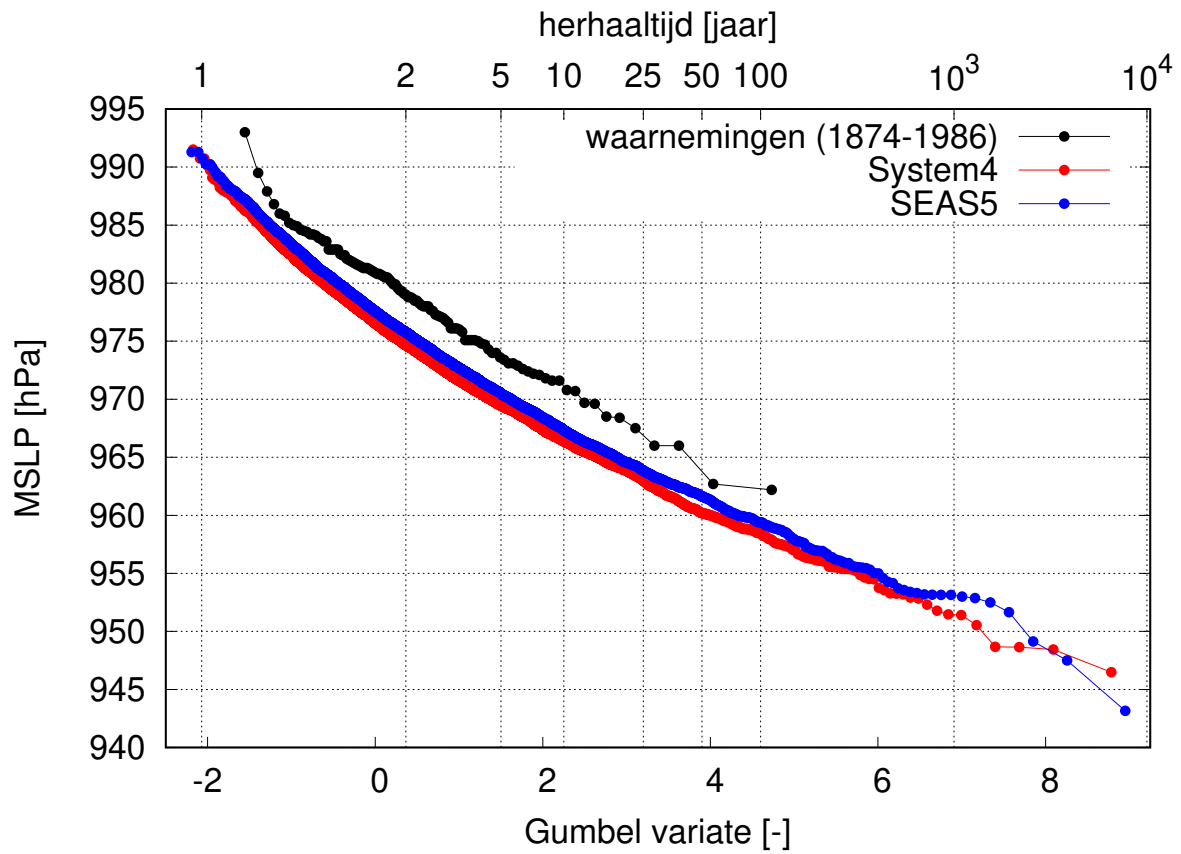
¹⁰dat wil zeggen: van ECMWF model via HARMONIE naar DCSM6.



Figuur 7: Gumbelplots van de wind jaarmaxima voor Sytem4 (rood) en SEAS5 (blauw). Voor SEAS5 is de stress omgerekend naar wind bij aanname van de ECUME relatie voor de drag (lange streep) en voor een Charnock relatie met $\alpha=0.032$ (korte streep). De waarnemingen in Hoek van Holland zijn aangegeven in zwart.

4.2 MSLP

Figuur 8 toont de jaarlijkse minimale druk in het roosterpunt ($55.45^{\circ}\text{N}, 8.4^{\circ}\text{O}$), bij de Deense plaats Nordby. Dit punt is gekozen omdat bij een minimale druk over Denemarken de fetch over de Noordzee optimaal is voor extreme opzetten aan de Nederlandse kust. Te zien is dat de verdeling van SEAS5 overeenkomt met die van System4. Dit betekent dat het verschil in horizontale resolutie niet doorwerkt in de diepte van de meeste extreme depressies. De minimale druk van SEAS5 en System4 is ongeveer 4hPa lager dan in de waarnemingen. Wat wel overeenkomt is de helling van de lijnen, wat aangeeft dat zowel System4 als SEAS5 goed in staat zijn om diepe depressies te genereren, met dezelfde frequentie/intensiteit-relatie als de waarnemingen laten zien.



Figuur 8: Gumbelplot van de waargenomen MSLP jaarminima voor Nordby (DK, 8.4° E, 55.45° N; zwart). De jaarminima voor het dichtstbijzijnde roosterpunt voor System4 zijn getoond in rood en voor SEAS5 in blauw.

We concluderen dat de System4 en SEAS5 evengoed in staat zijn om diepe depressies boven Denemarken te genereren.

5 Resultaten

Op moment van schrijven zijn nog niet alle data doorgerekend met DCSM5. Het aantal jaren die zijn doorgerekend zijn weergegeven in Tabel 6.

Tabel 6: Aantal doorgerekende jaren met het DCSM5 model voor de verschillende meteorologische modellen.

meteorologisch model	aantal beschikbare jaren	DCSM5	
		berekende jaren	percentage
System4 - wind	6482	6482	100%
SEAS5 - wind	7780	4405	57%
SEAS5 - stress	7780	6308	81%
EC-Earth	2416	-	-
RACMO	2416	2416	100%

In hoofdstuk 4 is geconcludeerd dat de stress uit SEAS5 beter geschikt is voor het aandrijven van de hydrologische modellen dan de wind uit System4, omdat hier informatie over de drag-parameterisatie ontbreekt. We gebruiken daarom de stress uit SEAS5 om DCSM5 aan te drijven. In dit hoofdstuk bespreken we de resultaten.

5.1 Scheve opzet versus waterstand

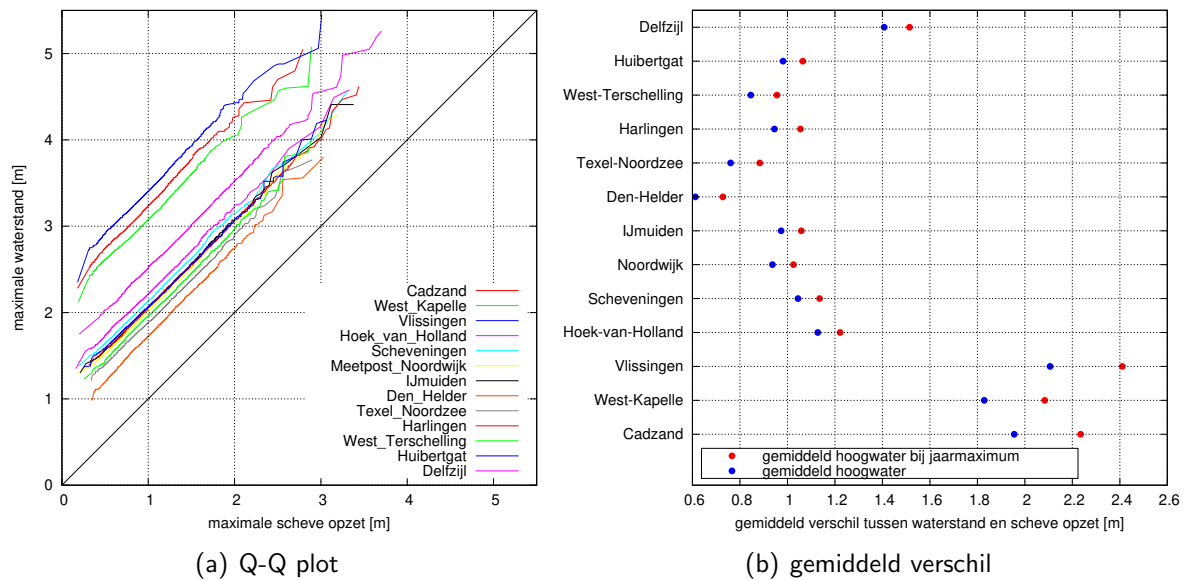
Het is bekend dat het astronomisch getij dat DCSM5 berekent niet altijd correct is. In de operationele praktijk wordt daarom het astronomische getij dat DCSM5 berekent vervangen door het getij dat bepaald is op basis van harmonische analyse van de waarnemingen. Omdat de harmonische analyse niet voor alle stations over de gehele periode beschikbaar is, concentreren we ons in de resultaten in eerste instantie op de scheve opzet. Dit is het verschil tussen de maximale waterstand en het dichtstbijgelegen astronomisch hoogwater (zie Van den Brink, 2018, voor verdere toelichting). Een ander voordeel van de analyse van scheve opzetten is dat hiermee het meteorologisch aspect geïsoleerd kan worden van het astronomisch aspect. Dat is van belang omdat het astronomisch getij een deterministische grootte is, en de meteorologische component stochastisch, wat een andere statistische benadering vraagt.

Uiteraard gaat het uiteindelijk om de waterstand. Daarom onderzoeken we eerst welk verband er is tussen de verdeling van de extreme waterstand en die van de scheve opzet. Figuur 9(a) toont het verband tussen de geordende jaarmaxima van de waterstand versus de jaarmaxima van de scheve opzet. Te zien is dat alle stations over praktisch het hele bereik een lineair verband laten zien, wat betekent dat de extreme waterstand een vaste waarde hoger is dan de extreme scheve opzet. De grootte van deze offset is weergegeven per station in Figuur 9(b). De gemiddelde hoogwaters en de hoogwaters bij maximale waterstanden zijn in blauw resp. rood weergegeven.

We concluderen hieruit dat de extreme-waarde-verdeling van de waterstand een (stationsafhankelijke maar) vaste waarde verschilt van de verdeling van de scheve opzet. De meest extreme waterstanden worden - statistisch gezien - dus niet mede bepaald door extreem hoge astronomische hoogwaters, maar alleen door het meteorologisch effect gecombineerd met een hoogwater dat (afhankelijk van de locatie) 8% tot 18% hoger is dan een gemiddeld hoogwater.

Het bovenstaande betekent dat we de opzet vanuit WAQUA kunnen analyseren zonder dat we noodzakelijkerwijs het astronomisch getij mee moeten nemen op iets over de extreme

waterstanden te kunnen zeggen.



Figuur 9: Q-Q plots van de jaarmaxima van waterstand versus scheve opzet voor een aantal stations langs de Nederlandse kust (a). Het gemiddelde hoogwater bij de maximale waterstand in (b) weergegeven in rood. Het gemiddelde hoogwater is weergegeven in rood.

5.2 Scheve opzetten van DCSM5

Figuur 10 toont de scheve opzetten voor 6 kuststations (Vlissingen, Hoek van Holland, IJmuiden, Den Helder, Harlingen en Delfzijl) zoals berekend door DCSM5 op basis van SEAS5 (blauw), ERA5 (groen)¹¹ en de waarnemingen (zwart). Van zowel SEAS5 als ERA5 is de stress gebruikt om DCSM5 aan te drijven. De onderbroken zwarte lijn geeft de jaarextremen voor 1979-2018, de periode waarvoor ERA5 beschikbaar is. De grijze arcering geeft de 95%-onzekerheid in de verdeling van de waarnemingen aan onder aanname van een GEV verdeling.

We constateren dat de meest extreme waargenomen waterstanden door alle modellen en voor alle stations onderschat wordt. Dit kan betekenen dat de stress uit de meteorologische modellen te laag is of dat DCSM5 de waterstanden onderschat (of beide). Daar komt bij dat de beperkte resolutie in tijd en ruimte van de modellen een onderschatting aannemelijk maakt. Hier wordt in paragraaf 5.4 op ingegaan. De invloed van DCSM5 wordt in paragraaf 5.3 geschat.

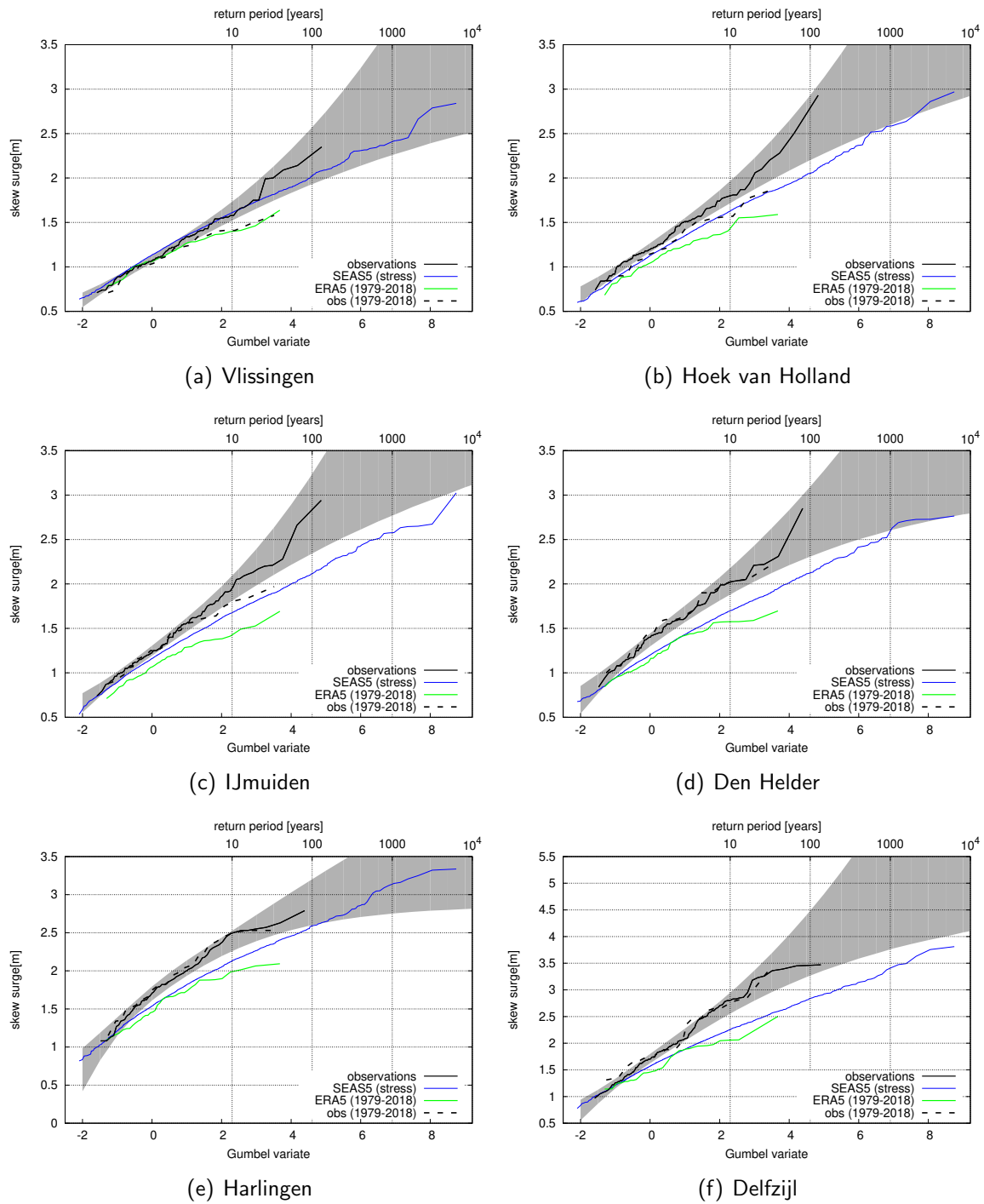
Opmerkelijk is dat de extreme-waarden-verdeling van de waarneemreeks gevoelig is voor de periode. Zo zijn de extremen over 1979-2018 voor Vlissingen, Hoek van Holland en IJmuiden duidelijk lager dan die van de totale periode. Onduidelijk is of dit mogelijk te maken heeft met de toegepaste correcties, of dat de trend reëel is en een geografisch component heeft (wel in het zuidelijk deel, niet in de Wadden¹²).

Ook opmerkelijk is dat de ERA5/DCSM5 verdeling voor alle stations lager ligt dan de SEAS/DCSM5 verdeling. Dit kan betekenen dat de 1979-2018 periode lagere opzetten genereerde dan de langjarige klimatologie die door SEAS5 gerepresenteerd wordt, maar het ook

¹¹Een uitgebreidere analyse van de ERA5/DCSM5 opzetten is te vinden in Appendix B.

¹²zie ook Hoofdstuk 6.2, waar we laten zien dat de extreme waterstanden in het Waddengebied door een ander type stormen wordt veroorzaakt dan in het zuidelijk deel.

betekenen dat de klimatologie van ERA5 anders is dan die van SEAS5.



Figuur 10: Gumbelplots van de scheve opzetten in Hoek van Holland (a) en Harlingen (b) gebaseerd op DCSM5 voor SEAS5 (blauw) en ERA5 (groen). De waarnemingen zijn getoond in zwart.

Tabel 7 toont de eens-per-jaar scheve opzet (i.e., de locatie parameter van de GEV verdeling) voor de 6 kuststations gebaseerd op de waarnemingen. In kolommen 2-4 zijn de verhoudingen voor respectievelijk System4, SEAS5 en ERA5 getoond ten opzichte van de waarnemingen. Zie Appendix B voor de afleiding van de verhoudingen voor de ERA5/DCSM5

combinatie.

Met uitzondering van Vlissingen tonen alle stations een onderschatting van 10-20%. De resultaten van SEAS5 zijn vergelijkbaar (of zelfs iets beter) dan ERA5. Hoewel System4 betere resultaten geeft, zijn deze niet bruikbaar omdat hier de wind is gebruikt in combinatie met een Charnock ($\alpha=0.032$), wat niet de werkelijke stress in System4 representeert.

Tabel 7: Eens-per-jaar scheve opzetten voor 6 kuststations op basis van de waarnemingen (kolom 1), en de verhouding van de eens-per-jaar opzetten van System4, SEAS5, en ERA5, allen op basis van DCSM5 (kolommen 2-4). Voor System4 en SEAS5 zijn de eens-per-jaar waarden bepaald op basis van de totale observatiereeks, voor ERA5 is de verhouding gebaseerd op de observaties uit 1979-2018.

	eens-per-jaar opzet[m] (waarnemingen)	verhouding System4 tov waarnemingen	verhouding SEAS5 tov waarnemingen	verhouding ERA5 tov waarnemingen
kolomnummer	1	2	3	4
Vlissingen	1.09	0.98	1.03	1.00
Hoek van Holland	1.22	0.96	0.88	0.90
IJmuiden	1.25	0.97	0.87	0.83
Den Helder	1.36	0.95	0.82	0.81
Harlingen	1.66	1.09	0.88	0.85
Delfzijl	1.70	0.93	0.84	0.80
gemiddeld		0.98	0.89	0.87

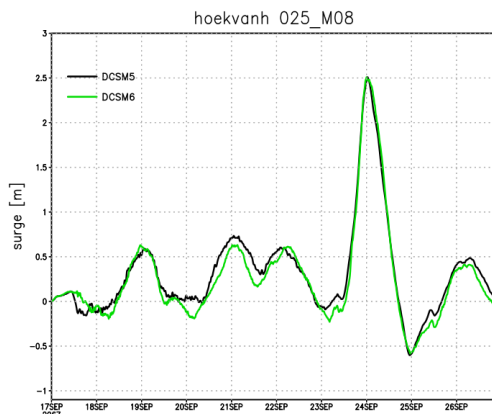
5.3 Effecten van DCSM versies op extreme waterstanden

Om de geconstateerde onderschatting in de scheve opzetten uit de SEAS5/DCSM5 combinatie (Tabel 7) te duiden, maken we gebruik van de extreme stormen uit de EC-Earth dataset, waarbij DCSM5/6 aangedreven worden door de HARMONIE uitvoer.

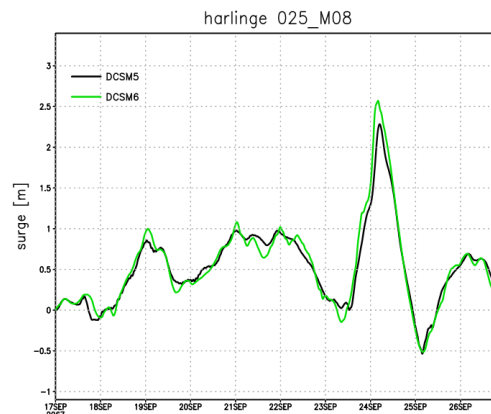
5.3.1 Effecten per locatie

Zoals weergegeven in het stroomschema van Figuur 6 zijn 37 stormen gedownscaled met HARMONIE en vervolgens doorgerekend met zowel DCSM5 als DCSM6 (zonder astronomisch getij)¹³. We vergelijken hier dus (C8) uit Figuur 6 met (C10). Figuur 11 laat als voorbeeld de tijdreeksen zien van storm 025 (zie Tabel 5) voor Hoek van Holland en Harlingen. De verschillen tussen de berekening van DCSM5 en DCSM6 zijn klein voor Hoek van Holland. Bij Harlingen zijn de verschillen iets groter, wat verklaard kan worden door de bathymetrie van het Waddengebied dat beter door DCSM6 meegenomen wordt.

¹³de DCSM6 berekeningen zijn uitgevoerd door Deltares.



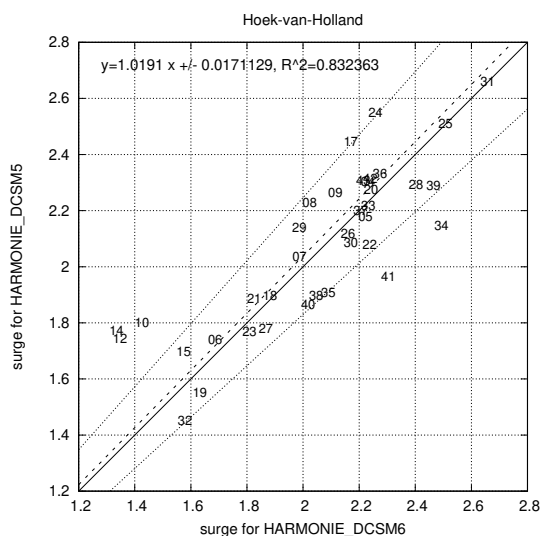
(a) Hoek van Holland



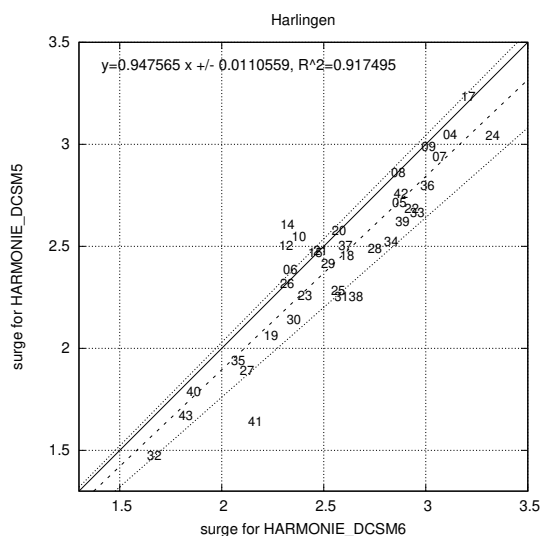
(b) Harlingen

Figuur 11: Tijdreeksen van de opzet rond de piek van storm 025 voor Hoek van Holland (a) en Harlingen (b) zoals berekend door DCSM5 (zwart) en DCSM6 (groen).

In Figuur 12 is de maximale waterstand per storm, berekend met de beide WAQUA versies, weergegeven, opnieuw voor Hoek van Holland en Harlingen. Figuur 12 laat zien dat DCSM5 gemiddeld 2% hogere waterstanden dan DCSM6 in Hoek van Holland geeft, en 5% lagere waterstanden in Harlingen.



(a) Hoek van Holland



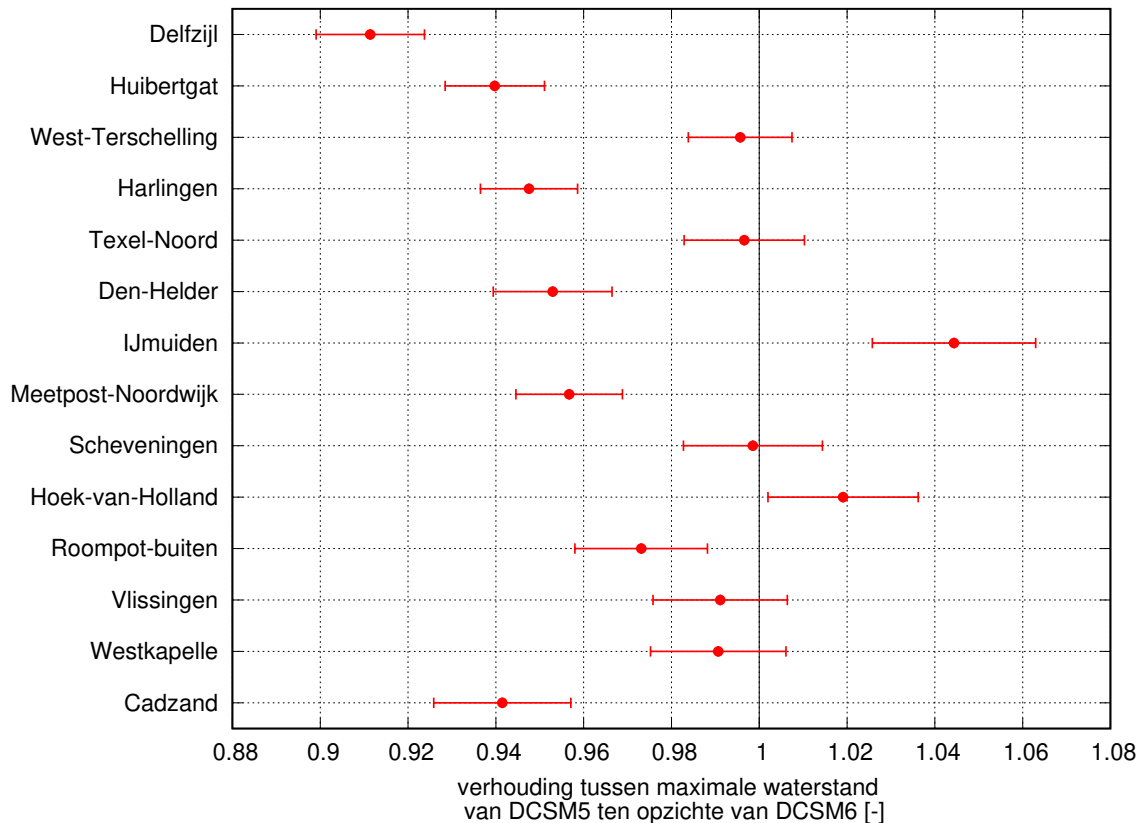
(b) Harlingen

Figuur 12: Scatterplots van de maximale opzet in Hoek van Holland (a) en Harlingen (b) voor de 37 stormen. Het cijfer geeft de rangorde aan van Tabel 5. De diagonaal is aangegeven met de doorgetrokken lijn, de lineaire fit met de onderbroken lijn en de standaard deviatie met de gestippelde lijnen. Boven in de figuur zijn de waarden van de lineaire fit, de standaard deviatie en de correlatie weergegeven.

Deze gemiddelde verhouding tussen DCSM5 en DCSM6 is voor een aantal stations langs de Nederlandse kust weergegeven in Figuur 13. De errorbar geeft de standaard deviatie in de geschatte verhouding weer. De hogere waterstanden in Hoek van Holland en IJmuiden uit

DCSM5 zijn opmerkelijk, omdat hier geen fysische verklaring voor is. Vooral die in IJmuiden is opvallend, omdat deze statistisch significant is, én omdat tabel 7 aangeeft dat DCSM5 al 13% te laag is in IJmuiden. DCSM6 geeft dus nog 4% lagere waarden¹⁴.

Te zien is dat DCSM5 lagere waterstanden geeft in het Waddengebied dan DCSM6 - iets wat bekend is uit de operationele praktijk. Hieruit weten we dat DCSM5 te lage waterstandsverwachtingen geeft.



Figuur 13: Verhouding tussen de maximale opzet voor DCSM5 ten opzichte van DCSM6 voor een aantal stations langs de Nederlandse kust. De standaard deviatie in de geschatte verhouding is weergegeven door de errorbar.

