



# Hydraulische Belastingen IJsselmeerdijk

Beschrijving totstandkoming

Opdrachtgever





# Hydraulische Belastingen IJsselmeerdijk

---

Beschrijving totstandkoming

concept rapport



**Auteur(s)**

ir. D.P. de Bake

BH5290-HKV-ZZ-XX-RP-Z-0010\_IJMD

februari 2021

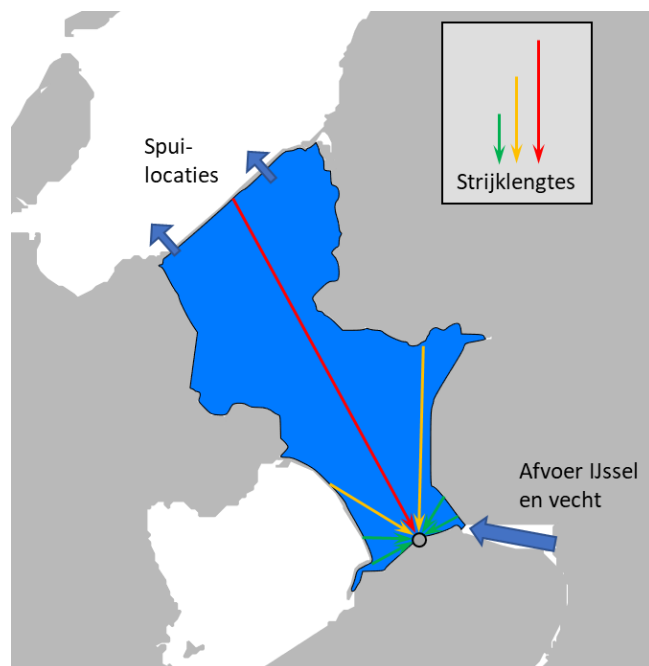


# Samenvatting

Het IJsselmeer is een groot watersysteem waarvan de waterstand wordt beïnvloedt door de afvoeren van de IJssel en de Vecht, verdamping en neerslag, afvoer naar de Waddenzee via de sluisen in de Afsluitdijk en diverse gemalen. Het is *vooral* de wind die tot zware belastingen op de IJsselmeerdijk leidt. Het IJsselmeer gaat bij toenemende wind binnen enkele uren 'scheef staan' en ook golven zijn binnen enkele uren 'volgroeid'. Dit leidt tot hoge golfbelastingen op de IJsselmeerdijk in het zuiden van het IJsselmeer.

Zeer hoge rivierafvoeren leiden pas na meerdere dagen tot een verhoogd meerpeil en deze situatie gaat meestal niet samen met een harde noordwesterwind, die nodig is om de IJsselmeerdijk zwaar te belasten. Daarnaast is de kans op hoge waterstanden als gevolg van een hoge afvoer vrij klein. Storm (wind) is dus voor de IJsselmeerdijk van Lelystad tot de Ketelbrug de dominante factor. Figuur 1 toont een schematische weergave van het watersysteem

*Figuur 1  
Schematische  
weergave  
watersysteem  
IJsselmeer*



Een belangrijk element voor de maatgevende condities is de *windrichting*. Normtraject 8-3 ligt grotendeels op het noord-noordwesten. Alleen stormen uit het zuidwesten tot noordoosten kunnen zodoende tot belastingsituaties van de waterkering leiden. Komt de wind uit een andere richting, dan waait het water zelfs bij de dijk weg (bijv. zuidenwind, oostenwind). Dit heet afwaaiing en leidt dus niet tot maatgevende condities voor de IJsselmeerdijk. Op andere dijktrajecten langs het IJsselmeer kunnen deze omstandigheden

overigens wel maatgevend zijn. De grootste *strijklengte* (afstand die de wind aflegt over een waterlichaam) ligt tussen de Afsluitdijk en IJsselmeerdijk (zie Figuur 1). De wind kan dan over een lengte van ruim 55km richting de IJsselmeerdijk waaien. De waterstand gaat daardoor niet alleen scheef staan (windopzet), er ontstaan ook flinke golven die overigens qua hoogte beperkt worden door de bodemligging van het IJsselmeer. Het IJsselmeer is gemiddeld vier meter diep is, waardoor zeer extreme golfhoogtes niet mogelijk zijn.

Onder extreme windsnelheden -we houden rekening met windkracht 12 en zelfs hoger- ontstaan meters hoge golven op het IJsselmeer. Helaas zijn er geen meetgegevens voor deze extreme omstandigheden en dus moeten we op modellen vertrouwen. Met het geavanceerde golfmodel SWAN (TU Delft) zijn golven nabij de IJsselmeerdijk berekend van meer dan 4 meter hoog. De kans van voorkomen van dergelijke golven is zéér klein, echter de waterveiligheidsnormen van de IJsselmeerdijk zijn streng, waardoor dergelijke golven tóch een dominante rol spelen bij het ontwerp van de dijk.

De windsnelheid is ook van belang in relatie tot de waterstand. Door de wrijving tussen de wind en het water gaat het water scheef staan. Blaast de wind dus uit het noordwesten, dan nemen de waterstanden bij de IJsselmeerdijk toe, tot boven het gemiddeld meerpeil. Komt de wind juist uit het zuidoosten, dan nemen de waterstanden af tot onder het gemiddeld meerpeil. Achtergronden over de werking van het watersysteem IJsselmeer zijn opgenomen in hoofdstuk 2. In hoofdstuk 4 zijn de waterstands- en golfberekeningen beschreven die gebruikt worden voor zowel de beoordeling als het ontwerp van de IJsselmeerdijk.

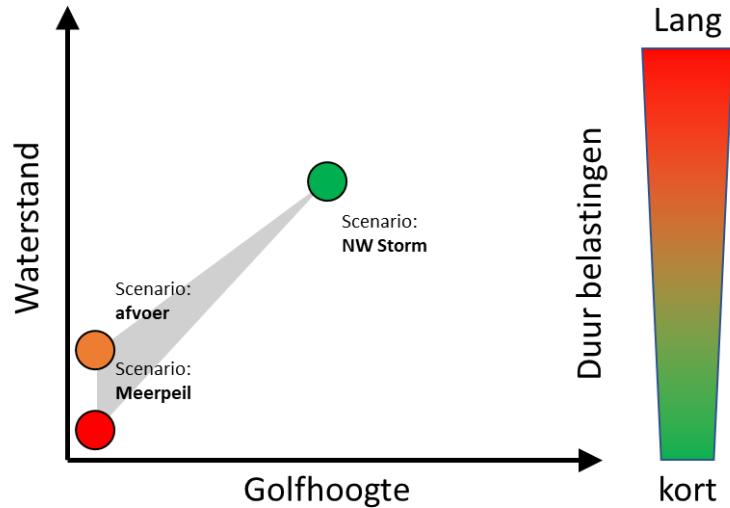
Elke combinatie van meerpeil, windrichting en windsnelheid leidt tot een unieke belastingsituatie op de dijk. In de basis kunnen we hierin onderscheiden:

1. Het 'dagelijks' meerpeil, zonder zware wind en hoge rivierafvoeren. Dit is veruit de meest voorkomende situatie.
2. Een verhoging van de waterstand als gevolg van aanzienlijke afvoer uit de IJssel en Vecht, eventueel in combinatie met gematigde wind.
3. Een verhoging van de waterstand als gevolg van een (noordwester)storm, eventueel in combinatie met een beperkt verhoogd meerpeil door hoge afvoeren, voorafgaand aan de storm.

Figuur 1 toont indicatief deze drie situaties, waarbij het grijze vlak alle relevante belastingcombinaties beschrijft. Bij zeer zware wind hoort automatisch een hoge waterstand. Het gaat bij het bepalen van de hydraulische belastingen voor beoordelingen en ontwerpen van dijken om de *kansbijdragen* van al deze combinaties. Het samenvallen van een extreem hoog meerpeil als gevolg van langdurig hoge rivierafvoer met een zeer zware noordwesterstorm heeft een héél kleine kans op voorkomen. Veel waarschijnlijker is het dat een extreme noordwesterstorm samen valt met een gemiddeld meerpeil (winterpeil). Om rekening te houden met alle combinaties is een belastingmodel van het IJsselmeer ontwikkeld. Dit

wiskundige model beschrijft het samenspel van meerpeil, windsnelheid en windrichting op het IJsselmeer. Meer informatie over het belastingmodel is te lezen in hoofdstuk 5.

*Figuur 2  
Waterstand- en  
golfbelastingrelatie  
belastingsscenario's*

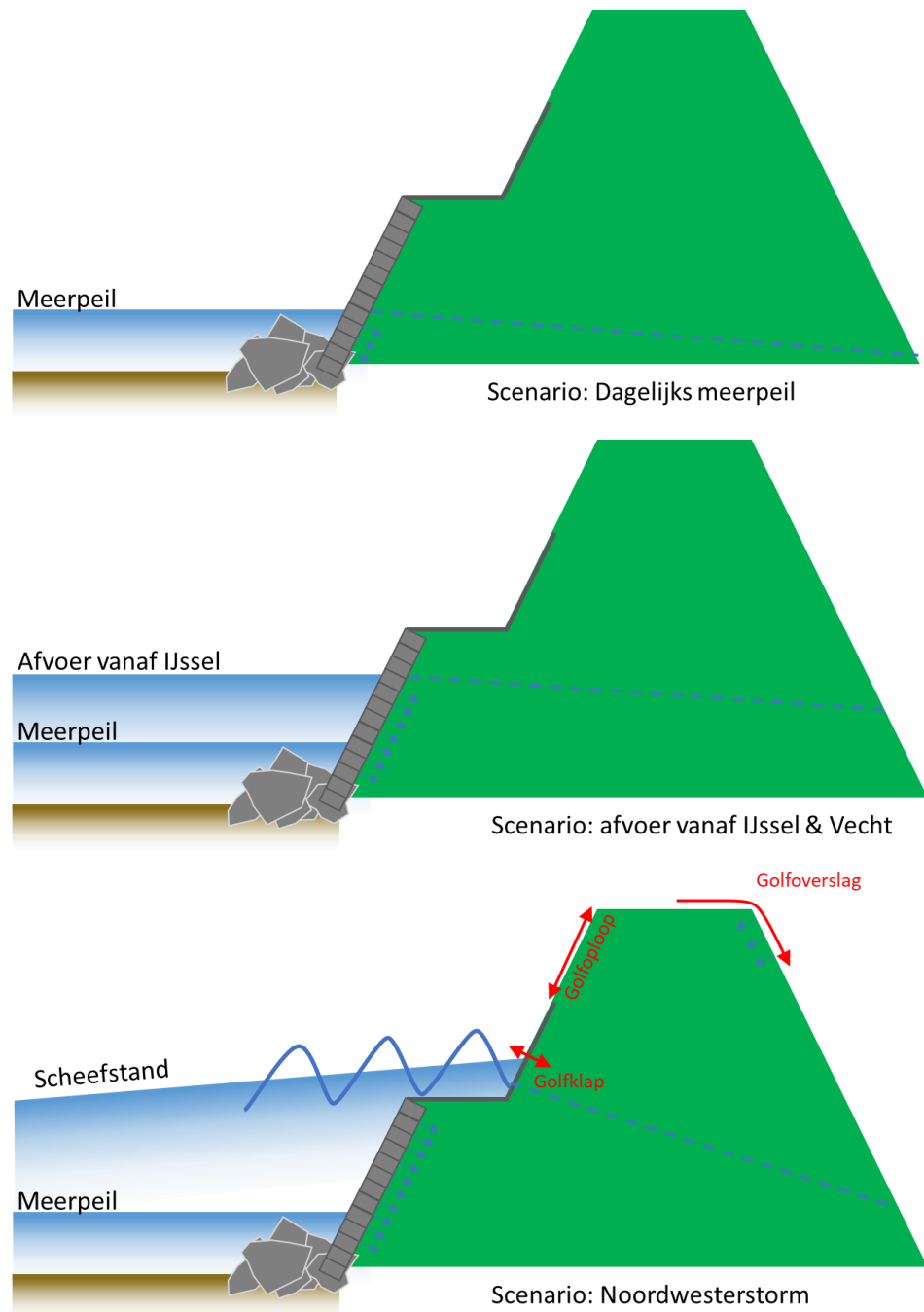


Waterstanden en golven belasten de dijk. Een hoge waterstand is in eerste instantie relevant in relatie tot de stabiliteit van de dijk. Hoe hoger het water tegen de dijk en hoe langer het water er tegenaan staat, hoe hoger ook de waterstand in de dijk, ook wel de freatische waterstand genoemd. Hierdoor zullen zandkorrels onderling minder wrijving ondervinden waardoor de kans op een afschuiving toeneemt. Een voorbeeld van een mogelijk maatgevend scenario is een hoge waterstand als gevolg van hoge afvoeren vanuit de IJssel en Vecht (zie ter illustratie Figuur 3). In dit geval houden de hoge waterstanden over een relatief lange periode aan. Hoge waterstanden zonder golven zijn over het algemeen geen probleem voor de dijkbekleding; steenzetting, asfalt en gras. Indien een dijk veel te laag is kan de situatie ontstaan dat deze zelfs overstroomt zonder golven. Dit noemen we overloop. Overloop is bij de IJsselmeerdijk niet aan de orde, maar speelt in het rivierengebied bijvoorbeeld wel een rol.

Golven die op het IJsselmeer ontstaan rollen richting de dijk en klappen stuk op de breukstenen teen, de berm of het buitentalud (golfklap). De golven lopen daarnaast het talud op (golfoploop) en slaan er in extreme gevallen zelfs deels overheen (golfoverslag). Overslaand water kan leiden tot erosie van het gras op de kruin en het binnentalud, de onderliggende kleilagen en uiteindelijk de kern van zand, maar via infiltratie ook tot een verminderde stabiliteit. De golfoploop zorgt voor hoge snelheden van het water op het buitentalud. Deze hoge snelheden worden veel minder goed door gras (zachte bekleding) verdragen dan door steenzettingen of asfalt (harde bekleding). Hetzelfde geldt voor golfklappen. Een harde bekleding kan veel meer golfenergie opvangen dan een grasbekleding. Een harde bekleding is echter vele malen duurder in aanleg en onderhoud en is (daarmee) een stuk minder duurzaam dan gras. Dit belastingsscenario treedt voornamelijk op bij een noordwesterstorm. Figuur 3 illustreert het betreffende belastingsscenario.

Bij lage en iets verhoogde meerpeilen is de kans op zware (noordwester)stormen relatief groot. Het IJsselmeer gaat scheef staan en de golven nemen snel in hoogte toe. Gedurende zo'n storm wordt eerst de teen van de dijk zwaar belast, daarna het ondertalud en de berm en tenslotte het boventalud. Bij het ontwerp moet op elk niveau worden gecontroleerd hoe hoog en lang (golflengte – samen met golfhoogte -> golfenergie) de verwachte golven zijn en hoe lang (tijd) deze de bekleding belasten. Met de juiste golfeigenschappen kan een voldoende veilig ontwerp worden gemaakt.

*Figuur 3  
Illustraties  
belastingsscenario's*





# Inhoud

<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>11</b>
1.1	Verkenning IJsselmeerdijk Zuiderzeeland	11
1.2	Doel voorliggend rapport	11
1.3	Belang van betrouwbare hydraulische belastingen	12
1.4	Leeswijzer	13
1.5	Twijfels aan huidige belastingen	14
<b>2</b>	<b>Het IJsselmeer</b>	<b>21</b>
2.1	Het watersysteem	21
2.2	Waterstanden IJsselmeer	26
2.3	Golven op het IJsselmeer	27
<b>3</b>	<b>Historie hydraulische belastingen IJsselmeer</b>	<b>31</b>
3.1	Tot 1996	31
3.2	1996-2001, eerste ronde toetsing primaire waterkeringen (HR1996)	32
3.3	2001 – 2006 , tweede ronde toetsing primaire waterkeringen (HR2001)	33
3.4	2006 – 2013, (verlengde) derde ronde toetsing primaire waterkeringen (HR2006)	35
3.5	2011, Concept Randvoorwaarden	35
3.6	2017 – heden, Beoordelen en ontwerpen met overstromingskansen	36
<b>4</b>	<b>Rekenen aan waterstanden en golven</b>	<b>39</b>
4.1	Waterstanden - WAQUA model	39
4.2	Productieberekeningen WAQUA	48
4.3	Windgolven – SWAN model	50
4.4	Productieberekeningen SWAN	54
4.5	Resultaat productie: Database/opzoektabel met waterstanden en golven.	60
<b>5</b>	<b>Belastingmodel IJsselmeer</b>	<b>62</b>
5.1	Samenspel van meerpeil en wind: probabilistisch model	62
5.2	Berekenen van hydraulische belastingen op de dijk	66
<b>6</b>	<b>Referenties</b>	<b>68</b>



# 1 Inleiding

## 1.1 Verkenning IJsselmeerdijk Zuiderzeeland

De IJsselmeerdijk in Zuidelijk Flevoland voldoet tussen de Ketelbrug en de Houtribsluizen niet aan de waterveiligheidsnorm. De door waterschap Zuiderzeeland aan de Inspectie voor Leefomgeving en Transport gerapporteerde veiligheids categorie voor normtraject 8-3 is 'D'. Dat betekent dat de dijk ruimschoots niet aan de wettelijke signaleringswaarde (1:30.000<sup>e</sup>) en ook niet aan de ondergrens (1:10.000<sup>e</sup>) voldoet. Op verzoek van het waterschap hebben Royal HaskoningDHV en HKV Lijn in Water in de eerste helft van 2020 een aanvullende analyse op de beoordelingsresultaten uitgevoerd. De algemene conclusie van het waterschap bleef daarbij overeind: er wordt een grote afstand tot de wettelijke norm gevonden, waardoor versterking noodzakelijk is. Inmiddels is normtraject 8-3 aangemeld bij het HWBP [1] (zie ook Figuur 4) en is de verkenning gestart.

## 1.2 Doel voorliggend rapport

Eén van de eerste activiteiten binnen de verkenning betreft een onderzoek naar mogelijke aanscherpingen van de hydraulische belastingen en het beschrijven van de wijze waarop deze belastingen worden bepaald. Voorliggend rapport betreft het laatste. Dit rapport valt onder activiteit 1.1.1 uit perceel 1, als onderdeel van product 2.3: *verbeterde hydraulische randvoorwaarden*.

Waterschap Zuiderzeeland heeft gevraagd om "een transparant verhaal dat de (niet-ingewijde) lezer meeneemt in de *opbouw* van de *hydraulische randvoorwaarden*, waarbij de aandachtspunten worden benoemd, die, afhankelijk van de inschatting van de experts, als input dienen bij het opstellen van de nieuwe database. Dat dit rapport, door de transparante analyse, *vertrouwen* geeft in de gekozen *hydraulische uitgangspunten* en dat we dit aan de hand van dit rapport kunnen uitleggen. Voor eventuele gevonden aandachtspunten wordt een advies verwacht voor de verdere aanpak. Het rapport moet op heldere en duidelijke wijze beschrijven hoe de hydraulische randvoorwaarden zijn opgebouwd/tot stand zijn gekomen."

Deze rapportage bevat een beschrijving van de keuzes die in het verleden bij het afleiden van de hydraulische belastingen zijn gemaakt, en indien aan de orde de argumenten of de eerder gemaakte keuzes en gekozen uitgangspunten -met de kennis van nu- nog steeds de juiste zijn.

Een concreet voorstel voor aanpassingen/aanscherpingen van de bestaande hydraulische belastingen is in het aparte rapport [2] beschreven. Daarin aandacht voor:

- Aanpassingen aan de hydraulische belastingen die direct kunnen worden doorgevoerd, met name door de bestaande databases aan te passen.
- Aanpassingen aan de hydraulische belastingen die weliswaar kansrijk zijn, maar binnen de Verkenning eerst nader onderzoek vergen.

Figuur 4  
IJsselmeerdijk [1].



## IJMD IJsselmeerdijk

### Opgave

Dit dijktraject van in totaal 23 kilometer lang wordt in twee afzonderlijke projecten aangepakt. Als eerste wordt de IJsselmeerdijk versterkt (17,6 kilometer). Deze dijk loopt van de Houtribdijk bij Lelystad noordwaarts naar de Ketelbrug, die de Flevopolder verbindt met de Noordoostpolder. Aansluitend (vanaf circa 2027) wordt de Oostvaardersdijk opgepakt, ten zuiden van Lelystad vanaf de Houtribdijk tot aan de Knardijk. Het hele dijktraject bestaande uit de IJsselmeerdijk en de Oostvaardersdijk ligt deels aan het IJsselmeer en deels aan het Markermeer. De hydraulische omstandigheden zijn daarmee voor beide delen verschillend.

Voor het dijktraject is de beoordeling in december 2018 afgerond. Uit deze beoordeling blijkt dat het belangrijkste faalmechanisme de bekleding is: erosie van de grasbekleding (kruin, binnentalud en buitentalud) en stabiliteit van de steenzetting. Voor de IJsselmeerdijk is in 2020 een nadere veiligheidsanalyse uitgevoerd. Deze bevestigt het beeld van de wettelijke beoordeling dat de grasbekleding en de stabiliteit van de steenzetting niet voldoen. Ook de teenconstructie voldoet niet. Vanwege de verwachte peilstijging van het IJsselmeer gedurende de ontwerperperiode, kent het traject ook een hoogteopgave.

### Context

Het zuidelijke deel van de IJsselmeerdijk grenst aan het stedelijk gebied van Lelystad. Kenmerkend voor dit deel zijn woongebieden, jachthavens, havendammen en recreatievoorzieningen. Het noordelijke deel heeft meer het robuuste, ruimtelijke karakter van een IJsselmeerdijk.

### Verkenningfase

Inmiddels is de startfase van de verkenning uitgevoerd, waarbij een plan van aanpak voor de verkenningfase is opgesteld en een aantal analyses en verkenningen al is uitgevoerd. De aanpak kenmerkt zich door verschillende elementen: het voorsorteren op de Omgevingswet die in 2022 van kracht is, het aanscherpen van de exacte veiligheidsopgave en een duurzame aanpak met focus op circulariteit van de (steen)bekleding. Verder zijn de energiebesparingen tijdens de realisatie kenmerkend, evenals een goede inpassing qua biodiversiteit.

## 1.3

## Belang van betrouwbare hydraulische belastingen

Hydraulische belastingen zijn, zeker voor de IJsselmeerdijk, bepalend voor (de grootte van) het veiligheidstekort nu en de ontwerpogave voor de toekomst. Hoe hoger extreme waterstanden en golven, hoe hoger en daarmee breder de dijk dient te zijn en hoe zwaarder bijvoorbeeld de benodigde steenbekleding. Het mag duidelijk zijn dat de hydraulische belastingen daarmee ook bepalend zijn voor de dijkversterkingskosten en dat een zwaardere dijk meer impact heeft op de omgeving.

Het is daarom belangrijk het al aan het begin van de verkenning eens te worden over de te hanteren hydraulische ontwerpbelastingen. Nieuwe inzichten in waterstanden en golven kunnen de scope van het project beïnvloeden. Een zo goed mogelijk beeld van de 'stand van de kennis' en de lopende onderzoeken bij de start is daarom wenselijk is. Een gedegen beschrijving en analyse van de ontwerpbelastingen aan de voorkant is daarmee een belangrijke risicobeheersmaatregel.

## 1.4

### Leeswijzer

Hoofdstuk 2 bevat een beschrijving van het watersysteem IJsselmeer en het ontstaan van (extreme) waterstanden en golven.

