Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

Technische Leidraad Katern Hydraulische belastingen

7 november 2026

Inhoudsopgave

1. Belastingen op primaire waterkeringen in Nederland 4
1.1 Inleiding 4
Belastingen op primaire waterkeringen in Nederland 4
1.2 Uitgangspunten hydraulische belastingen bij overstromingskansbepaling 5
Uitgangspunten bij het afleiden van de hydraulische belastingen 5
Inbedding hydraulische belastingen in probabilistische modellering voor overstromingskansbepaling 10
De 'knip' tussen belastingen en sterkte 12
1.3 Zichtjaar 13
Zichtjaar 13
Klimaatverandering 14
Bodemdaling (inclusief zetting en klink) 15
Effect van veranderende gebiedskenmerken op de hydraulische belastingen 15
Waterbeheer 16
2. Fysica-aspecten van hydraulische belastingen 17
Inleiding fysica van de hydraulische belastingen 17
2.1 Modellering fysica hydraulische belastingen 20
Modellering fysica hydraulische belastingen 20
Modelonzekerheden in lokale belastingen 22
Modellering wind 28
Modellering waterstanden 32
Modellering golfcondities 33
2.2 Gebiedsschematisatie 38
Gebiedsschematisatie 38
2.3 Productieberekeningen voor de fysische relatie tussen basisstochasten en hydraulische belasting parameters in tabelvorm 39
Productieberekeningen voor de fysische relatie tussen basisstochasten en hydraulische belasting parameters in tabelvorm 39
Productieberekeningen waterstanden 41
Productieberekeningen golven 42
2.4 Bepaling van het representatief verloop in de tijd 44
Bepaling van het representatief verloop in de tijd 44
2.5 Transformatie hydraulische belastingen naar de teen 45
Transformatie hydraulische belastingen naar de teen 45
Transformatie hydraulische belastingen met de DaF module 48
2.6 Rekenwaarden voor hydraulische belastingparameters 50
Rekenwaarden voor hydraulische belastingparameters 50
3. Statistiek 53
Statistiek van de basisstochasten 53
Basisstochasttype wind 54
Basisstochasttype rivierafvoer 59
Basisstochasttype zeewaterstand 61
Basisstochasttype meerpeil 63
Basisstochasttype toestand van de stormvloedkering 64
4. Probabilistiek 66

Watersysteemtypen en belastingmodellen 66
Watersysteemtype Bovenrivieren 72
Watersysteemtype Benedenrivieren 73
Watersysteemtype Meren 74
Watersysteemtype Kust 75
Watersysteemtype Oosterschelde 77
Watersysteemtype IJssel-Vecht delta 81

1. Belastingen op primaire waterkeringen in Nederland

1.1 Inleiding

Belastingen op primaire waterkeringen in Nederland

Bij de beschouwing van de kans op overstromen worden verschillende soorten belastingen op de waterkeringen onderscheiden. Van de verschillende soorten belastingen, die een waterkering moet weerstaan, gaat vanzelfsprekend de meeste aandacht uit naar de belastingen die het water uitoefent op de kering: de hydraulische belastingen. Een waterkering kan overigens ook andere belastingen ondergaan, zoals bijvoorbeeld door verkeer of aardbevingen.

Specificatie parameters hydraulische belasting afgestemd op faalmechanismen

In generieke zin bestaan de hydraulische belastingen op waterkeringen uit waterstanden en golven (hoogte, duur en richting). De nadere specificatie van de hydraulische belastingen binnen de overstromingskansbepaling hangt samen met de modellering van de faalmechanismen: de verschillende manieren waarop een waterkering kan bezwijken. Die samenhang wordt nader beschreven in Uitgangspunten.