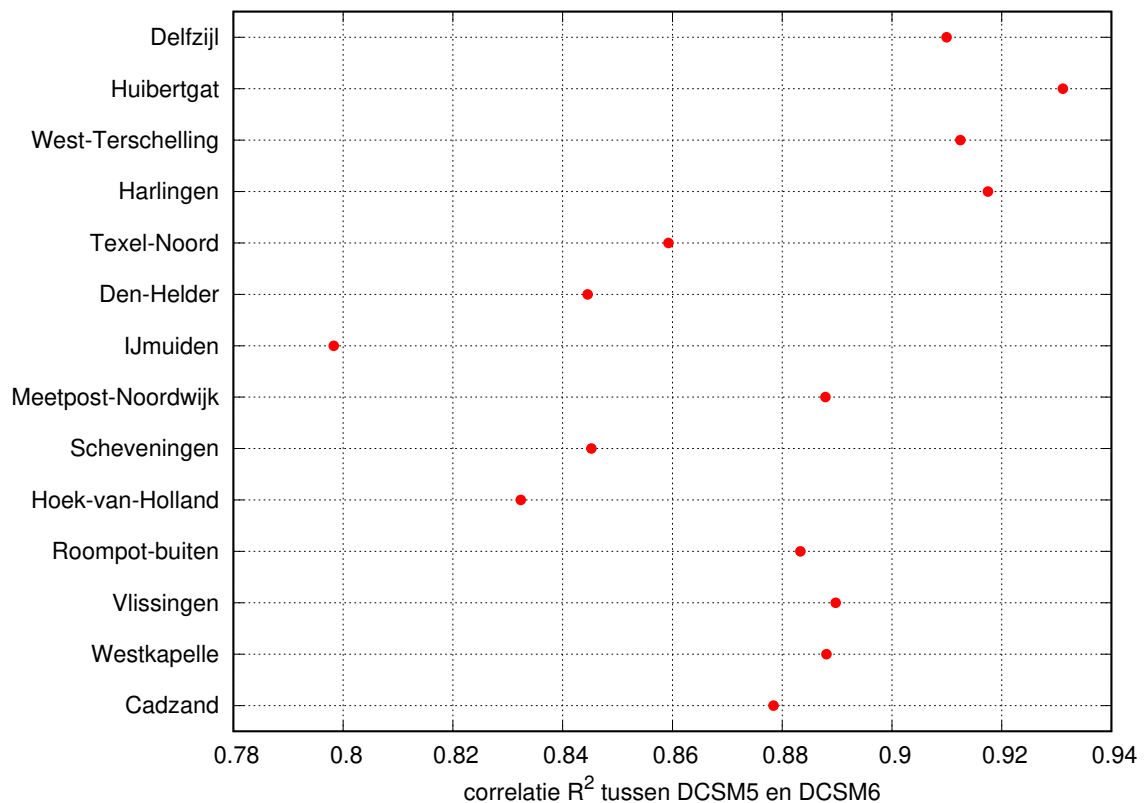
Figuur 14 toont de correlatie R^2 , gebaseerd op de 37 stormen, voor een aantal stations langs de Nederlandse kust. De correlatie is het hoogst in het Waddengebied. Dit is opmerkelijk, omdat dit betekent dat de hogere waarden die DCSM6 geeft ten opzichte van de grovere DCSM5 (zoals aangegeven in Figuur 13) niet afhangt van een specifieke storm, maar gelijk is voor alle stormen. Dit impliceert dat de toegevoegde waarde van DCSM6 voornamelijk hydrologisch is, en niet veroorzaakt wordt door de hogere resolutie van de meteorologische invoer.

Hoewel de invoer voor DCSM5 en DCSM6 identiek is (HARMONIE op 2.5km) is de invoer voor DCSM5 effectief gelijk aan 8km, omdat dit de resolutie van DCSM5 is. DCSM5 kan dus

¹⁴Mogelijk hebben de afwijkende resultaten te maken met de ligging in een seichegevoelige havenbekken van enkele km lang (als de strekdammen worden meegerekend). Daarmee kan de representativiteit en de seichegevoeligheid van de metingen evenzeer een oorzaak voor de verschillen zijn als afwijkingen in DCSM5 en DCSM6.

niet optimaal gebruik maken van de 2.5km resolutie van HARMONIE, terwijl DCSM5 dat wel kan.

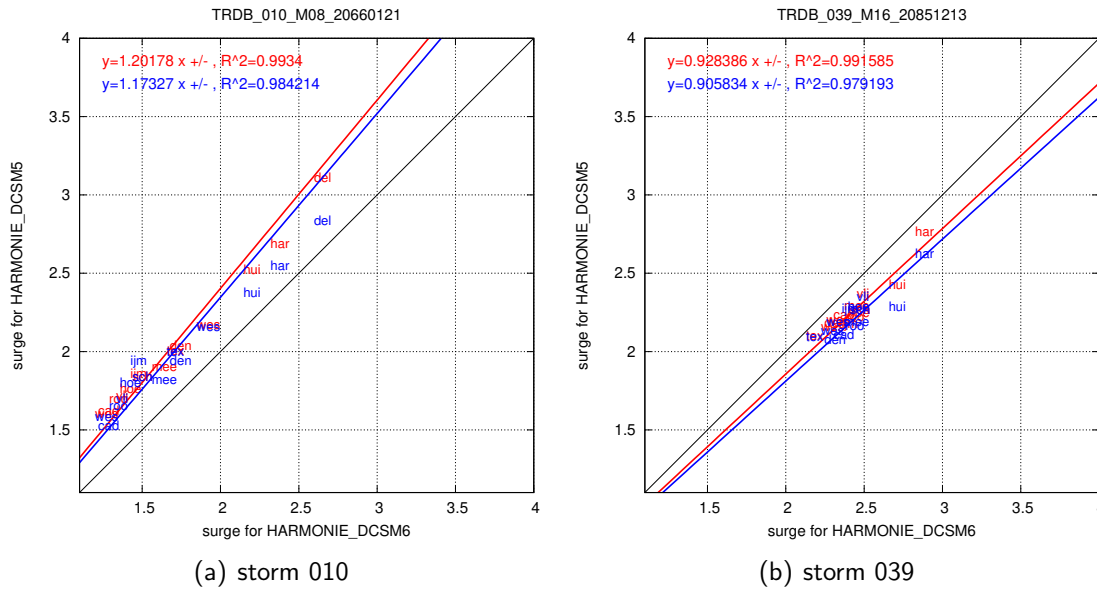
Deze effectief hogere resolutie van meteorologische invoer voor DCSM6 lijkt meer invloed te hebben langs de Hollandse kust (lagere correlatie, dus meer variatie door het gebruik van DCSM6), maar dat het gemiddelde effect kleiner is (verhouding ligt dicht bij 1) dan in de Wadden.



Figuur 14: Correlatie R^2 tussen DCSM5 en DCSM6 voor een aantal stations langs de Nederlandse kust. Opmerkelijk is de hogere waarde in het Waddengebied.

5.3.2 Effecten per storm

In Figuur 15 is de maximale waterstand per storm, berekend met de beide WAQUA versies, weergegeven, voor stormen 010 en 039 (hier wordt dus (C10) met (C8) vergeleken). De blauwe symbolen geven de waarden per station aan voor de ruwe DCSM5 en DCSM6 uitvoer. Omdat hierin ook een gemiddeld hydrologisch effect in zit, zijn de blauwe symbolen gecorrigeerd met de gemiddelde verhouding over alle stormen (zoals weergegeven in Figuur 13). Figuur 15 laat zien dat DCSM5 soms onder (039) en soms boven (010) de DCSM6 uitkomsten zit, en dat deze onder- of overschatting consistent is voor alle stations langs de Nederlandse kust.



Figuur 15: Scatterplots van de maximale opzet voor storm 010 (a) en 039 (b) voor 14 stations langs de Nederlandse kust. De diagonaal is aangegeven met de doorgetrokken lijn, de lineaire fit met de rode lijn. Boven in de figuur zijn de waarden van de lineaire fit, de standaard deviatie en de correlatie weergegeven.

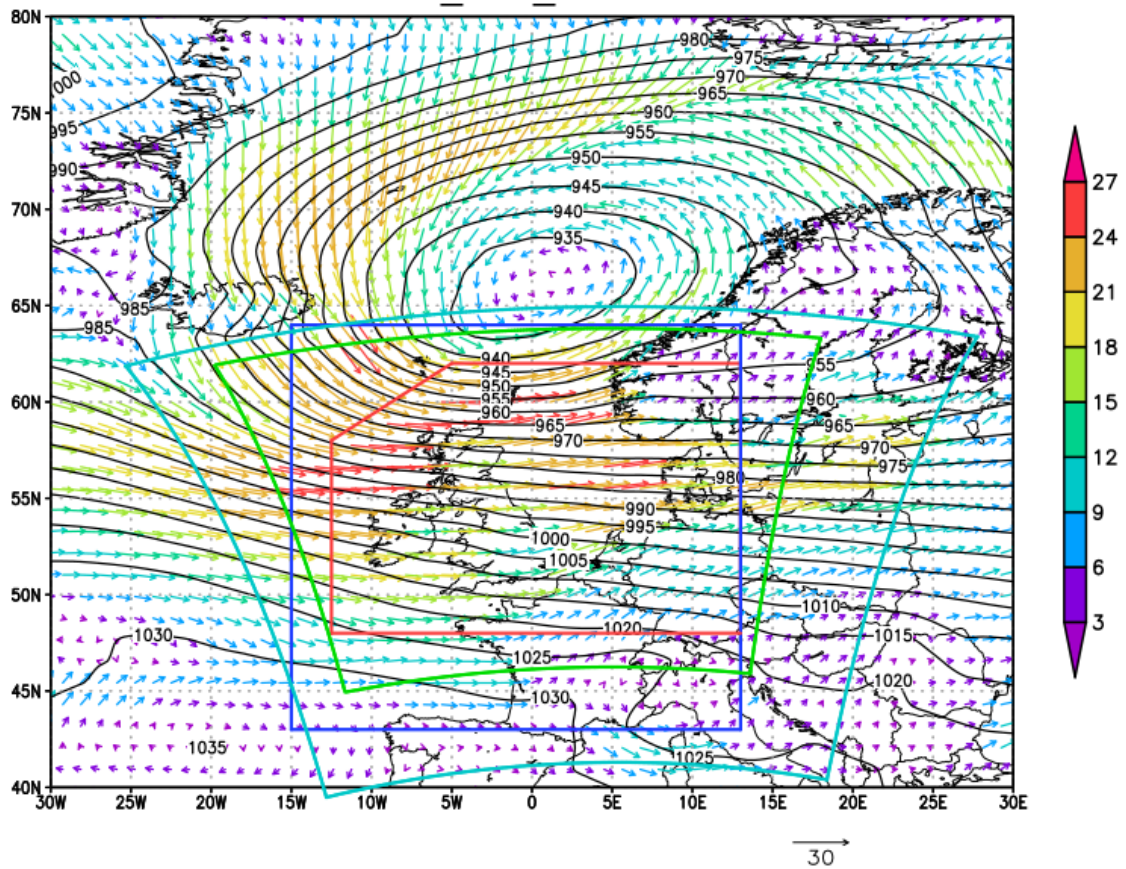
De gemiddelde verhouding tussen DCSM5 en DCSM6 is voor alle stormen weergegeven in Figuur 17. De errorbar geeft de standaard deviatie in de geschatte verhouding weer. In Figuur 17 vallen enkele zaken op. Ten eerste lijkt het dat de stormen die geselecteerd zijn vanwege de hoge waterstand in Harlingen (004-023) gemiddeld hogere verhoudingen opleveren tussen DCSM5 en DCSM6 dan de stormen bij Hoek van Holland (024-043). Ten tweede valt op hoe groot de verschillen tussen de stormen zijn: sommige stormen geven 15% hogere waarden met DCSM5 dan met DCSM6, andere stormen geven 15% lagere waarden.

De stormen 010, 012 en 014 geven alledrie minstens 15% hogere waarden met DCSM5 dan met DCSM6. Het blijkt dat voor deze stormen de kern van de depressie buiten het domein van DCSM5 ligt en zelfs buiten die van DCSM6. Daardoor wordt de externe surge niet goed berekend, wat een mogelijke verklaring is voor de verschillen tussen DCSM5 en DCSM6¹⁵.

Figuur 16 laat de druk- en windpatronen zien van storm 012 enkele uren voor de maximale waterstand. In kleuren zijn de rekendomeinen van RACMO (lichtblauw), HARMONIE (groen), DCSM5 (rood) en DCSM6 (donkerblauw) aangegeven. We merken op hoe groot de depressie is, met een kerndruk van 932 hPa.

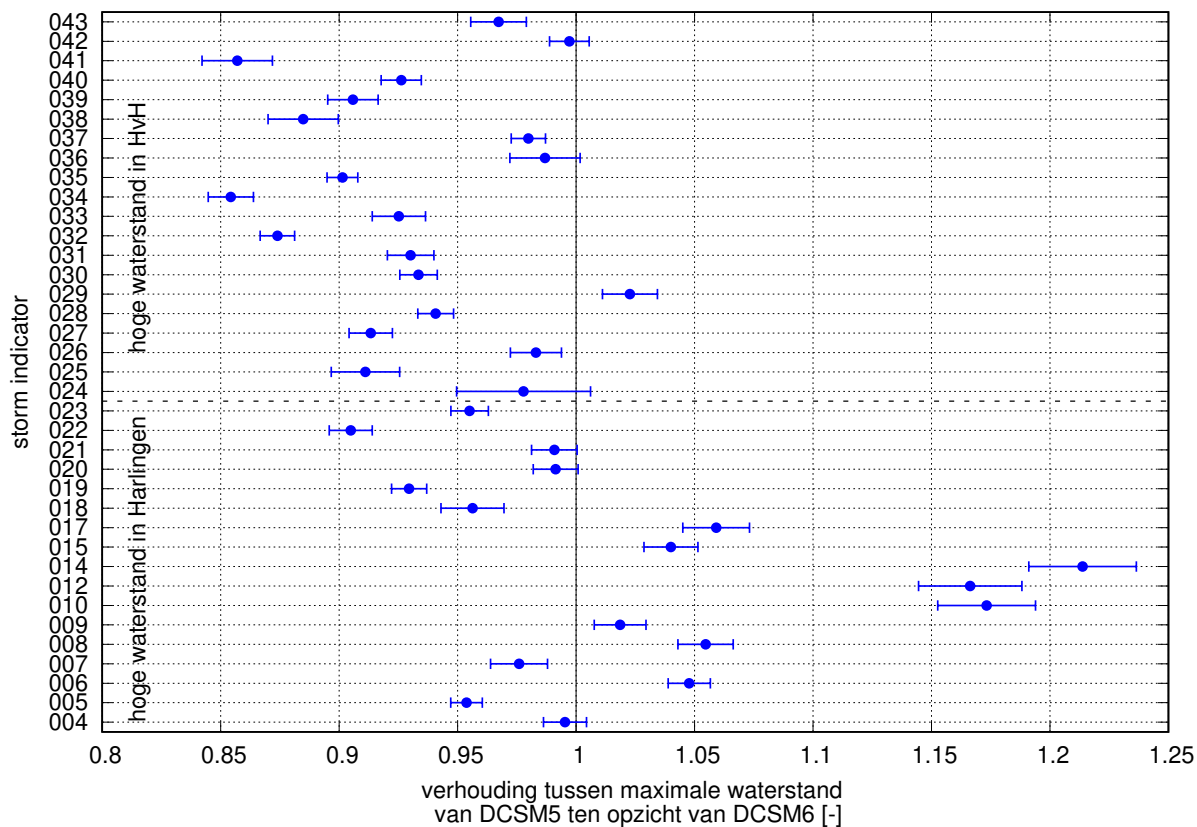
¹⁵Het is opmerkelijk dat DCSM5 in deze gevallen *hogere* waarden geeft dan DCSM6. Blijkbaar wordt de externe surge door DCSM5 overschat, of er een verschil tussen DCSM5 en DCSM6 in aankomsttijd van de externe surge.

012_M09_202101



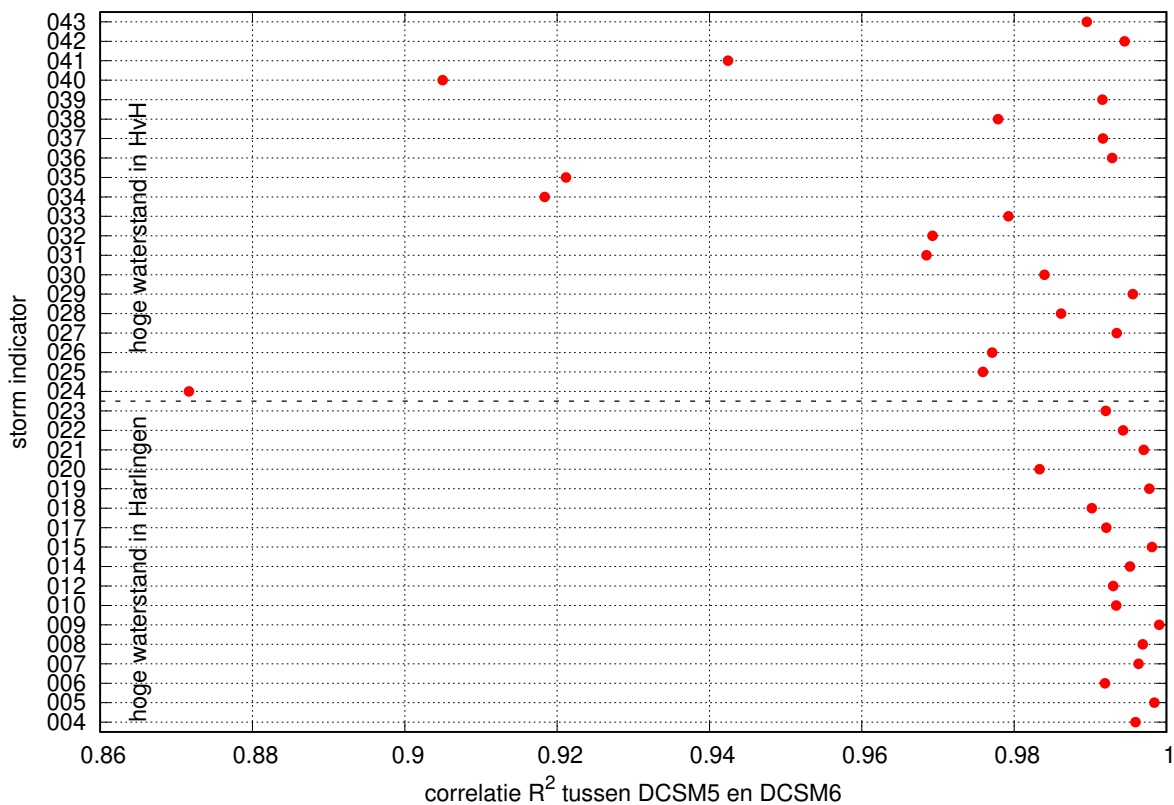
Figuur 16: Druk- en windpatronen van storm 012 enkele uren voor het bereik van de maximale waterstand. In kleuren zijn de rekendomeinen van RACMO (lichtblauw), HARMONIE (groen), DCSM5 (rood) en DCSM6 (donkerblauw) aangegeven.

We concluderen hieruit dat de vertaling van de verkregen DCSM5 naar DCSM6 resultaten niet uniform is, maar sterk storm-afhankelijk is.



Figuur 17: Verhouding tussen de maximale opzet voor DCSM5 ten opzichte van DCSM6 voor de 37 stormen. De standaard deviatie in de geschatte verhouding is weergegeven door de errorbar.

De correlatie tussen de stations per storm is weergegeven in Figuur 18. Opmerkelijk is de hogere correlatie voor de stormen met hoge waterstanden in Harlingen (004-023) ten opzichte van die in Hoek van Holland (024-043). Dit heeft waarschijnlijk te maken met het feit dat de stormen die in Hoek van Holland extreme waterstanden veroorzaken vaker kleinschalig zijn die die in Harlingen extreme waterstanden veroorzaken (zie paragraaf 6.2).

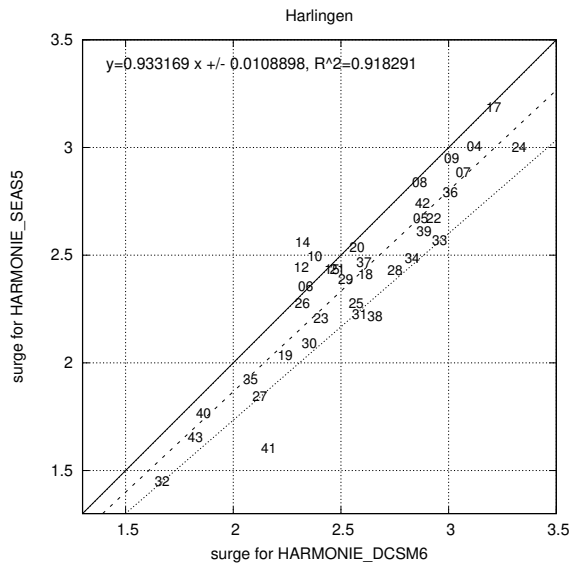


Figuur 18: Correlatie R^2 tussen DCSM5 en DCSM6 voor de 37 stormen. Opmerkelijk is de hogere correlatie voor de stormen met hoge waterstanden in Harlingen (004-023) ten opzichte van die in Hoek van Holland (024-043).

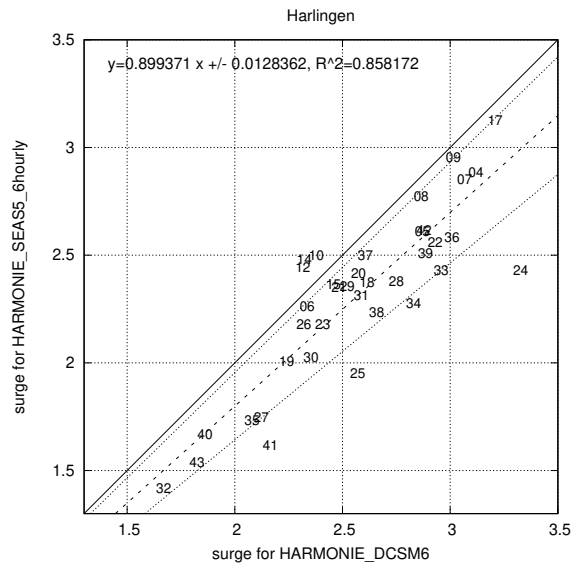
5.4 Afschatting van integrale effecten

Hoewel Figuur 18 aangeeft dat de verschillen tussen DCSM5 en DCSM6 sterk variëren per storm, leiden we hier toch een gemiddeld effect af op basis van alle stormen.

Figuur 19 laat voor Harlingen zien hoe de maximale waterstand verandert als de meteorologische invoer in twee stappen wordt teruggebracht naar de horizontale en temporele resolutie van de SEAS5. De linker figuur (a) laat zien dat de DCSM5-waterstand in Harlingen 7% lager is dan de DCSM6-waterstand als de ruimtelijke resolutie naar 0.25° wordt gebracht. Het effect is consistent voor nagenoeg alle stormen, wat zich uit in een kleine standaard deviatie en een hoge correlatie. Als ook de tijdstap wordt aangepast naar 6-uurlijks (rechter figuur (b)) neemt de waterstand in Harlingen in totaal met 10% af. Deze afname kan dus voor 5% worden toegeschreven aan het gebruik van DCSM5 ten opzichte van DCSM6 (zie Figuur 12(b)), voor 2% aan de ruimtelijke resolutie van SEAS6 (Figuur 19(a)), en 3% aan de temporele resolutie van SEAS5 (Figuur 19(b)).



(a) SEAS5 resolutie



(b) SEAS5 resolutie, 6-uurlijks

Figuur 19: Scatterplots van de maximale waterstand in Harlingen waarbij de HARMONIE meteorologische invoer is teruggebracht naar de horizontale resolutie van de SEAS5 met 3-uurlijkse (a) en 6-uurlijkse (b) invoer. De horizontale as geeft de DCSM6 waarde, de verticale as de DCSM5 waarde.

Tabel 8 geeft de verhouding aan tussen de maximale opzetten volgens DCSM5 ten opzichte van DCSM6 (aangedreven met HARMONIE), gemiddeld over de 37 stormen. De eerste 1 kolom geeft de resultaten aan voor de HARMONIE (2.5km) invoer, kolommen 4-8 geven de verhoudingen wanneer de HARMONIE resolutie is teruggebracht in ruimten en/of tijd.

Tabel 8: Verhouding (kolom 1a), standaard deviatie (2a) en correlatie (3a) tussen de maximale opzetten volgens DCSM5 ten opzichte van DCSM6 gemiddeld over 37 stormen. Kolommen 4-8 geven de resultaten voor invoer op lagere temporele en/of ruimtelijke resoluties. De onderste helft geeft alleen het meteorologische effect.

	HARMONIE (2.5 km)	Standaard deviatie	R ²	HARMONIE resolutie, 6uurlijks	System4 resolutie	System4 resolutie, 6uurlijks	SEAS5 resolutie	SEAS5 resolutie, 6uurlijks	
kolomnummer	1a	2a	3a	4a	5a	6a	7a	8a	
meteorologisch + hydrologisch effect	Cadzand	0.941	0.016	0.878	0.902	0.905	0.867	0.928	0.889
	Westkapelle	0.991	0.015	0.888	0.951	0.951	0.913	0.976	0.937
	Vlissingen	0.991	0.015	0.890	0.943	0.937	0.894	0.963	0.917
	Roopot buiten	0.973	0.015	0.883	0.940	0.935	0.902	0.959	0.926
	Hoek van Holland	1.019	0.017	0.832	0.991	0.978	0.951	1.002	0.974
	Scheveningen	0.999	0.016	0.845	0.972	0.958	0.933	0.985	0.959
	Meetpost Noordwijk	0.957	0.012	0.888	0.932	0.925	0.901	0.946	0.922
	IJmuiden	1.044	0.019	0.798	1.018	1.002	0.978	1.030	1.004
	Den Helder	0.953	0.014	0.845	0.927	0.926	0.901	0.942	0.916
	Texel Noord	0.997	0.014	0.859	0.970	0.967	0.942	0.985	0.959
	Harlingen	0.948	0.011	0.917	0.913	0.907	0.875	0.933	0.899
	West Terschelling	0.996	0.012	0.912	0.966	0.965	0.937	0.982	0.954
	Huibertgat	0.940	0.011	0.931	0.910	0.910	0.882	0.929	0.900
	Delfzijl	0.911	0.012	0.910	0.869	0.858	0.817	0.888	0.846
gemiddeld	0.976	0.014	0.877	0.943	0.937	0.907	0.961	0.929	
kolomnummer	1b	2b	3b	4b	5b	6b	7b	8b	
meteorologisch effect	Cadzand	-	-	-	0.958	0.961	0.921	0.986	0.944
	Westkapelle	-	-	-	0.960	0.960	0.922	0.986	0.946
	Vlissingen	-	-	-	0.951	0.945	0.902	0.972	0.926
	Roopot buiten	-	-	-	0.966	0.961	0.927	0.985	0.951
	Hoek van Holland	-	-	-	0.972	0.960	0.933	0.983	0.956
	Scheveningen	-	-	-	0.973	0.960	0.934	0.987	0.960
	Meetpost Noordwijk	-	-	-	0.974	0.967	0.942	0.989	0.964
	IJmuiden	-	-	-	0.975	0.960	0.936	0.986	0.962
	Den Helder	-	-	-	0.973	0.972	0.945	0.989	0.962
	Texel Noord	-	-	-	0.973	0.971	0.945	0.988	0.962
	Harlingen	-	-	-	0.963	0.957	0.924	0.985	0.949
	West Terschelling	-	-	-	0.970	0.969	0.941	0.986	0.958
	Huibertgat	-	-	-	0.968	0.968	0.938	0.989	0.958
	Delfzijl	-	-	-	0.953	0.941	0.896	0.974	0.928
gemiddeld	-	-	-	0.967	0.961	0.929	0.985	0.952	

Tabel 8 laat zien dat voor de meest zuivere vergelijking, namelijk zowel DCSM5 en DCSM6 aangedreven met dezelfde HARMONIE data (kolom 1a), DCSM5 gemiddeld 3% lagere opzetten geeft. De grootste afwijkingen zijn 9% onderschatting voor Delfzijl, en 4% overschatting voor IJmuiden (zie ook Figuur 13)¹⁶.

Daarnaast zijn de HARMONIE velden geschaald naar de ruimtelijke resoluties van System4 (0.5°) en SEAS5 (0.25°), en naar de temporele resoluties van System4 en SEAS5 (6-uurlijks). Deze resultaten zijn weergegeven in kolommen 4a-8a. De belangrijkste kolom is die waarbij geschaald wordt naar de 6-uurlijkse SEAS5 resolutie (kolom 7a). Hiervoor is de onderschatting gemiddeld 7,5%, variërend van 15% voor Delfzijl tot 0% voor IJmuiden.

Onder de aanname dat de invloeden van het meteorologische model en het hydrologisch model onafhankelijk zijn, kunnen de percentages in de 1e kolom als het effect van DCSM5 ten opzichte van DCSM6 worden beschouwd, en de andere kolommen als het product van dit hydrologisch effect met het meteorologisch effect.