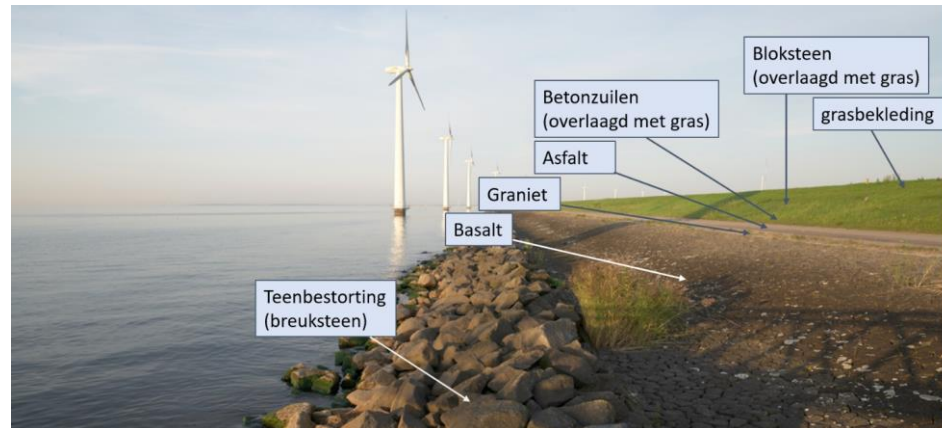
Rijkswaterstaat zorgt namens het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat al enige decennia voor hydraulische belastingen voor alle Nederlandse watersystemen, waaronder ook het IJsselmeer. Daartoe worden, indien er aanleiding voor nieuwe berekeningen is, vele combinaties van waterstanden en golven doorgerekend met geavanceerde waterbewegings- en golfrekenmodellen. De geschiedenis van de door Rijkswaterstaat berekende en beschikbaar gestelde belastingen in de periode 1986 tot heden is beschreven in hoofdstuk 3. In hoofdstuk 4 zijn de modellen WAQUA (waterstanden) en SWAN (golven) beschreven alsmede de daarmee berekende waterstanden en golven die we in de hydraulische database terugvinden. Rijkswaterstaat heeft voor het laatst in 2010/2011 formele berekeningen voor het IJsselmeer laten maken van zowel waterstanden (met het model WAQUA) als golven (met het model SWAN). HKV Lijn in Water heeft destijds samen met Svašek de SWAN productieberekeningen uitgevoerd.

Het gedrag van het watersysteem, ofwel het samenspel van meerpeil, windrichting en windsnelheid, wordt beschreven met een wiskundig model, het zogenaamde belastingmodel. Het belastingmodel voor het IJsselmeer is beknopt beschreven in Hoofdstuk 5. Een dergelijk belastingmodel is nodig omdat er voor het IJsselmeer vele combinaties van windsnelheid, windrichting en meerpeil mogelijk zijn, elk met een eigen kans op voorkomen. Het belastingmodel is opgenomen in de applicaties Hydra-NL en Riskeer, waarmee vervolgens de daadwerkelijke belastingen op de dijken zijn te berekenen. Wat deze software doet is -eenvoudig gezegd- de juiste combinaties van waterstanden en golven opzoeken in de database ('opzoektabel'), gegeven het belastingmodel, de norm van (eisen aan) de dijk en diverse instellingen van de gebruiker. Als resultaat vinden we dan de waterstanden en golven tegen de dijk maar ook bijvoorbeeld de minimaal benodigde kruinhoogte.

Golfhoogten (H) en golfperioden (T) bij diverse waterstanden (h) zijn bijvoorbeeld nodig voor het bepalen van de benodigde dikte van de zetstenen dijkbekleding, zoals basalt- of betonzuilen. Ook de hoogte van de overgang van de steenbekleding (harde bekleding) naar het gras (zachte bekleding) en

de minimaal benodigde kruinhoogte van de dijk worden grotendeels bepaald door de hydraulische belastingen.

*Figuur 5  
impressie bekleding  
buitentalud  
IJsselmeerdijk [3].*



## 1.5 Twijfels aan huidige belastingen

Er is in het voortraject van de verkenning al veel gesproken (zowel binnen het waterschap als met experts van RWS, Deltares, Royal HaskoningDHV en HKV) over de correctheid van de hydraulische belastingen.

Vanwege het feit dat de ontwerpopgave van de IJsselmeerdijk voor een belangrijk deel bepaald wordt door de hydraulische belastingen en omdat de hydraulische belastingen ter discussie zijn gesteld in het voortraject is gekozen om de totstandkoming van de hydraulische belastingen uitvoerig te beschrijven in voorliggende rapportage.

Een voorstel voor mogelijke aanscherpingen is in het rapport *Hydraulische Belastingen IJsselmeerdijk, Voorstel tot actualiseren databases en te gebruiken rekentechnieken* [2] beschreven. Basis voor die rapportage is Bijlage 2 bij het PvA Verkenningfase, de notitie *Overzicht plussen en minnen Hydraulische Belastingen* [4]. Als de belastingen onderbouwd naar beneden kunnen worden bijgesteld, door bijvoorbeeld opnieuw te kijken naar modelonzekerheden, leidt dat tot een minder zware dijkversterking.

### 1.5.1 Strengere norm, extreme gebeurtenissen

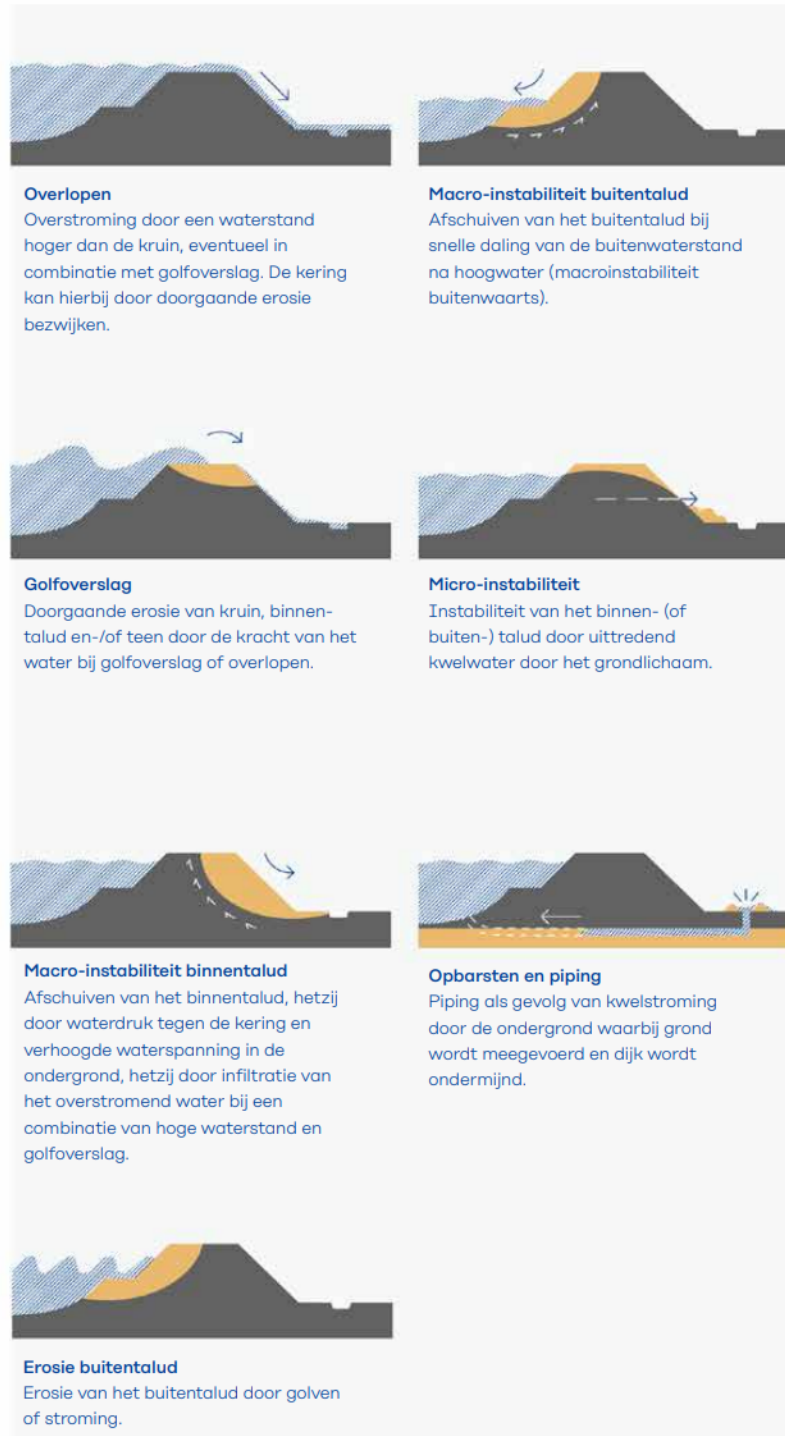
In het rapport *Wettelijke Beoordeling Primaire Waterkering normtraject 8-3* (20 november 2018) [3] geeft het waterschap aan twijfels te hebben bij de juistheid van de door het Rijk beschikbaar gestelde hydraulische belastingen. De norm van traject 8-3 is een overstromingskans (ondergrens) van 1:10.000<sup>e</sup> per jaar. Dit is een zeer kleine kans, waarbij waterstanden en golven horen die we nog nooit hebben waargenomen. Hoe kleiner de kans, hoe -in algemene zin- zwaarder de belastingen.

### 1.5.2

## Relatie tussen hydraulische belastingen en faalmechanismen

Bij de beoordeling en het ontwerp van primaire waterkeringen worden meerdere *faalmechanismen* beschouwd, ofwel wijzen waarop de dijk kan falen. In Figuur 6 zijn de belangrijkste faalmechanismen grafisch weergegeven en Tabel 1 bevat een toelichting op de voor het ontwerp van de IJsselmeerdijk meest relevante faalmechanismen.

*Figuur 6  
Faalmechanismen  
dijk volgens  
Grondslagen voor  
Hoogwater-  
bescherming [5].*





Tabel 1  
Selectie van  
relevante  
faalmechanismen  
(volgens WBI2017)  
en bijbehorende  
belastingen voor de  
IJsselmeerdijk [6].

Faalmecha- nisme	Afkorting	Relevantie voor IJsselmeerdijk
Grasbekleding erosie kruin en binnentalud.	GEKB	Golfoverslag is bepalend voor de ontwerphoogte van de IJsselmeerdijk. Hoe hoger de dijk, hoe minder overslaand water en daarmee een kleinere kans op erosie van de grasbekleding op de kruin en het binnentalud. Hoge golven bij de IJsselmeerdijk gaan samen met een hoge waterstand door opwaaiing/scheefstand. Een hogere dijk heeft een groter ruimtebeslag. GEKB is dan ook een bepalend faalmechanisme in het ontwerpproces.
Grasbekleding erosie buitentalud.	GEBU	Op het buitentalud zijn zowel golfoploop als golfklap van belang voor de grasbekleding. Harde golfklappen dragen veel energie over op de dijk. Gras gaat hierdoor veel eerder stuk dan een steenbekleding. De talud oplopende golven zorgen voor hoge stroomsnelheden en daarmee wrijving op het gras, met mogelijke erosie tot gevolg. Dit faalmechanisme is tevens bepalend voor het ontwerp van de IJsselmeerdijk. Gras is immers veel goedkoper en duurzamer dan steen en de hoogte van de overgang van steen naar gras is dus een belangrijke ontwerpkeuze.
Grasbekleding afschuiven buitentalud.	GABU	Gras op het buitentalud kan, samen met een deel van de onderliggende kleilaag oppervlakkig afschuiven. Dit fenomeen zal niet bepalend zijn voor het ontwerp van de IJsselmeerdijk, maar er moet -gegeven een ontwerp- wél op worden gecontroleerd. Waterstanden en golfhoogten zijn daarbij van belang.
Grasbekleding afschuiven binnentalud	GABI	Ook het gras op het binnentalud kan samen met een deel van de onderliggende kleilaag oppervlakkig afschuiven. Dit wordt veroorzaakt door een hoge waterstand in de dijk, onder meer veroorzaakt door golfoverslag. Ook dit mechanisme zal niet bepalend zijn voor het ontwerp van de dijk, maar er moet -gegeven een ontwerp- wel op worden gecontroleerd.
Stabiliteit Steenzetting	ZST	Zetstenen op het buitentalud zijn bedoeld om golfbelasting te weerstaan. Zetstenen



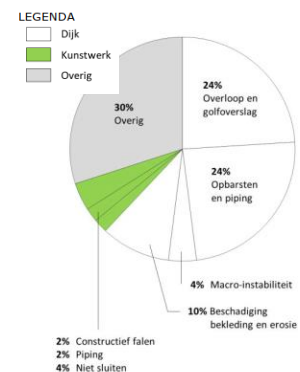
Faalmecha- nisme	Afkorting	Relevantie voor IJsselmeerdijk
		worden toegepast op dijk waar gras niet volstaat. Bij het dimensioneren de steenzetting is de combinatie van waterstanden en golven van belang.
Golfklappen op asfaltbekleding.	AGK	Net als bij zetsteen geldt dat asfalt als dijkbekleding bedoeld is om golfklappen op te vangen wanneer gras niet volstaat. In tegenstelling tot bijvoorbeeld de dijken langs de Waddenzee ligt er bij de IJsselmeerdijk geen asfalt op de dijktaf. Op de IJsselmeerdijk wordt asfalt toegepast voor wegen en paden, met name op de bermen. Het asfalt op de IJsselmeerdijk heeft dus primair een andere functie dan waterveiligheid. Het asfalt moet natuurlijk wel voldoende sterk/dik worden gedimensioneerd.
Macrostabieleit binnenwaarts	STBI	De IJsselmeerdijk kan, wanneer de waterstanden in de dijk erg hoog worden, instabiel worden en 'onderuit zakken'. Een groot glijvlak kan tot een directe bres leiden. Dit mechanisme speelt bij het ontwerp van de IJsselmeerdijk eigenlijk alleen een rol bij alternatieven die buiten het bestaande grondverbeteringscunet komen te liggen en daarmee ongeroerde slappe bodem belasten. Hierop wordt het ontwerp altijd gecontroleerd. Benodigd zijn waterstanden en overslagdebieten om de infiltratie en daarmee de toename van de waterstand in de dijk te kunnen bepalen.
Macrostabieleit buitenwaarts	STBU	Buitenwaartse macrostabieleit is vergelijkbaar met binnenwaartse stabieleit, maar treedt eigenlijk alleen op na een snelle daling van het buitenwater. Dit is voor de IJsselmeerdijk ook géén ontwerpbepalend faalmechanisme. Bij de controle is het verloop van de buitenwaterstand van belang en de gemiddelde laagwaterstand.
Piping	STPH	Piping, ofwel het optreden van zandmeevoerende wellen, is geen groot probleem bij de IJsselmeerdijk. Piping is vaak een maatgevend faalmechanisme bij dijken die belast worden door een langdurig hoge waterstand, in Nederland zijn dit de rivierdijken. De maatgevende

Faalmechanisme	Afkorting	Relevantie voor IJsselmeerdijk
		belasting voor de IJsselmeerdijk is kort (stormgedomineerd) en piping zal dan ook niet ontwerp-bepalend zijn. Ook hier geldt dat er wel op moet worden gecontroleerd, waarbij waterstanden op het IJsselmeer en het waterstandverloop een belangrijke rol spelen.
Microstabiliteit	STMI	Microstabiliteit is het fenomeen dat zand uitspoelt onderin het binnentalud, als gevolg van te hoge waterdrukken aldaar. Dit faalmechanisme is ook niet ontwerp-bepalend. Bij de controle zijn waterstanden in de dijk en overslagdebieten van belang.

Voor elk van deze mechanismen zijn door experts op basis van onderzoek eisen geformuleerd, gerelateerd aan de norm van het traject. Hoe strenger de norm, hoe strenger ook de eisen aan deze faalmechanismen. De norm is feitelijk de 'topeis' (ook wel de faalkansruimte), die wordt *uitgesplitst* over de relevante faalmechanismen. We noemen dit de faalkansverdeling. Dit verdelen is nodig zolang er wordt gerekend per faalmechanisme en per doorsnede. Zie Figuur 7.

Figuur 7  
Standaard  
faalkansverdeling  
[7].

Type waterkering	Faalmechanisme	Type traject	
		Zandige kust	Overig (dijken)
Dijk	Overloop en golfoverslag*	0,0	0,24
	Opbarsten en piping	0,0	0,24
	Macrostabiliteit binnenwaarts	0,0	0,04
	Beschadiging bekleding en erosie	0,0	0,10
Kunstwerk	Niet sluiten	0,0 <sup>b</sup>	0,04
	Piping	0,0 <sup>b</sup>	0,02
	Constructief falen	0,0 <sup>b</sup>	0,02
Duin	Duinafslag	0,70	0,0 / 0,10 <sup>c</sup>
Overig		0,30	0,30 / 0,20 <sup>c</sup>
<b>Totaal</b>		<b>1,0</b>	<b>1,0</b>



Door het verdelen van de faalkansruimte worden de eisen per faalmechanisme strenger dan de norm van het traject. Vergelijk een auto met vier cruciale onderdelen. Als de auto het 999 van de 1000 keer moet doen, dan moeten de eisen aan de vier losse onderdelen elk strenger zijn dan 1:1000<sup>e</sup>. Het wordt overigens gelijk complexer wanneer het falen van het ene onderdeel samenhangt met één of meerdere andere onderdelen (correlatie). Deze samenhang speelt ook bij hydraulische belastingen en wordt wiskundig beschreven in het belastingmodel (hoofdstuk 5). Zo horen bij de IJsselmeerdijk, gegeven de standaard faalkansverdeling, voor het faalmechanisme *graserosie van het buitentalud* golfcondities met een terugkeertijd van wel 600.000 jaar. Het gaat dan over golven tot wel 4 meter hoog. Deze *extreme omstandigheden* zijn lastig voor te stellen, maar fysisch gezien niet onmogelijk.

### 1.5.3 Mogelijkheden tot versoepelen van de eisen

In het ontwerp is het mogelijk om de faalkansverdeling nader te beschouwen en onderbouwd aan te passen. Zo kunnen mogelijk dubbelingen uit de faalkansverdeling worden gehaald door met één model meerdere faalmechanismen te berekenen in plaats van parallel. De verdeling kan ook onderbouwd worden aangepast indien bijvoorbeeld een mechanisme niet kán optreden. Eisen aan andere mechanismen kunnen dan wat minder zwaar worden omdat ze een groter 'deel van de taart' krijgen toebedeeld. De belastingen op de dijk gaan dan voor die mechanismen óók naar beneden. In de ideale wereld rekenen we met één model de overstromingskans voor het hele normtraject uit zonder faalkansverdeling, maar dat is nog toekomstmuziek. In de rapport *Hydraulische Belastingen IJsselmeerdijk, Voorstel tot actualiseren databases en te gebruiken rekentechnieken* [2] is een voorstel gedaan voor het aanpassen van de faalkansverdeling, in relatie tot de toe te passen rekenmethoden.

#### *Voorbeeld 1:*

Door de faalkansruimte voor Graserosie Kruin en Binnentalud (GEKB) en Graserosie Buitentalud (GEBU) samen te voegen en vervolgens met één model de faalkans van de hele grasmat (buitentalud, kruin, binnentalud) te berekenen, is de ontwerppogave waarschijnlijk te beperken. De aangepaste faalkansruimte voor het gras wordt dan  $0,24 \text{ (GEKB)} + 0,045 \text{ (GEBU)} = 0,285$ . De bijbehorende terugkeertijd voor de belasting op het Gras Buitentalud gaat dan terug van orde 600.000 naar 100.000 jaar. Dit betekent concreet minder zware golven.

#### *Voorbeeld 2:*

Aan het mechanisme piping is bij de IJsselmeerdijk een strengere eis te stellen omdat de kans op piping hier bijzonder klein is. Door de standaard ruimte van 0,24 te verlagen en daarmee dus de eis aan te scherpen ontstaat meer faalkansruimte voor andere mechanismen, zoals de bekledingen. Door de daadwerkelijke kans op piping te bepalen, kan een strenge eis worden bepaald waaraan wel wordt voldaan.

Als de standaard faalkansruimte voor de IJsselmeerdijk in de Verkenning wordt aangepast, dan geldt dat voor het hele normtraject 8-3 en dus óók voor het deel langs het Markermeer. Dit is een belangrijk aandachtspunt, aangezien het Markermeer deel van het normtraject geen deel uitmaakt van het project.

### 1.5.4 Betrouwbaarheid waterstanden, golven en rekenmethode

Waterstanden en windgolven zijn in de periode 2011/2012 voor het laatst in detail berekend in opdracht van Rijkswaterstaat. Gebruik is gemaakt van het model WAQUA [8] voor de waterstanden en SWAN voor de golven. Elk model is een versimpelde weergave van de werkelijkheid, waarbij aannames moeten worden gedaan, uitgangspunten moeten worden gekozen en de balans moet worden gezocht tussen rekentijd en kwaliteit van de uitkomsten.

In hoofdstuk 0 is een samenvatting opgenomen van beide modellen en de daarmee uitgevoerde 'productieberekeningen' die hebben geresulteerd in een database met waterstanden en golven bij vele combinaties van meerpeil, windsnelheid en windrichting. Aangegeven is of er aanleiding is, met de kennis van nu, andere uitgangspunten te kiezen die tot (significant) andere belastingen zouden leiden. In paragraaf 4.5 tenslotte is het probabilistische belastingmodel van het IJsselmeer beknopt beschreven [9]. Dit wiskundige model beschrijft de samenhang tussen het meerpeil, de windsnelheid en de windrichting en wordt gebruikt om trekkingen te doen uit de database met waterstanden en golven. Aanpassingen aan het probabilistische model beïnvloeden de belastingen ook. Voor zover aan de orde komen deze aanpassingen in rapport *Hydraulische Belastingen IJsselmeerdijk, Voorstel tot actualiseren databases en te gebruiken rekentechnieken* [2] aan bod.

# 2 Het IJsselmeer

## 2.1 Het watersysteem

Het IJsselmeer is ontstaan na de aanleg van de Afsluitdijk in 1932, die in het noordwesten het IJsselmeer begrenst. Het meer wordt verder begrensd (zie Figuur 8) door:

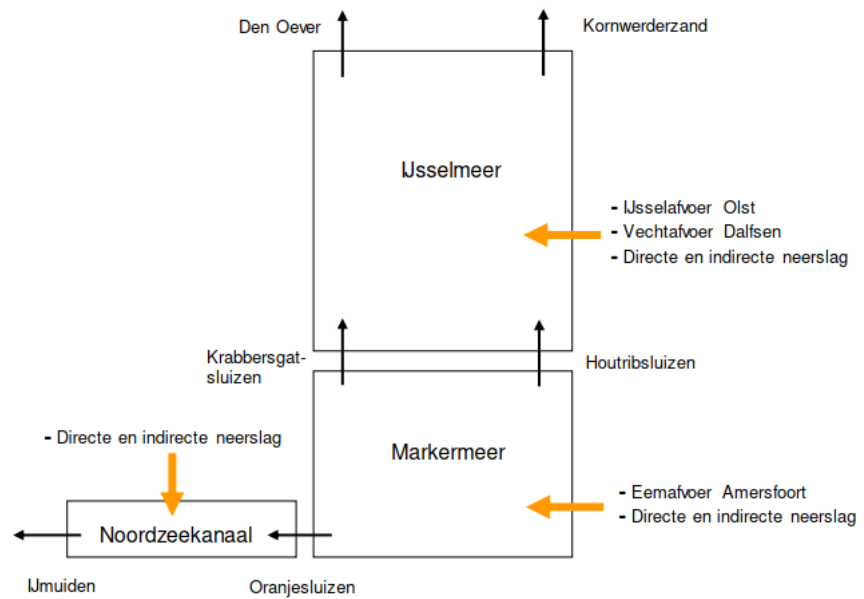
- De dijken in Noord Holland, tussen Den Oever en Enkhuizen;
- De dijken in Friesland tussen Kornwerderzand en Lemmer;
- De dijken in de Noordoostpolder tussen Lemmer en de Ketelbrug;
- De dijken in Zuidelijk Flevoland tussen de Ketelbrug en de Houtribdijk;
- De Houtribdijk.