Verleden en heden: van MHW naar databases

In oude rekenmethodes voor de waterveiligheid speelde de probabilistische modellering nog een beperkte rol en werd gewerkt met 'maatgevende' belastingen, met name de maatgevende hoogwaterstand (MHW) of het toetspeil. Deze informatie had een relatief beperkte omvang en werd als 'hydraulische randvoorwaarden (HR)' in boekvorm gepubliceerd. In de tegenwoordige rekenmethode is de probabilistische modellering veel breder uitgewerkt en wordt de informatie over hydraulische belastingen in de vorm van omvangrijke databases meegeleverd bij de rekeninstrumenten voor het beoordelen en ontwerpen van de primaire waterkeringen. Voor sommige toepassingen kunnen daaruit overigens nog wel representatieve rekenwaarden van de hydraulische belastingen worden afgeleid, zoals beschreven in Rekenwaarden voor hydraulische belastingparameters.

Afzonderlijke beschouwing van probabilistiek, statistiek en fysica

Binnen de overstromingskansbepaling wordt gebruik gemaakt van een probabilistisch model. Ten aanzien van de rol van de hydraulische belastingen in de probabilistische modellering kunnen drie hoofdonderwerpen worden onderscheiden:

1. Statistiek: de statistiek van de bedreigingsbronnen (wind, afvoer, enz.).
2. Fysica: de fysische relatie tussen bedreigingsbronnen en lokale hydraulische belastingparameters (waterstand, golfcondities).
3. Probabilistiek: het omgaan met verschillende combinaties van generieke bedreigingsbronnen per regio (het specificeren van watersystemen en hun belastingmodel binnen de probabilistische modellering).

In de beschrijving van de hydraulische belastingen in deze Technische leidraden gaat de meeste aandacht uit naar de operationele, vigerende methode voor het proces 'beoordelen'. Belangrijke generieke uitgangspunten met betrekking tot de hydraulische belastingen binnen het proces 'beoordelen' worden beschreven in Uitgangspunten.

Het zichtjaar bij 'beoordelen', 'ontwerpen' respectievelijk 'verkennen' is bepalend voor de vraag in hoeverre rekening wordt gehouden met bijvoorbeeld klimaatverandering of wijziging in gebiedsbeheer. Op de rol van het zichtjaar in de hydraulische belastingen wordt nader ingegaan in Zichtjaar.

1.2 Uitgangspunten hydraulische belastingen bij overstromingskansbepaling

Uitgangspunten bij het afleiden van de hydraulische belastingen

Dit artikel benoemt de uitgangspunten in die worden gehanteerd bij het afleiden van de hydraulische belastingen.

Parameters voor de lokale hydraulische belastingen

De lokale hydraulische belastingen bestaan uit waterstanden en golfcondities (hoogte, periode en richting) nabij de waterkering. Nader gespecificeerd betreft het de parameters:

- stilwaterlijn ten opzichte van NAP
- significante golfhoogte (H_s en H_{m0} worden als gelijkwaardig beschouwd)
- piekperiode (T_p) en/of spectraal gewogen periode ($T_{m-1,0}$)
- golfrichting (waar de golven vandaan komen) ten opzichte van Noord, volgens nautische conventie

Deze belastingparameters zijn mede zo gekozen omdat hiermee een voor de modellering praktische 'knip' wordt gelegd tussen belastingen en sterkte:

- De parameters bevatten voldoende informatie over hydraulische belastingen voor de beschouwde grenstoestandfuncties; hiernaast is alleen nog informatie over de kering nodig.
- De waarden van deze belastingparameters zijn zelf in elk geval in eerste benadering onafhankelijk van de kenmerken van de kering.

Deze 'knip' tussen belastingen en sterkte wordt nader toegelicht in het gelijknamige artikel.

Een kanttekening bij deze selectie van parameters wordt geplaatst in de paragraaf Focus op initiële mechanismen, topwaarden van de belasting.

De betekenis van 'lokaal' wordt nader beschouwd in de paragraaf Wat betekent 'lokaal?