Het meteorologische effect is in de onderste helft van de tabel geïsoleerd van het hydrologisch effect door de getallen te delen door de verhouding van kolom 1a. Daaruit blijkt dat het meteorologische effect - zeker langs de Hollandse kust - nagenoeg onafhankelijk is van de locatie. Het effect van de SEAS5 resolutie kan daarmee geschat worden op een reductie van de maximale opzetten van 1,5% (Hollandse-kust stations in kolom 7b), en 6-uurlijkse invoer geeft een extra reductie van 3,5%, dus in totaal 5% (kolom 8b)¹⁷.

Verlaging van de meteorologische invoer naar 6-uurlijks, van 2.5km resolutie naar 35km, en van DCSM6 naar DCSM5 geeft dus een verlaging van de opzet van gemiddeld 7,5% (kolom 8a in Tabel 8). Dat verklaart dus slechts een deel van de gemiddelde onderschatting van 13% die kolom 4 in Tabel 7 aangeeft voor de ERA5/DCSM5 combinatie. Onduidelijk is waar dit verschil door komt.

Het verschil van 11% tussen SEAS5 en de waarnemingen (kolom 3 in Tabel 7) wordt ook niet volledig verklaard door de resolutie effecten. We veronderstellen daarom dat de extreme stress in SEAS5 3,5% (11% - 7,5%) te laag is ten opzichte van de werkelijkheid. Merk op dat hierin de aanname zit dat DCSM6 geen bias heeft. Of dit terecht is, is de vraag, gezien het feit dat IJmuiden - die door DCSM5 al 13% onderschat wordt - door DCSM6 nog 4% extra onderschat wordt. Het kan dus ook zijn dat DCSM6 3,5% te lage waarden geeft.

Merk ook op dat in de percentages van Tabel 7 niet is gedifferentieerd naar grootte en richting van de stormen, terwijl Figuur 17 wel aanleiding geeft om te veronderstellen dat deze aspecten belangrijk zijn. Dit vergt nader onderzoek.

5.5 Getransformeerde waterstanden

Figuur 20 laat voor 6 kuststations zowel de waargenomen jaarmaxima van de scheve opzet zien (zwart) als de SEAS5 resultaten (rood). Daarnaast is er een correctie gemaakt op basis van de DCSM6 berekeningen (kolom 8a uit Tabel 8; blauw). Aan de correctie is 3,5% extra correctie toegevoegd zoals hierboven toegelicht¹⁸.

Vervolgens is de verdeling van de extreme waterstand van SEAS5 als volgt bepaald op

¹⁶We merken op dat uitsluiting van de stormen 010, 012 en 014 van de analyse (vanwege het feit dat de kerndruk buiten het domein van DCSM5 valt) tot verhoudingen leidt in kolommen 1a en 4a-8a die ongeveer 2% lager zijn.

¹⁷Vergelijking van 6-uurlijkse SEAS5-resolutie ten opzichte van HARMONIE/DCSM5 geeft dezelfde percentages (niet getoond), wat bevestigt dat de meteorologische en hydrologische effecten als onafhankelijk kunnen worden beschouwd

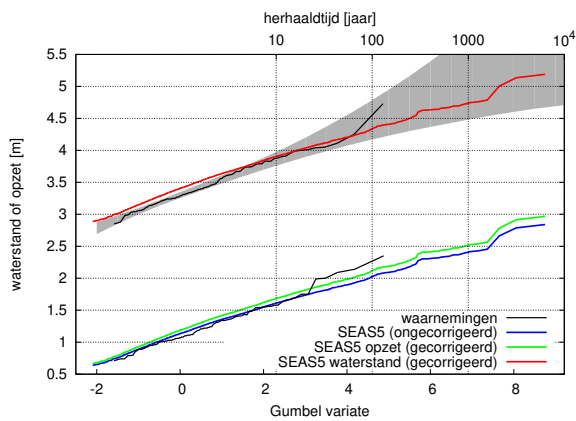
¹⁸We gaan er hierbij van uit dat de correctie in de stress evenredig doorwerkt in de scheve opzet.

basis van de verdeling van de scheve opzetten:

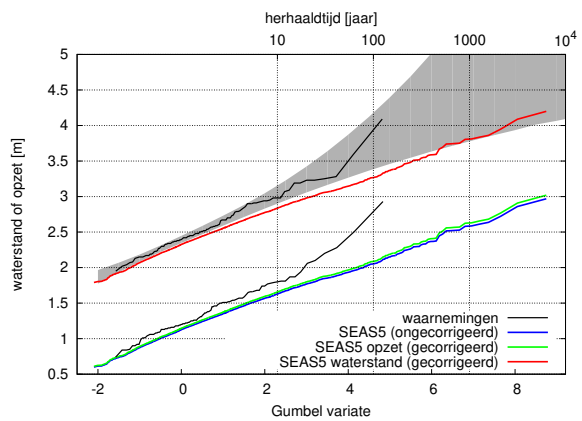
$$\text{Waterstand} = 1/C \times \text{opzet} + \text{hoogwater} \quad (3)$$

waarbij het hoogwater gebaseerd is op het gemiddelde verschil in de jaarmaxima tussen waterstand en scheve opzet van de waarnemingen, en de correctiefactor C afgelezen wordt uit kolom 7 van Tabel 8 (plus 3,5%). Deze verdeling is in Figuur 20 weergegeven in groen. Daarnaast is in zwart de verdeling van de jaarmaxima van de waargenomen waterstand weergegeven. We merken op dat - in overeenstemming met Figuur 9 - de waargenomen verdelingen van scheve opzet en waterstand parallel lopen.

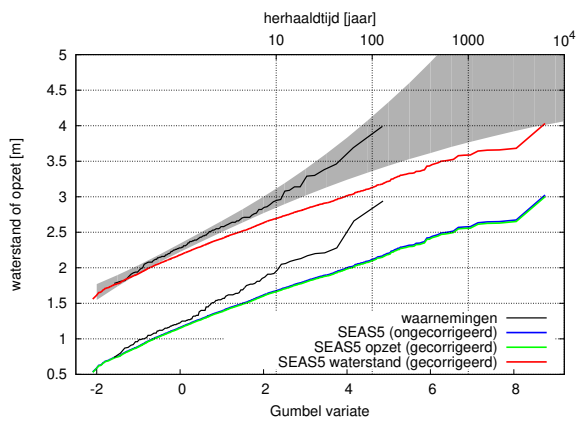
In blauw is de verdeling van de scheve opzetten op basis van de SEAS5/DCSM5-combinatie weergegeven. In rood is de correctie weergegeven op basis van de DCSM6 resultaten (Tabel 8) en in rood op basis van de waarnemingen (Tabel 7). Ook voor de waterstand zijn deze lijnen weergegeven door het gemiddelde hoogwater bij extreme stormvloed en er bij op te tellen.



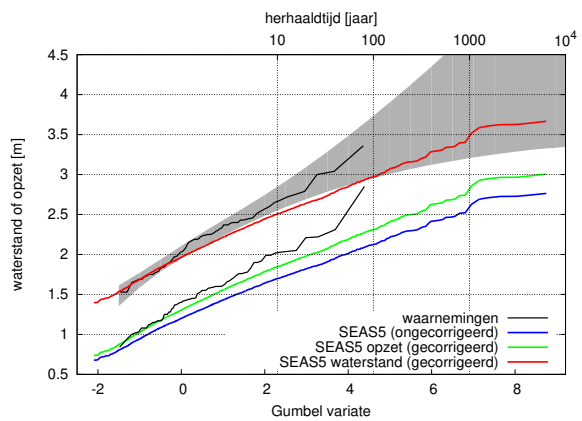
(a) Vlissingen



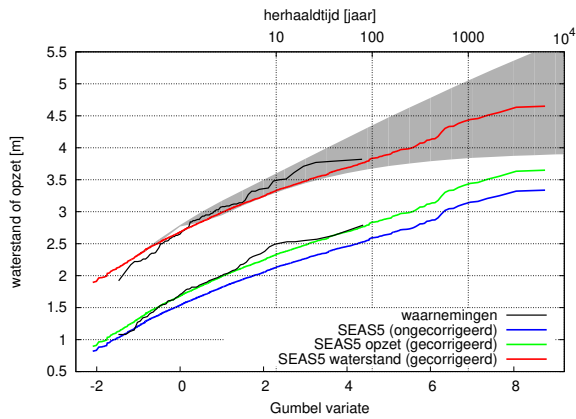
(b) Hoek van Holland



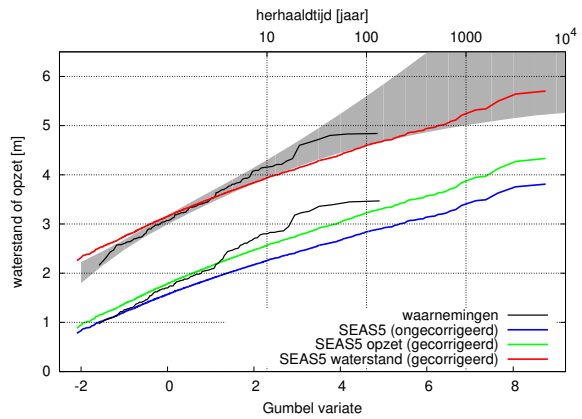
(c) IJmuiden



(d) Den Helder



(e) Harlingen



(f) Delfzijl

Figuur 20: Gumbelplots voor 6 stations langs de Nederlandse kust. Blauw: de scheve opzetten uit SEAS5; groen: de gecorrigeerde scheve opzetten. Zwart: de waargenomen scheve opzetten en waterstanden. Rood: getransformeerde opzetten naar waterstanden volgens Formule 3.

We concluderen dat de scheve opzetten die SEAS5/DCSM5 berekent met 5% opgehoogd dienen te worden om de resolutie effecten te verdisconteren: 1,5% voor de ruimtelijke resolutie en 3,5% voor de tijdsresolutie. Daarnaast zijn er hydrologische effecten, die plaats-afhankelijk zijn. Deze hydrologische effecten zijn geschat met DCSM6. De resultaten geven uitkomsten die

het verschil met de waarnemingen verkleinen (met uitzondering van IJmuiden). De verschillen die nog over blijven bespreken we kort hieronder voor de 6 kuststations:

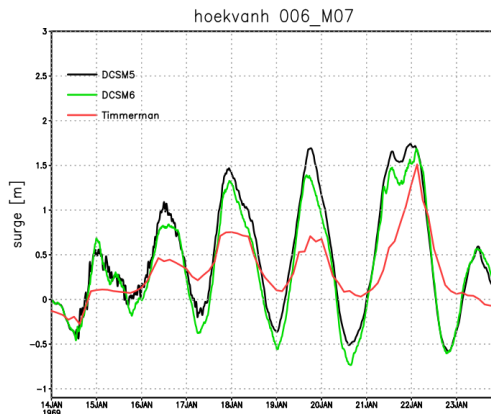
- Vlissingen geeft de beste 'ruwe' resultaten. Toepassing van de 5% resolutie correctie leidt tot een overschatting. DCSM6 geeft dezelfde resultaten als DCSM5.
- Hoek van Holland geeft - na 3,5% correctie - redelijke goede overeenkomst met de waarnemingen. De onderschatting van de meest extreme opzetten en waterstanden (voornamelijk '1953') kan óf een sampling effect zijn, óf het gevolg zijn van een overcorrectie van de waarnemingen (de correctie voor '1953' is 23cm volgens Figuur 4).
- IJmuiden wordt 13% onderschat, maar opmerkelijk genoeg geeft DCSM6 nog 4% lagere waarden dan DCSM5, terwijl de bathymetrie bij IJmuiden niet complex is. Dit roept vragen op over de kwaliteit van de DCSM6 berekeningen.
- Den Helder geeft - na correctie - nog steeds een lichte onderschatting.
- Harlingen geeft goede resultaten na correctie
- Delfzijl geeft - na correctie - nog steeds een lichte onderschatting.

6 Overige bevindingen

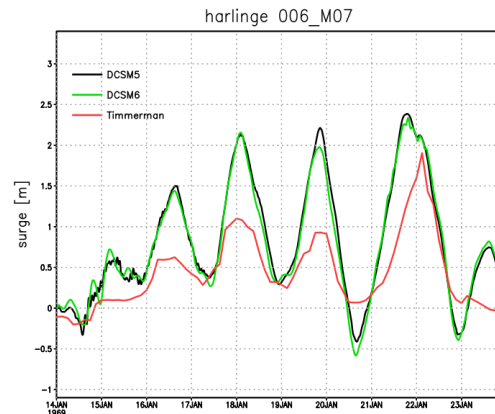
In dit hoofdstuk bespreken we overige bevindingen die niet zozeer betrekking hebben op de het afleiden van de modellentrein, maar wel van belang zijn voor een goede extrapolatie naar de gewenste herhaaltijden. We bespreken achtereenvolgens de invloed van de voorgeschiedenis van depressies (paragraaf 6.1), verschillen in meteorologische karakteristieken van de extreme waterstanden in Harlingen ten opzichte van Hoek van Holland (paragraaf 6.2) en de beperkingen van de extrapolatie naar extreme herhaaltijden waar de SPEEDY runs op wijzen (paragraaf 6.3).

6.1 Invloed van voorgeschiedenis

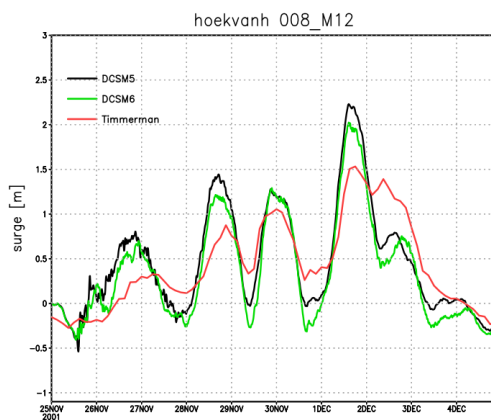
Figuur 21 laat de tijdreeksen zien van de opzet rond de piek van de stormen 006 en 008 voor Hoek van Holland (a) en Harlingen (b) zoals berekend door DCSM5 (zwart), DCSM6 (groen). Daarnaast is het resultaat van het Timmerman-model weergegeven in rood (zie Appendix C voor een beschrijving). Wat opvalt is dat er meerdere pieken in de opzet zijn, met een tussentijd van 1,5 à 2 dagen, dat de piek steeds hoger wordt, en dat het Timmerman model de pieken onderschat. Omdat het Timmerman geen 'geheugen' heeft, wijst deze discrepantie er mogelijk op dat het verschil tussen de DCSM modellen en Timmerman niet veroorzaakt wordt door een verschillende interpretatie van de meteorologische invoer, maar door het effect van eerdere depressies. Verder onderzoek hiernaar is wenselijk.



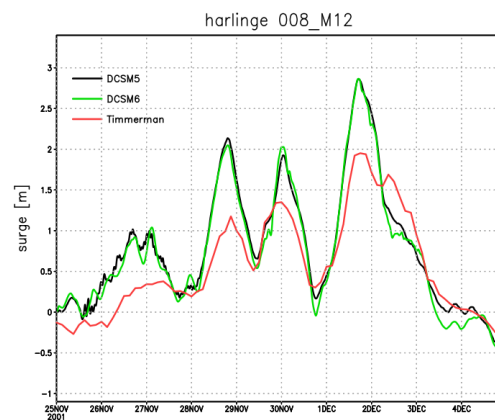
(a) Hoek van Holland storm 006



(b) Harlingen storm 006



(c) Hoek van Holland storm 008



(d) Harlingen storm 008

Figuur 21: Tijdreeksen van de opzet rond de piek van storm 006 (boven) en 008 (onder) voor Hoek van Holland (a, c) en Harlingen (b, d) zoals berekend door DCSM5 (zwart) en DCSM6 (groen). De berekeningen van het Timmerman model zijn weergegeven in rood.

Figuur 22 laat de MSLP patronen (lijnen) en wind vectoren (kleuren) zien voor opeenvolgende dagen voor storm 006. Te zien is een meanderende stroming die om de twee dagen een Noordwestelijke component over de Noordzee heeft, die niet alleen leidt tot een positieve opzet, maar door de frequentie ook tot extra verhoging.

Naast deze storm 006 vindt invloed van de voorgeschiedenis mogelijk plaats bij stormen 008, 009, 010, 014, 017, 021, 023, 025, 026, 029, 030, 031, 033, 036, 037, 038, 040, 041 en 043 (zie Figuur 25 in Appendix A). Daarmee kan het zijn dat de voorgeschiedenis een belangrijk aspect is voor het bereiken van extreme waterstanden aan de Nederlandse kust. De periode van 36 uur correspondeert met de eigenfrequentie van de Noordzee in Noord-Zuid richting¹⁹.

¹⁹zie o.a. pagina 43 van <http://cwk-info.knmi.nl/documentatie/wikimeteo/nz/getij.pdf>.

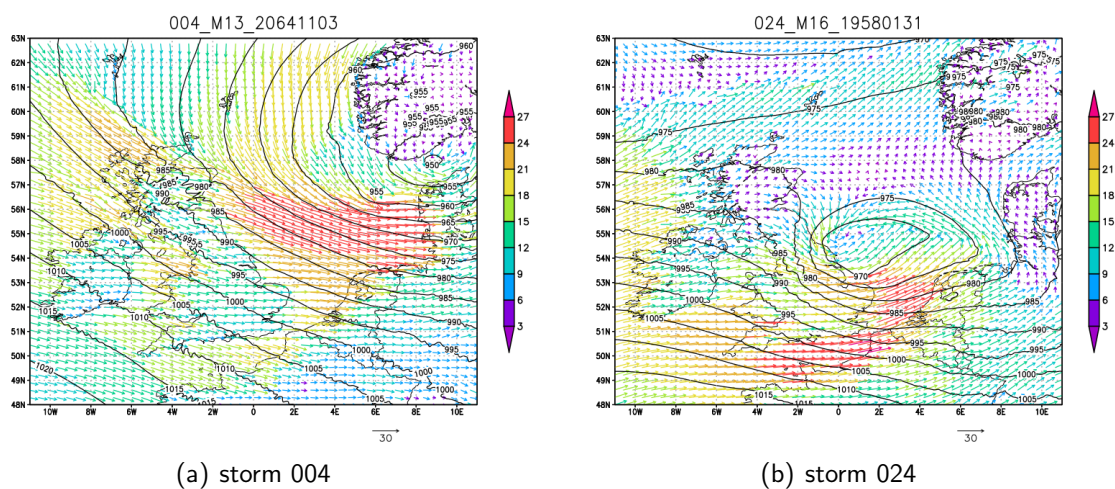
Figuur 22: Animatie van de MSLP patronen (lijnen) en waterstanden (kleuren) voor storm 006 (boven) en 012 (onder) in tijdstappen van 3 uur. De figuur linksonder laat de tijdreeksen van de waterstanden in Harlingen, Hoek van Holland en Cuxhaven zien. Klik op de figuur om de animatie te starten (werkt alleen onder Adobe Acrobat).

De animatie van Figuur 22 laat niet een duidelijke Noord-Zuid schommeling van de waterstanden zien. Een andere mogelijke verklaring is dat de opeenvolgende stormen het Noordzeebekken vullen met water dat niet voldoende tijd heeft om weg te lekken via het Kanaal voordat de volgende storm komt. Dat is vooral duidelijk te zien in de tijdreeks van storm 006, waar bij Harlingen en Cuxhaven een opbouw van de gemiddelde waterstand te zien is bij de 1e en 2e storm, terwijl Hoek van Holland (die dichterbij het Kanaal ligt) sneller terugkomt op de waterstand in rust.

Mogelijk speelt dit aspect ook bij storm 012 die een veel langer duurt waardoor ook het gehele Noordzeebekken zich vult. Ook hier lekt het water bij Hoek van Holland weg via het Kanaal, wat niet gebeurt voor Harlingen en Cuxhaven.

6.2 Classificatie van extreme stormvloed

Vergelijking van de meteorologische situaties die tot extreme stormvloeden in Harlingen (storm 004-023 in Tabel 5) of Hoek van Holland (storm 024-043) leiden, laat een opmerkelijk verschil zien: hoge opzetten in Harlingen worden vooral veroorzaakt door grootschalige depressies met een sterk Westelijke of Noord-westelijke component, met een kern rond of boven 60°N. Het verschil wordt geïllustreerd in Figuur 23 waar in (a) de meteorologische situatie van storm 004 - enkele uren voor de maximale waterstand in Harlingen - wordt getoond, en in (b) storm 024, die een extreme waterstand in Hoek van Holland veroorzaakt. De meteorologische situaties van de andere stormen zijn te vinden in Appendix A.



Figuur 23: MSLP patronen (lijnen) en windsnelheden (gekleurde pijlen) voor de stormen 004 (links) en 024 (rechts). Storm 004 is een voorbeeld van de grootschalige depressies die hoge waterstanden in Harlingen veroorzaken, en storm 024 is een voorbeeld van de veel kleinschaliger depressies die de hoge waterstanden in Hoek van Holland veroorzaken. De gegevens zijn afkomstig uit RACMO.

In Hoek van Holland is de kans echter veel groter dat een kleinschaligere depressie, met een meer lokaal karakter, een extreme opzet genereert. Voorbeelden hiervan zijn storm 024, 025, 027, 031, 033, 034, 038, 039, 040, 041 en 043.

Een verklaring zou kunnen zijn dat de responstijd van de opzet in Harlingen mogelijk langer is dan die in Hoek van Holland, zodat kleine, sneller trekkende systemen vaker tot extreme waterstanden in Hoek van Holland leiden dan in Harlingen. Ander andere mogelijke verklaring

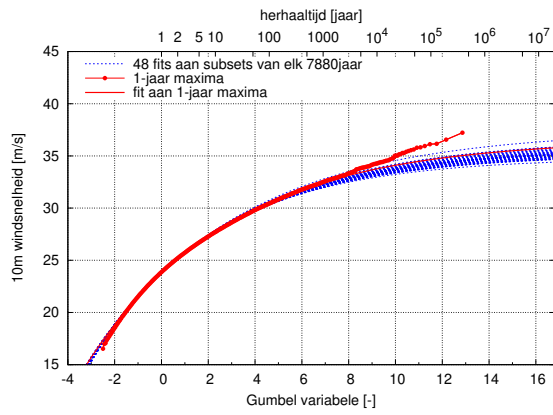
is dat langdurige stormen tot een vulling van het Noordzee-bekken leiden wat tot extra hoge waterstanden leiden. Dit speelt niet bij Hoek van Holland omdat het water hier weglekt door het Kanaal.

6.3 SPEEDY runs

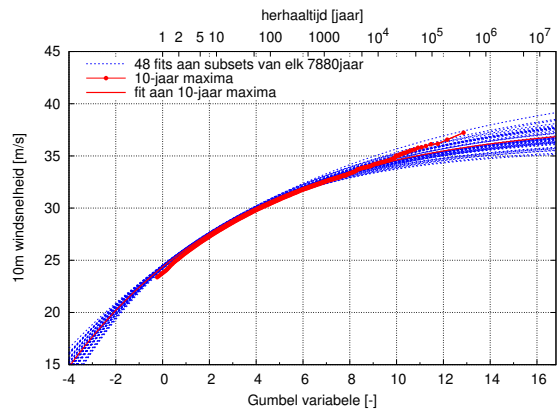
Figuur 24 laat de Gumbelplots zien voor de 384.480-jarige SPEEDY reeks voor de 10m-wind voor een centraal punt op de Noordzee. De rode stippen geven de 384.480 jaarmaxima weer, de rode lijn geeft de GEV fit aan de 1-, 5-, 10- en 100-jaar maxima weer in figuren (a)-(d). De blauwe lijnen geven de GEV verdelingen weer aan de 48 subsets van elk 7880 jaar, dwz elke subset heeft de lengte van de SEAS5 reeks.

Uit Figuur 24 concluderen we het volgende:

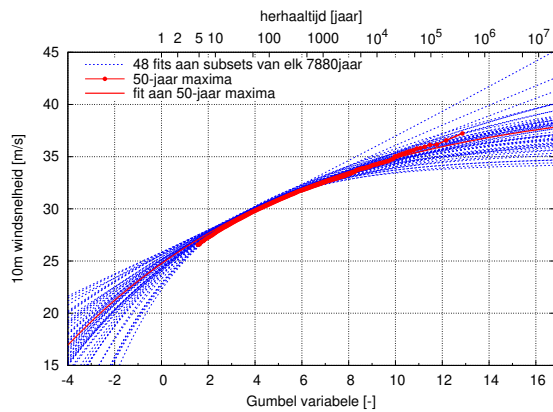
- de reeks vertoont geen sterk afwijkend gedrag in de verre staart van de verdeling. Er zijn geen aanwijzingen dat een extreem zeldzame populatie van gebeurtenissen de meest extreme windsnelheden domineert.
- De GEV-verdeling, gefit aan de jaarmaxima, kan de empirische verdeling beschrijven tot herhaaltijden van ongeveer 1000 jaar; voor grotere herhaaltijden onderschat de GEV de empirische verdeling.
- Deze onderschatting wordt kleiner als alleen de 10-jarige, 50-jarige of 100-jarige maxima worden gebruikt voor de fit. Dit impliceert dat de jaar-maxima (en zelfs de 10- en 50-jarige maxima) zich nog niet voldoende ver in de staart van de verdeling bevinden om te voldoen aan de convergentie naar de theoretische extreme-waarde-verdeling.
- Bij gebruik van 100-jarige maxima is de systematische bias in de fit klein. De spreiding in de 7880-jarige subsets is dan echter aanzienlijk geworden. Het lijkt daarmee dat er geen goede balans gevonden kan worden met de GEV verdeling tussen bias en spreiding. Het onderzoek van Cees de Valk (de Valk en Cai, 2018; de Valk en van den Brink, 2019) naar varianten op de GEV verdeling is daarom zeer relevant.



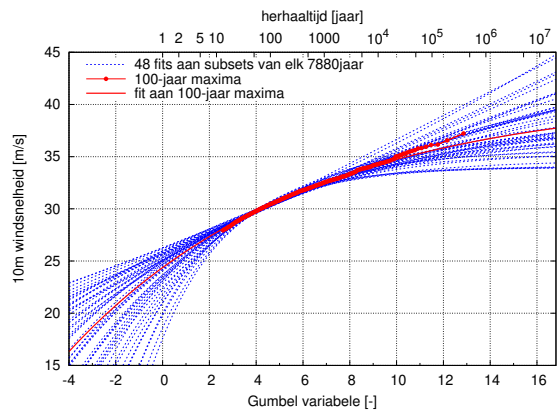
(a) fits aan 1-jaar maxima



(b) fits aan 10-jaar maxima



(c) fits aan 50-jaar maxima



(d) fits aan 100-jaar maxima

Figuur 24: Gumbelplots voor de 384.480-jarige SPEEDY reeks voor een centraal punt op de Noordzee. De rode stippen geven de 384.480 jaarmaxima weer, de rode lijn geeft de GEV fit aan de 1-, 5-, 10- en 100-jaar maxima weer in figuren (a)-(d). De blauwe lijnen geven de GEV verdelingen weer aan de 48 subsets van elk 7880 jaar, dwz elke subset heeft de lengte van de SEAS5 reeks.

7 Conclusies en discussie

7.1 Conclusies

Hieronder geven we de belangrijkste uitkomsten uit het rapport weer.

- Waarnemingen
 - De toegepaste correcties van waargenomen waterstanden voor zeespiegelstijging, landdaling en orografische verandering is van aanzienlijke invloed op extreme-waarde-verdeling (voornamelijk voor het zuidelijk deel van Nederland). Dit maakt een goede vergelijking tussen SEAS5 en waarnemingen moeilijk.
- ECMWF kwaliteit:
 - De wind uit System4 is minder geschikt om de waterstandsmodellen DCSM5 en/of DCSM6 aan te drijven omdat de bijbehorende drag-relatie niet bekend is, terwijl de keuze van de drag-relatie van grote invloed is op de uitkomsten.
 - Om deze reden is in dit rapport de nadruk gelegd op de opvolger van System4, SEAS5 genaamd, waarvoor ook de stress gearchiveerd is. Dit maakt aannames over de drag-relatie overbodig omdat de waterstandsmodellen stress als invoer gebruiken.
 - Hoewel - bij gebruik van de stress - de drag-relatie niet relevant is voor de waterstandsmodellen²⁰, is dit wel van belang voor een goede vergelijking met de waargenomen wind (Figuur 7). Afhankelijk van de gekozen parameterisatie komt de (pseudo)wind uit SEAS5 lager, gelijk of hoger uit dan de waargenomen wind in Hoek van Holland. De literatuur geeft echter geen eenduidig beeld over de beste drag-parameterisatie. Het is daarom niet te bepalen of de stress uit SEAS5 onder- of overschat wordt. En dus is het niet mogelijk om de stress uit SEAS5 te corrigeren op basis van wind waarnemingen.
- Downscaling met HARMONIE + DCSM6
 - Er zijn een 37-tal extreme stormen met HARMONIE doorgerekend op 2,5km resolutie. Uit deze meteorologische velden zijn vervolgens waterstanden berekend met zowel DCSM5 (8km resolutie) als DCSM6 (1,6km resolutie). Gemiddeld geeft DCSM6 2,5% hogere opzetten dan DCSM5.
 - Hoewel de procentuele verschillen tussen DCSM5 en DCSM6 voor een gegeven storm consistent zijn voor verschillende stationslocaties, variëren de verschillen sterk per storm: van 15% lagere tot 15% hogere waarden. Dat betekent dat het percentage van 2,5% - die gebaseerd is op het gemiddelde over 37 stormen - mogelijk niet geschikt is om de gehele extreme-waarde-verdeling te transformeren van DCSM5 naar DCSM6 resultaten.
 - Subsampling van HARMONIE (2,5km, uurlijks) naar 35km, 6-uurlijks (wat de resolutie van SEAS5 is)) leidt gemiddeld tot 5% lagere opzetten. Deze 5% kan onderverdeeld worden in 1,5% door de ruimtelijke resolutie van 35km, en 3,5% door de temporele resolutie van 6 uur.