De IJssel stroomt via het Ketelmeer in het IJsselmeer. In de Afsluitdijk bevinden zich spuisluisen naar de Waddenzee, bij Den Oever en Kornwerderzand (●). In de Houtribdijk bevinden zich, verbonden met het Markermeer, de Krabbersgatsluizen en de Houtribsluizen (●). Zie Figuur 9.

Figuur 8  
IJsselmeer [10].

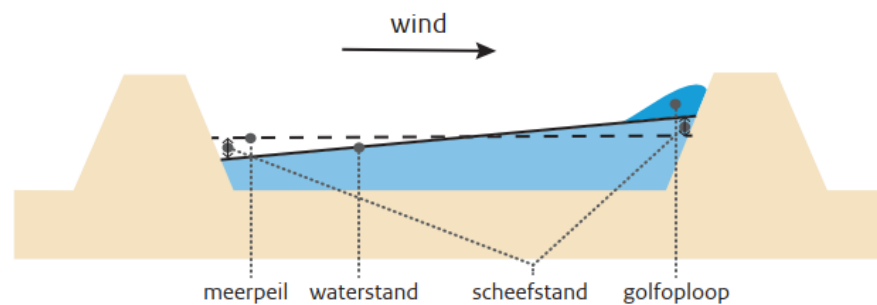


Figuur 9  
Schematische weergave watersystemen [11].



Sterk vereenvoudigd kunnen we het IJsselmeer zien als een 'bak' van 1133 km<sup>2</sup>, waarvan het waterpeil wordt beïnvloed door de afvoeren van de IJssel en de Vecht, neerslag en verdamping, de toevoer vanuit het Markermeer, de toevoer via gemalen en door het spuibeheer bij Den Oever en Kornwerderzand. Een nuttige animatie van de werking van watersysteem is in 2013 door het Deltaprogramma IJsselmeergebied gemaakt [12]. De belangrijkste bedreigingen voor de waterkeringen langs het IJsselmeer zijn het *meerpeil* op een bepaald moment (gemiddeld over het IJsselmeer) én de *wind* die voor scheefstand (opzet) en golven zorgt.

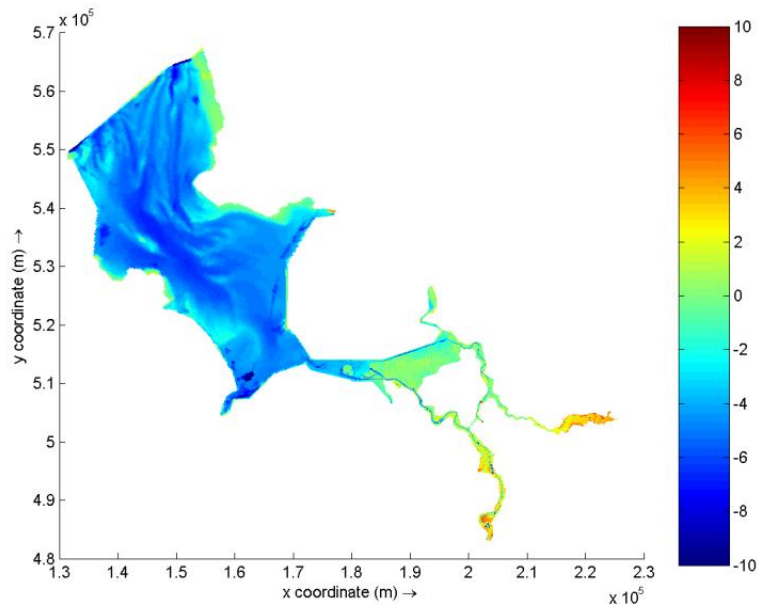
Figuur 10  
Visualisatie IJsselmeer, uit Peilbesluit IJsselmeergebied 2018 [13].



De bodemhoogte van het IJsselmeer is weergegeven in Figuur 11 [14]. Te zien is dat de gemiddelde bodemhoogte ongeveer NAP -4m is.



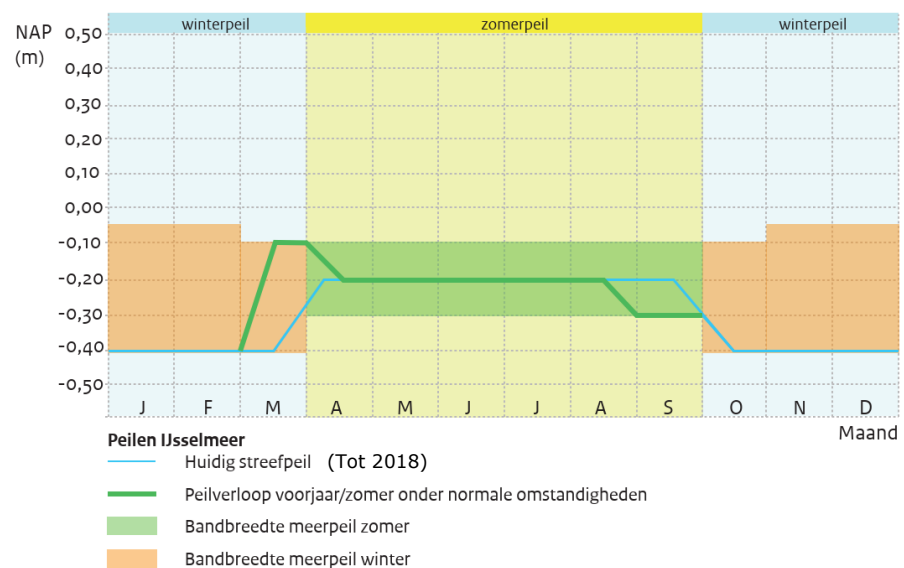
Figuur 11  
Bodemhoogte  
WAQUA model  
(Figuur 2.4 in [14]).



### 2.1.1 Meerpeil

Het meerpeil wordt vanwege diverse functies zo stabiel mogelijk op een afgesproken niveau gehouden. Deze afspraken zijn vastgelegd in het peilbesluit IJsselmeer [13]. In de zomer ligt het streefpeil tussen -0,30 m en -0,10 m NAP. In de winter tussen -0,40 en -0,05 m NAP. Zie Figuur 12. Deze peilen worden echter beïnvloed door de dagelijkse omstandigheden, met name door de wind. Wind zorgt voor scheefstand van het IJsselmeer en voor golven.

Figuur 12  
Zomer- en  
winter(meer)peil  
[13].

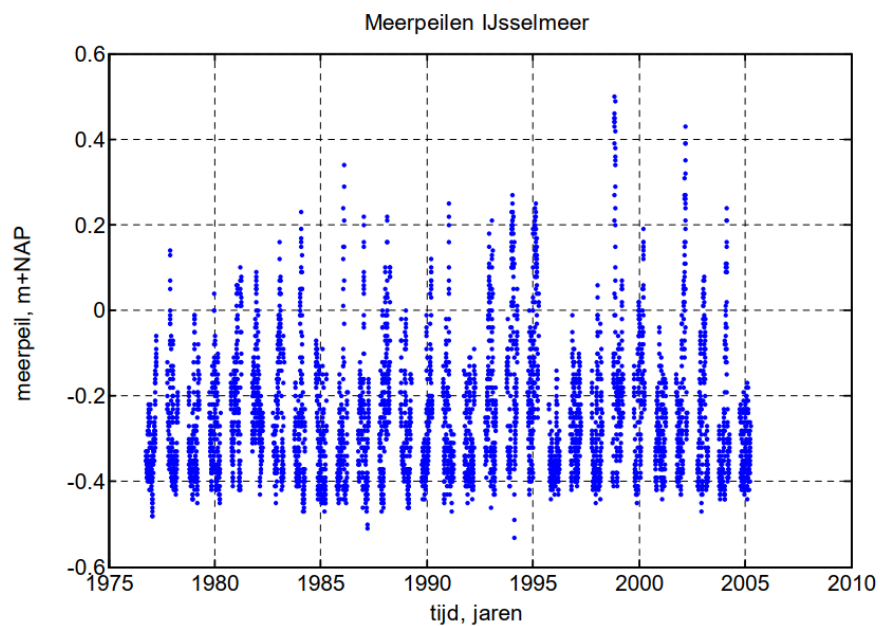


De IJssel en Vecht stromen via het Ketelmeer naar het IJsselmeer, waardoor het IJsselmeerpeil toeneemt. Via de sluisen in de Afsluitdijk stroomt het water uiteindelijk naar de Waddenzee. De rivierafvoeren beïnvloeden het meerpeil weliswaar, maar dat gaat op een veel langere tijdschaal dan de

invloed van de wind. Vandaar dat de rivierafvoeren geen *directe* rol spelen in de berekening van extreme waterstanden en golven voor het IJsselmeer (zie paragraaf 4.5).

Er is geen reden om binnen de verkenning af te wijken van het uitgangspunt dat het IJsselmeerpeil tot 2050 gelijk blijft aan nu en daarna meestijgt met de zeespiegelstijging. Vooralsnog wordt er rekening gehouden met 30 cm stijging tussen 2050 en 2080. In Figuur 13 zijn ter illustratie gemeten meerpeilen weergegeven voor de periode 1997 tot en met 2005.

*Figuur 13  
Meerpeilen als  
functie van de tijd  
[15].*



Zie voor de in het belastingmodel gebruikte IJsselmeerpeilstatistiek paragraaf 5.1.

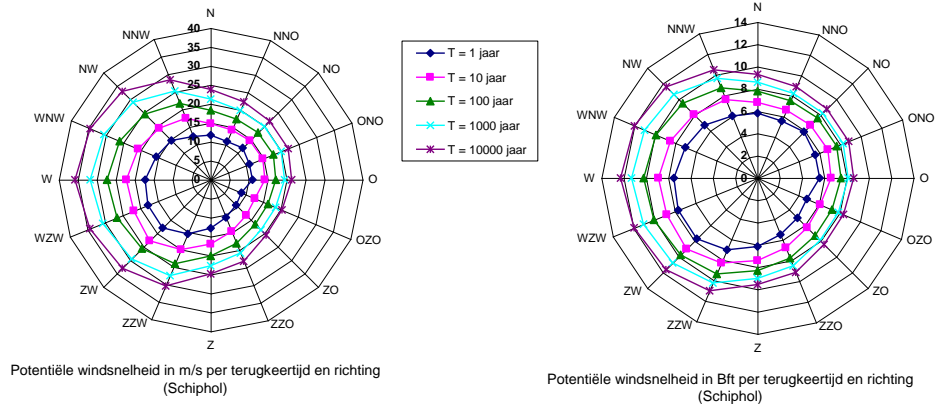
### 2.1.2 Windsnelheid en -richting

Hoe harder de wind, hoe hoger de schuifspanning tussen lucht en water, waardoor het water scheef gaat staan (windopzet) en er golven ontstaan. Hoe langer de wind aanhoudt, hoe meer de scheefstand tot ontwikkeling kan komen en hoe hoger de golven worden. Bij het bepalen van hydraulische belastingen wordt in Nederland, afhankelijk van de locatie, gebruik gemaakt van de windstatistiek van Schiphol of Deelen. Voor de IJsselmeerdijk betreft het Schiphol. Het KNMI meet al jaren de windsnelheid en -richting. Op basis van die jarenlange meetgegevens en gebruik makend van zogenaamde 'extreme waarden statistiek', zijn de kansen op windsnelheden en -richtingen afgeleid, weergegeven in Figuur 14. De kansen op zéér hoge windsnelheden zijn erg klein, maar juist deze extreme windsnelheden spelen een belangrijke rol bij de hydraulische belastingen.

*Figuur 14  
Overschrijdingskansen  
en potentiële*



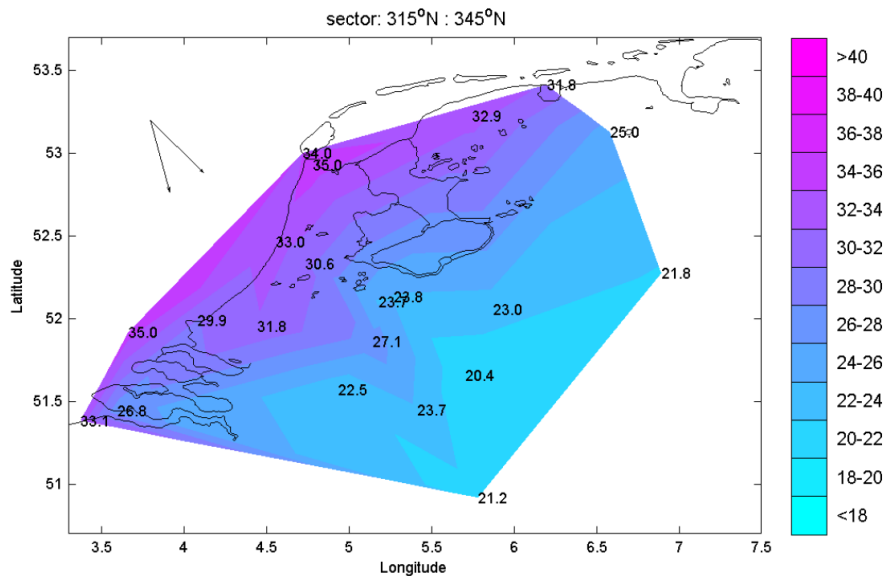
windsnelheid  
Schiphol (Figuur 2-2  
in [16]).



In de modellen voor waterstanden en golven wordt gebruik gemaakt van de lokale windsnelheid op 10 meter hoogte ( $u_{10}$ ) en van de zogenaamde potentiële windsnelheid. Dit is een fictieve uurgemiddelde windsnelheid op 10 meter boven een terrein met een lokale *ruwheid* van 0.03 meter (denk aan grassprietten). De potentiële windsnelheid wordt met name gebruikt om ruimtelijke verschillen in windsnelheid als gevolg van verschillen in lokale ruwheden te elimineren.

In Figuur 15 [17] zijn voor een overschrijdingskans van 1:10.000<sup>e</sup> per jaar de potentiële windsnelheden bij wind uit het noordwesten gepresenteerd. We zien bij deze frequentie in een groot deel van het land en ook op het IJsselmeer windsnelheden boven de 30 m/s, windkracht 11-12.

Figuur 15  
Potentiële  
windsnelheid voor  
een herhalings  
tijd van 10000  
jaar in  
m/s voor wind  
sector  
tussen 315-345°  
N  
[17].



Naast de windsnelheid is ook de richting van belang. Wind (storm) uit het noordwesten zorgt immers voor opzet én golven tegen de IJsselmeerdijk, terwijl wanneer de wind aflagig is, de dijk niet wordt aangevallen. Ook hier geldt de windstatistiek van meetstation Schiphol. Op Schiphol waait de wind het meest uit het zuidwesten.

Bij het berekenen van hydraulische belastingen op de IJsselmeerdijken worden zowel de kansen op de diverse windrichtingen als de kansen op een windsnelheid gegeven een windrichting meegenomen. Bij elke combinatie van windrichting en maximale windsnelheid hoort dus een kans, zoals ook is te zien in Figuur 14. Zo hoort bij een westenwind (W) van 35 m/s ofwel ruim windkracht 12 een terugkeertijd T van 10.000 jaar, terwijl wind uit het oosten (O) bij een terugkeertijd T van 10.000 jaar net boven de 20 m/s ofwel windkracht 8 uit komt.

Beide variabelen, windsnelheid en windrichting, zijn voorzien van hun statistische onzekerheden in het belastingmodel dat is geïmplementeerd in de applicaties Hydra-NL en Riskeer. Hydra-NL is de standaard applicatie in Nederland voor het bepalen van hydraulische ontwerpbelastingen op primaire waterkeringen.

## 2.2 Waterstanden IJsselmeer

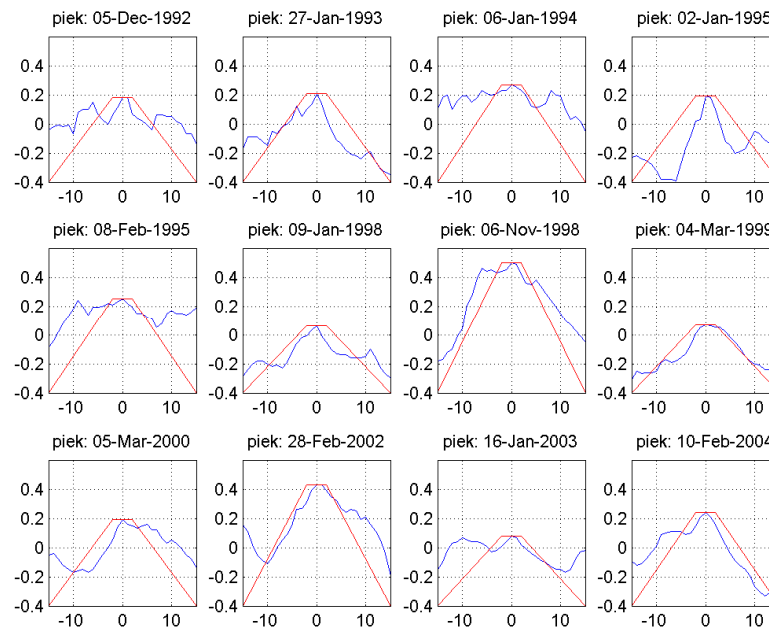
Het meerpeil wordt beïnvloed door de afvoer van de IJssel en de Vecht en het al dan niet kunnen spuien via de sluizen in de Afsluitdijk naar de Waddenzee, echter de stormduur is voor de rivierafvoeren te kort om het meerpeil significant te beïnvloeden. Het meerpeil wordt daarom constant verondersteld tijdens een hoogwatergebeurtenis. De wind waait over het wateroppervlak en zorgt via wrijving voor een scheefstand, zoals al in Figuur 10 is weergegeven. Deze scheefstand moet worden opgeteld bij het constante meerpeil. Opwaaiing/scheefstand neemt sneller toe naarmate de windsnelheid groter wordt. In het bovenste deel van de watermassa stroomt het water met de wind mee, in het onderste gedeelte vindt terugstroming plaats. Deze terugstroming wordt sterker bij toenemende waterdiepte: de opwaaiing neemt dan af. Er ontstaat een evenwicht als deze situatie lang genoeg duurt.

Voor een waterstandsverhoging tegen de IJsselmeerdijk zal het water eerst enige tijd naar de dijk toe moeten stromen en ook golven hebben tijd nodig om te groeien tot hun evenwichtswaarde. Het IJsselmeer reageert echter snel op harde wind, de maximale opwaaiing wordt al binnen ongeveer twee uur na de top van een storm bereikt. De wind is voor de IJsselmeerdijken langs Flevoland van veel groter belang dan het meerpeil. Immers, de kans dat een (zeer) hoog meerpeil samenvalt met een zware noordwester storm is erg klein. Aanzienlijke scheefstand en hoge golven zijn waarschijnlijker bij een lager (gemiddeld) meerpeil.

De wind draait meestal gedurende een storm en neemt ook in snelheid toe en weer af. Elke storm is echter uniek. Om toch met het verloop van stormen te kunnen rekenen in een wiskundig belastingmodel, wordt gebruik gemaakt van gestandaardiseerde 'waterstands-golfvormen' zoals weergegeven in Figuur 16. In deze figuur [15] is van 12 hoogwaters het verloop weergegeven en de gestandaardiseerde trapezia, met een opbouwende fase, een piek/top van bepaalde duur en een afbouwende fase. Gebleken is dat het precieze

verloop van de waterstand niet heel belangrijk is voor de belastingen op de dijken. Een gestandaardiseerd trapezium volstaat, met als voordeel dat daar relatief gemakkelijk mee is te rekenen.

*Figuur 16  
12 hoogwaters  
IJsselmeer (> 0.05  
m+NAP) in de  
periode 1992-2004  
[15].*



Daadwerkelijk opgetreden stormverlopen zoals weergegeven in Figuur 16 (blauwe lijnen) worden gebruikt om het WAQUA waterbewegingsmodel van het IJsselmeergebied 'af te regelen' (kalibreren). Het idee is dat als het model deze stormen goed nabootst, ook extremere situaties goed worden berekend. Zie verder paragraaf 4.1.

## 2.3 Golven op het IJsselmeer

De hoogte en lengte van golven die op het IJsselmeer ontstaan zijn afhankelijk van een aantal factoren. De belangrijkste zijn:

- De windsnelheid.
- De windrichting en daarmee de strijklengte (*fetch* in het Engels), ofwel de lengte waarover de golven zich kunnen ontwikkelen. Bij storm uit het noordwesten is dit op het IJsselmeer tot wel 57 kilometer.
- De waterdiepte.
- De ruwheid van het wateroppervlak en daarmee de wrijving tussen wind en water.

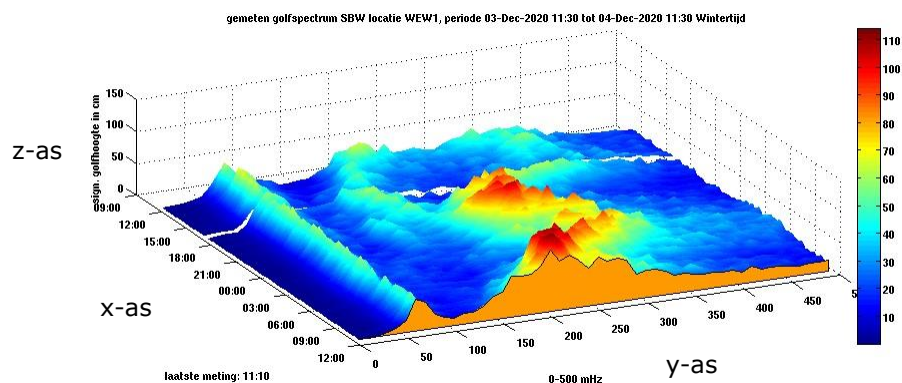
De interactie tussen het wateroppervlakte, de waterdiepte, stroming, wind en golven is complex. Golven maken het wateroppervlak minder glad, hogere golven 'vangen' dus meer windenergie waardoor ze weer extra groeien. De golfafhankelijke ruwheid van het wateroppervlakte speelt ook een rol in de opwaaiing van het water. Toenemende waterdiepte en stroming hebben weer invloed op de hoogte en voortplantingssnelheid van de golven enzovoorts.

Het meest *eenvoudige* model waarmee doorgaans golven worden berekend is het semi-empirische model van Bretschneider. Invoer voor dit ééndimensionale model is een gemiddelde waterdiepte ( $d$ ), een zogenaamde effectieve strijklengte ( $F$ ) waarbij verschillende windrichtingen zijn gemiddeld én de windsnelheid op 10 meter hoogte ( $u_{10}$ ). Dit model wordt doorgaans bij smalle wateren toegepast, met name op de rivieren. Het resultaat is een golfhoogte  $H_{sig}$  en een golfperiode  $T_{sig}$ . Bretschneider wordt vaak gebruikt om een snelle inschatting te maken van de orde grootte van de golven.

Op het IJsselmeer wordt echter al sinds vele jaren gerekend met een meer geavanceerd 2-dimensionaal model. Eerst was dit HISWA, dat is opgevolgd door SWAN (TU Delft) [18]. SWAN (**S**imulating **WA**ves **N**earshore) is een zogenaamd *spectraal* golfmodel, waarmee onder meer golven in tijd en ruimte zijn te berekenen inclusief de invloed van wind, waterstroming en diepte op golven, de onderlinge invloed van golven, het breken van golven en het ontstaan van schuimkoppen. Dit model rekent niet één significante golf uit, maar alle mogelijke golven binnen een bepaalde kansverdeling.

Een golf kan worden beschreven als enkelvoudige golf met een (significante) golfhoogte en -periode en gemiddelde voortplantingsrichting, echter een golfveld op zee en ook op het IJsselmeer bestaat in werkelijkheid uit vele verschillende (samengestelde) golven, die zich goed statistisch laten beschrijven met een zogenaamd *golfspectrum* dat wordt berekend aan de hand van waarnemingen. Het spectrum laat de hoeveelheid *energie* zien als functie van de frequentie van de golven. SWAN berekent spectra voor een storm, zodat die kunnen worden vergeleken met het uit metingen van een storm geconstrueerde spectrum (kalibratie). Figuur 17 bevat een voorbeeld van een door een meetboei gemeten spectrum, als functie van de tijd. Op de x-as is de tijd weergegeven (uren), op de y-as de frequentie van de golven en op de z-as golfhoogte als functie van tijd en frequentie. Hoe hoger de golf, hoe meer energie.