Onzekerheid rond hydraulische belastingen in de probabilistische modellering

De belastingparameters (waterstanden en golfcondities) kennen een natuurlijke variabiliteit: er is sprake van inherente onzekerheid (Inherente, statistische en modelonzekerheden). Het omgaan met de inherente onzekerheid rond de hydraulische belastingen vormt een belangrijk onderdeel van de probabilistische rekenmethode voor de overstromingskansbepaling: het is nodig de inherente onzekerheid rond de lokale waterstanden en golfcondities statistisch te kwantificeren. Zie verder de paragraaf Verwerking inherente onzekerheid in de probabilistische modellering.

De probabilistische rekenmethode houdt overigens naast de inherente onzekerheid óók rekening met kennisonzekerheid rond de belastingparameters, zie verder de paragraaf Verwerking kennisonzekerheid rond hydraulische belastingen.

Verwerking inherente onzekerheid in de probabilistische modellering

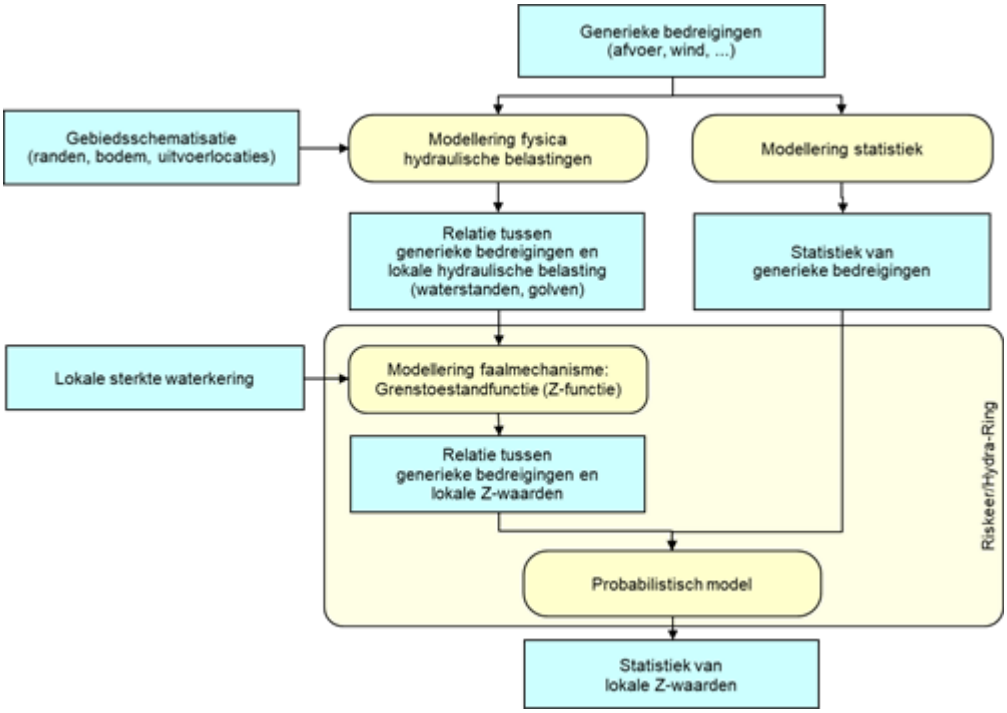
De normen van onze waterkeringen zijn zo streng dat het vrijwel altijd onmogelijk is de maatgevende belastingen puur op basis van meetreeksen te bepalen. De normen komen immers overeen met herhalingstijden van honderden tot (tien)duizenden jaren, en maatgevende gebeurtenissen zijn daarmee veel te zeldzaam om voldoende vaak te kunnen meten. Bovendien is het praktisch gezien niet haalbaar om voor elk keringvak over een zeer lange én representatieve meetreeks te beschikken. En dat al helemaal niet als voor het bepalen van ontwerpbelastingen rekening moet worden

gehouden met bijvoorbeeld een rivierverruiming die nog in aanleg is, en een toekomstige klimaatverandering die nog moet plaatsvinden. In de huidige modellering wordt daarom die statistiek afgeleid uit:

- De statistiek van de belangrijkste bronnen voor hoge lokale hydraulische belastingen: de bedreigingsbronnen.
- De fysische relatie tussen die bedreigingsbronnen en de lokale hydraulische belastingen.