²⁰De stress zelf wordt enigszins beïnvloed door de keuze van de drag-formulering, zie Sterl (2019). Deze verschillen hebben we verder niet meegenomen.

- Hiermee kan dus 7,5% van de 11% onderschatting van SEAS5/DCSM5 ten opzichte van de waarnemingen verklaard worden. De overblijvende 3,5% komt óf door te lage stress uit SEAS5, óf door onderschatting van DCSM6.
 - De onderschatting in IJmuiden door DCSM6 is nog sterker dan door DCSM5. Dit geeft twijfels over de nauwkeurigheid van DCSM6.
- Meteorologische beschrijving
 - De extreme stormvloed in Harlingen worden vaak veroorzaakt door grootschaliger en meer noordelijker gelegen depressies dan de stormvloed in Hoek van Holland.
 - Een aanzienlijk deel van de meest extreme waterstanden wordt veroorzaakt door verschillende depressies die elkaar opvolgen met een tussentijd van 36-48 uur. Dit kan de waterstand met een meter verhogen.
- Statistische extrapolatie
 - De extreme-waarde-verdeling van de waterstand verschilt alleen in de locatie parameter van die van de scheve opzet. Dat impliceert dat het effect van het astronomisch getij onafhankelijk van de herhaaltijd verondersteld kan worden.
 - De extreem lange reeks van 400k jaren die met SPEEDY is gegenereerd, geeft geen aanwijzingen van onregelmatigheden in het gedrag in de verre staart van de verdeling. Wel geeft de reeks aan dat de GEV verdeling óf een bias geeft, óf een grote spreiding in de extrapolaties. Dat maakt onderzoek naar goede alternatieven voor de GEV verdeling relevant.

7.2 Discussie en vooruitblik

De 7780 jaar aan meteorologische gegevens uit de SEAS5 seizoensverwachtingen van het ECMWF geven de beste input die er beschikbaar is voor het bepalen van de ontwerpcriteria van de Nederlandse dijken. In dit rapport hebben we laten zien dat voor de suboptimale resolutie van het meteorologische model gecorrigeerd kan worden door de opzetten met 5% te verhogen. De invloed van de resolutie van 8km van het DCSM5 model kan verdisconteerd worden door een verhoging van de opzetten met 2,5%. De overblijvende gemiddelde onderschatting ten opzichte van de waarnemingen van 3,5% kan meerdere mogelijkheden hebben: het kan aan de stress uit SEAS5 liggen, aan onderschatting door DCSM6, of aan trends en/of inhomogeniteiten in de waarnemingen.

Wat de oorzaak ook is, we concluderen dat de SEAS5 van dermate hoge kwaliteit is dat deze een goed alternatief biedt voor de waarnemingen. Gebruik van de SEAS5 dataset heeft namelijk veel voordelen ten opzichte van gebruikt van de waarnemingen. Zo is de dataset geschikt om de hele modellen-trein aan te drijven met realistisch variërende wind- en drukvelden, iets wat met de locatiegebonden waarnemingen niet lukt. Een ander voordeel is dat daarmee niet-voorzien omstandigheden, zoals opeenvolgende depressies die door het geheugen-effect tot verhoogde opzetten leiden, meegenomen worden. Als derde voordeel geeft de analyse van de meteorologische dataset veel meer inzicht in de meteorologische karakteristieken van de maatgevende stormen dan ooit vanuit de waarnemingen verkregen kan worden. Een voorbeeld hiervan is het verschil in omvang, locatie en treksnelheid van de maatgevende stormen voor Hoek van Holland ten opzichte van Harlingen.

Hoewel de dataset een factor 50-100 groter is dan de lengte van de waarnemingen, laat de 400k lange SPEEDY reeks zien dat zelfs een 7780-jarige reeks gevoelig is voor sampling

effecten bij extrapolatie naar de gewenste terugkeertijden van 10^7 jaar. Het is daarom nodig om alternatieven te vinden voor de traditionele GEV verdeling. De logGW-schatter (de Valk en Cai, 2018; de Valk en van den Brink, 2019) is een veelbelovend optie die momenteel verder wordt onderzocht voor de toepasbaarheid op extreme waterstanden.

Geadviseerd wordt om via een doordacht plan het proof-of-concept verder uit te werken.

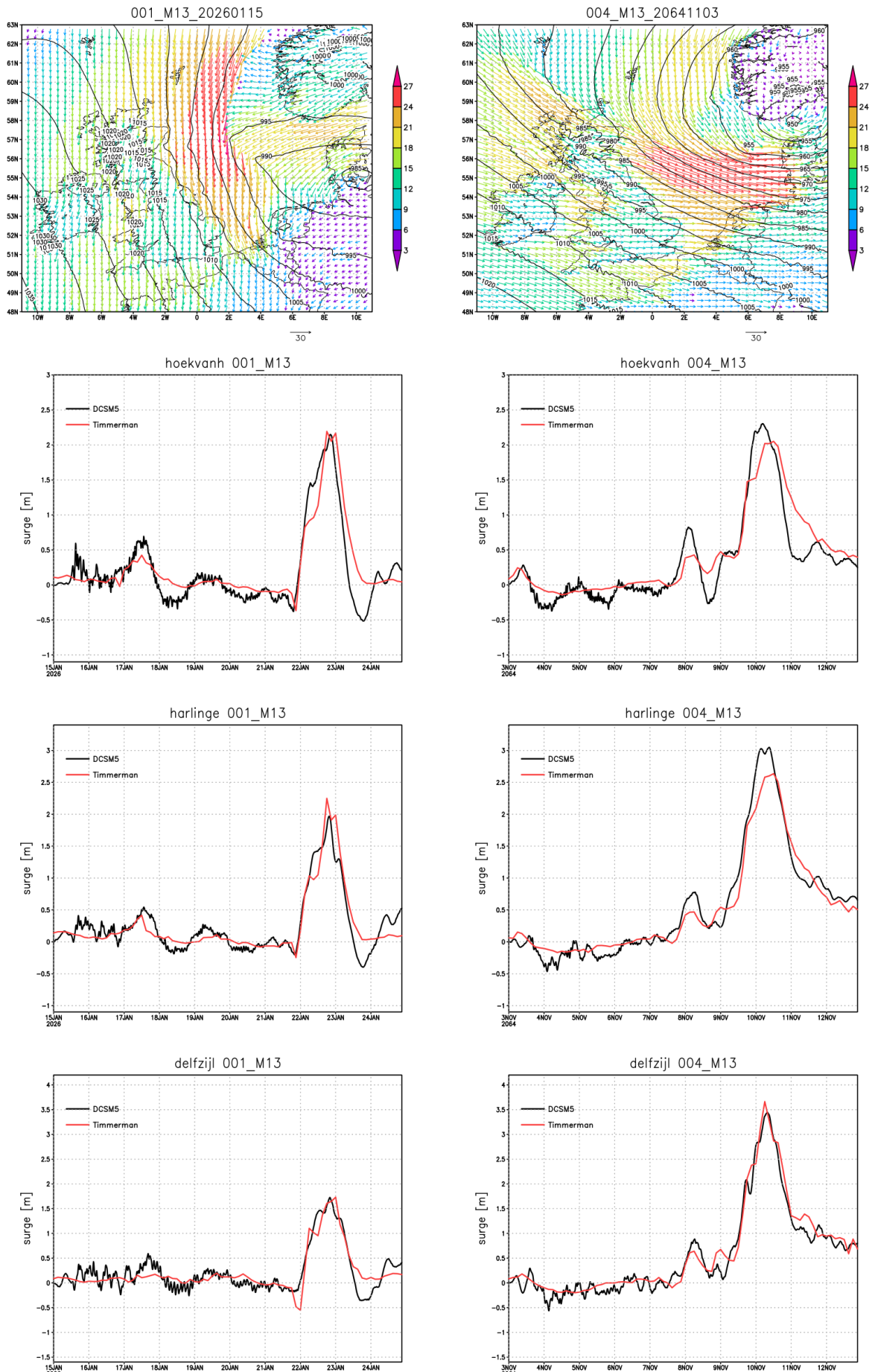
Referenties

- M. Becker, M. Karpytchev, M. Davy, en K. Doekes. Impact of a shift in mean on the sea level rise: Application to the tide gauges in the Southern Netherlands. *Continental Shelf Research*, 29:741–749, March 2009. doi: 10.1016/j.csr.2008.12.005.
- H. Charnock. Wind stress on a water surface. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 81(350):639–640, 1955. ISSN 1477-870X. doi: 10.1002/qj.49708135027. URL <http://dx.doi.org/10.1002/qj.49708135027>.
- C. de Valk en J.J. Cai. A high quantile estimator based on the log-generalized weibull tail limit. *Econometrics and Statistics*, 6(C):107–128, 2018. URL <https://EconPapers.repec.org/RePEc:eee:ecosta:v:6:y:2018:i:c:p:107-128>.
- C. de Valk en H.W. van den Brink. Estimation of wind speeds with very high return periods from large datasets generated by weather prediction models: statistical aspects. Technical report, KNMI, 2019.
- D.P. Dee, S.M Uppala, A.J. Simmons, P. Berrisford, P. Poli, S. Kobayashi, U. Andrae, M.A. Balmaseda, G. Balsamo, P. Bauer, P. Bechtold, A.C.M. Beljaars, en L van de Berg. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 137:553–597, 2011. doi: 10.1002/qj.828.
- D. Dillingh, L. de Haan, R. Helmers, G.P. Können, en J. van Malde. De basispeilen langs de Nederlandse kust; statistisch onderzoek. Technical Report DGW-93.023, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, 1993.
- H. Gerritsen, H. de Vries, en M. Philippart. The Dutch Continental Shelf Model. In Daniel Lynch en Alan Davies, editors, *Quantitative Skill Assessment for Coastal Ocean Models*, volume 47 of *Coastal and Estuarine Studies*. American Geophysical Union, 1995.
- W. Hazeleger, X. Wang, C. Severijns, S. Ștefănescu, R. Bintanja, A. Sterl, K. Wyser, T. Semmler, S. Yang, B. van den Hurk, T. van Noije, E. van der Linden, en K. van der Wiel. Ec-earth v2.2: description and validation of a new seamless earth system prediction model. *Climate Dynamics*, 39(11):2611–2629, Dec 2012. ISSN 1432-0894. doi: 10.1007/s00382-011-1228-5. URL <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1228-5>.
- H. Hersbach. Sea-surface roughness and drag coefficient as function of neutral wind speed, July 2010.
- S.J. Holgate, A.M., P.L. Woodworth, L.J. Rickards, M.E. Tamisiea, E. Bradshaw, P.R. Foden, K.M. Gordon, S. Jevrejeva, en J. Pugh. New data systems and products at the permanent service for mean sea level. *Journal of Coastal Research*, pages 493–504, 2013. doi: 10.2112/JCOASTRES-D-12-00175.1. URL <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-12-00175.1>.
- F.A.P. Hollebrandse. *Temporal development of the tidal range in the southern North Sea*. PhD thesis, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Hydraulic Engineering, TUDelft, 2005.
- F. Kucharski, F. Molteni, en A. Bracco. Decadal interactions between the western tropical Pacific and the North Atlantic Oscillation. *Climate Dynamics*, pages 79–91, 2006.

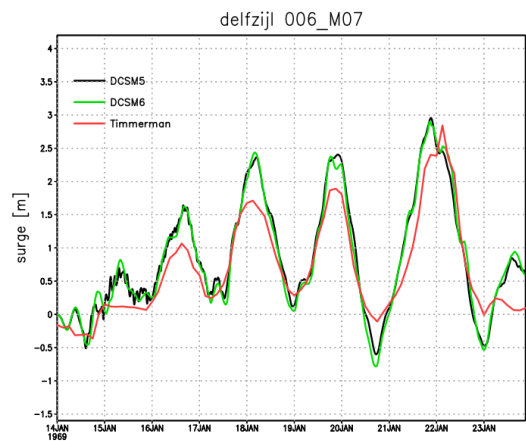
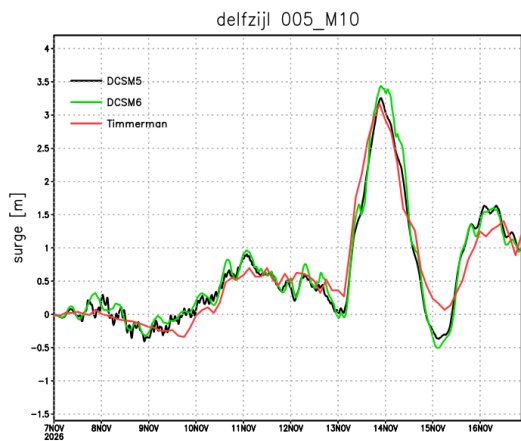
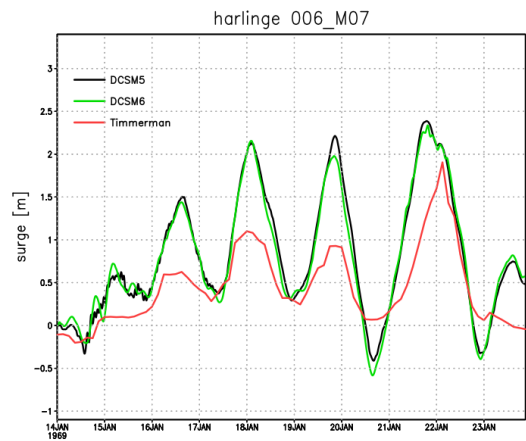
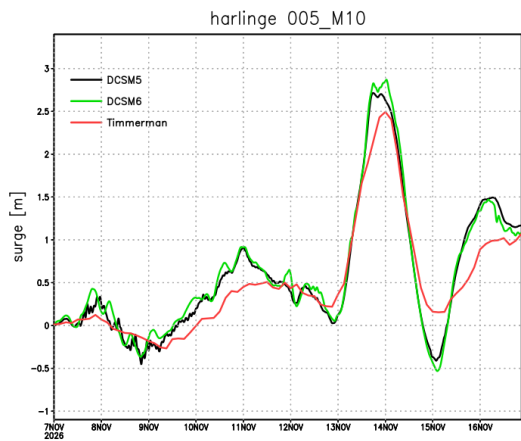
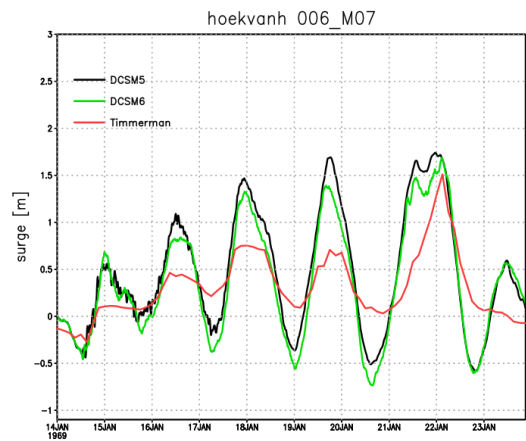
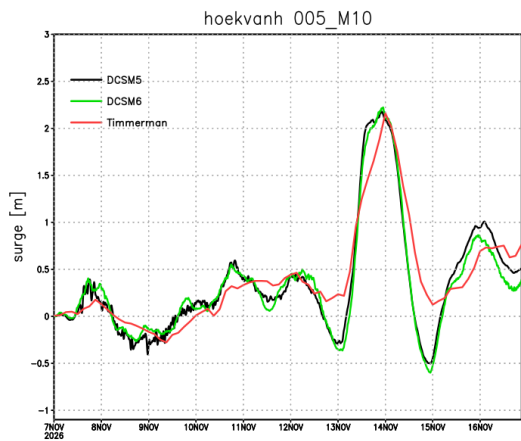
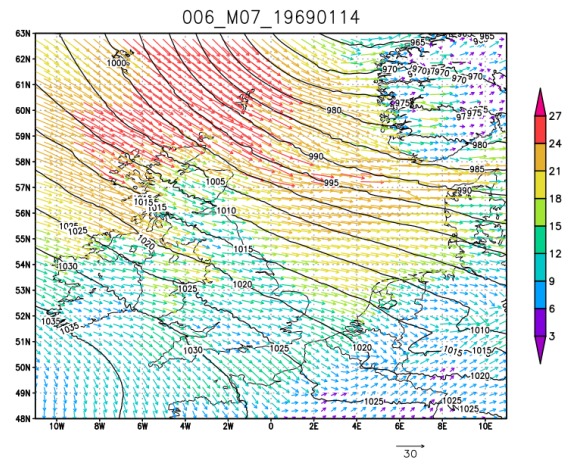
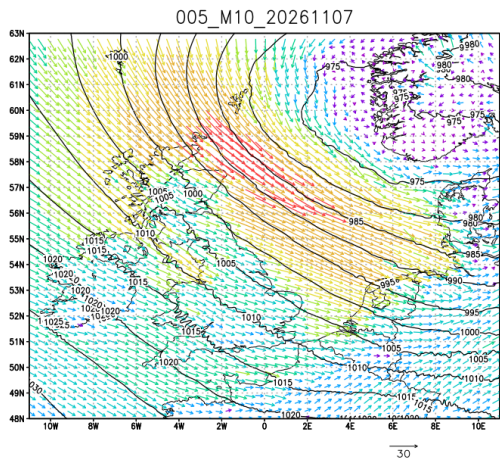
- F Molteni. Atmospheric simulations using a GCM with simplified physical parametrizations. I. Model climatology and variability in multi-decadal experiments. *Climate Dynamics*, 20: 175–191, 2003.
- PSMSL. Permanent service for mean sea level, tide gauge data, retrieved 05 jun 2017, 2017. URL <http://www.psmsl.org/data/obtaining/>.
- Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017, Bijlage III. Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017, Bijlage III, 2017.
- Y. Seity, P. Brousseau, S. Malardel, G. Hello, P. Bénard, F. Bouttier, C. Lac, en V. Masson. The AROME-France convective-scale operational model. *Mon. Wea. Rev.*, 139:976–991, 2011.
- A. Sterl. Wave-dependent drag parametrizations and their impact. Technical report, KNMI, 2019.
- A. Sterl, A.M.R. Bakker, H.W. van den Brink, R. Haarsma, A. Stepek, I.L. Wijnant, en R.C. de Winter. Large-scale winds in the southern North Sea region: the wind part of the KNMI'14 climate change scenarios. *Environmental Research Letters*, 10(3):035004, 2015. doi: 10.1088/1748-9326/10/3/035004. URL <https://doi.org/10.1088%2F1748-9326%2F10%2F3%2F035004>.
- H. Timmerman. *Meteorological effects on tidal heights in the North Sea*. Staatsdrukkerij, The Hague, 1977.
- H. W. Van den Brink en G. P. Können. The statistical distribution of meteorological outliers. *Geophysical Research Letters*, 35(23):n/a–n/a, 2008. ISSN 1944-8007. doi: 10.1029/2008GL035967. URL <http://dx.doi.org/10.1029/2008GL035967>. L23702.
- H. W. Van den Brink, G. P. Können, J. D. Opsteegh, G. J. van Oldenborgh, en G. Burgers. Estimating return periods of extreme events from ECMWF seasonal forecast ensembles. *International Journal of Climatology*, 25(10):1345–1354, 2005. ISSN 1097-0088. doi: 10.1002/joc.1155. URL <http://dx.doi.org/10.1002/joc.1155>.
- H.W. Van den Brink. Extreme wind en druk in ECMWF seizoenverwachtingen. Technical Report 364, KNMI, 2018. URL <http://bibliotheek.knmi.nl/knmipubTR/TR364.pdf>.
- H.W. Van den Brink en S. De Goederen. Recurrence intervals for the closure of the Dutch Maeslant surge barrier. *Ocean Science*, 13(5):691–701, 2017. doi: 10.5194/os-13-691-2017. URL <https://www.ocean-sci.net/13/691/2017/>.
- E. Van Meijgaard et al. The KNMI regional atmospheric climate model RACMO version 2.1. Technical Report 302, KNMI, 2008. URL bibliotheek.knmi.nl/knmipubTR/TR302.pdf.
- Joana van Nieuwkoop, Peter Baas, Sofia Caires, en Jacco Groeneweg. On the consistency of the drag between air and water in meteorological, hydrodynamic and wave models. *Ocean Dynamics*, 65(7):989–1000, Jul 2015. ISSN 1616-7228. doi: 10.1007/s10236-015-0849-3. URL <https://doi.org/10.1007/s10236-015-0849-3>.
- A. Weill, L. Eymard, G. Caniaux, D. Hauser, S. Planton, H. Dupuis, A. Brut, C. Guerin, P. Nacass, A. Butet, S. Cloche, R. Pedreros, P. Durand, D. Bourras, H. Goirdani, G. Lachaud, en G. Bouhours. Toward a better determination of turbulent air–sea fluxes from several experiments. *Journal of Climate*, 16:600–618, 2003.

A Synoptische karakterisering en opzetreksen van de geselecteerde stormen

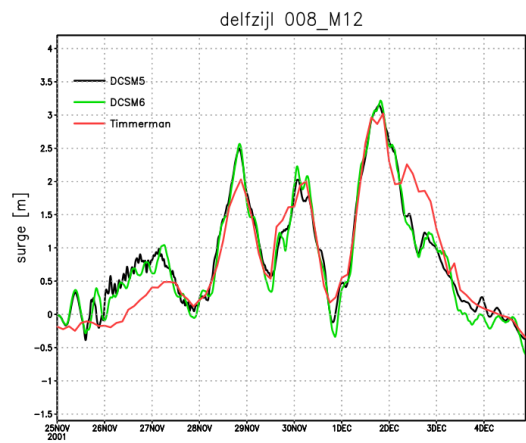
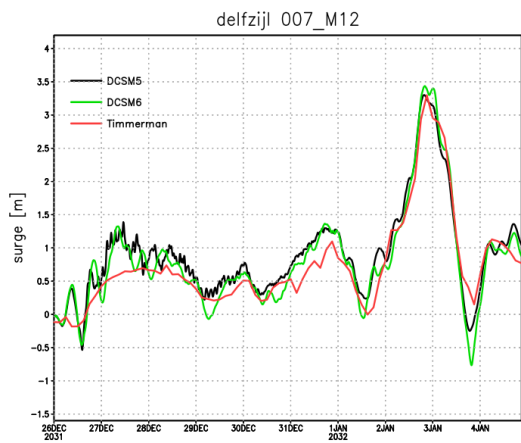
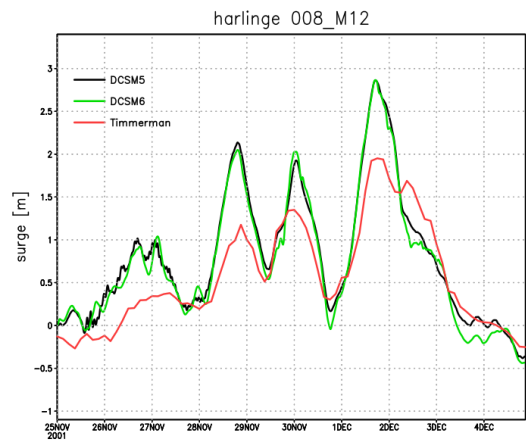
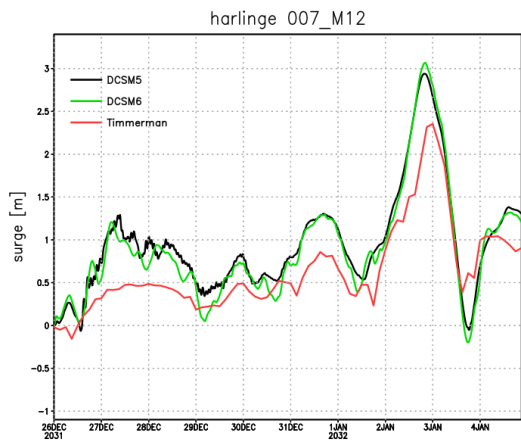
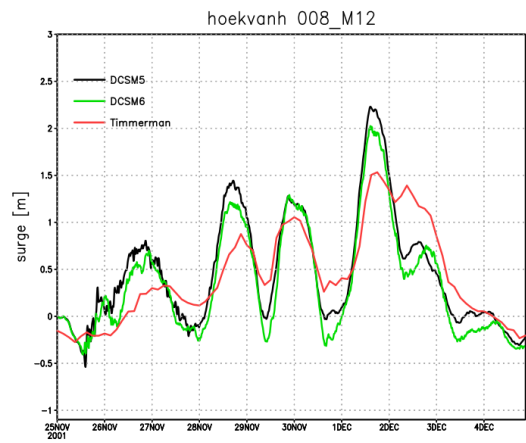
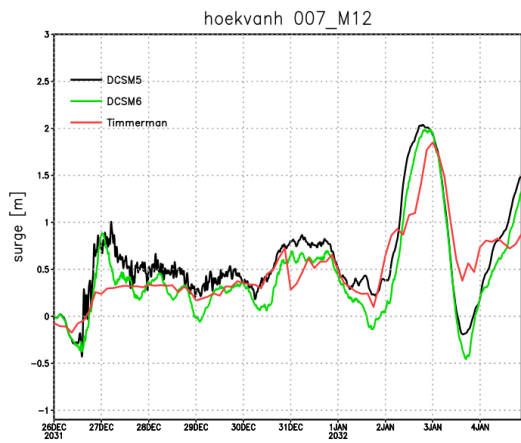
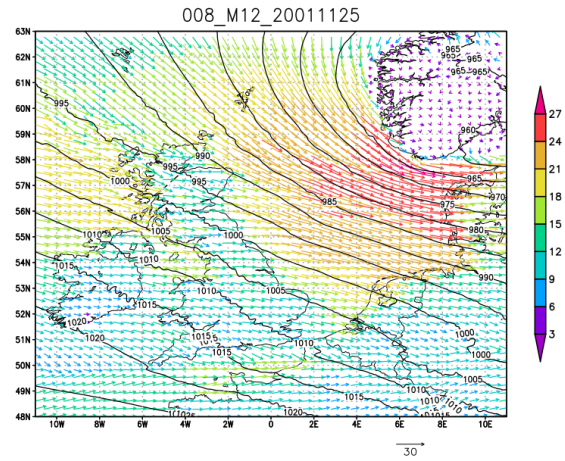
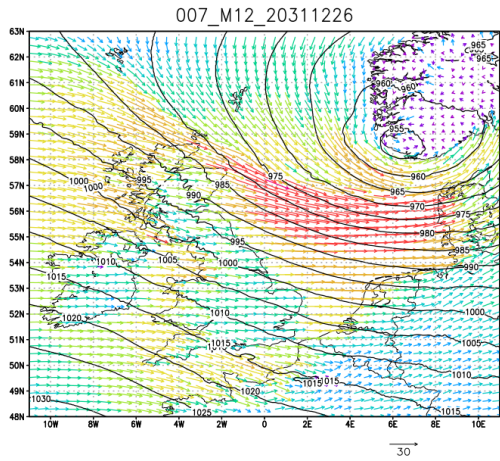
Hieronder volgen de MSLP patronen en wind vectoren van de stormen. In kleur de wind vectoren, in contouren MSLP. Moment: 6 uur voor maximaal hoogwater in Harlingen (001, 004-23) of Hoek van Hoek van Holland (024-043). De tijdreeksen geven de opzet weer in Hoek van Holland, Harlingen en Delfzijl.