*Figuur 17  
voorbeeld gemeten  
golfspectrum  
Rottumerplaat  
Noordzee [19].*



Het SWAN-model voor het IJsselmeer, waarmee in 2011 berekeningen zijn uitgevoerd, is beschreven in paragraaf 4.3.

*Figuur 18  
Golven tijdens storm  
op het IJsselmeer  
[20].*



De golven op het IJsselmeer kunnen vanzelfsprekend uit alle richtingen komen, echter de IJsselmeerdijk wordt vooral belast door golven uit het noorden tot noordwesten. Vanuit die richting is de strijklengte het grootste.



# 3

## Historie hydraulische belastingen IJsselmeer

Dit hoofdstuk bevat een beschrijving van de ontwikkeling van de hydraulische belastingen op het IJsselmeer vanaf 1986 tot nu. In de afgelopen 35 jaar is met name door Rijkswaterstaat, het KNMI, Deltares (en voorloper WL) veel kennis ontwikkeld. Er zijn golfmeetcampagnes met meetboeien uitgevoerd en de modellen voor golven en waterstanden zijn steeds geavanceerder geworden. Datzelfde geldt voor de probabilistische belastingmodellen.

Dit hoofdstuk is zuiver informatief. De genoemde getallen, zoals benodigde dijkhoogten en optredende waterstanden en golven, zijn veelal achterhaald door nieuwe inzichten, maar geven goed beeld van de ontwikkelingen van 1986 tot nu.

### 3.1 Tot 1996

Tot 1996 werden voor de IJsselmeerdijk, net als voor alle primaire waterkeringen, door Rijkswaterstaat *minimaal benodigde kruinhoogten* bepaald, berekend met het model PEILOF (Directie Zuiderzeewerken en DBW/RIZA, 1986). Zie ter illustratie figuur 1, afkomstig uit de rapportage 'Veiligheidsnormen IJsselmeer' [21] en RWS Directie Zuiderzeewerken[22]. In deze tabel is de 1/4000<sup>e</sup> overschrijdingskansnorm opgenomen die in 1996 wettelijk werd vastgelegd. De dijk moest belastingen bij deze frequentie kunnen keren, ook wel standzekerheid genoemd. Inmiddels hebben we een ander type norm, namelijk de overstromingskans. De norm is er niet langer om standzekerheid te borgen, maar om de kans op een overstroming te maximaliseren.

We zien de destijds aanwezige kruinhoogten en op twee locaties (12B en 13C) een kruinhoogtetekort. Op stabiliteit en andere faalmechanismen werd niet gecontroleerd. Er werd van hydraulische randvoorwaarden gesproken, nu wordt vaker de term 'hydraulische belastingen' gehanteerd.

Figuur 19  
Berekeningen  
kruinhoogten 1986  
[22].

MAATGEVENDE KRUIHHOOGTEN DIJKEN IJSSELREEK

TABEL 2

DIJKTRAJECT	DIJKLOCATIE ZIE I BYLAGE 4	DECIMERINGS- HOOGTE (M)	BESTAANDE KRUIHHOOGTE EN Overschrijdingsfreg. MAP-101 (1/JAAR)	MAATGEVENDE KRUIHHOOGTE(H) EN DIJKVERHOOGTING(V) VOOR DE AANGE- GEVENE Overschrijdingsovergangenties 1/1250 1/2500 1/4000						
				H1	V1	H2	V2	H3	V3	
MIERINGERMEER	01	.39	3.95	1/3900	3.76		3.04		3.95	
MIERINGERMEER	02A	.34	3.95	1/ 380	4.18	00.23	4.25	00.30	4.35	00.40
MIERINGERMEER	02B	.35	4.50	1/5900	4.26		4.33		4.44	
MIERINGERMEER	03A	.34	4.50	1/7500	4.23		4.30		4.41	
MEST FRIESLAND	03B	.39	3.70	1/ 100	4.09	00.39	4.17	00.47	4.29	00.59
MEST FRIESLAND	04A	.39	4.40	(1/10000)	2.93		3.01		3.13	
MEST FRIESLAND	04B	.39	4.30	(1/10000)	3.05		3.13		3.24	
MEST FRIESLAND	05A	.34	5.95	(1/10000)	4.45		4.52		4.62	
MEST FRIESLAND	05B	.45	5.00	(1/10000)	4.31		4.40		4.54	
MEST FRIESLAND	06A	.39	6.10	(1/10000)	3.79		3.87		3.98	
MEST FRIESLAND	06C	.39	6.10	(1/10000)	3.59		3.67		3.79	
MEST FRIESLAND	06D	.39	4.60	(1/10000)	2.53		2.61		2.73	
MEST FRIESLAND	07	.39	4.60	(1/10000)	2.37		2.45		2.57	
DYK ENKHELYSTD	08A	.39	6.50	(1/10000)	2.01		2.09		3.00	
DYK ENKHELYSTD	09B	.39	7.65	(1/10000)	3.52		3.60		3.72	
DYK ENKHELYSTD	09C	.39	7.65	(1/10000)	3.44		3.52		3.64	
DYK ENKHELYSTD	09A	.39	7.65	(1/10000)	3.39		3.47		3.59	
DYK ENKHELYSTD	09B	.39	5.70	(1/10000)	2.73		2.81		2.93	
DYK ENKHELYSTD	10D	.50	5.70	(1/10000)	3.00		3.20		3.30	
DYK ENKHELYSTD	10C	.52	3.50	(1/10000)	2.01		2.92		3.07	
DYK ENKHELYSTD	10A	.50	3.50	(1/10000)	2.95		3.07		3.25	
DYK ENKHELYSTD	10B	.50	3.50	(1/10000)	2.46		2.57		2.72	
DYK ENKHELYSTD	11A	.51	3.50	(1/10000)	2.51		2.61		2.77	
DDST FLEVOLAND	12B	.70	3.00	1/ 900	3.90		4.06	00.26	4.29	00.49
DDST FLEVOLAND	12A	.04	3.90	1/3200	3.54		3.71		3.96	
DDST FLEVOLAND	12C	.05	5.20	(1/10000)	3.95		4.12		4.30	
DDST FLEVOLAND	12D	1.34	5.20	1/4700	4.45		4.72		5.12	
DDST FLEVOLAND	13C	1.19	5.20	1/1100	3.26		5.51	00.31	5.07	00.67
DDST FLEVOLAND	13B	.95	5.20	(1/5000)	4.60		4.80		5.00	
DDST FLEVOLAND	13A	.97	5.20	1/3900	4.74		4.94		5.23	
N. OOST POLDER	17A	.71	4.65	1/5000	4.17		4.32		4.53	
N. OOST POLDER	17B	1.03	4.65	1/2000	4.20		4.50		4.81	
N. OOST POLDER	17C	.95	4.65	1/ 100	5.56	00.91	5.75	01.10	6.04	01.39
N. OOST POLDER	10A	.97	4.65	1/ 200	5.49	00.04	5.69	01.04	5.90	01.33
N. OOST POLDER	10B	.99	4.65	1/ 400	5.11	00.46	5.32	00.87	5.62	00.97
N. OOST POLDER	17D	.06	4.65	1/1600	4.57		4.74		5.00	00.35
N. OOST POLDER	19A	.92	4.65	1/1500	4.57		4.76		5.03	00.30

GRONDSLAG: (MERPEIL+OPMAAKING+GOLFOOPLOOP)  
GOLFOOPLOOP NIET EN 0.50 METER  
BUIJENTALUD DIJKVERHOOGING I.V.M. 25-GOLFOOPLOOP OVERAL 1:4 AANGENOMEN  
DIJKVERHOOGINGEN KLEINER DAN 0.2 METER ZIJN NIET VERMELD  
DECIMERINGSHOOGTE IS KRUIHHOOGTEVERSCHEIL BIJ VERHOOGING/VERKLEINING  
OVERSCHRIJDINGSFREQUENTIE MET FACTOR 10

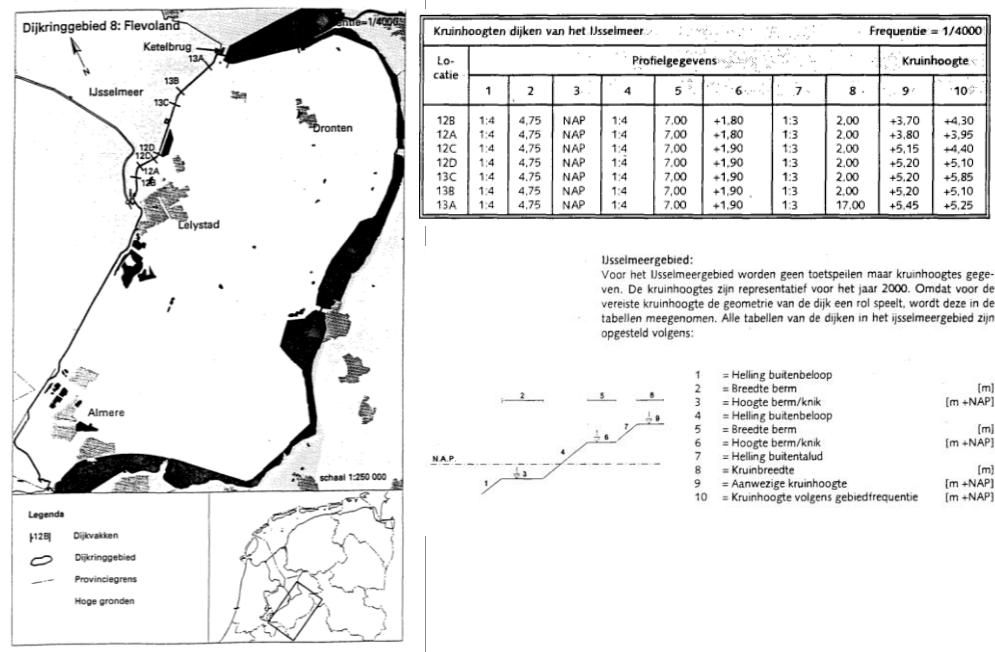
RIJKSWATERSTAAT DIENST BINNENWATEREN  
HOOFDAFDELING WATERSYSTEMEN

### 3.2 1996-2001, eerste ronde toetsing primaire waterkeringen (HR1996)

Toen in 1996 de Wet op de Waterkering van kracht werd startte ook de eerste *toetsing primaire waterkeringen*. In de wet lagen voor het eerst normen vast (overschrijdingskans) en via de toetsing moest worden aangetoond of die normen werden gehaald. Voor de IJsselmeerdijk gold zoals hiervoor opgemerkt een *overschrijdingskansnorm* van 1/4000<sup>e</sup> per jaar. Dat betekent dat de dijken extreme condities met een kans van 1/4000<sup>e</sup> per jaar moesten kunnen keren, ofwel standzeker zijn. De bijbehorende *maatgevende waterstanden en golven*, destijds hydraulische randvoorwaarden geheten, werden in het zogenaamde Randvoorwaardenboek gepubliceerd. Per dijk (nu bestaan die niet meer en hebben we normtrajecten) was voor een aantal dijkvakken de Maatgevende Hoog Waterstand (MHW) bepaald en één combinatie van golfhoogte en periode. Voor dijkkring 8 (Flevoland) zijn destijds door RWS RIZA direct minimale kruinhoogtes bepaald met het model PEILOF en was het aan de toenmalige beheerder RWS-directie IJsselmeergebied om te verifiëren of die kruinhoogte ook aanwezig was. Zie Figuur 20. De destijds berekende minimale kruinhoogte (kolom 10) werd blijkbaar niet overal gehaald (kolom 9). Tussen 2000 en 2005 is de dijk (gedeeltelijk) versterkt, maar er heeft geen kruinverhoging plaatsgevonden.



Figuur 20  
Aanwezige en benodigde kruinhoogte IJsselmeerdijken volgens HR1996 [23].

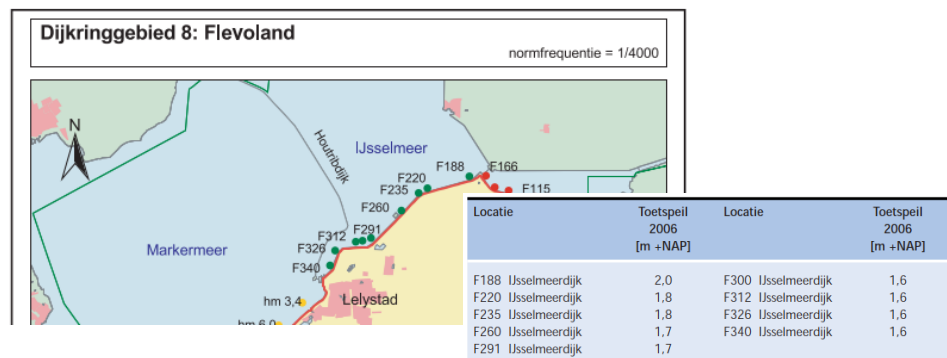


### 3.3

## 2001 – 2006 , tweede ronde toetsing primaire waterkeringen (HR2001)

Werden in 1996 nog minimaal benodigde kruinhoogten afgegeven, deze werden vanaf 2001 ook voor de IJsselmeerdijken vervangen door hydraulische randvoorwaarden bestaande uit toetspeilen (waterstanden bij de normfrequentie) en golfrandvoorwaarden. PEILOF werd vervangen door het probabilistische programma Hydra-M (meren), een voorloper van Hydra-NL<sup>6</sup> dat we nu gebruiken.

Figuur 21  
Toetspeilen (meerpeil + windopzet) IJsselmeerdijk volgens HR2006 [24].



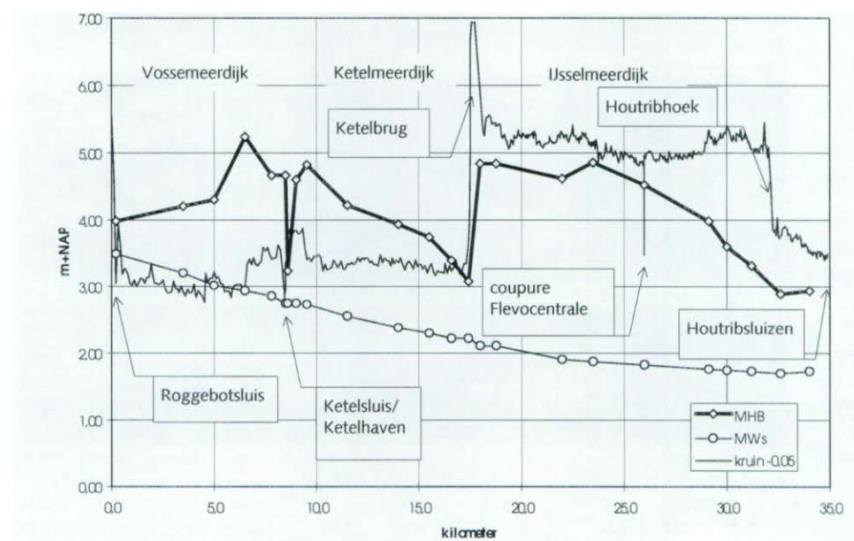
In 2001 zijn de in 1999 herziene randvoorwaarden voor het IJsselmeer, het Ketelmeer en het Vossemeer opgenomen in de HR2001[24]. De waterstanden zijn destijds berekend met een WAQUA-model en de golven

<sup>6</sup> <https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/applicaties-modellen/applicaties-per/omgevings/omgevings/hydra-nl-0/>

met het golvenmodel HISWA. De golven op de IJsselmeerdijk zijn overigens niet gepubliceerd in het Randvoorwaardenboek 2001, maar waren beschikbaar via de applicatie Hydra-M. Voor bekledingen was er een apart probabilistisch model ontwikkeld, namelijk Hydra-Q, om golven bij verschillende waterdiepten te kunnen berekenen. Deze functionaliteit bestaat nog steeds in de huidige applicaties Hydra-NL en Riskeer.

Vanaf eind jaren '90 tot 2005 zijn er door Rijkswaterstaat dienst IJsselmeergebied versterkingen uitgevoerd aan de dijken langs het Ketelmeer, het Vossemeer en het IJsselmeer. De IJsselmeerdijken waren volgens de toen geldende hydraulische randvoorwaarden, berekend met Hydra-M, voldoende hoog. Let wel, er werd toen *niet* -zoals nu- gerekend met model- en statistische onzekerheden, waardoor de destijds benodigde kruin sowieso lager uitvalt. Daarnaast was de norm (overschrijdingskans) getalsmatig een stuk minder hoog dan de huidige norm (overstromingskans). In Figuur 22 is de hoogteopgave gepresenteerd als verschil tussen de Maatgevende Hydraulische Belasting (MHB, term bestaat niet meer) en kruin, zoals weergegeven in het rapport Projectnota en Milieueffectrapport[25]. Tegenwoordig spreken we niet langer van MHB, maar van HBN, ofwel het Hydraulisch Belastingniveau als maat voor de benodigde kruinhoogte.

Figuur 22  
Kruinhoogten  
IJsselmeerdijk [25].



Uit deze figuur blijkt dat er destijds, onder de toen geldende norm en met de toen beschikbare rekenregels, geen kruinhoogtetekort was tussen de Ketelbrug en de Houtribsluizen.

### 3.4

## 2006 – 2013, (verlengde) derde ronde toetsing primaire waterkeringen (HR2006)

*Figuur 23  
Passage over het  
niet actualiseren van  
de Meren [15].*

## 9. Meren

### 9.1 Hydraulische Randvoorwaarden 2006

Alle Hydraulische Randvoorwaarden die in HR2001 zijn vastgesteld, zijn ongewijzigd overgenomen in de HR2006. Voor IJburg en de Eem zijn nieuwe Hydraulische Randvoorwaarden bepaald, en zijn hieraan toegevoegd. Op verzoek van de waterschappen zijn ook enkele locaties in het Gooimeer aan de Hydraulische Randvoorwaarden toegevoegd.

De totstandkoming van de Hydraulische Randvoorwaarden is gerapporteerd in [7].

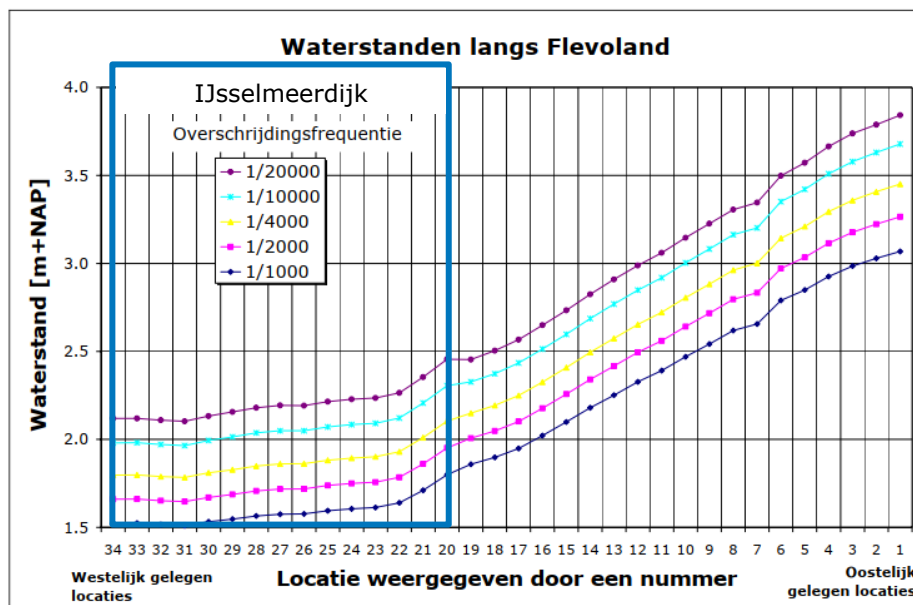
Voor de HR2006 zijn er uiteindelijk geen nieuwe berekeningen uitgevoerd voor het IJsselmeer, Ketelmeer of Vossemeer. De HR2001 zijn overgenomen in de HR2006.

### 3.5

## 2011, Concept Randvoorwaarden

In 2011 zijn hydraulische belastingen bepaald voor heel Nederland, echter deze zijn *niet formeel verschenen* omdat er inmiddels werd ingezet op de overstromingskansbenadering, die uiteindelijk op 1 januari 2017 van kracht is geworden. De vierde toetsronde is dus nooit gestart en de 'getallen' uit 2011 zijn concept gebleven. Echter, veel van het uitgevoerde werk, met name de productieberekeningen van waterstanden en golven, kon gelukkig worden gebruikt in 2017. In Figuur 24 zijn de door HKV met Hydra Zoet (versie tussen Hydra-M en Hydra-NL in) berekende waterstanden voor vijf frequenties en op 34 uitvoerlocaties langs dijkkring 8 (Flevoland) weergegeven, zoals beschreven in het rapport Concept Toetspeilen 2011 [26]. Aardig detail is dat de toetspeilen voor de primaire waterkeringen langs het IJsselmeer (waterstanden bij de normfrequentie) door HKV (M. Duits) destijds 'uitermate logisch' zijn bevonden, wat wil zeggen dat er geen vreemde sprongen zijn geconstateerd in waterstanden en dat de waarden in het verwachte bereik lagen. Zie Figuur 24 voor de destijds berekende waterstanden bij diverse terugkeertijden. Binnen de blauwe rechthoek is het projectgebied weergegeven (Houtribsluizen – Ketelbrug).

Figuur 24  
Waterstanden als functie van de overschrijdingsfrequentie voor dijkkring 8 (Flevoland) langs het IJssel-, Ketel- en Vossemeer [26].



### 3.6

## 2017 – heden, Beoordelen en ontwerpen met overstromingskansen

Met de introductie van de overstromingskansen op 1-1-2017 zijn de eisen aan de IJsselmeerdijk getalsmatig veranderd van 1:4000<sup>e</sup> (overschrijdingskans) naar 1:10.000<sup>e</sup> (ondergrens overstromingskansen). Daarnaast is het sinds 2017 de gewoonte om onzekerheden expliciet mee te nemen bij zowel de bepaling van de sterkte van waterkeringen als de belastingen op waterkeringen. Tot 2017 werden de onzekerheden in belastingen verdisconteerd door hogere eisen aan de sterkte te stellen. Rekenen met onzekerheden is de essentie van de overstromingskansbenadering, echter hoe groter de onzekerheden zijn, hoe hoger de overstromingskansen. Wanneer de onzekerheden groot zijn loont het daarom de moeite om te trachten de onzekerheidsbanden te verkleinen door onderzoek in het laboratorium, bureaustudie of metingen in het veld. Denk daarbij aan het verzamelen van de laatste inzichten via literatuuronderzoek, het uitvoeren van grondonderzoek om de geotechnische parameters met meer zekerheid te kunnen kiezen of aan langjarige meetcampagnes om de relatie tussen stormen en golfhoogten en -perioden te bepalen.

Ter illustratie de statistische onzekerheid rondom het IJsselmeerpeil, volgens Geerse [15]. Te zien is dat bij T=10 jaar de onzekerheidsband relatief klein is, immers deze waarden komen redelijk vaak voor en dus zijn er meetgegevens. Hoe kleiner de terugkeertijd, hoe minder meetgegevens en

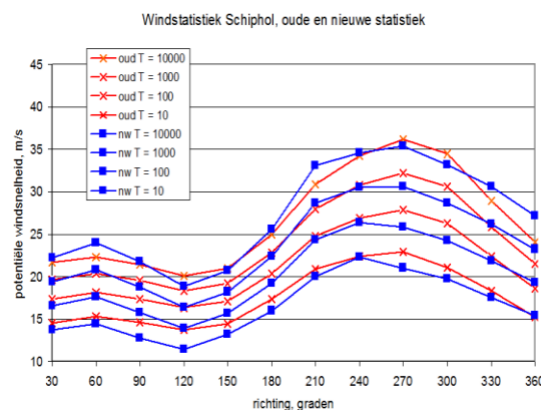
dus hoe onzekerder het wordt, aangezien er moet worden geëxtrapoleerd naar waarden die we nog nooit eerder hebben waargenomen.