Figuur 1 toont een vereenvoudigd stroomschema met kernelementen van de probabilistische modellering voor de overstromingskansbepaling. In dit schema geldt:

- De blauwe blokken bevatten informatie, gegevens.
- De gele blokken bevatten bewerkingen, rekenmodellen, processen.
- De pijlen geven de richting van de informatiestroom aan.



Figuur 1 Kernelementen in de probabilistische modellering voor de overstromingskansbepaling.

Dit schema wordt nader toegelicht in Inbedding hydraulische belastingen in probabilistisch modellering voor overstromingskansbepaling.

Verwerking kennisonzekerheid rond hydraulische belastingen

De probabilistische rekenmethode houdt naast de inherente onzekerheid óók rekening met kennisonzekerheid rond de hydraulische belastingen. Kennisonzekerheid bestaat zowel uit de statistische onzekerheid als de modelonzekerheid. De statistische onzekerheid heeft betrekking op de onzekerheid rond de statistiek van de basisstochasten. Dit wordt nader uitgewerkt in Inherente, statistische en modelonzekerheden. De modelonzekerheid heeft betrekking op de fysische relatie tussen de basisstochasten en de lokale hydraulische belastingen. Dit wordt nader uitgewerkt in Modelonzekerheden in lokale belastingen.

Focus op initiële mechanismen, topwaarden van de belasting

Traditioneel wordt een hoge belasting primair geassocieerd met hoge waterstanden en/of hoge golven. Bovendien werd in de faalmechanismemodellen tot nu toe gewerkt met een faaldefinitie die

voor een groot deel samenhangt met een initieel mechanisme: een 'begin van bezwijken'. Dit heeft in de rekenmethode voor waterveiligheid geleid tot een focus op topwaarden van de belastingparameters, zowel wanneer een vaste periode van een jaar wordt beschouwd als wanneer specifieke belastinggebeurtenissen worden beschouwd. Merk op dat in bijna alle achtergrondrapporten wordt gesproken van een ‘event’ of ‘belasting-event’ in plaats van belastinggebeurtenis. Met alle drie de termen wordt hetzelfde bedoeld, namelijk een combinatie van basisstochastwaarden waarvoor de belasting database fysica de lokale (top-)waarden van de belastingparameters bevat. In deze Technische Leidraden zal van de term belastinggebeurtenis gebruik worden gemaakt, maar deze dient volledig equivalent te worden beschouwd met de termen ‘event’ of ‘belasting-event’ in achtergronddocumentatie.
Naast de topwaarden van de hydraulische belastingen is voor diverse faalmechanismemodellen echter óók behoefte aan informatie over:

- de belastingduur, netter verwoord: het verloop van de hydraulische belasting in de tijd binnen een representatief belastinggebeurtenis, zie de paragraaf Het verloop van de hydraulische belasting in de tijd binnen een belastinggebeurtenis

en/of

- dagelijkse belastingomstandigheden, zoals het gemiddeld laag water (GLW), zie de paragraaf Karakteristieke waarden voor dagelijkse omstandigheden.

Het verloop van de hydraulische belasting in de tijd binnen een belastinggebeurtenis

Met de kennisontwikkeling rond faalmechanismen zijn faalmechanismemodellen doorontwikkeld. Aanvankelijk werd daarbij alleen gerekend met informatie over de top van de belasting. Maar inmiddels is in steeds meer gevallen óók informatie over het verloop van de hydraulische belasting in de tijd binnen een belastinggebeurtenis van belang geworden. Dit geldt al voor de huidige modellen met de focus op initiële mechanismen, zoals schade aan de dijkbekleding, maar geldt nog sterker als in het faalmechanismemodel ook rekening gehouden gaat worden met de vervolgmechanismen tot aan feitelijke overstroming, zoals de erosie van de dijkkern.