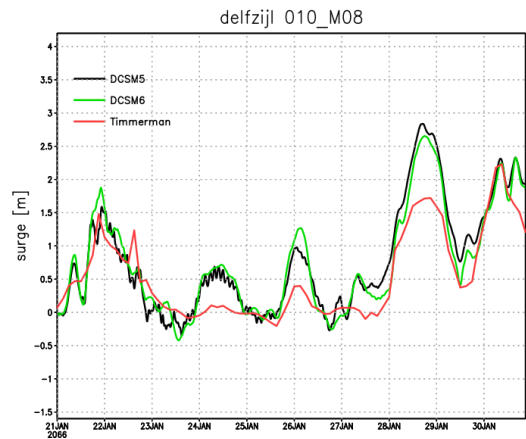
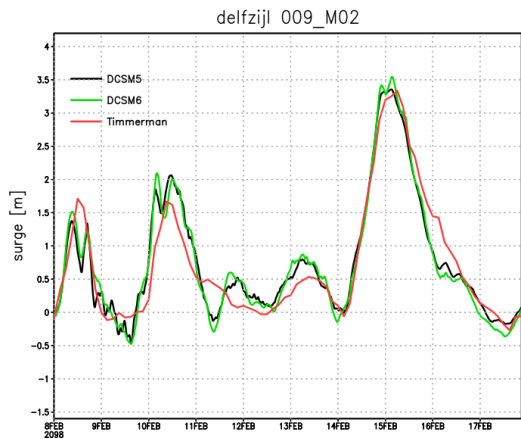
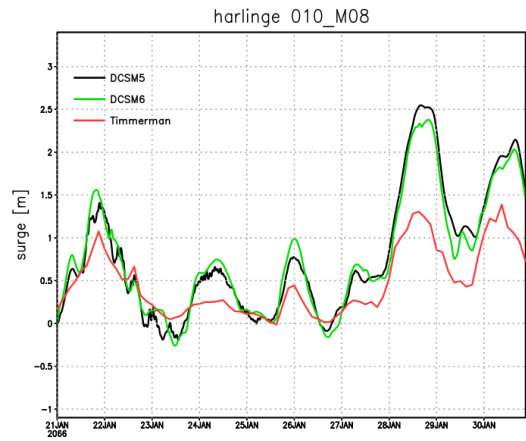
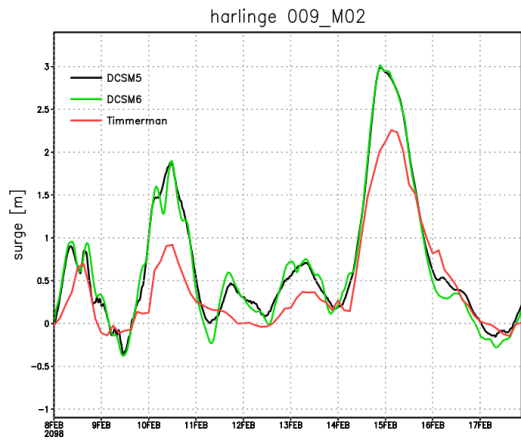
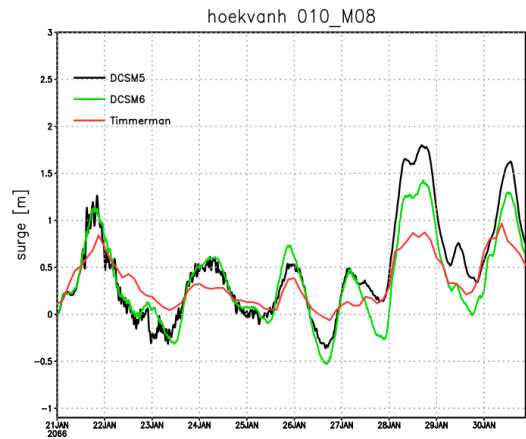
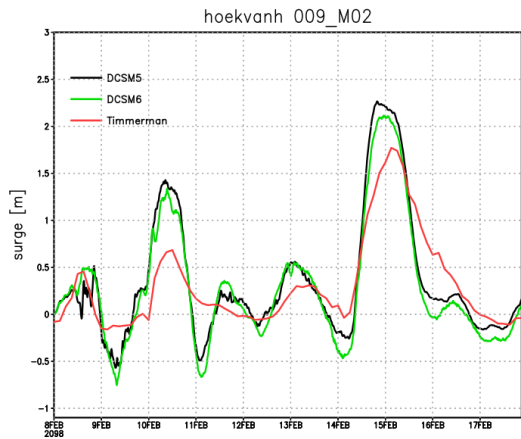
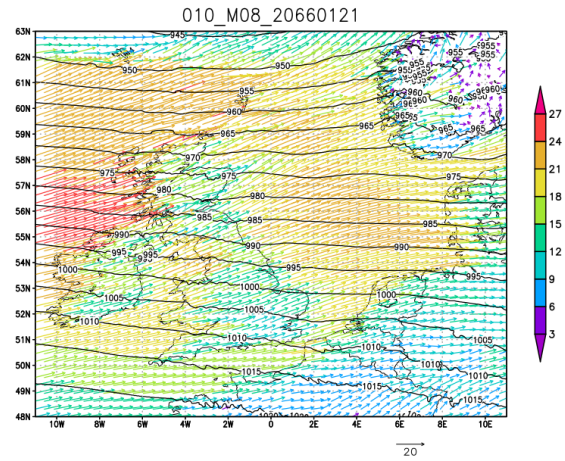
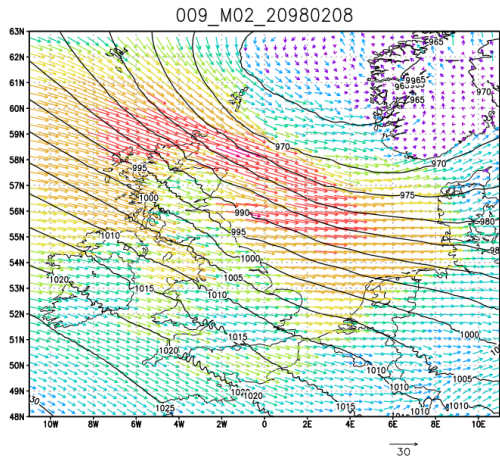
Figuur 25: Drukpatronen voor de 37 meest extreme stormen in Harlingen (001, 004-023) en Hoek van Holland (024-043)



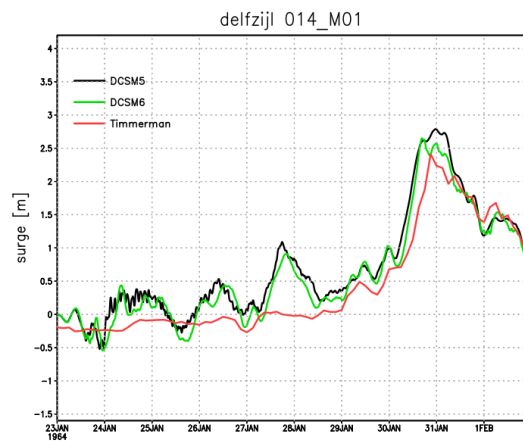
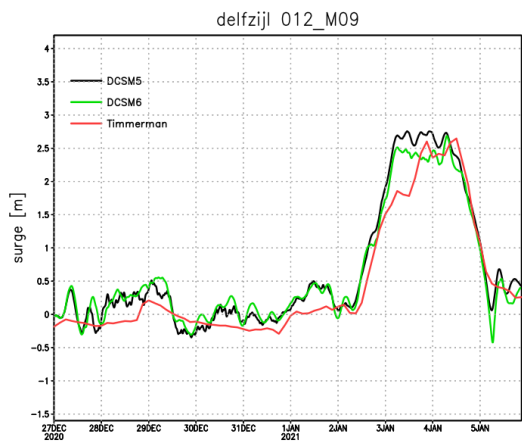
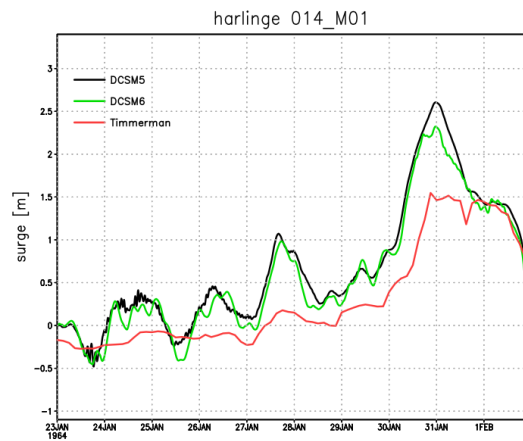
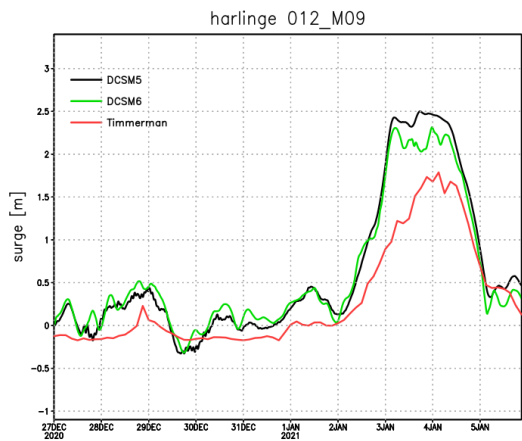
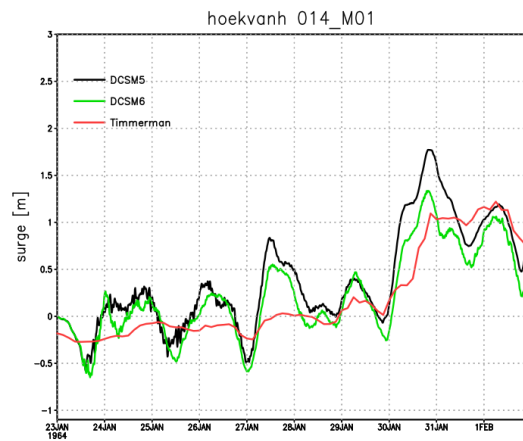
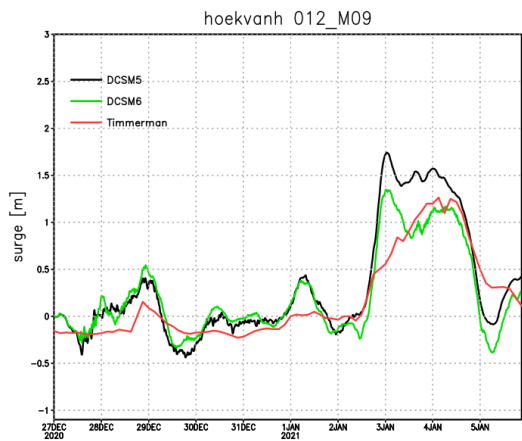
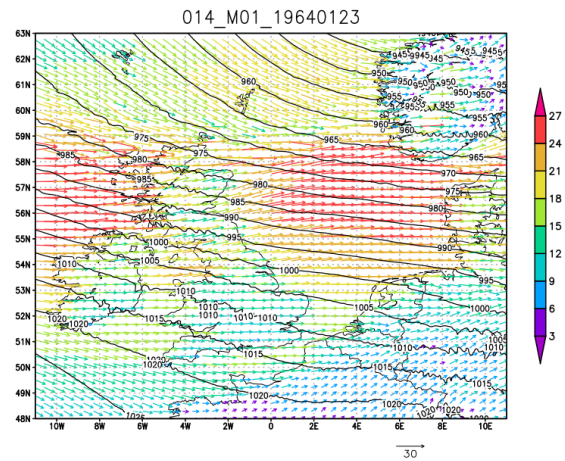
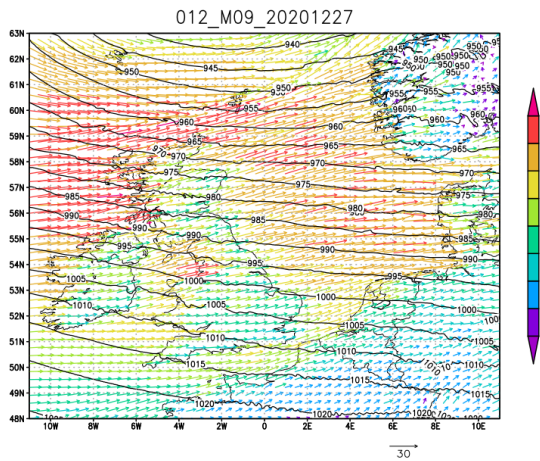
Figuur 25₅₅ (vervolg)



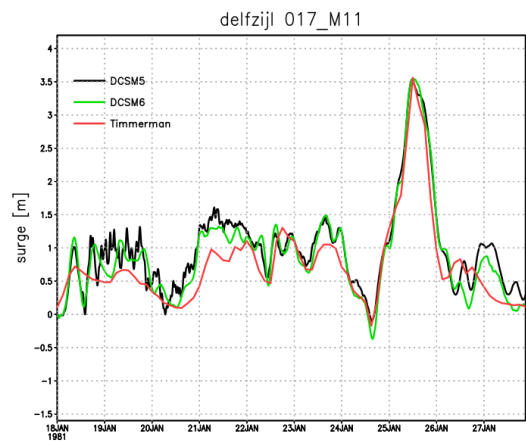
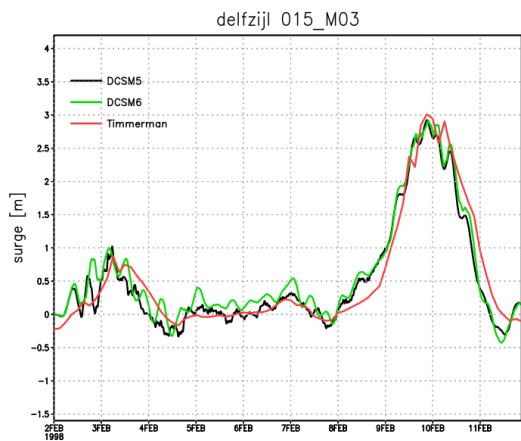
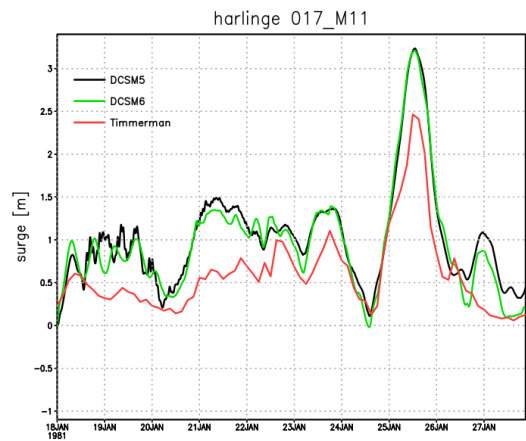
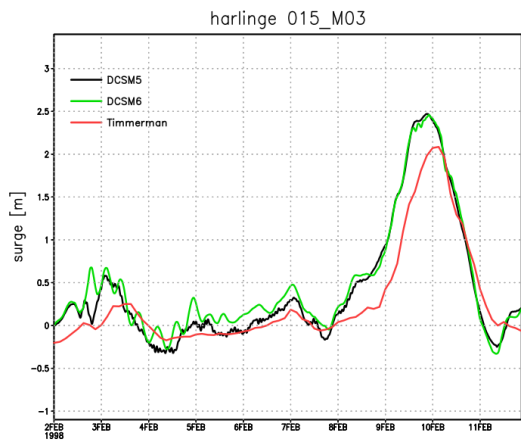
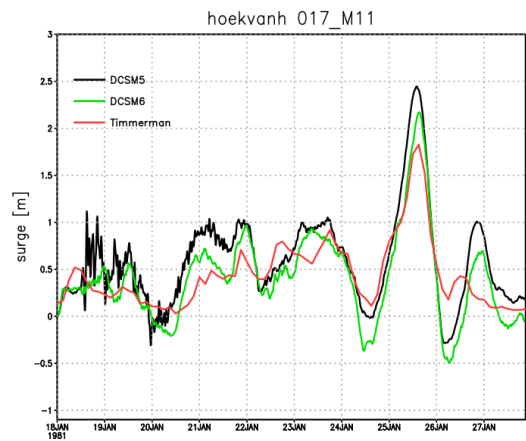
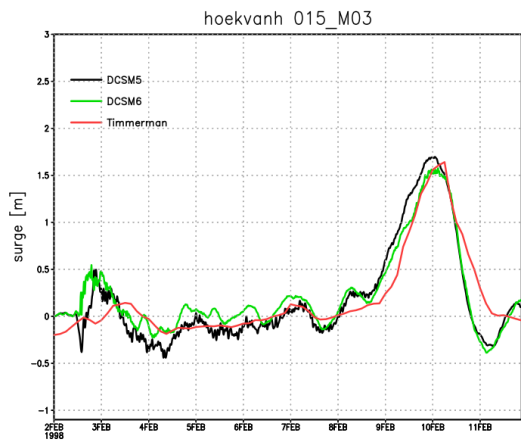
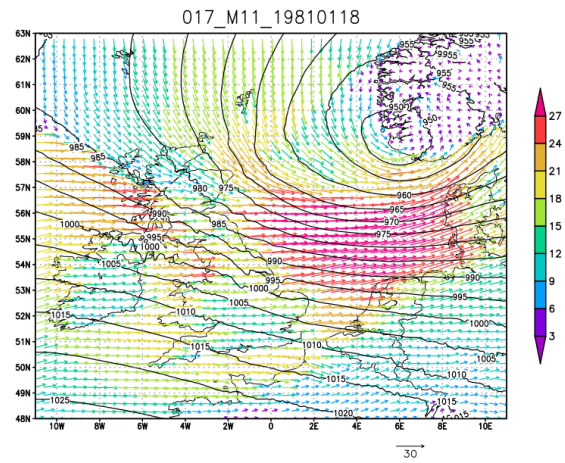
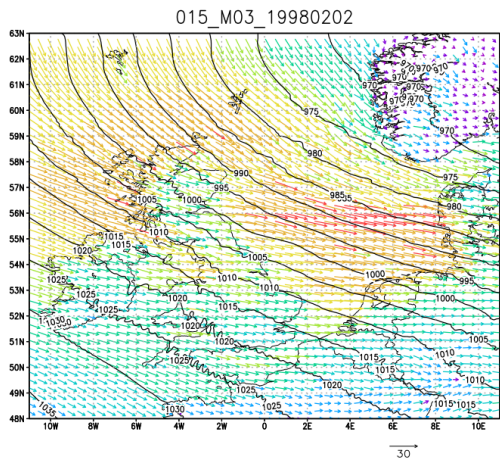
Figuur 25 (vervolg)
56



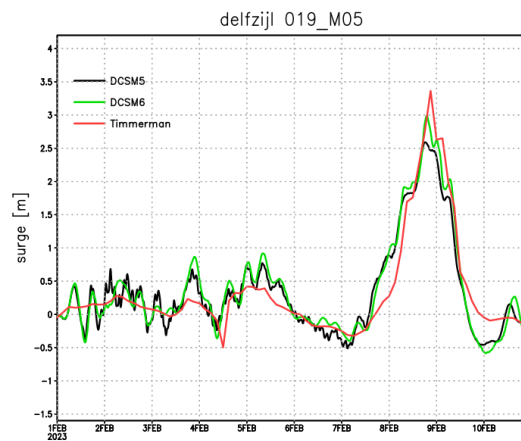
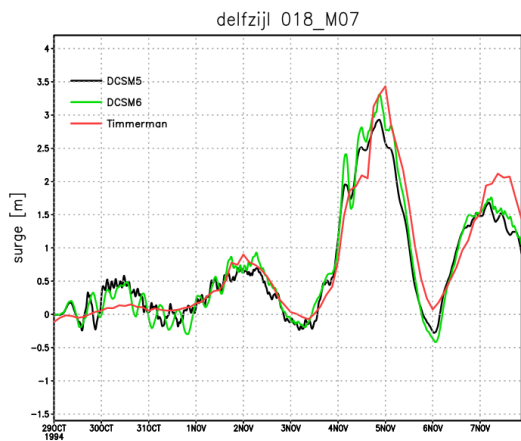
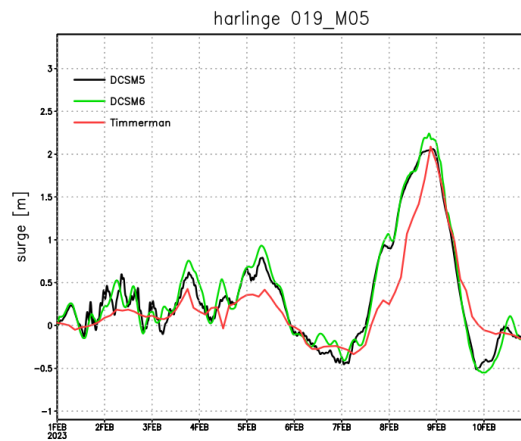
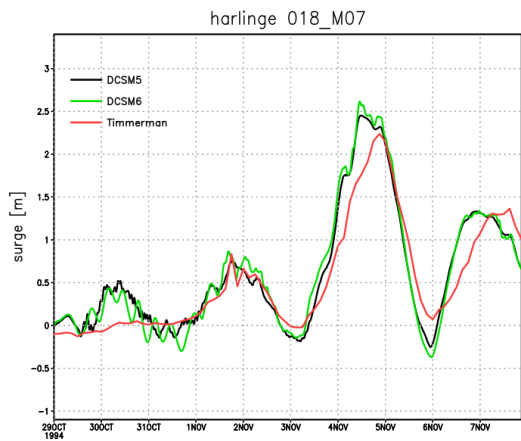
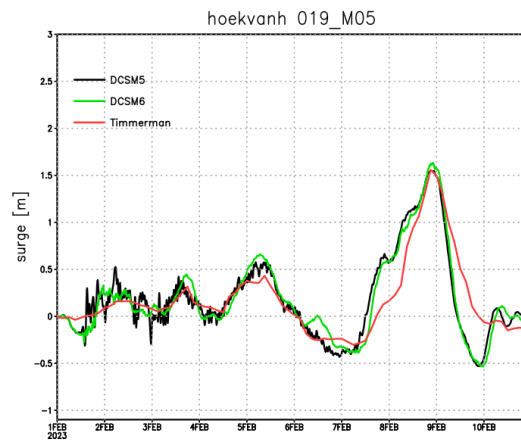
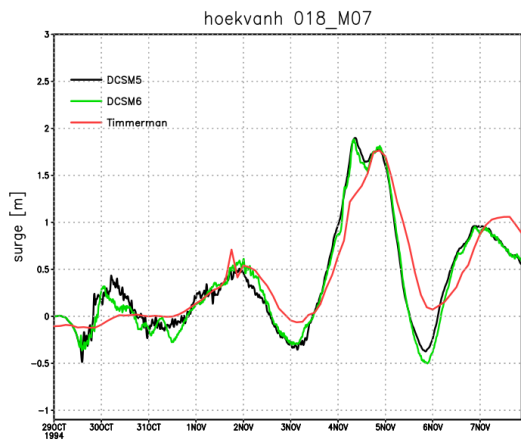
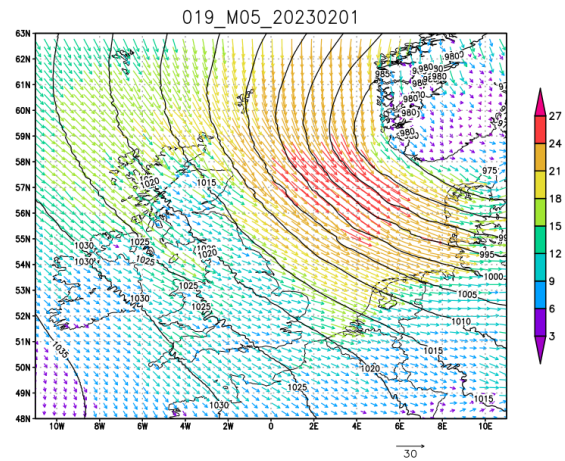
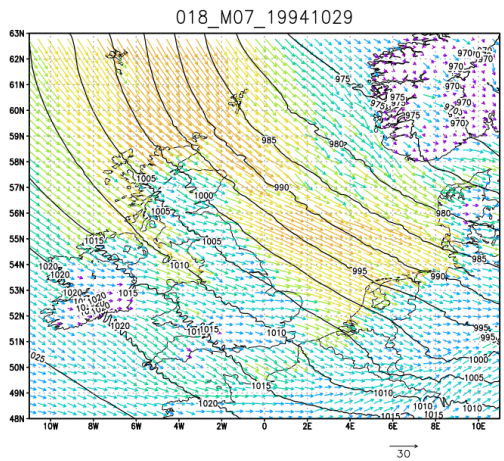
Figuur 25 (vervolg)
57



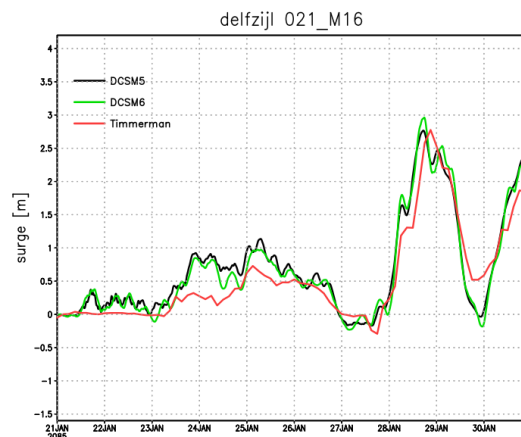
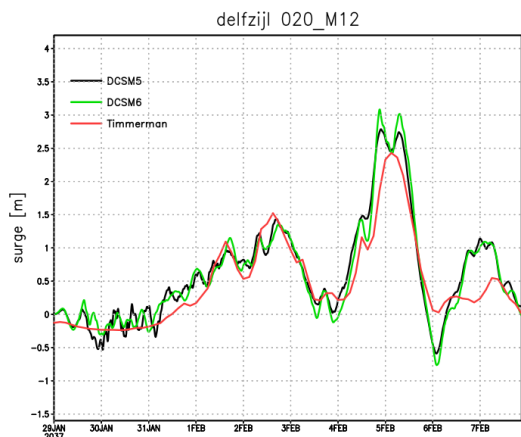
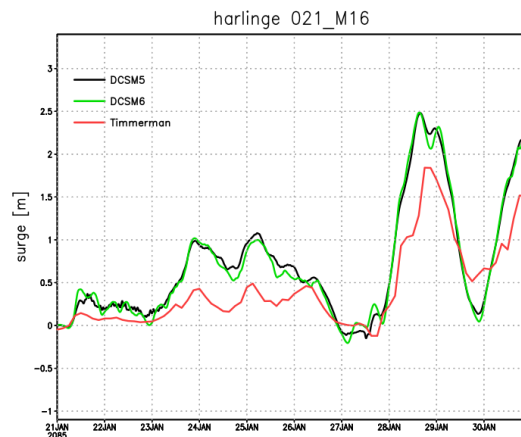
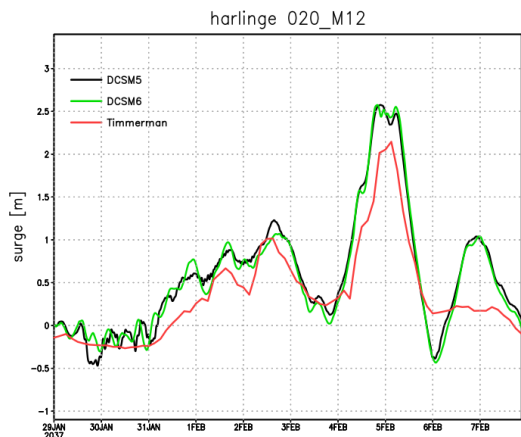
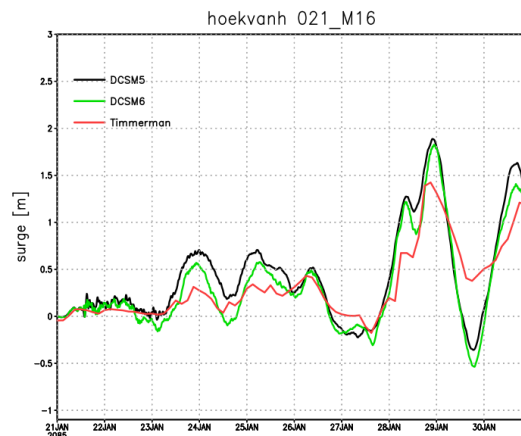
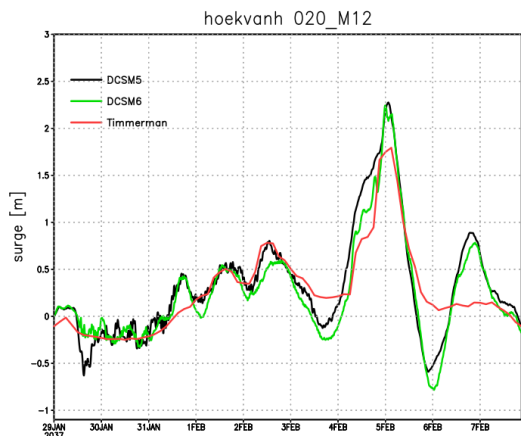
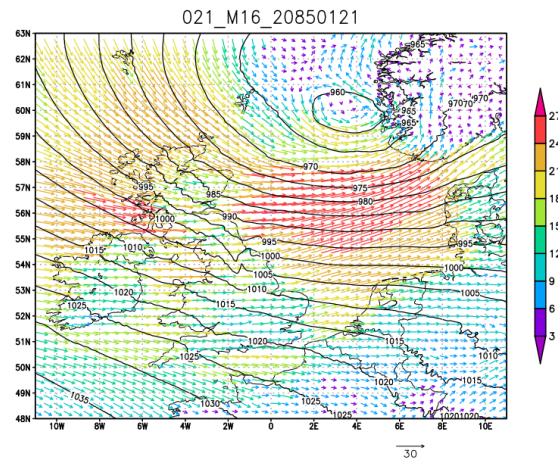
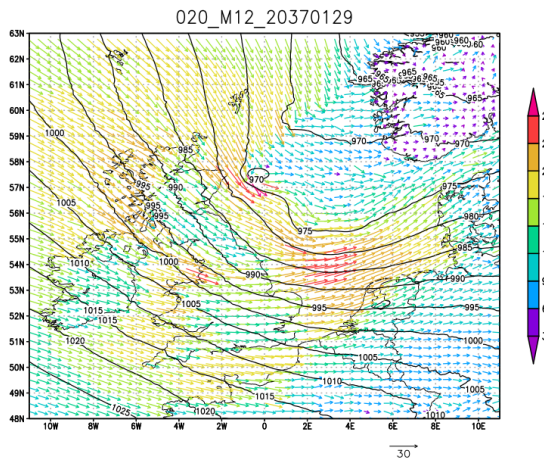
Figuur 25₃₈ (vervolg)