*Tabel 2  
Relatie  
IJsselmeerpeil en  
herhalingstijd incl.  
95%  
betrouwbaarheidsba  
nden [15].*

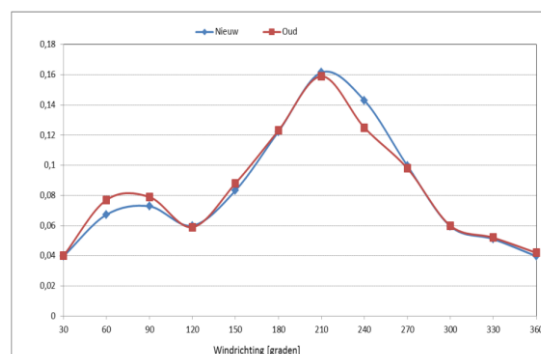
T [jaar]	Meerpeil [m+NAP]	95% ondergrens [m+NAP]	95% bovengrens [m+NAP]
10	0,40	0,33	0,45
100	0,62	0,50	0,77
1.000	0,85	0,62	1,16
10.000	1,07	0,71	1,63
100.000	1,29	0,78	2,19

Aan de meerpeilstatistiek is tussen 2011 en 2017 niets veranderd. De windstatistiek is echter wel geactualiseerd voor het WBI2017. De hydraulische randvoorwaarden HR2006 en de concept randvoorwaarden WTI2011 zijn gebaseerd op de windstatistiek van het KNMI uit 1983, gebaseerd op windmetingen uit de periode 1962-1976. Op basis van langere en betrouwbaardere meetreeksen voor de periode 1970-2008 is door Deltares en het KNMI nieuwe windstatistiek voor potentiële windsnelheden afgeleid voor een groot aantal windstations verspreid over heel Nederland [17], waaronder Schiphol. Deze 'nieuwe' statistiek geeft voor 12 richtingen van 30 graden de overschrijdingsfrequenties van hoge/extreme windsnelheden vanaf overschrijdingsfrequenties van circa 2 keer per jaar.

*Figuur 25  
verschil oude (1993)  
en nieuwe (2009)  
windstatistiek [27].*



*Figuur 26  
Vergelijking van de  
kansverdeling op  
windrichting (30  
graden) voor  
Schiphol [27].*



De verschillen tussen de oude en de nieuwe statistiek (zie Figuur 25 en Figuur 26) zijn over het algemeen beperkt. Voor de belastingen op de IJsselmeerdijk zijn de richtingen 210-330 en de hoge terugkeertijden (10.000 en meer) het meest relevant. In dat bereik liggen de nieuwe windsnelheden over het algemeen wat lager, waarbij gelijk opgemerkt moet worden dat

windsnelheden boven de 30 m/s worden afgetopt (winddragaftopping) en dus geen rol spelen.

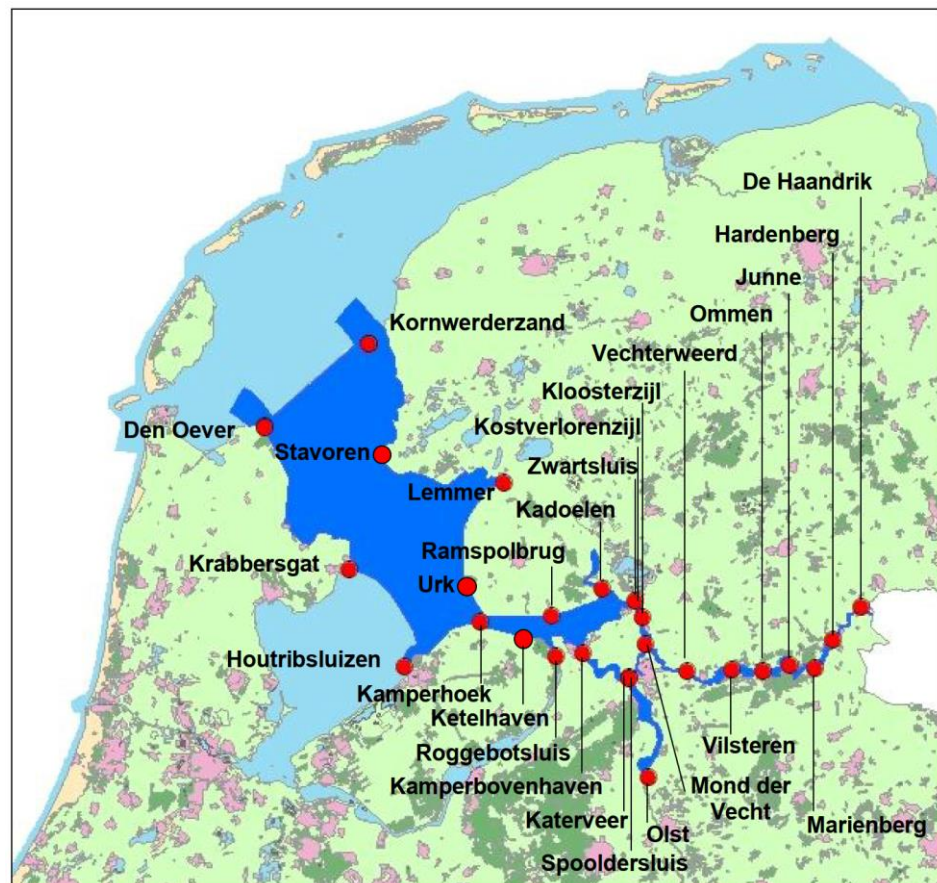


# 4 Rekenen aan waterstanden en golven

## 4.1 Waterstanden - WAQUA model

In paragraaf 2.2 is het WAQUA model reeds genoemd dat door Deltares in 2010 is gemaakt en waarmee in 2011 productieberekeningen zijn gemaakt door Svašek & HKV. In de paragrafen hierna volgt een samenvatting van de modelopbouw en de resultaten van de daarmee gemaakte productieberekeningen waarvan de resultaten uiteindelijk in de database WBI2017 terecht zijn gekomen, zoals ook beschreven in het *Achtergrondrapport WTI-2011 voor IJsselmeer* [28], dat weer is gebaseerd op het werk van Deltares, Alkyon, HKV en Svašek uit 2010/2011.

Figuur 27  
WAQUA Modelgebied  
(blauw) en  
belangrijke punten  
(rood) [8]



Dit WAQUA-model van het IJsselmeer, de Overijsselse Vecht en de IJssel vanaf Olst beschrijft de situatie op 1 januari 2010. Er is eerst een *referentiemodel* gemaakt dat de situatie in 1998 beschrijft, daarna zijn diverse maatregelen toegevoegd aan de Baseline-schematisatie [29], om tot de modellering van de situatie in 2010 te komen. Diepte- en hoogtegegevens, maar ook gegevens over bijvoorbeeld ruwheden, worden in zogenaamde Baseline-schematisaties vastgelegd (GIS-database en -

applicatie binnen ArcGis). Het idee is dat zo de basisgegevens zoals de bodemhoogte-informatie, de ligging van de dijken, en de verschillende vegetatiestructuurtypen uniform, op één plek vastliggen en maatregelen zoals het verruimen van een rivier of het baggeren van de IJsselmeerbodem, navolgbaar kunnen worden toegevoegd (en ook weer verwijderd). De WAQUA schematisaties worden dus telkens gegenereerd vanuit Baseline. Er is destijds gebruik gemaakt van de applicaties Baseline 4 en 5. Anno 2020 is Baseline 6 beschikbaar. Het WAQUA-model en de – berekeningen zijn gemaakt met versie *SIMONA 2009 major-release* [30].

#### 4.1.1 Eisen model

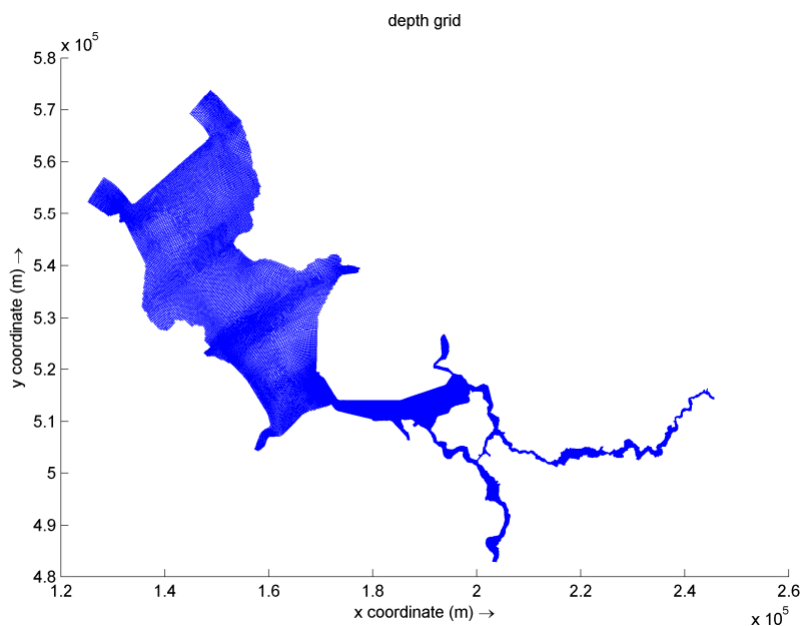
Voor de belastingen op de IJsselmeerdijken is het van belang dat het WAQUA model de (maximale) windopzet tijdens een storm goed berekent. Aan het WAQUA model zijn destijds eisen t.a.v. nauwkeurigheid, numerieke stabiliteit en rekentijd gesteld. Het algemene meerpeil, ofwel het meerpeil zonder wind, moest binnen een marge van 5 cm van de gefilterde, gemeten waarden worden berekend. Stijgingen van het lokale meerpeil als gevolg van wind moesten binnen een marge van 10 tot 20 cm ten opzichte van de metingen worden berekend.

#### 4.1.2 Rekenrooster

De Baseline-informatie is aan het WAQUA rooster toegevoegd (Alkyon 2008 in [8]). Dit rooster is sinds 2008 voor het IJsselmeer niet meer aangepast. Zie Figuur 28.



Figuur 28  
 Het rooster voor de  
 IJVD-modellen  
 (vijs40m\_5c.rgf)  
 (Figuur 4.1 in [8]).



#### 4.1.3

#### Diepte

Het IJsselmeer is voor het 1998-model (referentie) overgenomen van het Alkyon-model (Alkyon, 2008 in [8]). Voor de situatie 2009 is er een *update* van de bodemligging gemaakt, gebaseerd op het dieptebestand IJG-2006. Rijkswaterstaat maakt sinds 1998 dieptebestanden van het IJsselmeer. In Baseline zijn in één keer de nieuwe diepten van 2006 'ingemixt', zoals dat heet (maatregelcode: ym\_zbhgt06).

Er is geen reden om de bodemdieptes van het IJsselmeer ter discussie te stellen. Nieuwe lodingen zullen beperkte verschillen laten zien die marginaal doorwerken op de waterstanden en golven tegen de IJsselmeerdijk.

#### 4.1.4

#### Bodemruwheid

De ruwheid van de IJsselmeerbodem is, net als voor het Ketelmeer, Vossemeer en Zwarte Meer), gedefinieerd met een *constante ruwheidswaarde* volgens de formulering van Manning [31]. De gebruikte waarde ( $\alpha$ ) is 0,022.

Er is geen reden om dit uitgangspunt ter discussie te stellen.

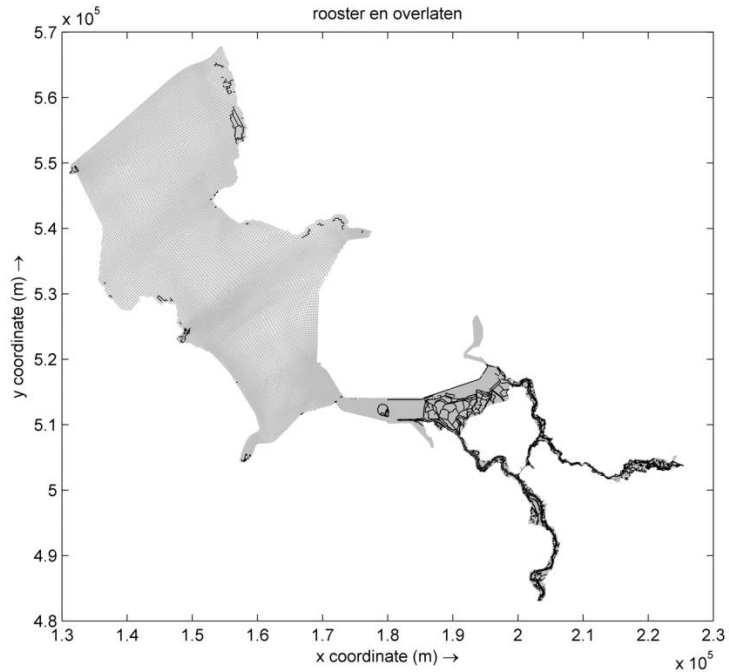
#### 4.1.5

#### Overlaten en kunstwerken

Overlaten in WAQUA dienen om hoger gelegen elementen te modelleren, zoals zomerkaden of dammen. Deze zijn zeer relevant voor de IJssel en de Vecht, maar slechts beperkt voor het gedrag van het IJsselmeer onder stormcondities. Zie ook Figuur 29. Ook de diverse stuwen en andere kunstwerken in het WAQUA model zijn voor het IJsselmeer van ondergeschikt belang.

Er is dan ook geen reden om de WAQUA-berekeningen op dit punt ter discussie te stellen.

*Figuur 29  
Overlaten op het  
WAQUA  
rekenrooster [8].*



#### 4.1.6

#### Randen model

Het IJssel-Vechtdelta WAQUA-model kent vijf modelranden, waarvan drie afvoerranden bovenstrooms (Olst voor de IJssel, Laar voor de Vecht en Zwolle voor het Zwarte Water) en twee waterstandsranden benedenstrooms bij de spuisluizen door de Afsluitdijk (Den Oever en Kornwerderzand). Naast de hoofdrandvoorwaarden zijn ook diverse zijdelingse (laterale) toestromen aan het model toegevoegd, zoals diverse gemalen (Urk, Lemmer, Stavoren etc.) en de spuisluizen in de Houtribdijk (Krabbersgat en Houtrib). Echter ook hiervoor geldt dat de hoeveelheid water die aan het IJsselmeer wordt toegevoegd (inc. regen) of weggenomen (inc. verdamping) tijdens een storm die bepalend is voor de IJsselmeerdijk, verwaarloosbaar is. De complete waterbalans van het IJsselmeer is weergegeven in de vergelijking in Figuur 30.

*Figuur 30  
Waterbalans  
IJsselmeer[8].*

$$Q_{\text{spuisluizen}} = (\text{Neerslag} - \text{verdamping}) \cdot \frac{A_{\text{IJsselmeer}}}{\Delta t} + Q_{\text{IJssel}} + Q_{\text{Vecht}} + Q_{\text{gemalen}} + \Delta h \cdot \frac{A_{\text{IJsselmeer}}}{\Delta t}$$

waarin

- Q = debiet of afvoer (m<sup>3</sup>/s)
- Neerslag = neerslag (m)
- Verdamping = verdamping (m)
- A = oppervlak (m<sup>2</sup>)
- Δt = beschouwde tijdstap (s)
- Δh = verandering meerpeil IJsselmeer (m)

De hiervoor genoemde uitgangspunten zouden bij productie in 2020 nog steeds gelden.

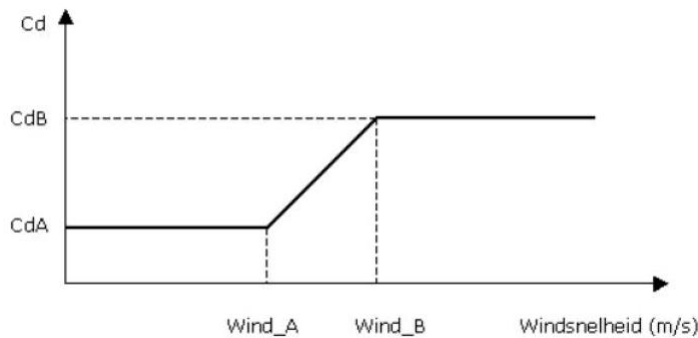
4.1.7

Wind-waterstandinteractie

De wind beïnvloedt de waterstanden op het IJsselmeer. Diverse stormen, gemeten door zowel het KNMI als RWS zijn ter verificatie van de modelwaterstanden ‘op het WAQUA model gezet’. Zie voor enige resultaten paragraaf 4.1.10. WAQUA rekent voor de overdracht van windenergie naar het water met *waterruwheid ofwel winddrag*. Dit is een relatie tussen de windsnelheid en de windschuifspanning op het wateroppervlak. In het algemeen is de waterruwheid geen constante, maar afhankelijk van de windsnelheid: hoe hoger de windsnelheid, hoe groter de waterruwheid. Een veel gebruikte waterruwheidsformulering is die volgens Wu (met Wu-constanten a en b), zie [32] en [33] .

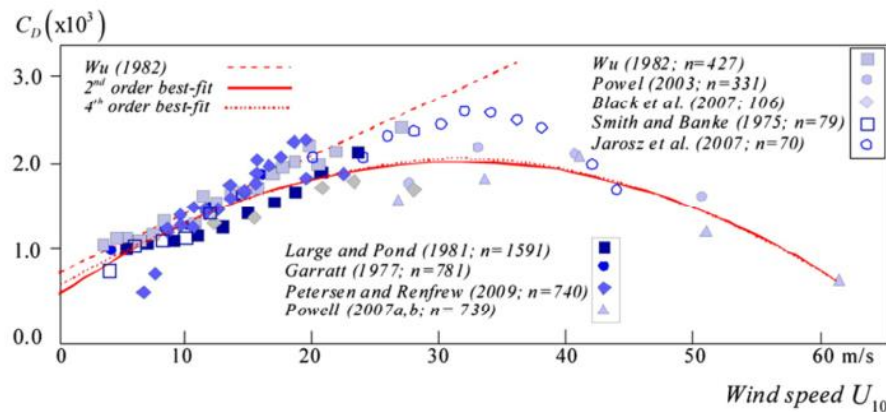
Bij de productieberekeningen is een *ruimtelijk uniform windveld* opgelegd waarbij de openwater *windsnelheid* en de *windrichting in de tijd variëren*. De schuifspanning ( $C_D$ ) die daarbij is gehanteerd verloopt volgens Figuur 31, waarin  $C_{dA}=0,0014$ ,  $C_{dB}=0,0039$ ,  $wind\_A=7,8$  m/s en  $wind\_B=50,0$  m/s.

*Figuur 31 Schematisch verloop van de windschuifspanningscoëfficiënt als functie van de windsnelheid.*



In de productieberekeningen van 2011 is géén rekening gehouden met winddragaftopping ofwel het afvlakken of zelfs afnemen van de windschuifspanning voor windsnelheden onder de 50 m/s, zoals diverse meetreeksen in Figuur 32 wél laten zien. Het verdisconteren van de winddragaftopping en daarmee een verlaging van de berekende waterstanden en golven wordt sinds enige jaren toegepast door een aanpassing van de windstatistiek. Eind 2020 is onderzocht of de winddragaftopping niet op een andere, fysisch nettere manier, kan worden meegenomen bij het bepalen van de ontwerpbelastingen. In samenspraak met het Adviesteam Dijkontwerp, Deltares en Rijkswaterstaat is besloten dit niet te doen. Zie rapport *Hydraulische Belastingen IJsselmeerdijk, Voorstel tot actualiseren databases en te gebruiken rekentechnieken* [2].

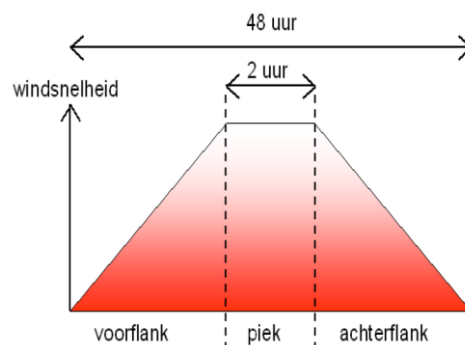
Figuur 32  
Winddrag  
parametrisatie en  
waargenomen  $C_D$ -  
waarden als functie  
van windsnelheid.



#### 4.1.8 Stormduur, verloop windsnelheid

Op het IJsselmeer wordt een standaard stormduur van 48 uur gehanteerd, met het verloop in de tijd van de windsnelheid volgens de standaard trapeziumvorm, weergegeven in Figuur 33. Deze vorm is afgeleid bij de ontwikkeling van het probabilistische model voor de Vecht- en IJsseldelta [15] en onderschreven in het rapport *Waterstandsverlopen Meren, IJsselmeer en Markermeer* [34]. Zie ook paragraaf 2.2 en hoofdstuk 4.5.

Figuur 33  
Geschematiseerd  
stormverloop  
IJsselmeer [14].



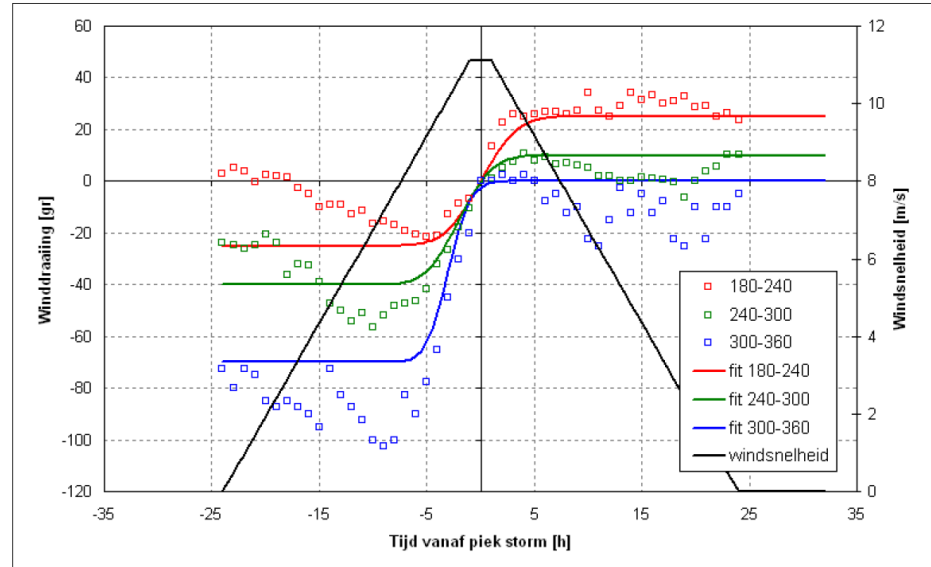
Tijdens een WAQUA berekening wordt het meerpeil constant verondersteld, de opzet wordt dus alleen door de wind veroorzaakt. Er zijn geen nieuwe inzichten die een andere stormduur dan wel een ander verloop in de tijd van de windsnelheid rechtvaardigen. De stormduur betreft overigens het verloop van de wind en niet het verloop van de waterstand. De waterstand gaat pas bij hogere windsnelheden scheef staan.

##### *Draaiing van de wind tijdens storm*

Wind komt tijdens een storm vrijwel nooit gedurende de hele storm uit dezelfde richting, maar draait. Op basis van observaties [14](Deltares, 2009) is voor 3 sectoren (180°-240°, 240°-300° en 300°-360°) een draaiing als functie van de tijd afgeleid. Zie hiervoor Figuur 34. Een noordwester storm (blauw) begint dus 70° meer westelijk en bereikt vlak voor de piek zijn uiteindelijke richting. Voor wind in de andere sectoren wordt een constante

richting verondersteld, omdat binnen deze sectoren geen significante winddraaiing gevonden is [14].

Figuur 34  
Winddraaiing op basis van observaties[14].



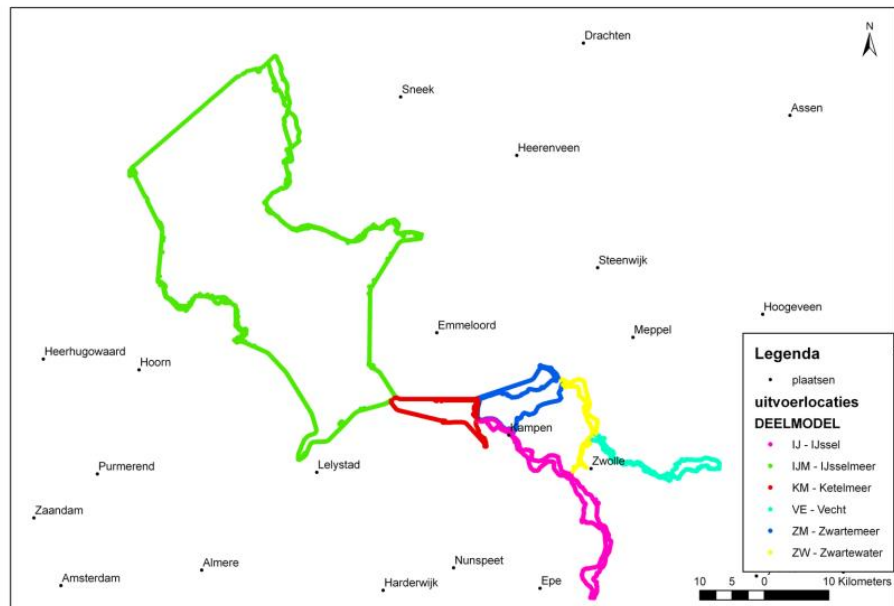
Het KNMI voert momenteel in opdracht van Rijkswaterstaat onderzoek uit naar klimaateffecten op de wind. Sinds 2014 werkt het KNMI aan de ontwikkeling van klimaatreeksen van het huidig klimaat. In 2021 volgt de één na laatste stap in de herziening van de windmodellering. Het gaat dan concreet om het actualiseren van de windstatistiek, keuzen over de modellering van stormvormen en een update van de basispeilen voor de kust. Ook zet het KNMI eerste stappen om beter inzicht te krijgen in de onzekerheden van het windklimaat. Dit onderzoek is nog volop in ontwikkeling, er zijn op dit moment dus geen nieuwe inzichten rondom bijvoorbeeld de draaiing van de wind die nu al toegepast kunnen worden binnen de verkenning.

#### 4.1.9

#### Uitvoerlocaties

De resultaten van de waterstandsberekeningen worden weggeschreven op de zogenaamde uitvoerlocaties. Deze locaties zijn uiteindelijk in Hydra-NL en Riskeer zichtbaar, waar ze gekoppeld kunnen worden aan dijkprofielen. In 2011 zijn voor het IJsselmeer nieuwe uitvoerlocaties bepaald.

Figuur 35  
Uitvoerlocaties productieberekening en WAQUA 2011 [14].



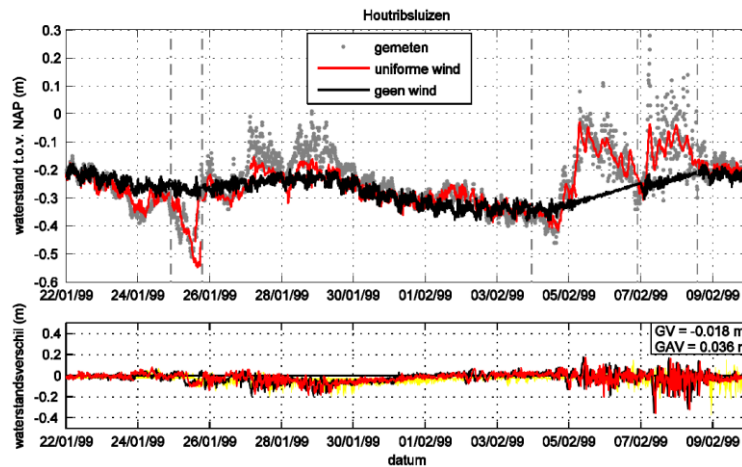
Er zijn geen redenen om anno 2020 wederom nieuwe uitvoerlocaties te kiezen.

#### 4.1.10

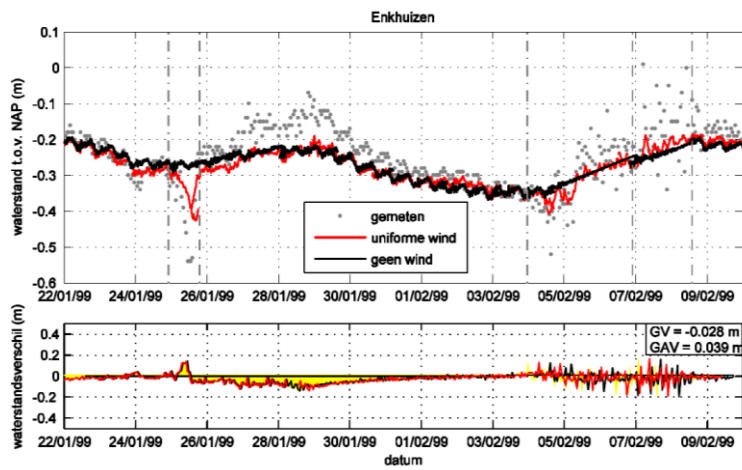
#### Verificatie waterstanden

De waterstanden op het IJsselmeer worden zoals eerder opgemerkt grotendeels door het opgelegde windveld bepaald. De resultaten van de kalibratie- en verificatieberekeningen zijn in het *Bijlagen rapport WAQUA model IJsselmeer, IJsseldelta en Vecht* [35] grafisch weergegeven. Enkele figuren hieronder zijn hieruit ter illustratie overgenomen.

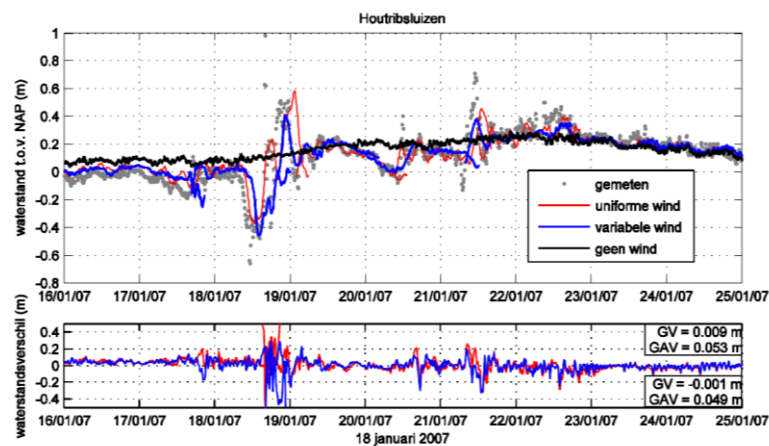
*Figuur 36  
verificatieberekening  
WAQUA model  
IJsselmeer,  
Houtribsluizen.  
Periode 22-01-99  
t/m 09-02-99. [35]*



*Figuur 37  
verificatieberekening  
WAQUA model  
IJsselmeer,  
Enkhuizen. Periode  
22-01-99 t/m 09-  
02-99. [35]*



*Figuur 38  
verificatieberekening  
WAQUA model  
IJsselmeer,  
Houtribsluizen.  
Periode 16-01-07  
t/m 25-01-07. [35]*





Geconcludeerd is door Deltares in 2011 dat het WAQUA model de waterbeweging op het IJsselmeer goed genoeg simuleert om er productieberekeningen mee te maken.

## 4.2 Productieberekeningen WAQUA

### 4.2.1 Doorgerekende combinaties van meerpeil en wind

Ten behoeve van WBI2017 is voor een groot aantal combinaties van de onafhankelijke stochasten (zie hoofdstuk 4.5) *meerpeil*, *windsnelheid* en *windrichting* de bijbehorende maximale waterstand bepaald. In de kansrekening is een stochastische variabele een getal dat afhangt van de toevallige uitkomst in een kansexperiment, ofwel een trekking uit een kansverdeling. In totaal zijn 720 WAQUA berekeningen (9 windsnelheden x 16 windrichtingen x 5 meerpeilen) uitgevoerd. Naast de drie onafhankelijke stochasten (variabelen die elkaar niet beïnvloeden) zijn ook de afhankelijke stochasten afvoer van de IJssel en afvoer van de Overijsselse Vecht in onderstaande tabel opgenomen. Deze zijn echter gekoppeld aan het meerpeil volgens de correlatie zoals beschreven in [15] en zijn dus géén stochast in het belastingmodel. Zie ook Hoofdstuk 4.5, de beknopte beschrijving van het belastingmodel van het IJsselmeer.

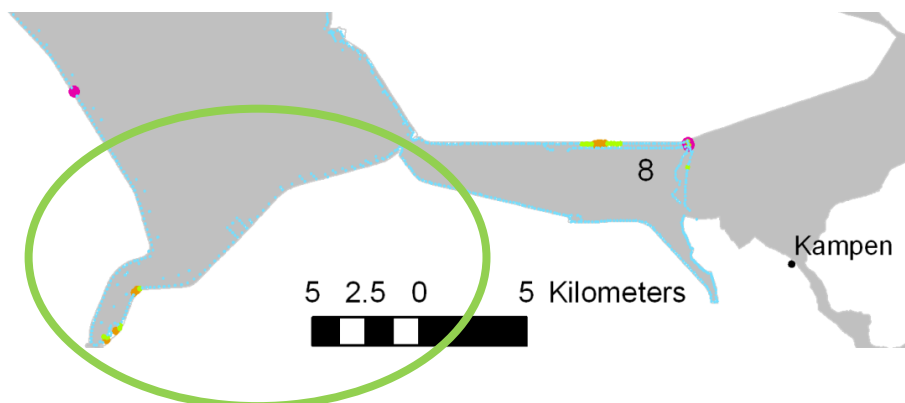
*Tabel 3  
Productieberekening  
en waterstand  
IJsselmeer, 2011  
[14].*

Upot [m/s]	U10ow [m/s]	Windrichting [grd]	Meerpeil [m+NAP]	Q-IJssel [m3/s]	Q-Vecht [m3/s]	Ramspol
14.0	15.4	22.5	-0.40	80	8	Gestuurde Ramspolkering
19.0	20.6	45.0	-0.10	882	227	
22.0	23.7	67.5	0.40	1420	412	
25.0	26.7	90.0	1.00	3084	935	
28.0	29.7	112.5	1.80	5325	1704	
31.0	32.7	135.0				
34.0	35.6	157.5				
38.0	39.5	180.0				
42.0	43.3	202.5				
		225.0				
		247.5				
		270.0				
		292.5				
		315.0				
		337.5				
		360.0				

## 4.2.2

### Controle uitvoer WAQUA

*Figuur 39  
Vanwege instabiliteit  
en/of maximale  
waterstand  
afgekeurde  
berekeningen  
(uitsnede uit figuur  
3.3, [36]).*



De uitvoer op de locaties langs de IJsselmeerdijk voldeed aan de (hoge) eisen die aan de berekeningen zijn gesteld. Voor het IJsselmeer betreft dit eisen aan (numerieke) stabiliteit van de berekeningen en het logische verloop van de maximale waterstand, het windverhang en de ontwikkeling van de waterstand in de tijd. We zien alleen bij Flevomarina en bij de Parkhaven enkele afgekeurde berekeningen, veroorzaakt door de ligging achter de havendammen.

## 4.2.3

### Conclusie WAQUA berekeningen 2011

Hieronder is paragraaf 3.4 (Conclusies) uit het rapport *WAQUA-productieberekeningen IJsselmeer en Vecht- en IJsseldelta voor WTI-2011: rapportage fase 2* [36] integraal overgenomen. Er was ruim vertrouwen in de waterstandsberekeningen.

*Figuur 40  
paragraaf 3.4[36].*

#### 3.4 Conclusies

De WAQUA-productieberekeningen voor het IJsselmeer zijn met succes afgerond. Uit de controleprocedures bleek dat de set met productieberekeningen over het geheel genomen resultaten bevat met voldoende consistentie en nauwkeurigheid. De combinatie van de resultaten van enerzijds visuele controles en anderzijds geautomatiseerde controles heeft geleid tot ruim vertrouwen in de kwaliteit van de productieberekeningen. Waterstandsvelden, stroombeelden en het gedrag van de Ramspolkering zijn vooral visueel en steeksproefgewijs gecontroleerd. Stabiliteit, maximale waterstand, windverhang, trendmatige ontwikkeling van de waterstand en foutmeldingen van WAQUA zijn gecontroleerd voor alle berekeningen door middel van automatisering met behulp van Matlab. Op het niveau van afzonderlijke productieberekeningen en deelgebieden binnen het WAQUA-model zijn er bij de controles wel kleinere problemen naar voren gekomen, waarin veelal instabiliteit een rol speelt.

Voor het IJsselmeergebied zijn de volgende locaties aan te wijzen als locaties waar instabiliteit in een aanzienlijk deel van de productieberekeningen een rol speelt:

1. Den Oever
2. Omgeving Kornwerderzand
3. Stavoren
4. Inham ten noorden van Noordoostpolder
5. Omgeving van spaarbekkens bij Andijk
6. Haventje bij Andijk
7. Westelijk uiteinde van de Houtribdijk
8. Ketelmeer, westelijk van Ramspolkering

Er is ook nu geen aanleiding om aan de resultaten van 2011 te twijfelen.

## 4.3 Windgolven – SWAN model

Windgolven zijn berekend met SWAN, zoals al in paragraaf 2.3 aangegeven. De in 2011 gehanteerde versie voor de productieberekeningen was 40.72ABCDE. Deze versie is nog steeds vigerend. Voor de volledigheid staan in de tabel hieronder de belangrijkste reken/modelinstellingen, met daarbij de opmerking dat het behoort tot technische instellingen betreft. In de paragrafen hierna worden enkele modelinstellingen (keuzes) kort beschreven. Het voert echter te ver om hier in dit rapport dieper op in te gaan. Voor meer achtergrondinformatie wordt verwezen naar de rapportage van het SWAN model [37].

Onderwerp	Rekeninstelling	Parameters	Toelichting
Modelgeneratie	GEN3 WESTH		Derde generatie modus voor de wind input. Exponentiële windgroei volgens Yan (1986)
Whitecapping	WCAP WESTH	<i>cds2=5.0e-05</i> <i>br=0.00175</i> <i>p0=4.0</i> <i>powst=0.0</i> <i>powk=0.0</i> <i>nldisp=0.0</i> <i>cds3=0.8</i> <i>powfsh=1.0</i>	Breken van golftoppen doordat ze te steil worden ( <i>whitecapping</i> ). Methode Van der Westhuysen et al. (2007, 2011)
Quadruplet golf-golf interactie	QUAD	<i>iquad=2</i> <i>lambda=0.25</i> <i>Cnl4=3.0+07</i>	Betreft de wijze van rekenen met niet lineaire golf-interacties ( <i>quadruplets</i> ). Methode Hasselmann et al. (1985)
Quadruplet limitering	LIMITER	<i>ursell=10.0</i> <i>qb=1.0</i>	Quadruplets zijn gedeactiveerd voor Ursellgetallen boven de 10 (Ursell limiter). De drempelwaarde voor wrijving van brekende golven is 1.
Bodemwrijving	FRIC JONSWA P	<i>cfjon=0.038</i>	Bodemwrijving Methode JONSWAP, Hasselmann et al. (1973)
Breken door beperkte diepte	BREA WESTH	<i>alpha=0.96</i> <i>pown=2.5</i> <i>bref=-1.3963</i> <i>shfac=500.0</i>	Methode Van der Westhuysen (2010)
Triad golf-golf interactie	TRIAD	<i>trfac=0.1</i> <i>cutfr=2.5</i>	LTA methode Eldeberky (1996)

DiffRACTIE, reflectie en golfopzet in de brekerzone zijn niet meegenomen in de SWAN berekeningen.

### 4.3.1

### Eisen model

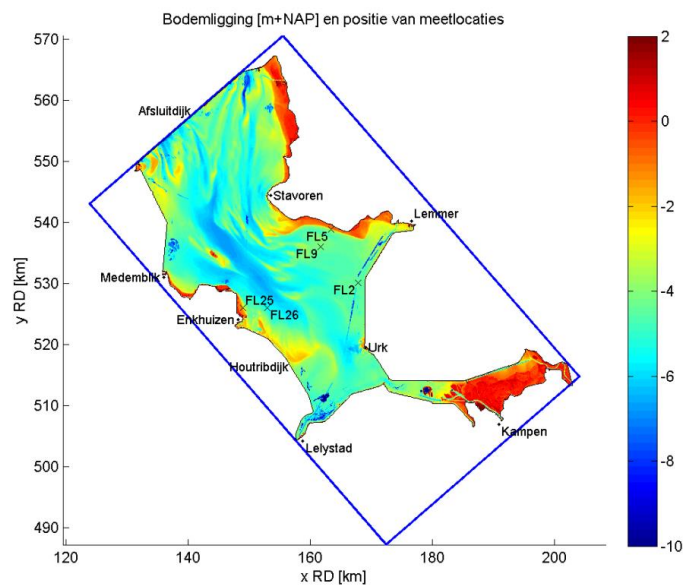
Net als het WAQUA-model dient het SWAN model de werkelijkheid zo goed mogelijk te benaderen, waarbij balans gezocht wordt tussen stabiliteit, nauwkeurigheid en rekestijd. Omdat SWAN een numeriek model is, is *convergentie* belangrijk. Een berekening moet tot een stabiel resultaat komen en niet gaan 'slingeren'. Aan een SWAN berekening worden dan ook eisen gesteld t.a.v. de veranderingen in significante golfhoogte  $H_{m0}$  en de gemiddelde periode  $T_{m01}$  tussen twee tijdstappen. Daarnaast dient de convergentie 'glad' te verlopen en is er een maximum aan het aantal iteraties gesteld (80). Het idee is dat schokken of vreemde sprongen in de berekeningen op deze manier worden opgemerkt en gefilterd.

Daarnaast is het vanzelfsprekend zaak dat de berekende golven overeenkomen met de werkelijkheid. Daartoe is, net als bij WAQUA een kalibratie en verificatie uitgevoerd aan de hand van een aantal opgetreden stormen.

### 4.3.2

### Rekenrooster

*Figuur 41  
SWAN rooster met  
bodemdpte.*



Het SWAN rooster is ongeveer 74 bij 42 km groot.

### 4.3.3

### Diepte

De bodemdata voor het IJsselmeer is hetzelfde als voor het WAQUA model, namelijk het destijds meest actuele dieptebestand [38], op enkele plekken aangevuld met AHN data [39]. Zie wederom Figuur 41.

#### 4.3.4 Bodemruwheid

SWAN rekent net als WAQUA met een bodemruwheid. Binnen SWAN wordt de zogenaamde JONSWAP (Joint North Sea Wave Project) bodemwrijving gebruikt, die voor het IJsselmeer een waarde heeft van 0.067. Er is geen reden om deze SWAN instelling nu ter discussie te stellen.

#### 4.3.5 Randen

Anders dan bij het WAQUA-model zijn er bij een SWAN berekening géén hydraulische modelranden. Als invoer gebruikt SWAN een veld met maximale waterstanden uit een WAQUA berekening. Daar wordt vervolgens alleen wind opgezet.

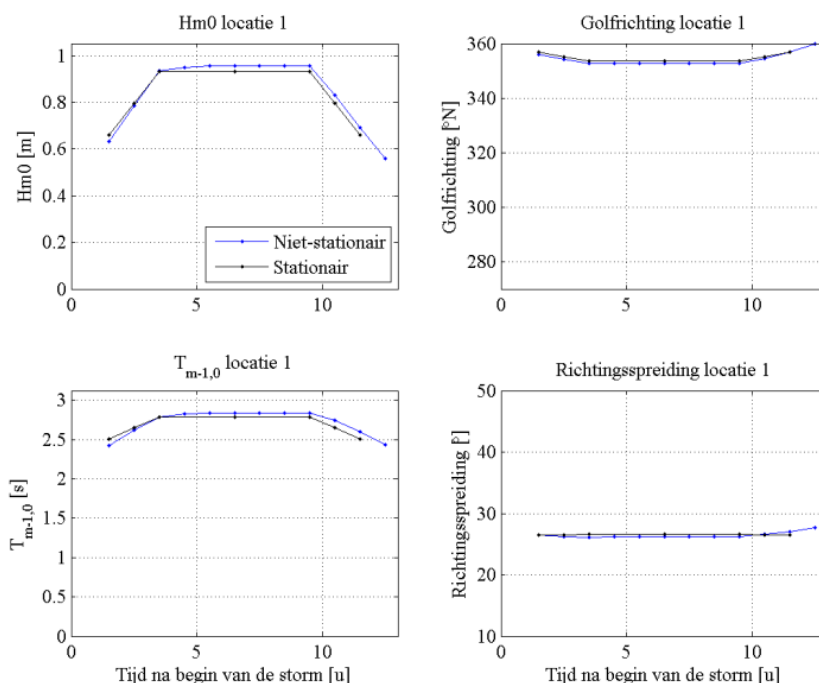
#### 4.3.6 Wind-waterinteractie

SWAN rekent op een geavanceerde manier (de ontwikkeling van) windgolven uit, daarbij rekening houdend met allerlei fysische processen zoals golf-golf interactie, wrijving tussen wind en water, bodemwrijving en stroming. SWAN maakt daartoe gebruik van een coëfficiënt waarmee de energieoverdracht van wind naar water wordt beschreven. Zie verder paragraaf 4.1.7.

#### 4.3.7 Stormduur, verloop windrichting en -snelheid

Het verloop van de windsnelheid tijdens storm dat is gehanteerd bij de SWAN-productieberekeningen is gelijk aan het verloop bij de waterstandsberekeningen met WAQUA (48 uur) en verloopt volgens hetzelfde trapezium. Svašek heeft in 2010 onderzocht of er verschil is tussen stationaire en niet-stationaire (in de tijd) berekeningen, d.w.z. berekeningen met een constante *windsnelheid* versus een in de tijd toenemende en weer afnemende wind [37]. Stationaire berekeningen vergen minder rekentijd en resulteren per definitie in een volledig ontwikkeld golfveld, terwijl het de vraag is of de golfvelden op het IJsselmeer wel volledig tot ontwikkeling komen in korte tijd. De windrichting is voor de vergelijking tussen stationair en niet-stationair identiek geschematiseerd. De veronderstelling was dat bij sterk in de tijd variërende windsnelheden het golfveld op het IJsselmeer zich *mogelijk* niet volledig kan ontwikkelen waardoor een serie achtereenvolgende stationaire berekeningen om de storm te simuleren tot andere golfcondities kan leiden dan één niet-stationaire berekening. Geconcludeerd is destijds voor het IJsselmeergebied dat tijdens de piek van de storm, in elk geval bij niet beschutte locaties, de stationaire berekeningen tot nagenoeg identieke resultaten (golfhoogten) leiden als de niet-stationaire berekeningen. Het leidt dus voor de wind gedomineerde locaties langs het IJsselmeer en daarmee ook voor de IJsselmeerdijk van Lelystad tot de Ketelbrug, tot voldoende nauwkeurige uitkomsten wanneer wordt gerekend met een aantal opeenvolgende vaste windsnelheden. Zie ook Figuur 42.

**Figuur 42**  
Verschil tussen stationaire en niet-stationaire SWAN berekeningen (Figuur B.1 in [37]).



#### 4.3.8

#### Uitvoerlocaties

Bij de productieberekeningen van de golfparameters met SWAN zijn dezelfde uitvoerlocaties beschouwd als bij de productie van waterstanden met WAQUA. Op de uitvoerlocaties worden weggeschreven de significante golfhoogte ( $H_s$  of  $H_{m0}$ ), de piek golfperiode ( $T_p$ ) de gemiddelde periode  $T_{m-1,0}$  en de golfrichting.