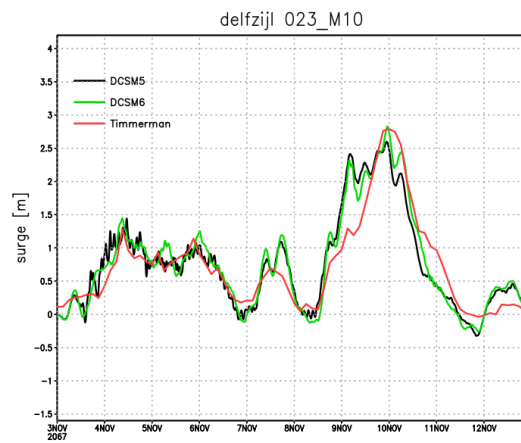
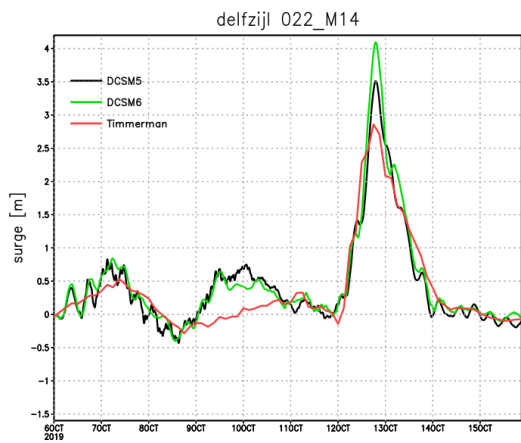
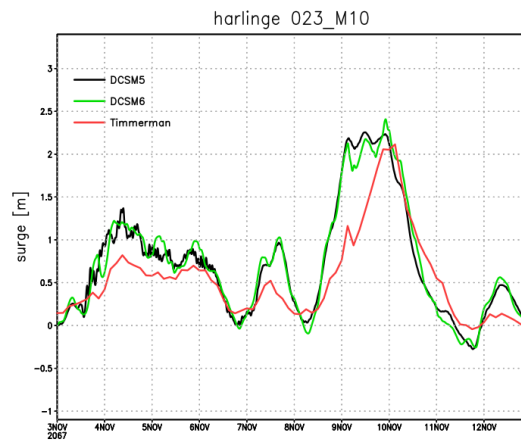
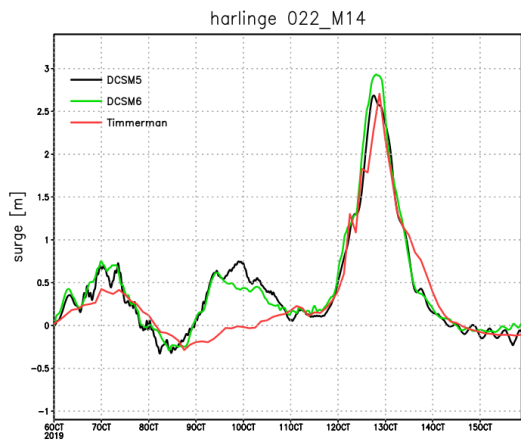
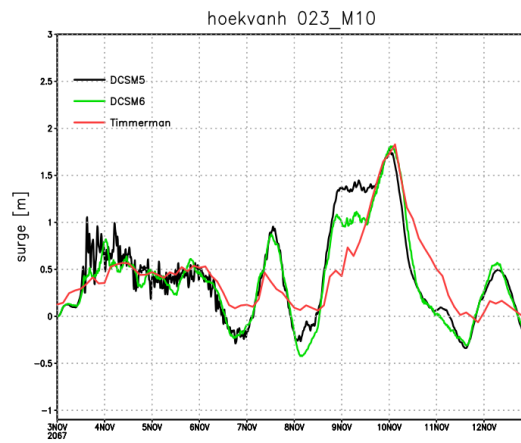
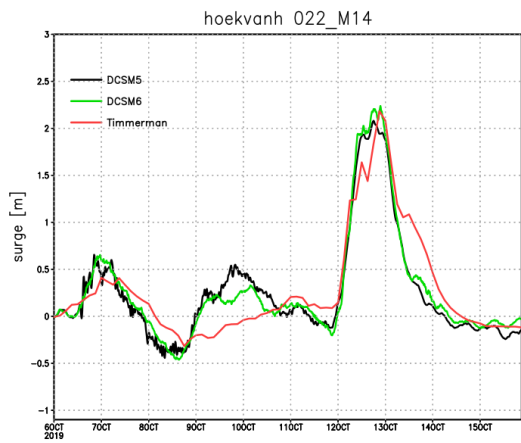
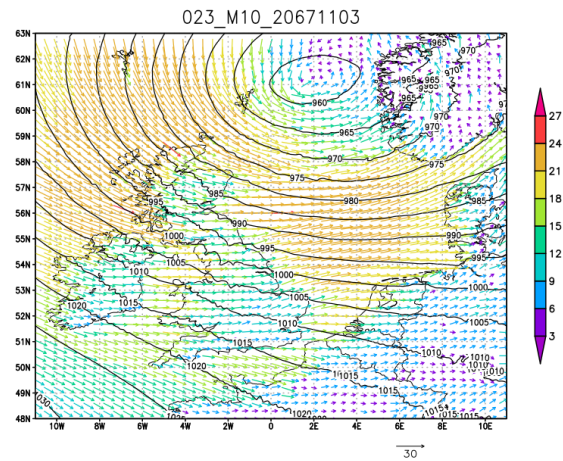
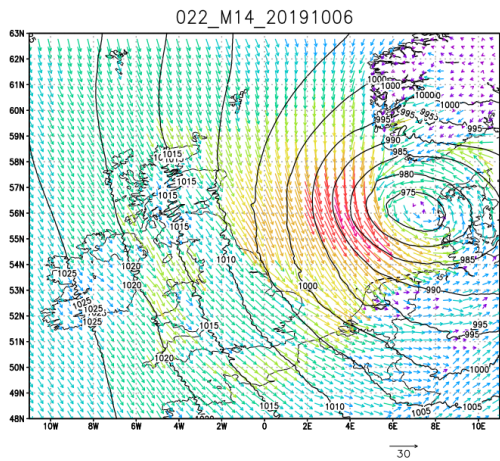
Figuur 25₉ (vervolg)



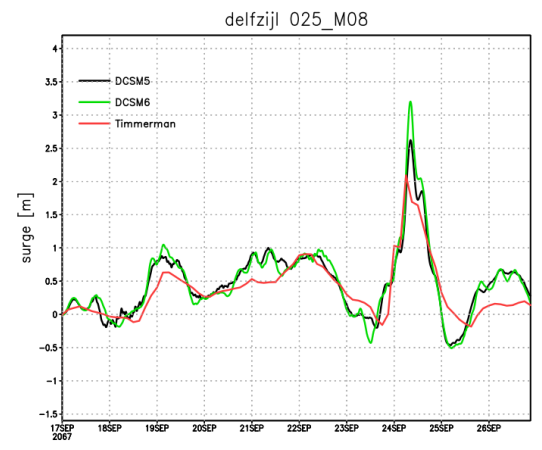
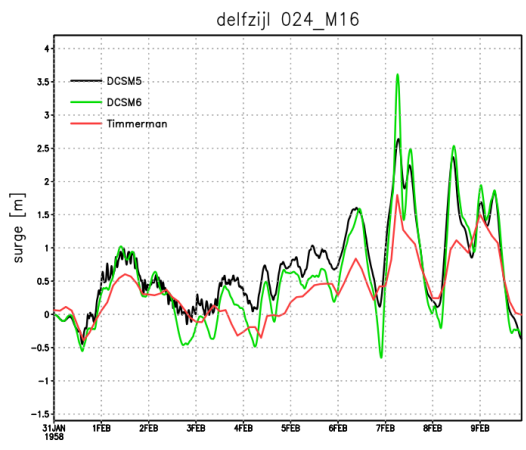
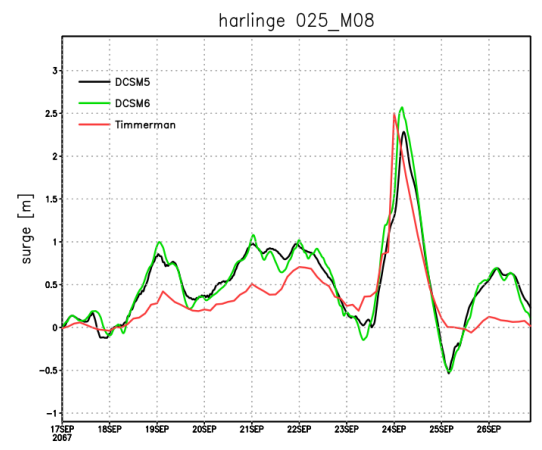
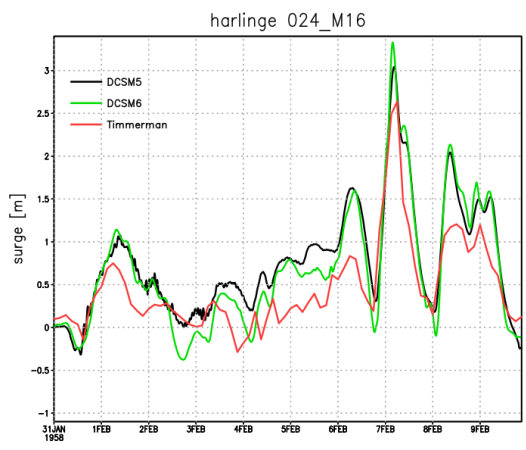
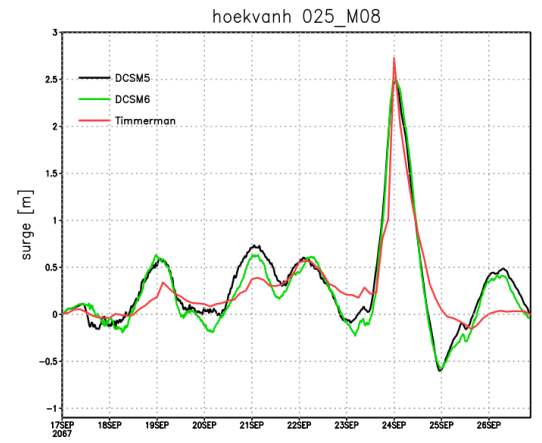
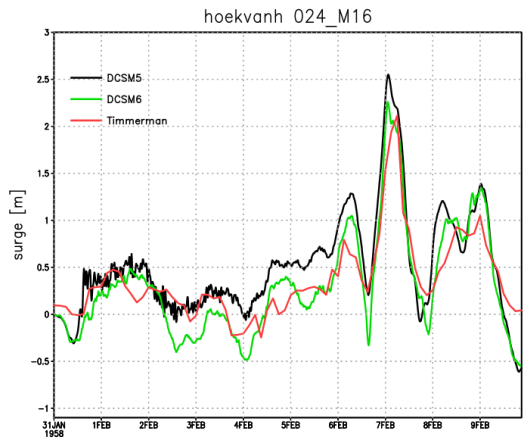
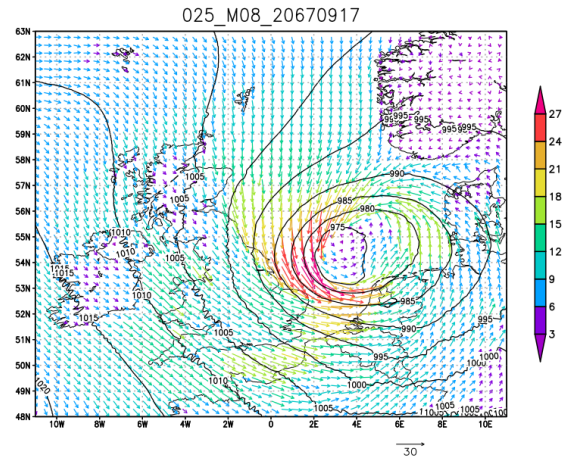
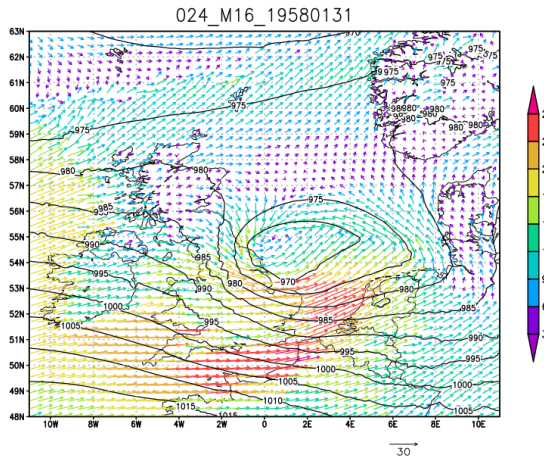
Figuur 25: (vervolg)
60



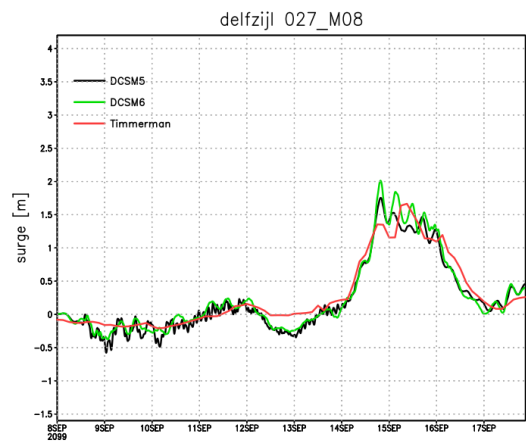
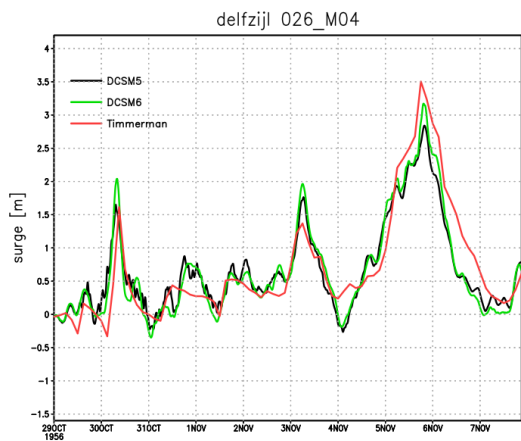
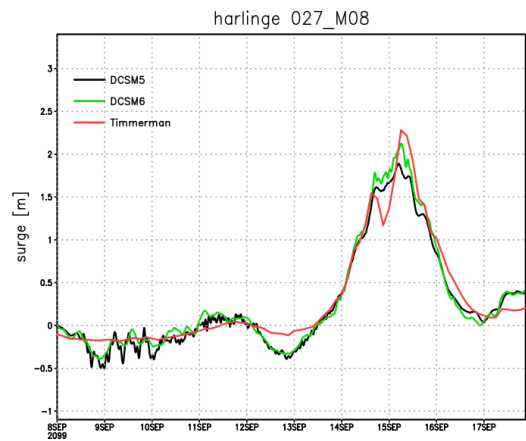
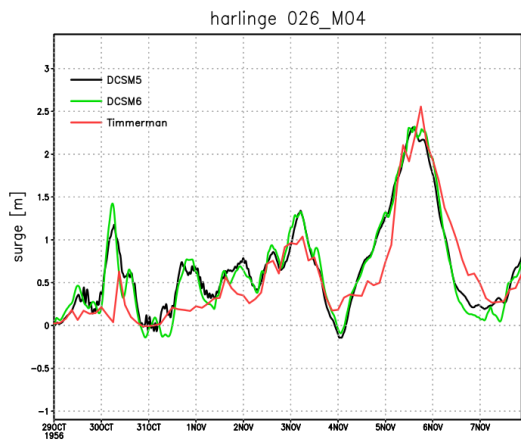
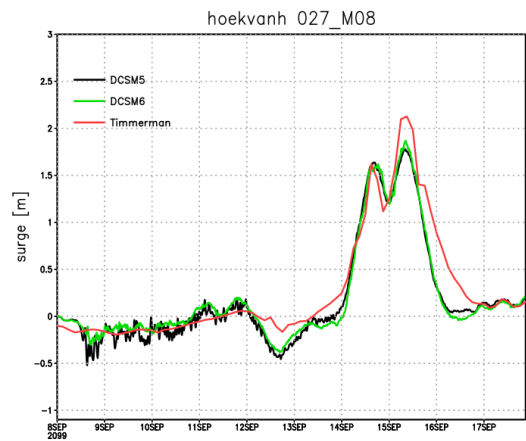
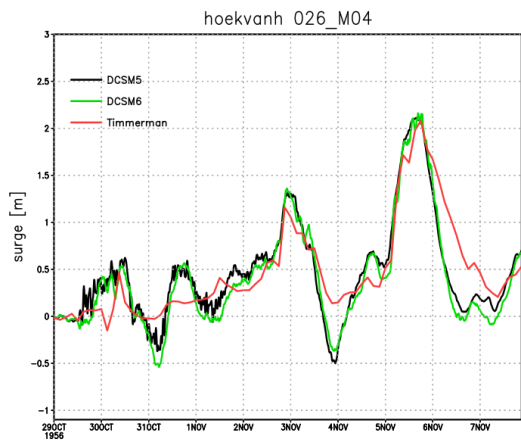
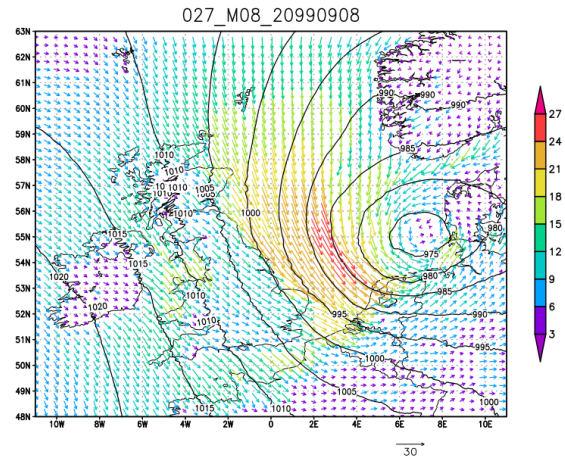
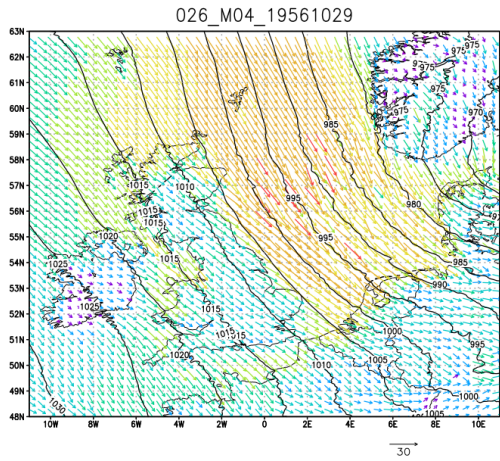
Figuur 25: (vervolg)



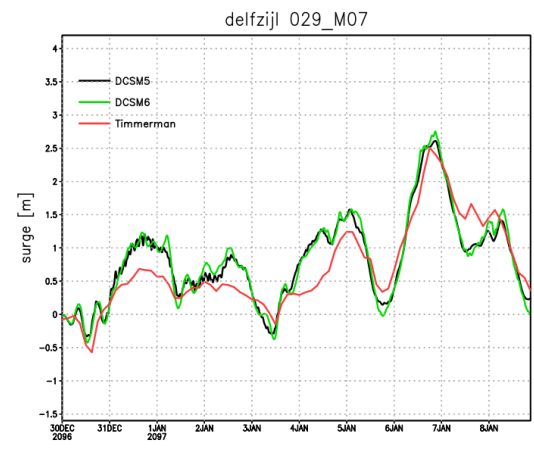
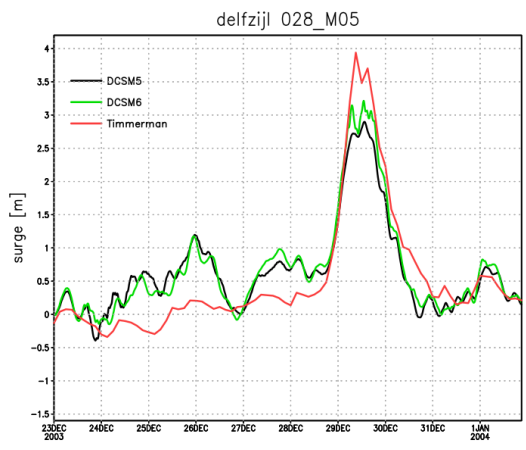
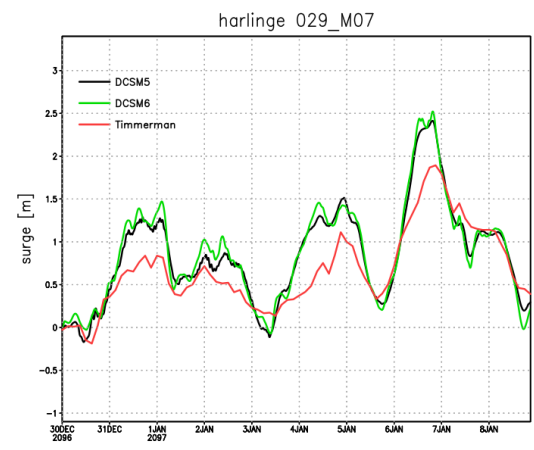
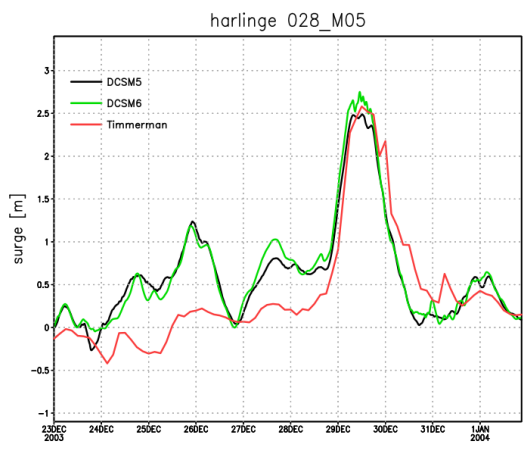
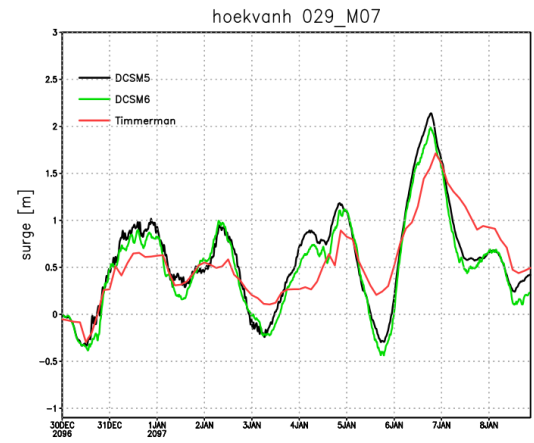
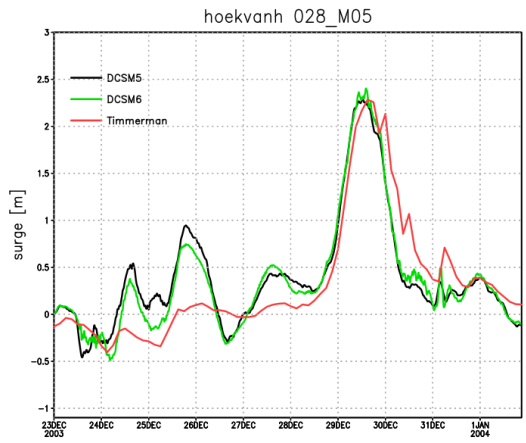
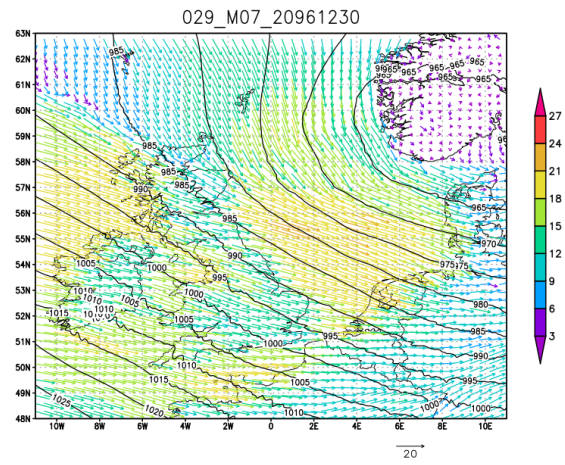
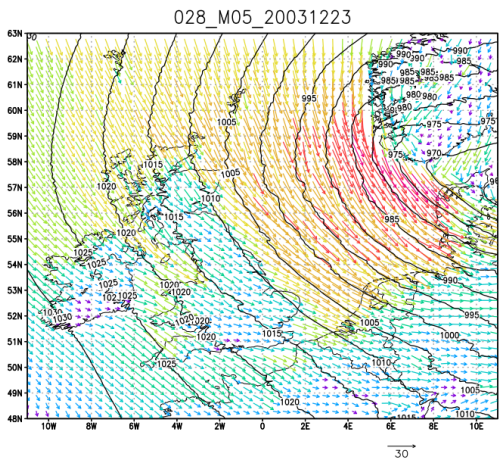
Figuur 25: (vervolg)
62