#### 4.3.9

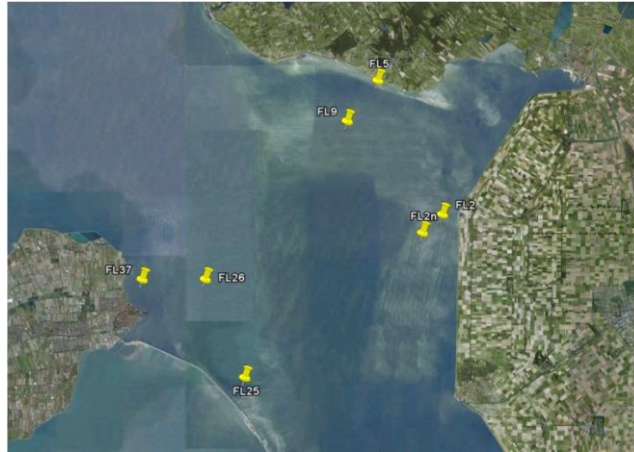
#### Verificatie golven

De (numerieke en fysieke) instellingen voor het SWAN IJsselmeer model zijn grotendeels afkomstig uit de kalibratie van het SWAN Waddenzee model [40]. Om te verifiëren of deze instellingen ook op het IJsselmeer tot goede resultaten leidt zijn zeven gemeten stormen uit de periode 1999 tot en met 2007 gesimuleerd met windsnelheden tussen de 15,2 tot 23,5 m/s en windrichtingen tussen de 215 en 286°N. De resultaten van de berekeningen zijn vervolgens vergeleken met de metingen.

**Tabel 4**  
Overzicht verificatiestormen SWAN IJsselmeer (Appendix II, Tabel 1 in [37]).

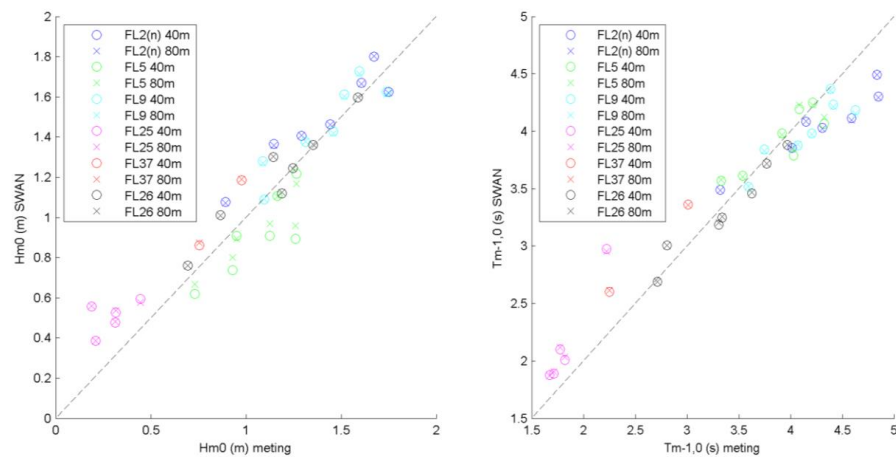
Case	Datum	Tijd	Meerpeil [m NAP]	$U_{10}$ [m/s]	$U_{dir}$ [°N]
IJA	02-10-1999	03:00	-0,20	15,2	215
IJB	22-02-2002	04:00	0,08	18,8	215
IJC	27-10-2002	14:20	-0,26	23,2	249
IJG	08-01-2005	13:00	-0,20	19,9	246
IJH	12-02-2005	15:00	-0,39	18,3	286
IJK	18-01-2007	12:00	0,06	22,4	237
IJL	18-01-2007	19:00	0,10	23,5	267

Figuur 43  
Meetlocaties t.b.v.  
SWAN verificatie  
(Appendix II,  
Figuur 1 in [37]).



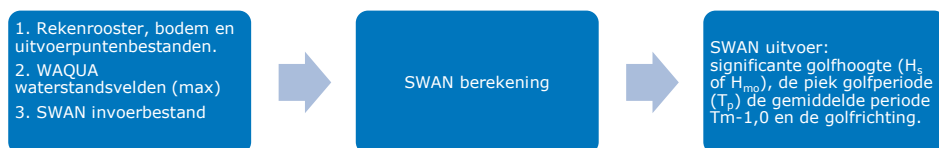
Wanneer de rekenuitvoer wordt uitgezet tegen de metingen is te zien hoe goed het model de werkelijkheid benadert. Zie Figuur 44.  
Helaas zijn er geen metingen beschikbaar dichterbij de IJsselmeerdijk. Toch geven de resultaten op de beschikbare locaties een voldoende compleet beeld van de nauwkeurigheid van het model.

Figuur 44  
Resultaten verificatie  
(Appendix II,  
Figuur 2 in [37]).



Het SWAN model rekent op het IJsselmeer stabiel en convergeert dus goed tot resultaten. De modelfout ligt rond de 10%, zowel in golfhoogte als periode. Zie ook paragraaf 5.1.2 (modelonzekerheden in het probabilistisch model). Het SWAN model is op basis van deze uitgevoerde kalibratie goed genoeg bevonden voor het uitvoeren van de productieberekeningen in 2011.

#### 4.4 Productieberekeningen SWAN





#### 4.4.1

### Doorgerekende combinaties van meerpeil en wind

Met SWAN zijn net als met WAQUA 720 berekeningen gemaakt. De doorgerekende combinaties van windsnelheid, windrichting en meerpeil zijn weergegeven in Tabel 5, waarbij opgemerkt wordt dat SWAN rekent met Open Water Wind (hetzelfde als de  $U_{10}$ -windsnelheid), zodat de potentiële windsnelheid eerst wordt geconverteerd. Zie ook 2.1.2.

Tabel 5  
SWAN combinaties  
productieberekening  
en 2011 (Tabel 2.2  
in [41]).

Potentiële piekwindsnelheid [m/s]		Hoofdwindrichting [°N]		Meerpeil [m+NAP]	
14	U14	22,5	D022	-0.4	S01
19	U19	45,0	D045	+0.1	S02
22	U22	67,5	D067	+0.4	S03
25	U25	90,0	D090	+1.0	S04
28	U28	112,5	D112	+1.8	S05
31	U31	135,0	D135		
34	U34	157,5	D157		
38	U38	180,0	D180		
42	U42	202,5	D202		
		225,0	D225		
		247,5	D247		
		270,0	D270		
		292,5	D292		
		315,0	D315		
		337,5	D337		
		360,0	D360		

Input voor elke SWAN berekeningen voor het IJsselmeer is een *ruimtelijk variërende waterstandsveld*, berekend met WAQUA (zie 4.2). Dit waterstandsveld is géén momentopname, maar bevat voor elke rooster cel de berekende maximale waterstand gedurende de storm. Bij elke (stochast)combinatie van meerpeil, windrichting en windsnelheid hoort dus een apart WAQUA waterstandsveld dat op het SWAN rooster wordt gezet. Let op: in de WAQUA berekeningen zit voor de belangrijkste windrichtingen een tijdsafhankelijke draaiing (niet-stationair), zoals beschreven in paragraaf 4.3.7. In de SWAN berekeningen is dat niet zo (stationair). Dit heeft echter geen consequenties omdat de golfgroei vrijwel instantaan is. Bij een draaiing kunnen de golfkarakteristieken uit de relevante stationaire som worden overgenomen.

#### 4.4.2

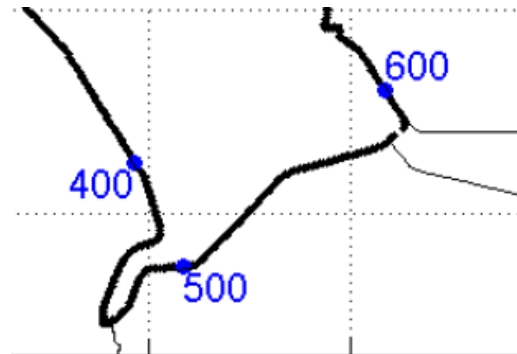
### Controle uitvoer SWAN productieberekeningen

Alle 720 berekeningen bleken te voldoen aan de gestelde procedurele eisen en zijn daarna ook in kwantitatieve zin gecontroleerd. Er zijn langs de IJsselmeerdijk géén numerieke fouten geconstateerd. De berekeningen kregen hier allemaal de score Excellent of Goed.

Er is vervolgens gecontroleerd of de uitkomsten binnen fysisch realistische grenzen vielen en of de afhankelijkheid van  $H_{m0}$ ,  $T_{ps}$  en  $T_{m-1,0}$  de windsnelheid  $U$  logisch is. We kijken hier specifiek naar de IJsselmeerdijk en dus de locaties tussen -ongeveer- 460 (Houtribsluis) en 580 (Ketelbrug). Tot locatie

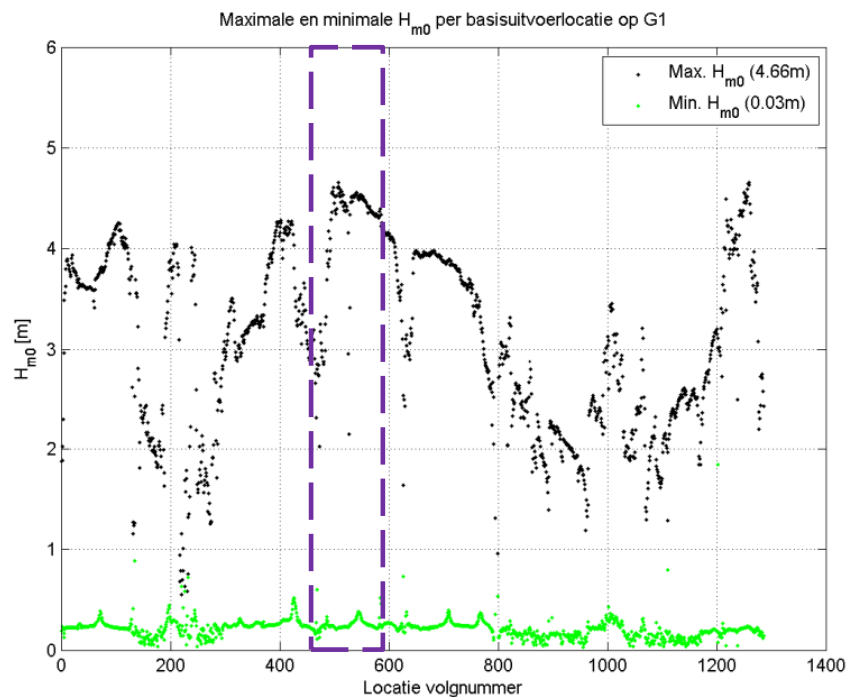
495 liggen de locaties beschut in de baai van Van Eesteren wat het lokale minimum in het verloop van de maximale golfhoogte verklaart. Langs IJsselmeerdijk richting de Ketelbrug neemt de golfhoogte sterk toe tot de *grootste maximale golfhoogte van 4,66 m in locatie 507*. Verder naar het noorden neemt de maximale golfhoogte gestaag af doordat de grootste mogelijke strijklengte afneemt. Zie Figuur 45 voor (een voor dit project relevante uitsnede van) de destijds gehanteerde locatienumering [41].

Figuur 45  
Uitsnede  
basisuitvoerlocaties  
SWAN [41].

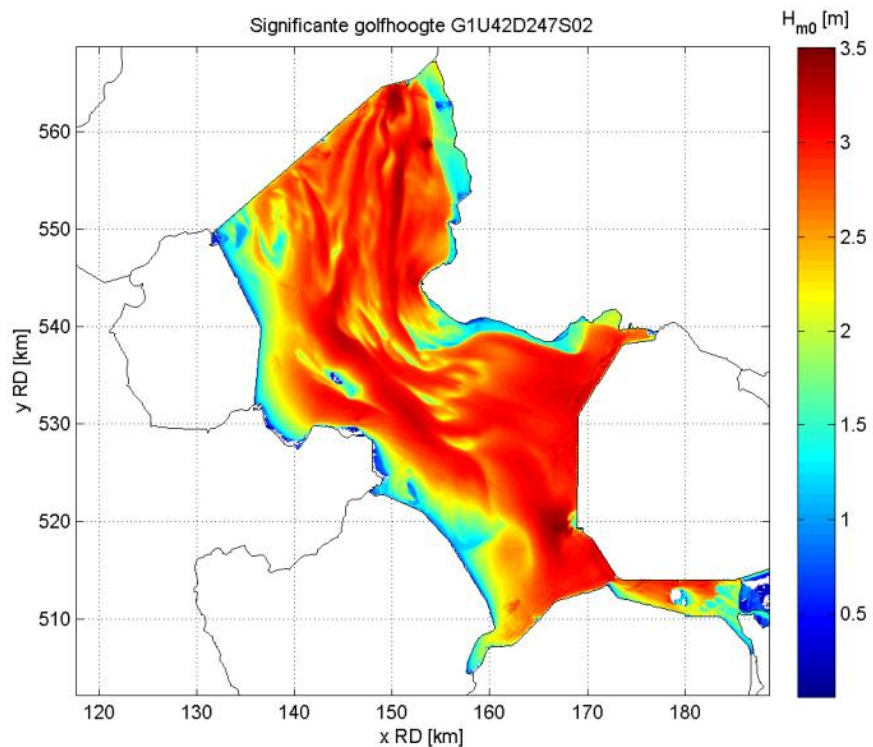


In Figuur 46 zijn de minimale en maximale golven ( $H_{m0}$ ) te zien, per uitvoerlocatie [41]. Binnen de toegevoegde paarse rechthoek (stippellijn) is het plangebied van de IJsselmeerdijk te zien. Het verschil in golfhoogte tussen de beschutte locaties nabij de Houtribsluis (Parkhaven) en de locaties 'vol in de wind' is duidelijk te zien.

Figuur 46  
Minimale en  
maximale golven  
berekend met  
SWAN. In paars de  
IJsselmeerdijk, bij  
benadering [41].



Figuur 47  
Uitvoer  $H_{m0}$  bij  
berekening met  
 $u=42$  m/s, richting  
 $= 247,5^\circ$  en  
meerpeil 0,1m +NAP  
[41].

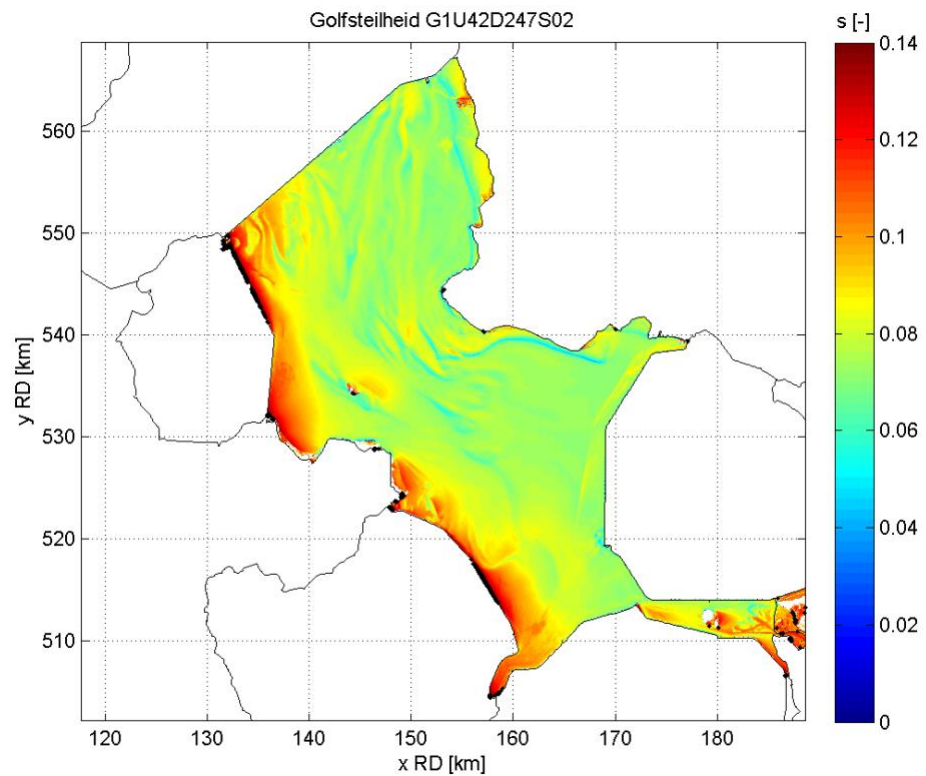


Er is onder meer gecontroleerd op golfsteilheid ( $s < 0,14$ ) en de brekingsindex ( $i_{br} > 1,5$ ).

- De *golfsteilheid* is de verhouding tussen de golfhoogte en de golflengte:  
 $s = H_{m0}/L$
- De *brekingsindex* is de verhouding tussen de golfhoogte en waterdiepte:  
 $i_{br} = H_{m0}/d$

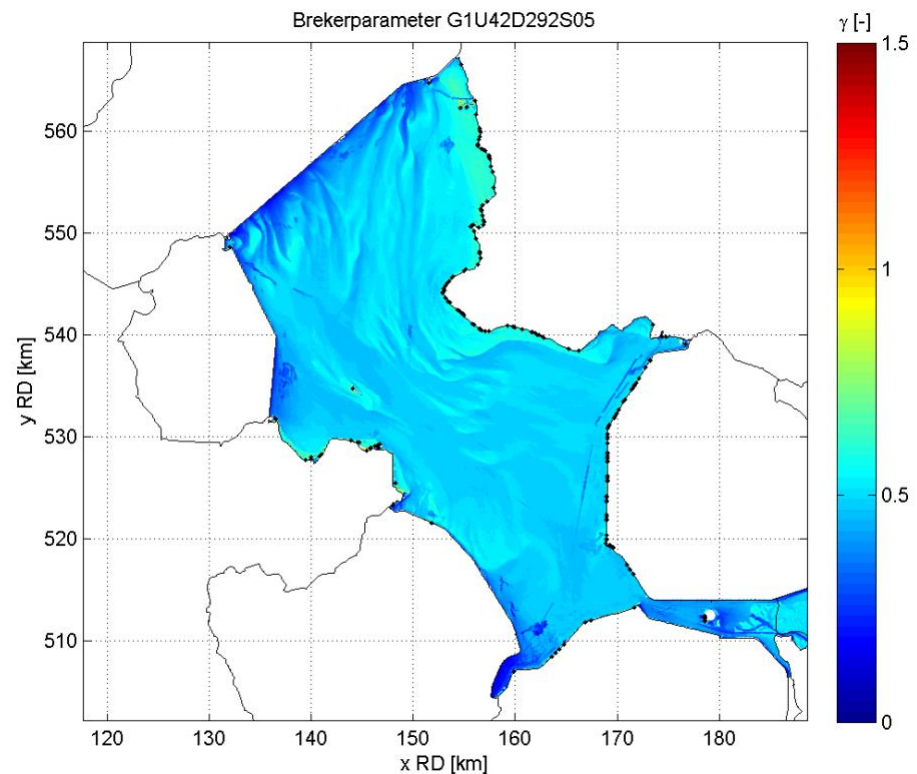
De golfsteilheid is in minder dan 0,1% van de roostercellen te groot ( $>0,14$ ) echter dit is te verklaren door dat het 'jonge' golven betreft die bij de oever met afluiddige wind zijn ontstaan.

*Figuur 48  
Uitvoer golfsteilheid  
bij berekening met  
 $u=42$  m/s, richting  
 $= 247,5^\circ$  en  
meerpeil 0,1m +NAP  
[41].*



De brekerparameter is in slechts een zeer klein deel van de roosterzellen kleiner dan 1,5. Het betreft dan ook nog vaak roosterzellen tegen de dijk, bij zeer kleine waterdiepten, terwijl de uitvoerpunten verder van de dijk afliggen. Zie Figuur 49.

*Figuur 49  
Uitvoer  
brekerparameter bij  
berekening met  
 $u=42$  m/s, richting  
 $= 292,5^\circ$  en  
meerpeil 1,8m +NAP  
[41].*



#### 4.4.3 Conclusie SWAN berekeningen 2011

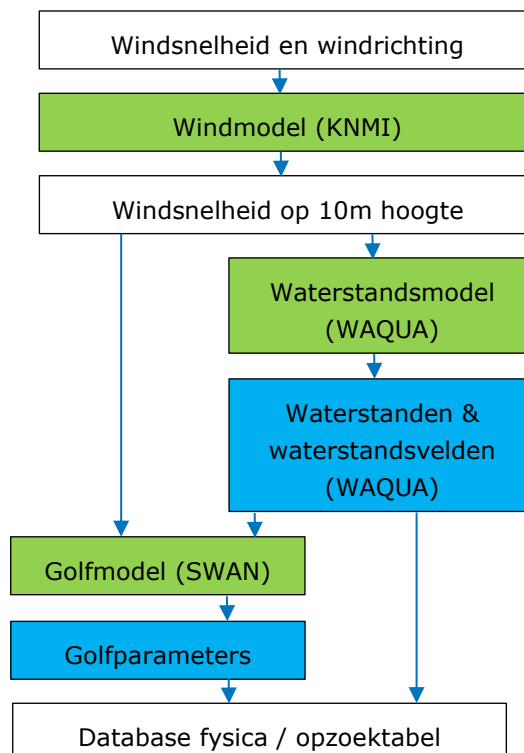
De controle leverde op dat vrijwel alle uitvoer van 'Excellente' kwaliteit is en dus binnen de fysische grenzen valt en dat het verloop van de diverse golfparameters langs de dijken een logisch patroon laat zien. Verder is aanbevolen de uitvoerpunten bij de Flevocentrale niet te gebruiken vanwege een niet geheel kloppende bodem aldaar. De dijk direct achter de Flevocentrale heeft geen versterkingsopgave, zodat de hier zeer lokaal ontbrekende golfrandvoorwaarden geen rol spelen binnen dit project. Daarbij komt dat de golfrandvoorwaarden in de naastgelegen uitvoerpunten nagenoeg gelijk zijn, vanwege dezelfde ligging t.o.v. de wind.

De conclusie van HKV/Svašek was dat de berekende golven van (ruim) voldoende kwaliteit waren.

#### 4.5 Resultaat productie: Database/opzoektabel met waterstanden en golven.

De met WAQUA berekende waterstanden en de met SWAN berekende golfparameters worden toegevoegd aan een database, feitelijk een grote *opzoektabel* waarin alle rekenresultaten op de uitvoerlocaties bij de diverse combinaties van meerpeil, windsnelheid en windrichting zijn opgeslagen. De 'productietrein' ziet er dan samengevat als volgt uit:

*Figuur 50  
productieproces  
hydraulische  
belastingen*



De database kan tenslotte worden gekoppeld aan het probabilistische belastingmodel voor het IJsselmeer in Hydra-NL of Riskeer, om de ontwerp belastingen op de IJsselmeerdijk te bepalen. Zie verder hoofdstuk 5.



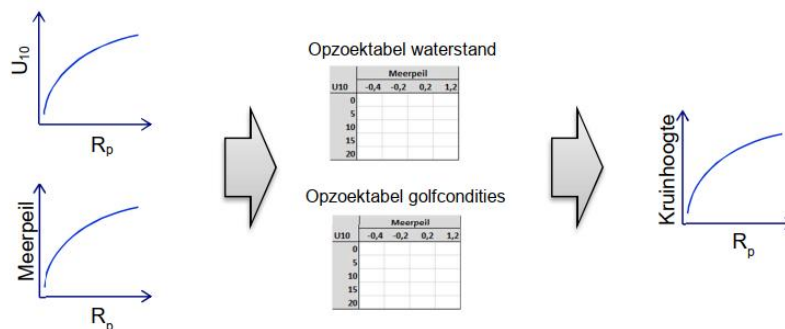
# 5 Belastingmodel IJsselmeer

## 5.1 Samenspel van meerpeil en wind: probabilistisch model

Met alleen de database met waterstanden en golven kunnen we geen dijk ontwerpen. Er kunnen vele combinaties van IJsselmeerpeil, windrichting en windsnelheid voorkomen, elk met een kans van voorkomen en bijbehorende hydraulische belastingen op de IJsselmeerdijk. Om de overschrijdingskansen te kunnen berekenen van al deze combinaties wordt al sinds een aantal jaren gebruik gemaakt van een *probabilistisch belastingmodel*, waarmee wiskundig alle mogelijke combinaties van de belangrijkste variabelen worden beschouwd. In hoofdstuk 3 is te lezen dat achtereenvolgens de probabilistische modellen PEILOF, Hydra-M, Hydra-Zoet en tenslotte Hydra-NL (HKV) en Riskeer/HydraRing (Deltares) zijn ontwikkeld. Wanneer de variabelen worden beschreven door een kansverdeling spreken we van *stochasten*.