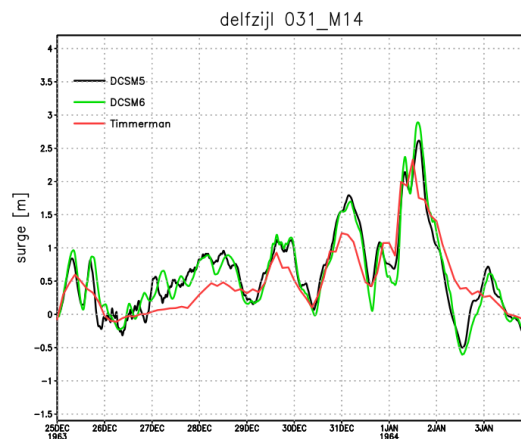
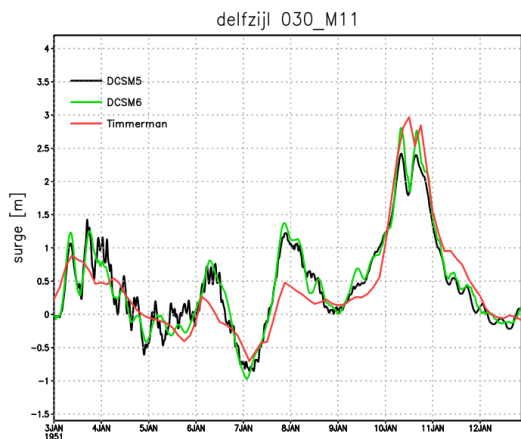
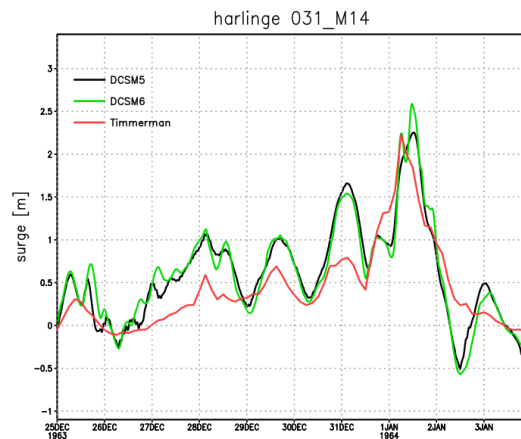
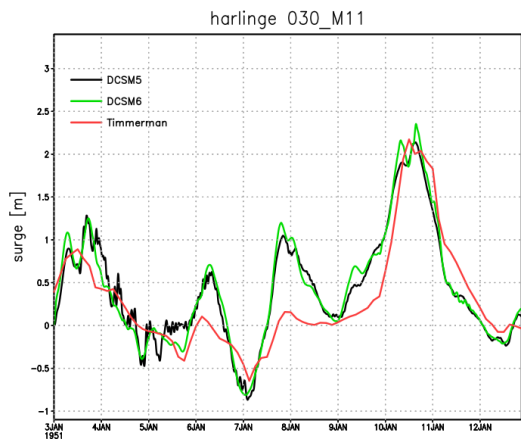
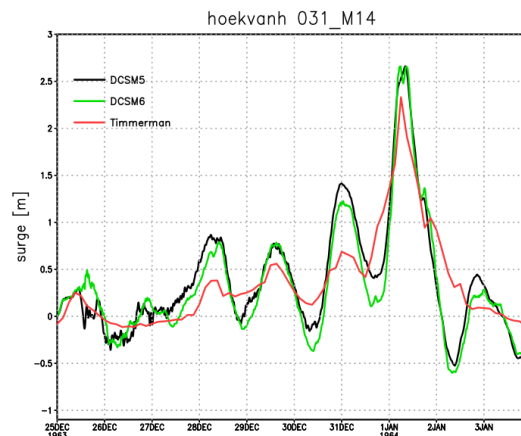
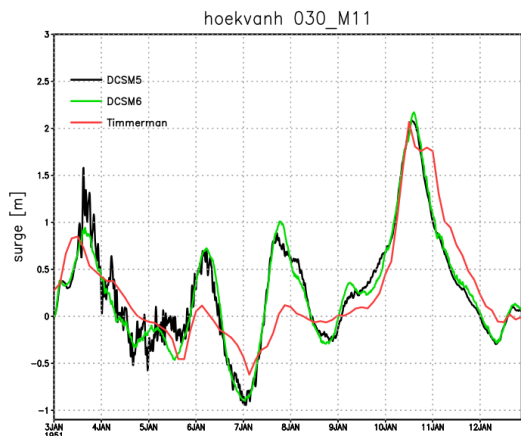
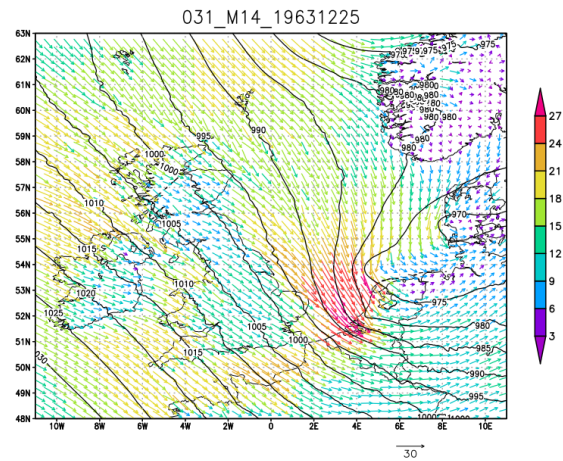
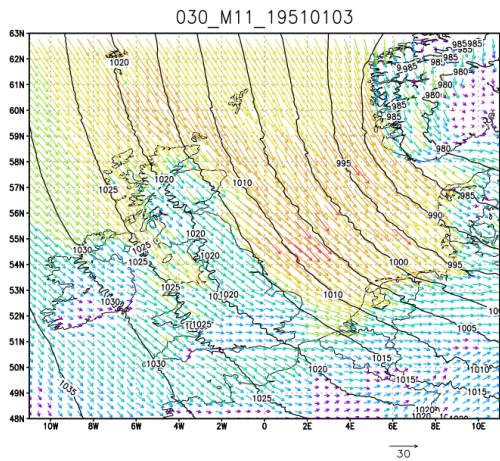
Figuur 25: (vervolg)
63



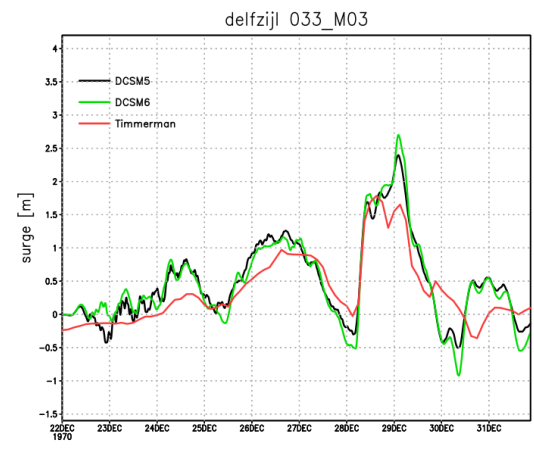
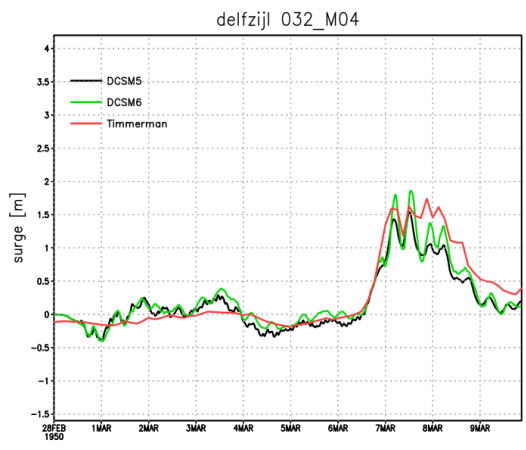
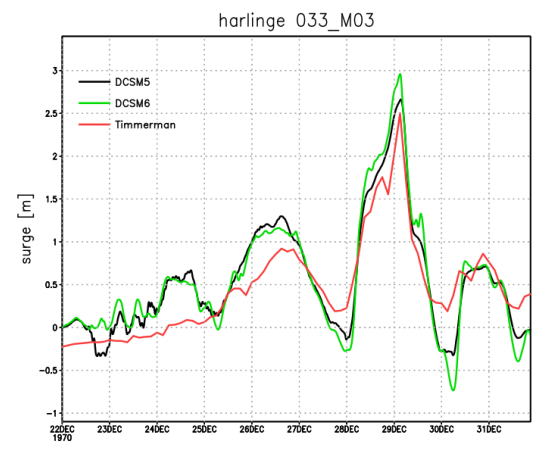
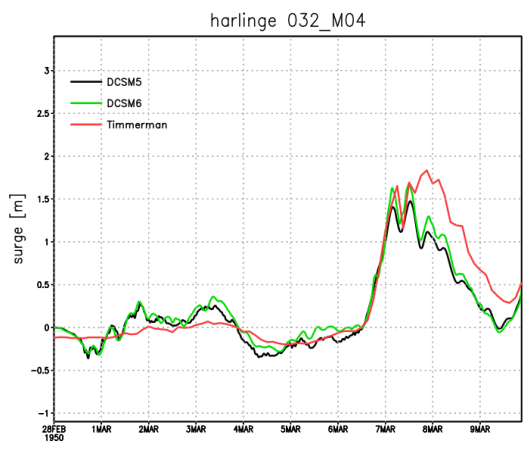
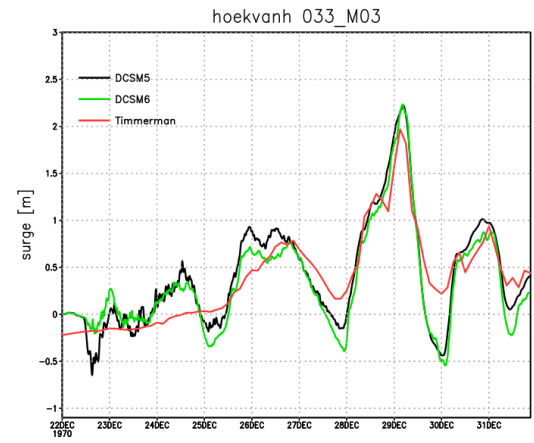
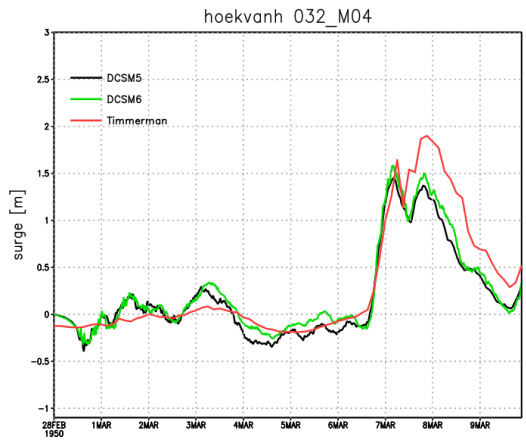
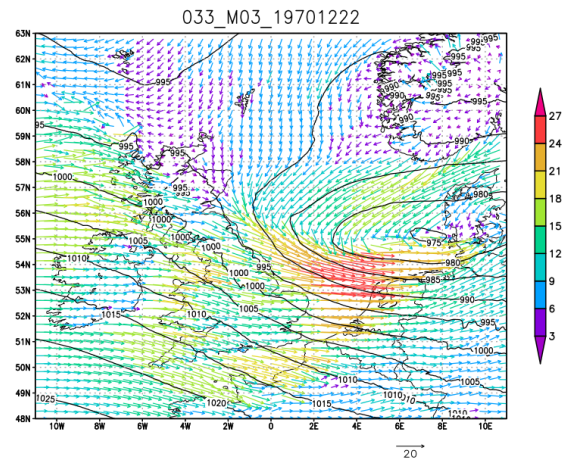
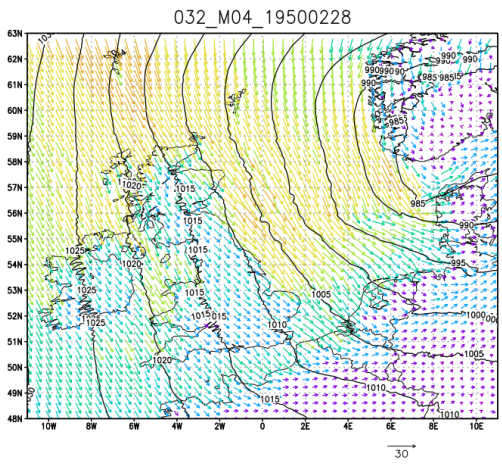
Figuur 25: (vervolg)
64



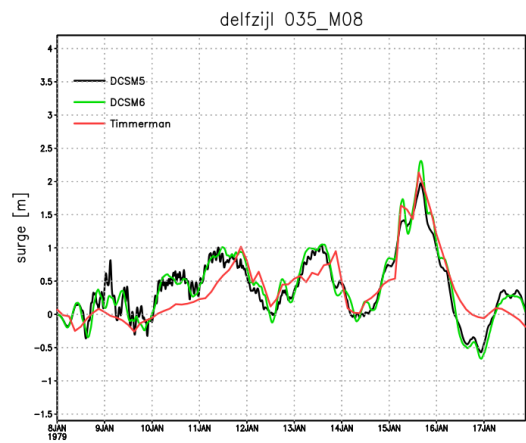
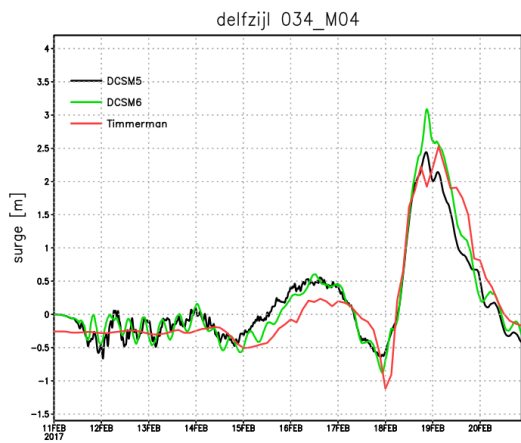
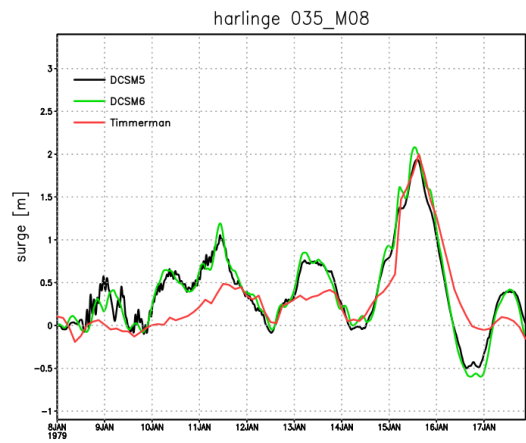
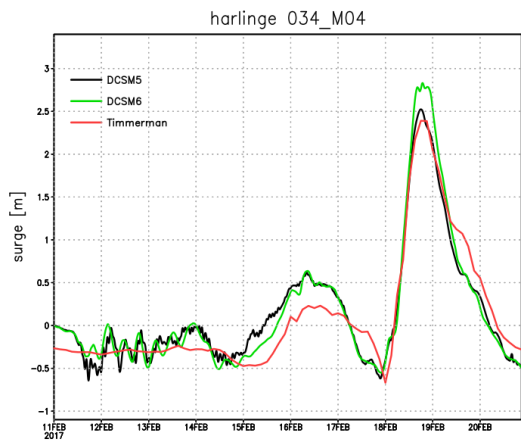
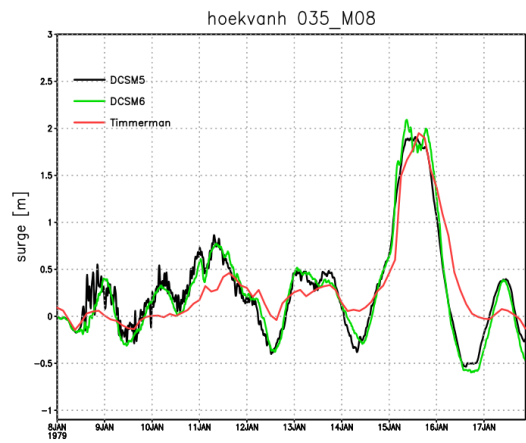
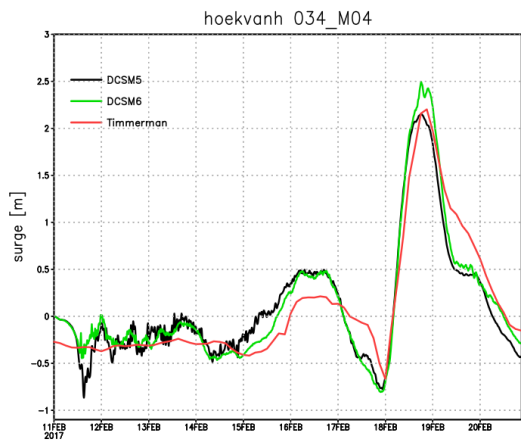
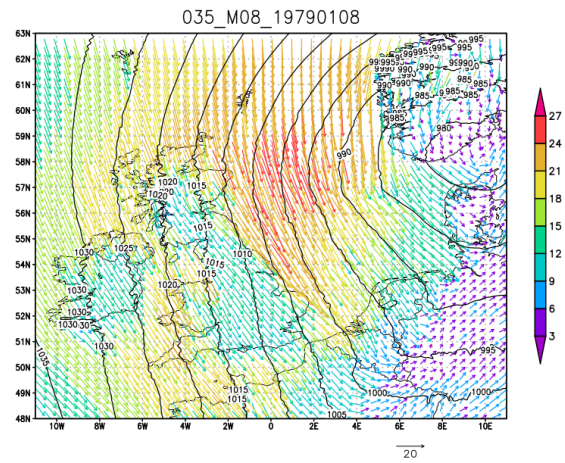
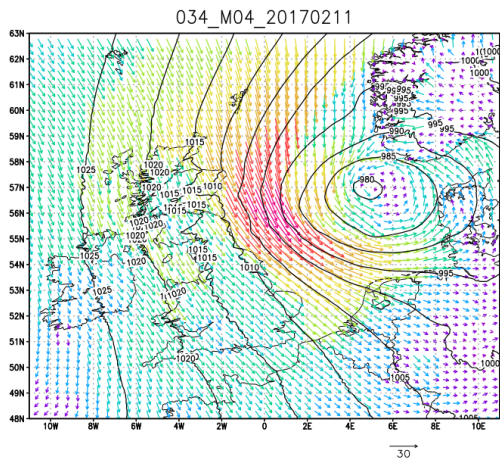
Figuur 25 (vervolg)



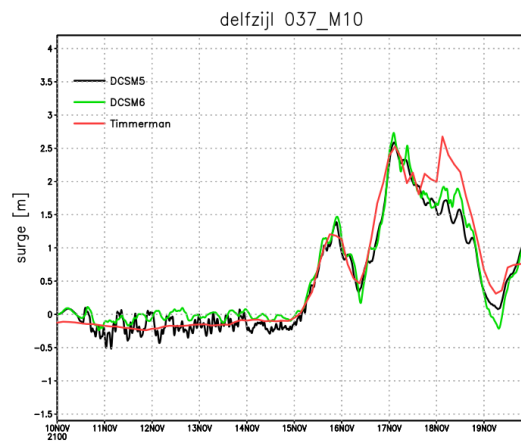
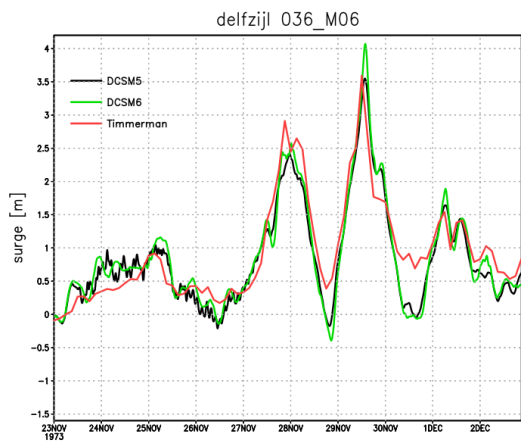
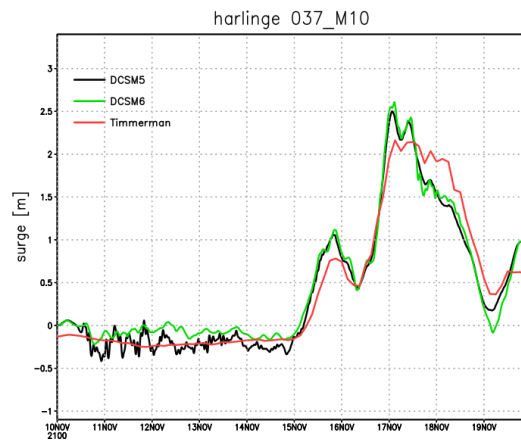
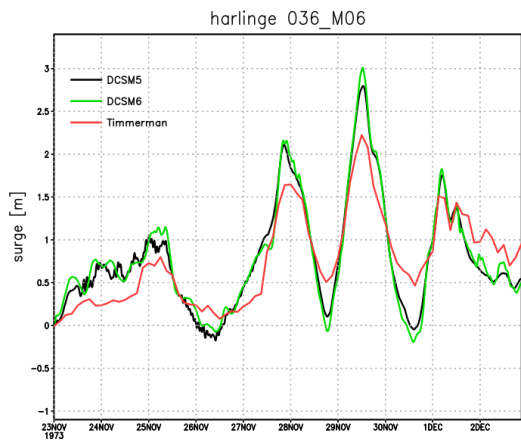
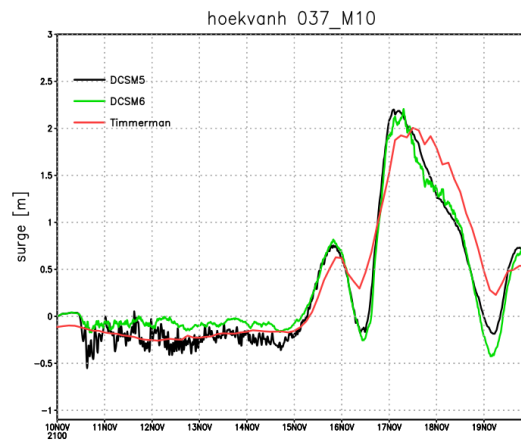
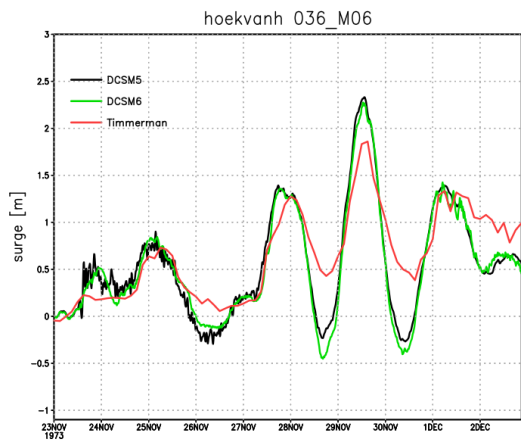
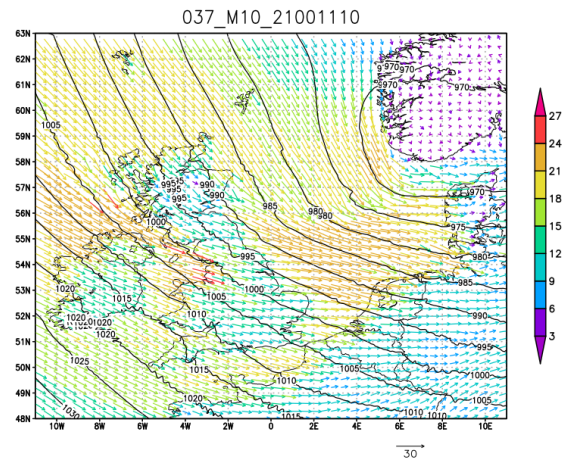
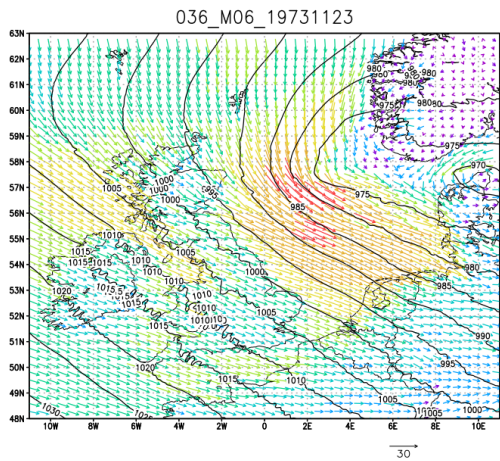
Figuur 25: (vervolg)
66



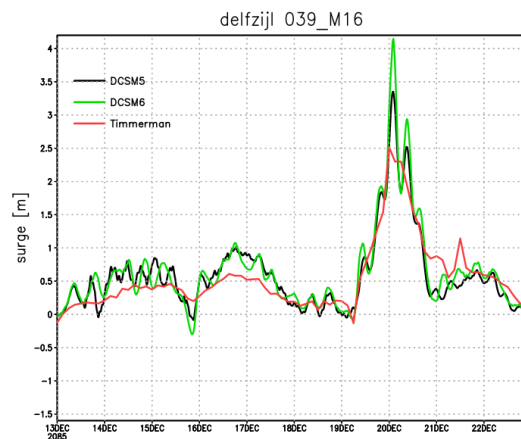
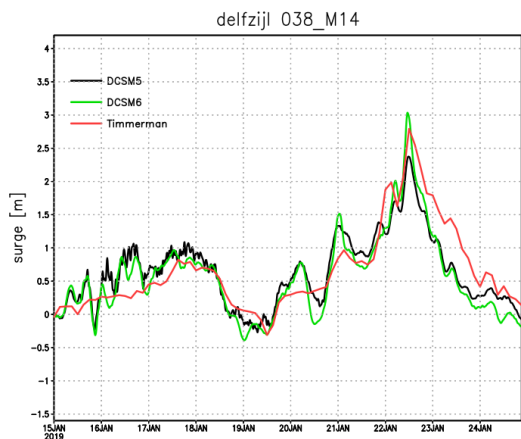
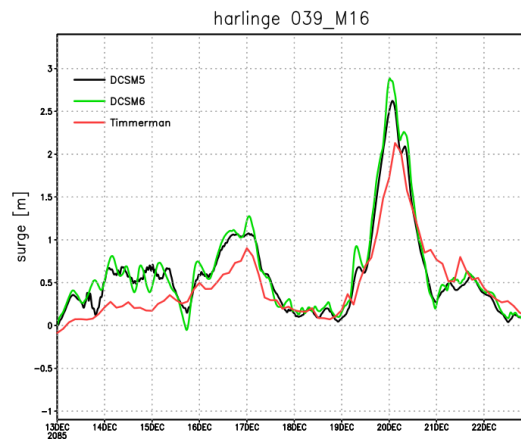
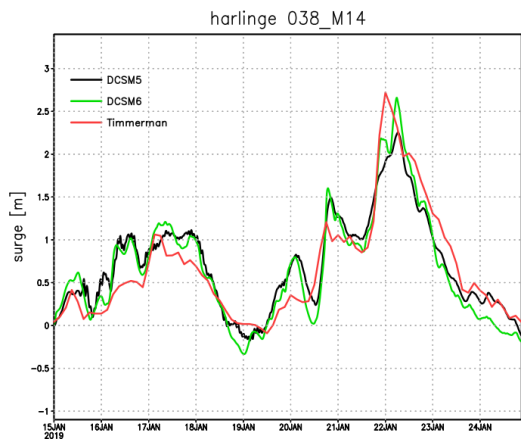
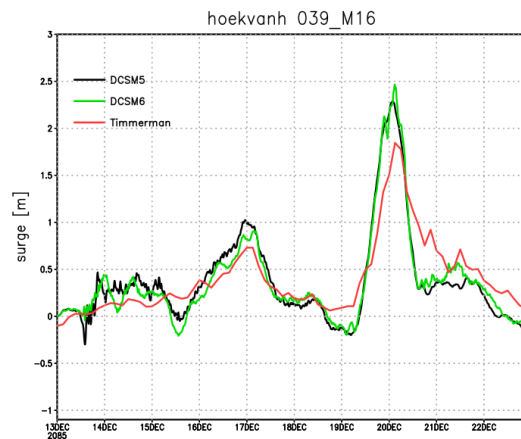
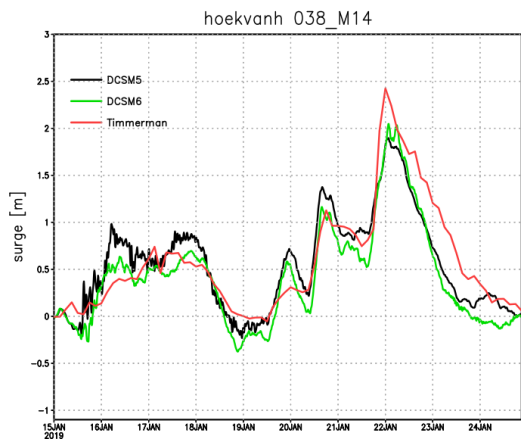
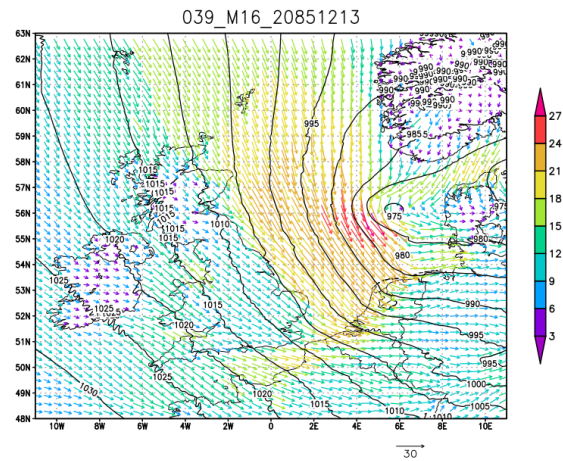
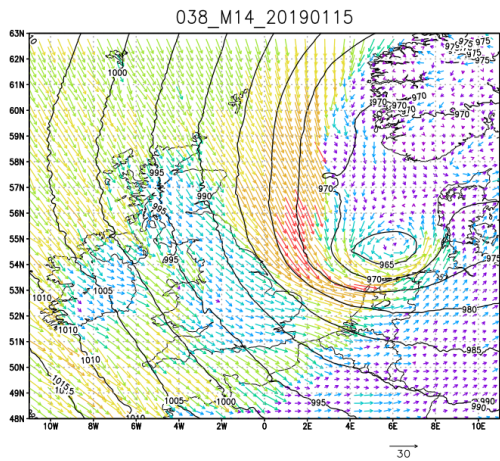
Figuur 25: (vervolg)
67



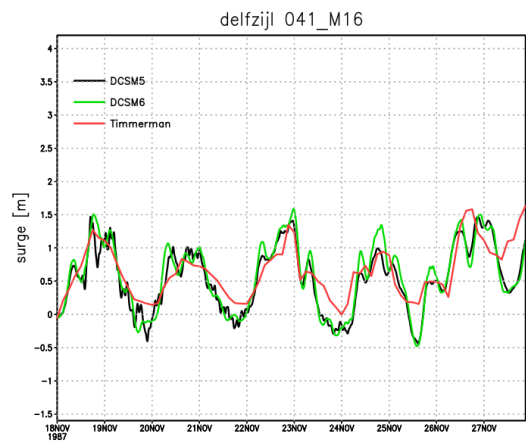
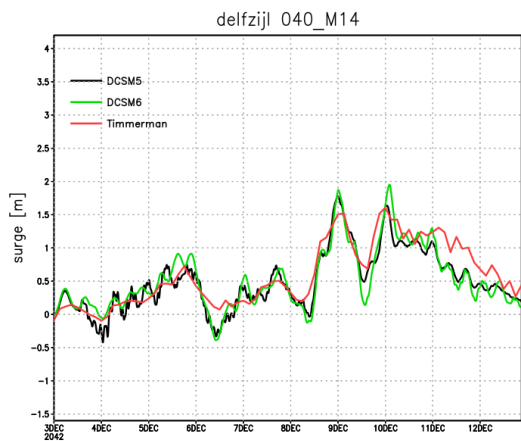
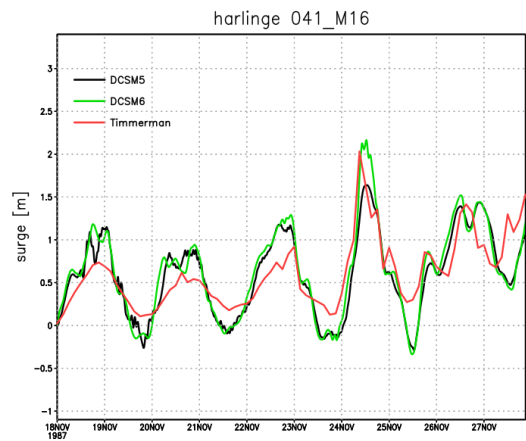
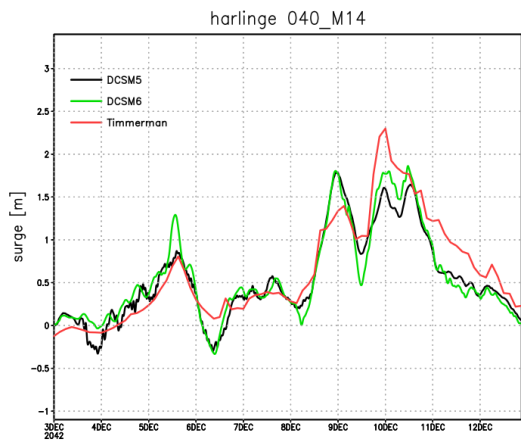
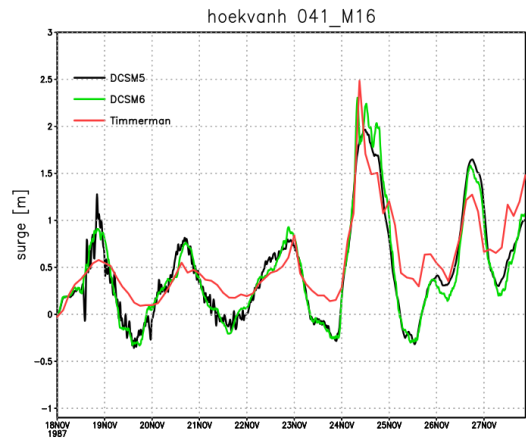
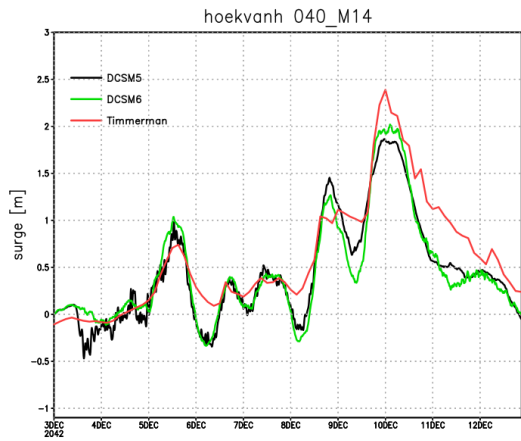
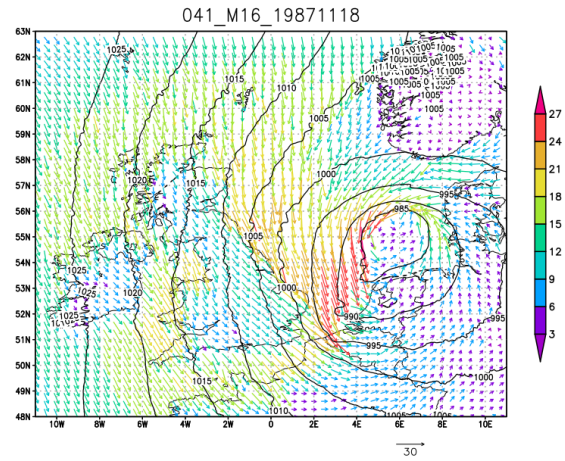
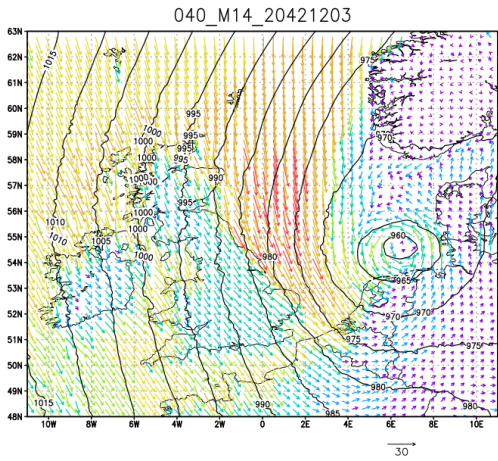
Figuur 25: (vervolg)
68



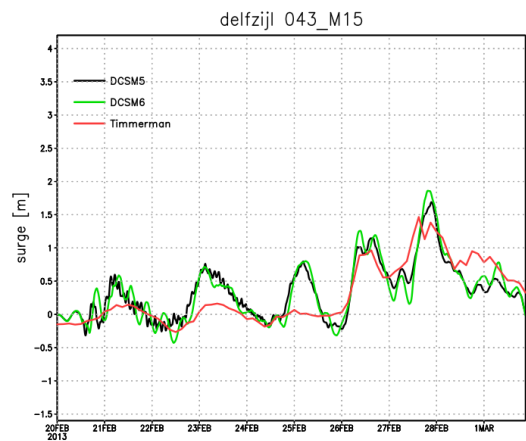
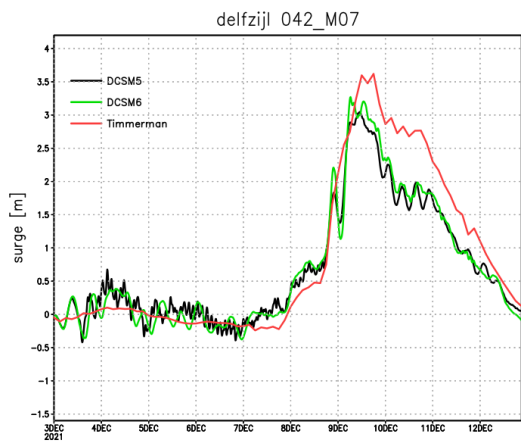
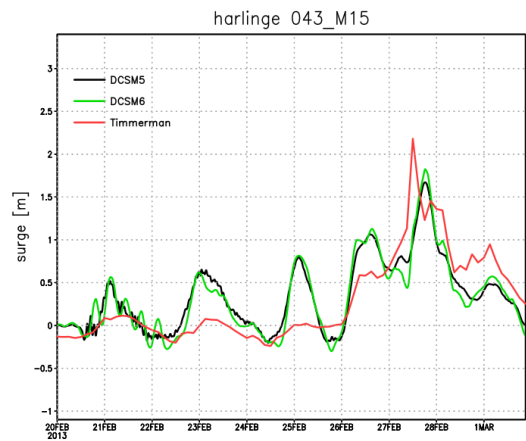
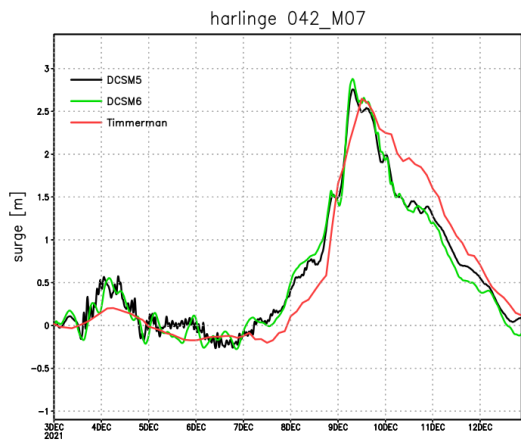
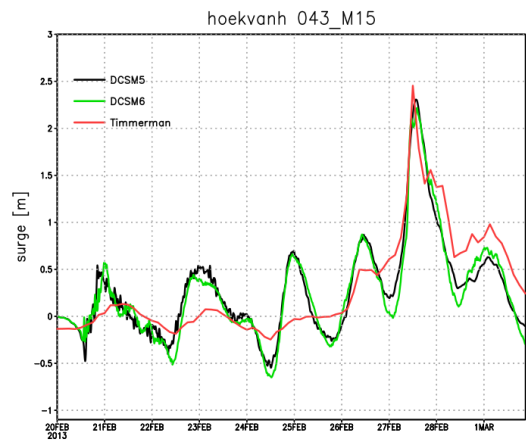
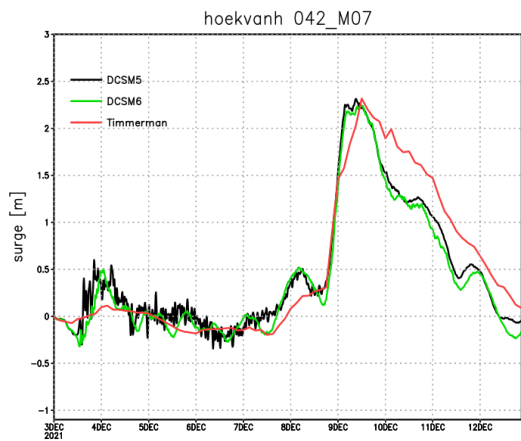
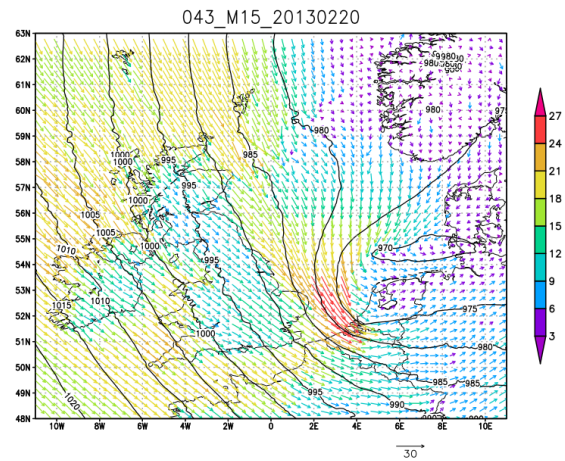
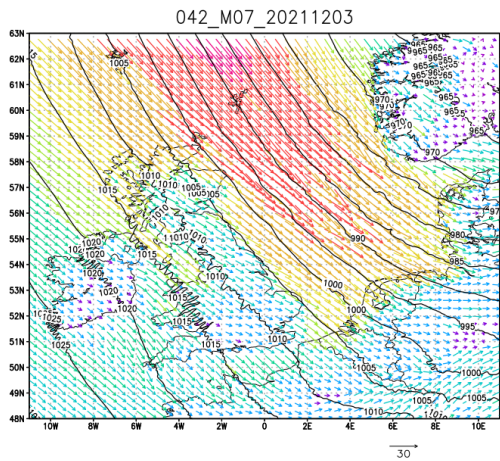
Figuur 25₆₉ (vervolg)



Figuur 25₇₀ (vervolg)



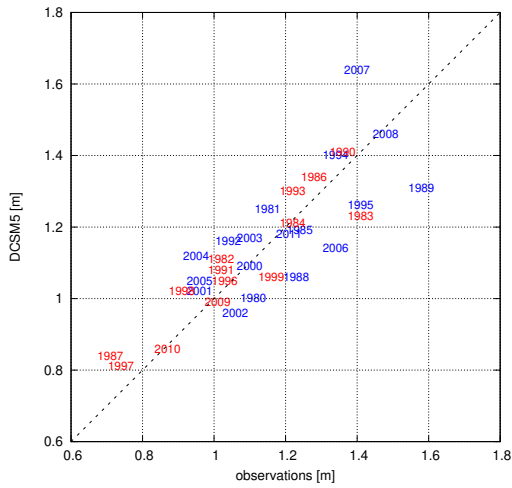
Figuur 25₁ (vervolg)



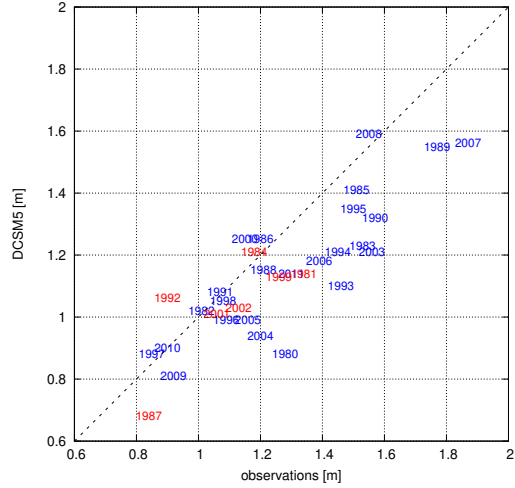
Figuur 25₇₂ (vervolg)

B Scheve opzetten uit ERA5/DCSM5

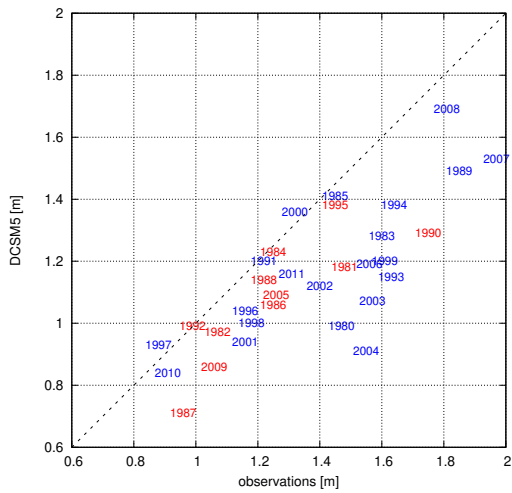
Figuur 26 toont de scatterplots van de waargenomen scheve opzet jaarmaxima (1979-2018) in 6 stations langs de Nederlandse kust tegenover de berekende opzetten met DCSM5 met de stress van ERA5 als input. De cijfers geven het jaar aan waaruit het maximum komt. Een blauw cijfer betekent dat DCSM5 het jaarmaximum aan dezelfde stormvloed toekent als is waargenomen, voor rode cijfers vindt DCSM5 een andere stormvloed die het jaarmaximum oplevert.



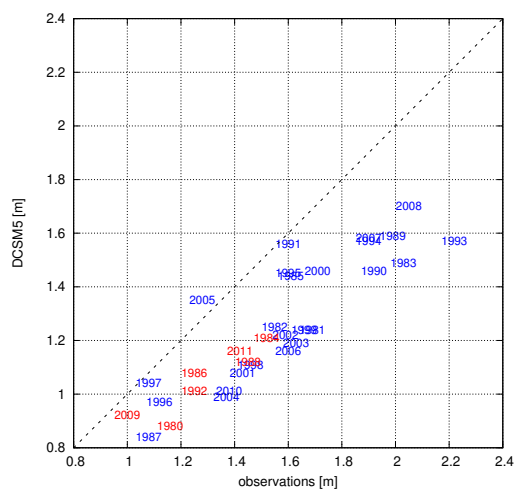
(a) Vlissingen



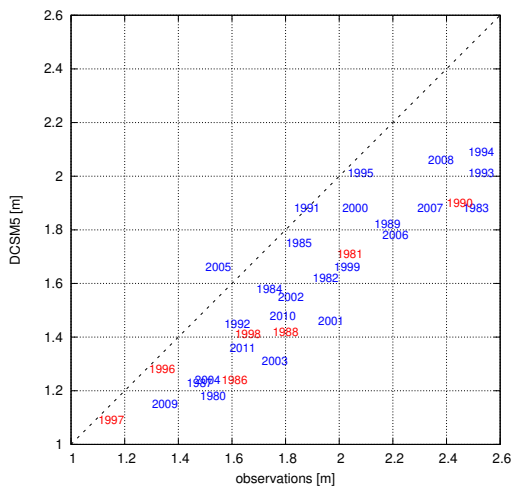
(b) Hoek van Holland



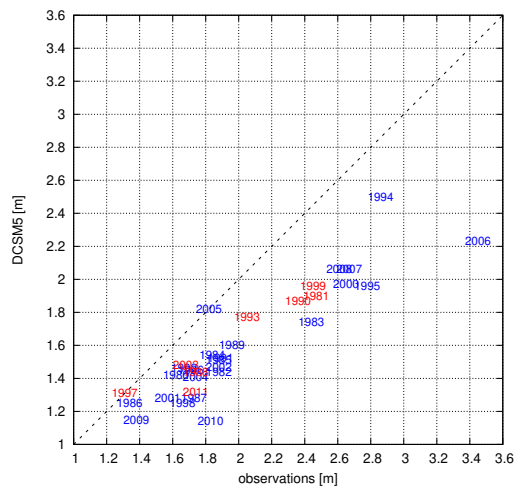
(c) IJmuiden



(d) Den Helder



(e) Harlingen



(f) Delfzijl

Figuur 26: Scatterplots van de opgetreden scheve opzetten versus de ERA5/DCSM5 berekende waterstanden voor 6 stations langs de Nederlandse kust. Getoond zijn de jaarmaxima. Het getal geeft het jaar aan waaruit het maximum komt. Blauwe cijfers geven de stormvloed aan waarbij ERA5/DCSM5 de juiste stormvloed als jaarmaximum heeft geïdentificeerd, voor de rode cijfers levert een andere stormvloed in ERA5/DCSM5 het jaarmaximum op dan in de waarnemingen.

Tabel 9: Verhouding tussen de jaarmaximale opzetten volgens DCSM5 ten opzichte van de waarnemingen (1979-2018). De waarden zijn gegeven zowel voor de gevallen waarbij DCSM5 voor dezelfde stormvloed een jaarmaximum geeft als de waarnemingen (1e kolom) als voor alle gevallen (3e kolom). De respectievelijke standaard deviaties zijn gegeven in kolommen 2 en 4. Kolom 5 geeft het percentage waarbij DCSM5 voor dezelfde stormvloed een jaarmaximum geeft als de waarnemingen.

	verhouding (identieke events)	standaard deviatie	verhouding (alle events)	standaard deviatie	percentage identieke events
kolomnummer	1	2	3	4	5
Vlissingen	1.00	0.11	1.01	0.10	56
Hoek van Holland	0.90	0.10	0.91	0.11	78
IJmuiden	0.83	0.12	0.85	0.11	66
Den Helder	0.81	0.09	0.81	0.08	78
Harlingen	0.85	0.08	0.85	0.08	78
Delfzijl	0.80	0.08	0.81	0.08	75
gemiddeld	0.87	0.10	0.87	0.09	72

Tabel 9 vat de resultaten van Figuur 26 samen. De extreme opzetten worden met gemiddeld 13% onderschat, variërend van 0% voor Vlissingen tot 20% voor Delfzijl. Gemiddeld geeft ERA5/DCSM5 voor bijna 3/4 van de jaarmaxima de juiste stormvloed als jaarmaximum. Uit Figuur 26 is op te maken dat de juiste stormvloed als jaarmaximum vooral gedetecteerd wordt voor de hogere stormvloeden - iets wat overeenstemt met de verwachting.

C Beschrijving van het Timmerman opzet-model

Timmerman (1977) ontwikkelde een opzet-model, waarin hij de Noordzee verdeelt in 6 vakken die elk (met een tijdsvertraging) een bijdrage leveren aan de opzet in een kuststation. De bijdrage is voor een aantal kuststations door Timmerman getabelleerd per windsterkte en per richting van de isobaren. Voor Harlingen en Delfzijl wordt - naast de 6 vakken - ook de lokale wind meegenomen. De vakken zijn weergegeven in Figuur 27. Hierin is ook door middel van pijlen de richting en relatieve bijdrage van elk vak aan de opzet in Hoek van Holland (blauw), Delfzijl (rood) en Harlingen (groen) weergegeven. We hebben de volgende aanpassingen ten opzichte van het oorspronkelijke Timmerman model gemaakt:

- De afhankelijkheid van de windrichting is sinusvormig verondersteld
- We veronderstellen een kromping van de wind ten opzichte van de isobaren van 20° .
- De drag coëfficiënt is niet constant genomen op 0.0028 maar volgens een Charnock relatie met $\alpha=0.0034$. Dit is de waarde die gemiddeld geldt in het SEAS5 model voor hoge winden.

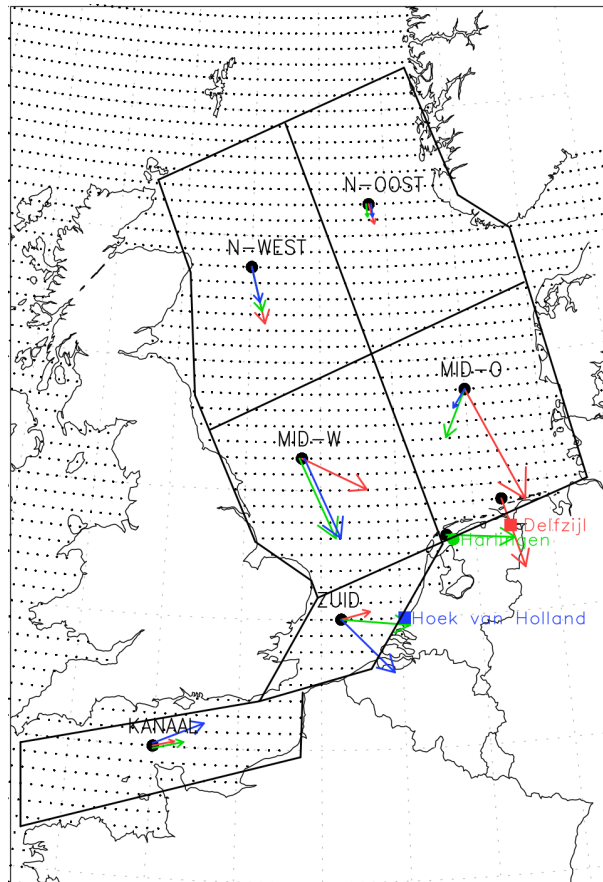
De opzet volgens het Timmerman model S_T berekenen we dus via:

$$S_T(t + \Delta T_v) = 0.01(1013 - \text{MSLP}) + \sum_{v=1,8} C_d(U_v) A_v \{U_v \cos(\gamma(U_v) - \beta_v)\}^2 \quad (4)$$

waarin v het vak aanduidt, τ_v de stress in vak v in m/s, γ_v de richting van de isobaren in vak v , ΔT_v de tijdsvertraging tussen stress en opzet in uren, A_v een vermenigvuldigingsfactor die de bijdrage van vak v verdisconteert, β_v de optimale windrichting in vak v in graden, en MSLP de druk op zeeniveau ter plaatse van het kuststation in hPa. De waarden voor A_v , β_v en ΔT_v zijn voor de verschillende stations weergegeven in Tabel 10.

We merken op dat het Timmermodel geheugen-effecten en allogene opzet niet meeneemt²¹.

²¹zie <https://www.keesfloor.nl/art/opzet.htm>.



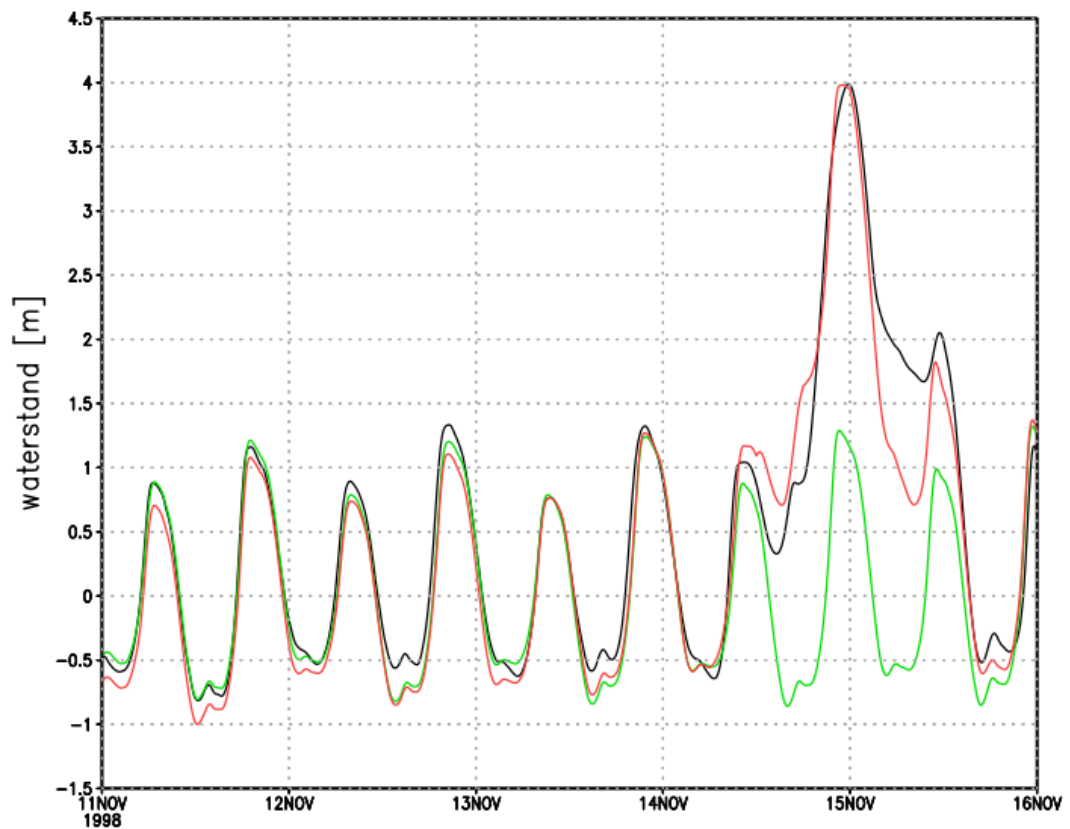
Figuur 27: Vakken in het Timmerman model. In elk vak staat de naam bij het roosterpunt dat gebruikt is als representatie van de wind in het betreffende vak. De pijlen geven de richting en de sterkte aan van de windvector die optimale bijdrage geeft aan de opzet in Hoek van Holland (blauw), Harlingen (groen) en Delfzijl (rood). De locaties van de zwarte stippen, alsmede de sterkte en richting van de vectoren zijn weergegeven in Tabel 10. De zwarte puntjes geven de zeepunten van SEAS5 aan (0.25°).

Tabel 10: Gebruikte coëfficiënten voor het Timmerman model van Formule 4.

		Noord-West	Noord-Oost	Midden-West	Midden-Oost	Zuid	Kanaal	Waddenzee	Eemsmond
Vlissingen	$A_v[-]$	0.50	0.18	1.31	0.21	1.36	1.00	-	-
	$\beta_v[^\circ]$	350	350	340	60	340	260	-	-
	$\Delta T_v[\text{uur}]$	9	9	6	3	3	3	-	-
Hoek van Holland	$A_v[-]$	0.60	0.21	1.47	0.37	1.26	0.92	-	-
	$\beta_v[^\circ]$	350	360	340	40	320	250	-	-
	$\Delta T_v[\text{uur}]$	9	9	6	3	3	6	-	-
Harlingen	$A_v[-]$	0.76	0.21	1.47	0.87	1.15	0.52	1.15	-
	$\beta_v[^\circ]$	350	360	340	30	280	260	280	-
	$\Delta T_v[\text{uur}]$	9	9	6	3	3	9	0	-
Delfzijl	$A_v[-]$	0.97	0.34	1.21	2.10	0.50	0.37	-	1.21
	$\beta_v[^\circ]$	350	350	300	340	260	260	-	350
	$\Delta T_v[\text{uur}]$	9	9	6	3	3	9	-	0
latitudes	$[^\circ]$	57.5	58.5	54.5	55.5	52	50	53.25	53.75
longitudes	$[^\circ]$	0	3.5	1.5	6	2.5	-2	5.25	6.75

Met Formule 4 kan een goede eerste schatting van de opzet verkregen worden. Hiermee kan de 7780 jaar van SEAS5 in 17 uur doorgerekend worden op een lokaal werkstation, tegenover 430 dagen die nodig zijn voor WAQUA/DCSM5 en 30 jaar voor WAQUA/DCSMv6.

Figuur 28 toont de tijdreeksen van de waterstand in Hoek van Holland voor een van de hoogste waterstanden in de SEAS5 dataset volgens Formule 4 waarbij het astronomisch getij is opgeteld (rood) en volgens WAQUA/DCSM5 (zwart). Het Timmerman model volgens Formule 4 toont voor het maximum een opvallend goede overeenkomst met WAQUA/DCSM5.



Figuur 28: Tijdreeks van de waterstand volgens WAQUA/DCSM5 (zwart) en het Timmerman model (Formule 4, rood) waarbij het astronomisch getij is opgeteld voor een van hoogste waterstanden in Hoek van Holland in de SEAS5 datareeks. Het astronomisch getij is weergegeven in groen.



Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut

Postbus 201 | 3730 AE De Bilt
T 030 220 69 11 | www.knmi.nl