Het IJsselmeer behoort tot het watersysteemtype Meer, net als het Markermeer, de Veluwerandmeren, de Grevelingen en het Veerse meer. In deze watersystemen zijn zoals eerder in dit rapport beschreven alleen het *meerpeil* en de *wind* van belang. Als voorbeeld: Een laag meerpeil in combinatie met een flinke noordwesterstorm kan tot dezelfde belasting op de dijken leiden als een hoog meerpeil bij veel minder harde wind. Het belastingmodel beschrijft wiskundig de kans op samenvallen van de basisstochasten windsnelheid ( $U_{10}$ ), windrichting en meerpeil bij verschillende terugkeertijden ( $R_p$ ), door combinaties in de database op te zoeken en te vertalen naar overschrijdingscurves van lokale waterstanden en golfcondities. De correlatie tussen de diverse stochasten speelt daarbij een belangrijke rol, net als de modelonzekerheden.

Figuur 51  
Principe  
probabilistisch model  
[42].



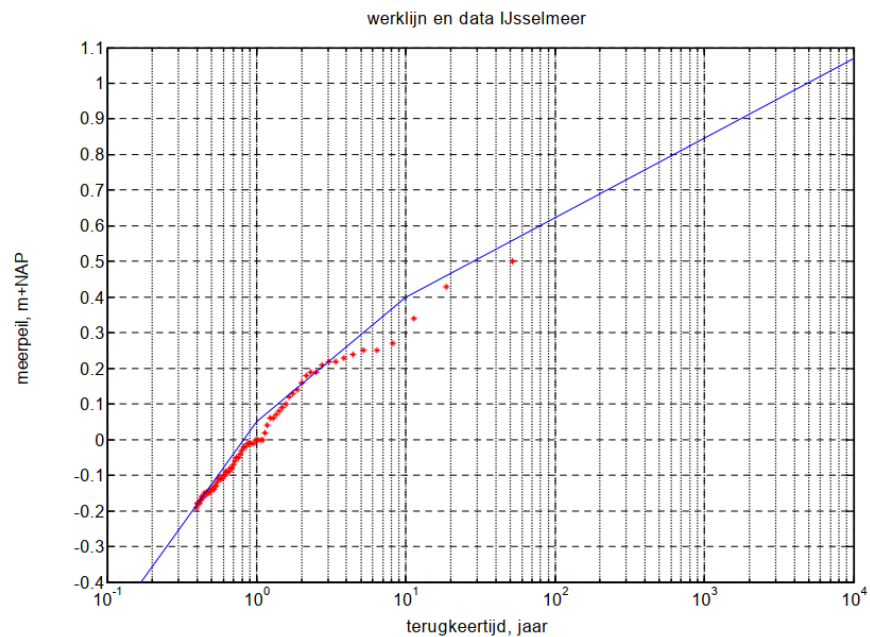
Door niet alleen de hydraulische belastingen probabilistisch te beschouwen, maar dat ook te doen voor de sterkte van de dijk, kan een volledig probabilistische kans op falen, of overstromingskans worden berekend. Zo wordt in Riskeer de sterkte van het gras op de kruin en het binnentalud probabilistisch beschreven én gecombineerd met de probabilistische belastingen. Het resultaat is de kans op optreden van het faalmechanisme Graserosie Kruin en Binnentalud (GEKB).

Als stochasten heeft het belastingmodel voor het IJsselmeer:

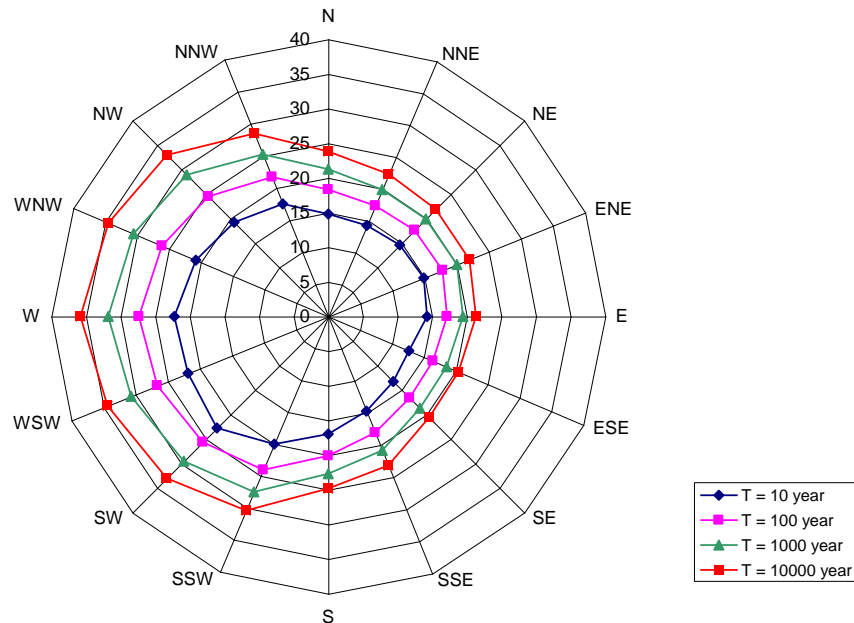
- Het meerpeil M (ruimtelijk gemiddelde van de waterstand, afhankelijk van de locatie het IJsselmeerpeil dan wel het Markermeerpeil).
  - Windsnelheid U (statistiek van Schiphol).
  - Windrichting R (statistiek van Schiphol).
- Beschouwd worden de 12 richtingssectoren  $15^{\circ}$ - $45^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$ - $75^{\circ}$ , ...,  $345^{\circ}$ - $15^{\circ}$ , die kortweg worden aangeduid als  $30^{\circ}$ ,  $60^{\circ}$ , ...,  $360^{\circ}$ .

Het gaat voor dit rapport te ver om de wiskundige (cor)relaties tussen de verschillende stochasten te bespreken. In het rapport [43] is deze achtergrond terug te vinden. In paragraaf 5.1.1 is hiervan een samenvatting opgenomen. Ter illustratie zijn hierna figuren van de meerpeilstatistiek en de windstatistiek bij Schiphol opgenomen.

*Figuur 52  
meerpeilstatistiek,  
zonder  
onzekerheden,  
zichtduur 15 dagen,  
drempel -0,2m  
+NAP (Figuur 5.5 in  
[15]).*



Figuur 53  
Windstatistiek  
Schiphol [43].



### 5.1.1

#### Probabilistisch model

In het probabilistisch model worden de windsnelheid en -richting onafhankelijk van het meerpeil beschouwd. Hiervoor wordt gekozen omdat het in het geval van windsnelheid en -richting om een zogenaamde 'snelle' stochast gaat (12 uursperiode), terwijl het meerpeil een 'trage' stochast is met een basisduur van 30 dagen. Er zijn 3 stappen om tot een overschrijdingskans van een bepaalde hydraulische belasting ( $H$ ) te komen. Deze hydraulische belasting kan een waterstand, golfbelasting of hydraulisch belastingniveau (HBN, benodigde kruinhoogte) zijn. De werkwijze voor het bepalen van de golfbelasting per waterstand ('Q-variant') wijkt af van onderstaand principe, maar wordt niet verder toegelicht.

##### Stap 1:

Bepaling van de kans op hydraulische belasting van de 'snelle' stochasten (12 uur).

In de eerste stap wordt de kans berekend dat de hydraulische belasting ( $H$ ) een niveau  $h$  overschrijdt gegeven een meerpeil ( $P_{12u}(H > h|m)$ ). Deze kans wordt voor een groot aantal meerpeilen afgeleid, waarbij alle combinaties (windsnelheid, windrichting en meerpeil) van basisstochasten worden beschouwd. De hydraulische belasting wordt bepaald op basis van de WAQUA en SWAN berekenen, waarin deze basisstochasten (meerpeil, windsnelheid en windrichting) vertaald worden naar golfbelastingen en waterstanden (opgebouwd door meerpeil en scheefstand) voor de gekozen locatie.

##### Stap 2:

### Bepaling van de kans op hydraulische belasting van alle stochasten (30 dagen)

Op basis van de uitvoer van de eerste stap ( $P_{12u}(H > h|m)$ ) kan de 30-daagse kans bepaald worden. Hiervoor wordt een groot aantal meerpeilverlopen opgedeeld in 12-uurs stappen. Elk verloop heeft zodoende 60 tijdstappen, waarbinnen het meerpeil één waarde kent. Vervolgens kan voor elke tijdstap de uitvoer van stap 1 gekoppeld worden om zo per verloop van 30 dagen tot een kans te komen dat de hydraulische belasting ( $H$ ) een niveau  $h$  overschrijdt ( $P_{30d}(H > h)$ ).

#### Stap 3:

#### Bepaling van de overschrijdingskans van de hydraulische belasting.

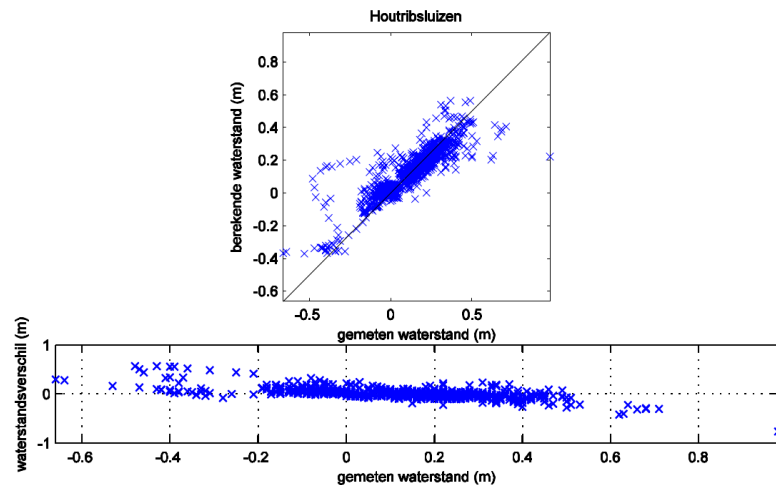
In de laatste stap wordt de kans over een basisduur van 30 dagen gecombineerd tot een jaarlijkse overschrijdingskans. Omdat de statistiek gebaseerd is op een winterhalfjaar ( $6 \cdot 30$  dagen) kan de overschrijdingskans van hydraulische belasting  $h$  eenvoudig bepaald worden met:  $F(H > h) = 6 \cdot P_{30d}(H > h)$ .

## 5.1.2

### Modelonzekerheden WAQUA en SWAN

In het probabilistische model wordt ook rekening gehouden met het feit dat een model niet perfect is. De werkelijkheid wordt immers nooit helemaal nagebootst, zoals is te zien in Figuur 54 uit het WAQUA kalibratierapport [8]. De metingen en modelresultaten zijn tegen elkaar uitgezet. In de ideale situatie zitten alle punten op de zwarte lijn. In het extreme bereik waarvan geen metingen bestaan (nog nooit voorgekomen) is het dan ook helemaal de vraag of het model de werkelijkheid goed simuleert. Daar wordt wel vanuit gegaan. De modelonzekerheden worden met een kansverdeling (dus ook als stochast) meegenomen in de probabilistische berekening. Hoe kleiner de spreiding, hoe lager de belasting. Onderbouwd verlagen loont dus de moeite. In rapport [7] is een voorstel beschreven voor het -beperkt- verkleinen van de modelonzekerheden van de waterstanden. Ter illustratie Figuur 54, waarin gemeten en met WAQUA berekende waterstanden met elkaar zijn vergeleken. Bij een perfect model zouden alle blauwe punten op de zwarte diagonale lijn liggen.

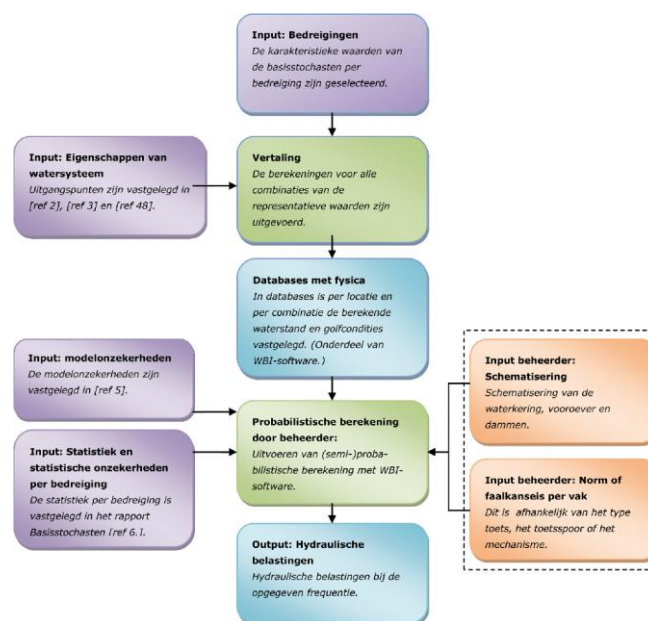
*Figuur 54  
Versillen tussen metingen en modeluitkomsten, locatie Houtribsluizen (Figuur C.74 in [35]).*



## 5.2 Berekenen van hydraulische belastingen op de dijk

Met een probabilistisch model én een gevulde database zijn hydraulische belastingen voor zowel de beoordeling als het ontwerp te maken. In het WBI2017 en OI2014 is uitgebreid beschreven hoe dit in zijn werk gaat. Illustratief is Figuur 55 uit de Ministeriële Regeling primaire waterkeringen bijlage II: hydraulische belastingen [44]. Hierin is te zien dat naast de belastingen die in het voorgaande zijn besproken óók de gegevens van de IJsselmeerdijk van belang zijn en natuurlijk de norm. De hoogte, taludhelling binnen- en buitenwaarts, de erosiebestendigheid van het gras en de sterkte van de harde bekleding: het speelt allemaal een rol bij de bepaling van de overstromingskans.

*Figuur 55  
Werkproces bepalen hydraulische belastingen op de dijk (Figuur 2-1 in [44]).*



Onderstaande tabel toont voor de directe faalmechanismen de benodigde hydraulische condities ( $H$ ). De bepaling van deze parameter (bij een bepaalde terugkeertijd) wordt uitgevoerd met het probabilistisch belastingmodel zoals beschreven in paragraaf 5.1.1., via de applicaties Hydra-NL en Riskeer. Voor elk van deze parameters is een omgekeerde benadering ook mogelijk, waarbij de waarde (waterstand, overslagdebiet, golfhoogte, etc.) opgegeven kan worden en vervolgens de bijbehorende terugkeertijd wordt afgeleid.

*Tabel 6  
Faalmechanismen en  
hun relevante  
belastingen*

Faalmechanisme	Belastingparameter ( $H$ )
STBI/STBU	Waterstand
	Overslagdebiet
STPH	Waterstand
AGK/AWO	Waterstand
	Golfhoogte
	Golfbelasting*
STMI/GABI	Waterstand
	Overslagdebiet
GEBU/GABU	Waterstand
	Golfhoogte
	Golfbelasting*
GEKB	Overslagdebiet
ZST	Waterstand
	Golfbelasting*

\*) Golfbelasting wordt uitgedrukt in een combinatie van golfhoogte, -periode en - richting. Dit wordt uitgedrukt in de functie:  $z = H_{m0}^a + T_p^b + \cos \beta^c$ , waarbij a, b en c afgeleid zijn voor elk bekledingstype.

## 6 Referenties

- [1] Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden, „Projectenboek HWBP 2021,” 2020.
- [2] D. de Bake, „Hydraulische Belastingen IJsselmeerdijk. Voorstel tot actualiseren database en te gebruiken rekentechnieken,” HKV & RHDHV, 2021.
- [3] Waterschap Zuiderzeeland, „Wettelijke Beoordeling Primaire Waterkeringen 2017-2022, normtraject 8-3, Definitief, vastgesteld,” 2018.
- [4] Deltares, „Overzicht plussen en minnen Hydraulische Belastingen (memo),” 2020.
- [5] Expertise Netwerk Waterveiligheid (ENW), „Grondslagen voor hoogwaterbescherming,” 2017.
- [6] Ministerie van Infrastructuur en Milieu, „Staatscourant 2016 nr. 65697,” 2016.
- [7] Rijkswaterstaat (RWS), „Achtergrondrapport Ontwerpinstrumentarium 2014. Behorende bij Handreiking Ontwerpen met Overstromingskansen (OI2014v4),” 2016.
- [8] Deltares, „WAQUA-model IJsselmeer, IJsseldelta en Vecht. Opbouw, kalibratie en verificatie. 1202108-000,” 2011.
- [9] Wikipedia, „Probabilistisch ontwerpen,” 2016. [Online]. Available: [https://nl.wikipedia.org/wiki/Probabilistisch\\_ontwerpen](https://nl.wikipedia.org/wiki/Probabilistisch_ontwerpen). [Geopend 26 januari 2021].
- [10] Google, „IJsselmeer,” [Online]. Available: <https://www.google.com/maps/@52.8370962,5.2064419,79203m/data=!3m1!1e3>. [Geopend 22 januari 2021].
- [11] C. Geerse en B. Kuijper, „Probabilistisch model frequentielijnen IJsselmeergebied. Hoofdrapport van model DEZY,” 2015.
- [12] Dpijsselmeergebied, „Een veilig en veerkrachtig IJsselmeergebied,” YouTube, 28 oktober 2013. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=mDZNjzRCurc>. [Geopend 22 januari 2021].
- [13] Rijkswaterstaat (RWS), „Peilbesluit IJsselmeergebied. MN0618TP330,” 2018.
- [14] HKV & Svašek, „WAQUA-productieberekeningen IJsselmeer en Vecht- en IJsseldelta voor WTI-2011: rapportage fase 1,” 2011.
- [15] C. Geerse, „Hydraulische randvoorwaarden 2006 Vecht- en IJsseldelta. Statistiek IJsselmeerpeil, afvoeren en stormverlopen voor Hydra-VIJ. Werkdocument 2006.036x,” Instituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling (RIZA), 2006.



- [16] C. Geerse, „Rol van meerpeilen en wind tijdens bedreigende omstandigheden voor de dijken van Marken (memo).„ HKV, 2014.
- [17] S. Caires, „Extreme wind statistics for the Hydraulic Boundary Conditions for the Dutch primary water defences. SBW-Belastingen: Phase 2 of subproject "Wind Modelling",„ Deltares, 2009.
- [18] Technische Universiteit Delft (TU Delft), „SWAN,“ 2020. [Online]. Available: <https://www.tudelft.nl/en/ceg/about-faculty/departments/hydraulic-engineering/sections/environmental-fluid-mechanics/research/swan/>. [Geopend 25 januari 2021].
- [19] Rijkswaterstaat (RWS), „Sterkte Belasting Waterkeren (SBW),“ 2020. [Online]. Available: <https://waterberichtgeving.rws.nl/klanten/rijkswaterstaat/sterkte-belasting-waterkeren>. [Geopend 25 januari 2021].
- [20] Flevopost, „Flevolandse dijken doorstaan zomerstorm goed,“ 2015. [Online]. Available: <https://flevopost.nl/artikel/399273/flevolandse-dijken-doorstaan-zomerstorm-goed.html>. [Geopend 25 januari 2021].
- [21] Rijkswaterstaat (RWS), „Achtergronden veiligheidsnormen dijken IJsselmeer. C4844,“ 1986.
- [22] Rijkswaterstaat (RWS), „Veiligheidsnormen dijken IJsselmeer. X3.86.10,“ 1986.
- [23] Ministerie van Verkeer en Waterstaat, „Hydraulische randvoorwaarden voor primaire waterkeringen. C11765 RWS,“ 1996.
- [24] Ministerie van Verkeer en Waterstaat, „Hydraulische randvoorwaarden 2001 voor het toetsen van primaire waterkeringen,“ 2001.
- [25] Rijkswaterstaat (RWS), „Dijkversterking IJsselmeerdijken Oostelijk Flevoland. Projectnota en milieu-effectrapport,“ 2000.
- [26] M. Duits, „Concept Toetspeilen HR2011 - IJsselmeer,“ HKV lijn in water, 2011.
- [27] Deltares, „Basisstochasten WTI-2017. Statistiek en statistische onzekerheid. 1209433-012-HYE-0007,“ 2015.
- [28] A. Kieftenburg en H. Chbab, „Achtergrondrapport WTI-2011 voor IJsselmeer. Concept hydraulische randvoorwaarden HR2011 voor het IJsselmeer, Ketelmeer en Vossemeer. 1204143-003,“ Deltares, 2012.
- [29] Helpdesk Water, „Baseline,“ 2020. [Online]. Available: <https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/applicaties-modellen/applicaties-per/watermanagement/watermanagement/baseline/>. [Geopend 25 januari 2021].
- [30] Deltares, Rijkswaterstaat, Alkyon, Logica, Vortech BV, „Release notes. Major release Simona2009,“ 2009.
- [31] R. Czachorski, „Manning’s Equation – The Details Behind this Highly Versatile Formula,“ H2Ometrics, 2018. [Online]. Available: <https://h2ometrics.com/manning-equation/>. [Geopend 26 januari 2021].

- [32] J. de Waal, „Windmodellering voor bepaling waterstanden en golven. Een analyse van de bouwstenen. RIZA werkdocument 2003.118x,“ Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2003.
- [33] C. Bak en D. Vlag, „Achtergronden Hydraulische Belastingen Dijken Usselmeergebied. Deelrapport 5. Modellering waterbeweging (WAQUA). RIZA rapport 99.042,“ Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 1999.
- [34] H. Chbab, „Waterstandsverlopen Meren. IJsselmeer en Markermeer. 1204143-003,“ Deltares, 2012.
- [35] Deltares, „Bijlagen rapport WAQUA-model IJsselmeer, IJsseldelta en Vecht. 1202108-001,“ 2011.
- [36] HKV & Svašek, „WAQUA-productieberekeningen IJsselmeer en Vecht- en IJsseldelta voor WTI-2011: rapportage fase 2,“ 2011.
- [37] Svašek, „SWAN model van het IJsselmeer. Definitief,“ 2010.
- [38] Nationaal Georegister (NGR), „Algemeen Dieptebestand IJsselmeergebied 2006,“ 2006. [Online]. Available: <https://www.nationaalgeoregister.nl/geonetwork/srv/api/records/bb524ddd-c15a-42d1-a424-7e7a02a9a2fa>. [Geopend 27 januari 2021].
- [39] Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN), „Actueel Hoogtebestand Nederland,“ 2020. [Online]. Available: <https://www.ahn.nl/>. [Geopend 27 januari 2021].
- [40] C. Gautier, „SWAN Calibration and Validation for HBC2011. Rapport 1200103-020-HYE-0002,“ Deltares, 2010.
- [41] M. Klein, „SWAN productieberekeningen IJsselmeer en Zwarte Meer voor WTI-2011: rapportage fase 1,“ HKV & Svašek, 2011.
- [42] A. Smale, „Overzicht plussen en minnen Hydraulische Belastingen. 11205572-002-HYE-0001,“ Deltares, 2020.
- [43] C. Geerse, „Hydra-Zoet for the fresh water systems in the Netherlands. Probabilistic model for the assessment of dike heights,“ HKV, 2011.
- [44] Ministerie van Infrastructuur en Milieu, „Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017. Bijlage II Voorschriften bepaling hydraulische belasting primaire waterkeringen,“ 2016.





**Hoofdkantoor**

HKV lijn in water BV  
Botter 11-29  
8232 JN Lelystad

**Nevenvestiging**

Informaticalaan 8  
2628 ZD Delft

0320 294242  
info@hkv.nl  
www.hkv.nl