De beschrijving van de variatie van de hydraulische belastingparameters in de tijd binnen een belastinggebeurtenis in de huidige modellering is vooralsnog pragmatisch eenvoudig ingevuld: er is gekozen voor een (per deelgebied en faalspoor verschillende) representatieve lijn, die het waterstandsverloop ten opzichte van de topwaterstand weergeeft. Zie verder Bepaling van het representatief verloop in de tijd.

Ook de onzekerheid rond het verloop van de belasting in de tijd wordt nog niet expliciet gemodelleerd in het probabilistisch model.

Karakteristieke waarden voor dagelijkse omstandigheden

Voor sommige mechanismemodellen zijn karakteristieke waarden voor dagelijkse omstandigheden met betrekking tot lokale waterstanden nodig. Denk hierbij bijvoorbeeld aan grasbekleding erosie buitentalud, afschuiven in buitenwaartse richting en zettingsvloeiing voorland. Dergelijke karakteristieke waarden zijn afgeleid uit de 'waternormalen', zie hiervoor de websites van Rijkswaterstaat over waterdata en Waterkwantiteit - Waterinfo Extra.

Focus op het winterhalfjaar

De kans op overstroming varieert binnen een jaar; is afhankelijk van het seizoen: in de zomer is de kans op een extreme storm en/of afvoer relatief klein. In de huidige probabilistische modellering

wordt pragmatisch met deze variatie omgegaan:

- er wordt geen rekening gehouden met een bijdrage van het zomerhalfjaar aan de kans op overstroming en
- binnen het winterhalfjaar wordt geen onderscheid gemaakt naar kansbijdragen van deelperioden: het winterhalfjaar wordt statistisch gezien als homogeen beschouwd.

Zie verder het artikel Inherente, statistische en modelonzekerheden.

Vereenvoudigde rol waterkeringen in fysisch gedrag watersysteem

Bij de modellering van het fysisch gedrag van het watersysteem worden vereenvoudigende aannames gehanteerd over de rol van de waterkeringen. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen keringen die een dijkringgebied beschermen en voorliggende keringen.

Onfeilbare dijkringgebiedbeschermende keringen

Er wordt vanuit gegaan dat al het water binnen het watersysteem blijft; er vindt géén overstroming van een dijkringgebied vanuit het watersysteem plaats. Dit betekent dat - bij de betreffende berekeningen - impliciet wordt aangenomen dat de dijkringgebiedbeschermende waterkeringen oneindig hoog en sterk zijn.

Het uitgangspunt dat de feitelijke kenmerken van de kering (zoals keringtype, profiel, ruwheid, hoogte) geen invloed hebben op de fysische relatie tussen basisstochasten en lokale hydraulische belasting hangt hiermee samen.

Merk op dat dit uitgangspunt wel ruimte laat om rekening te houden met het effect van een overstroming die buiten het beschouwde watersysteem plaatsvindt. Maar daar moet dan wel expliciet toe besloten worden. Twee concrete gevallen waar dit wordt toegepast zijn:

- Het effect van overstromingen van de Maaskades in het bovenstroomse deel van de Maas (Watersysteem Bovenmaas) wordt meegenomen bij het beschrijven van de afvoerstochast voor het benedenstroomse deel van de Maas (benedenstrooms van Boxmeer).
- Het effect van overstromingen in het buiten Nederland gelegen bovenstroomse gebied van de bovenrivieren wordt meegenomen bij het beschrijven van de afvoerstochast aan de bovenstroomse rand (op de landsgrens) van het watersysteem.

Overstromingen in België en Duitsland worden meegenomen als ze bovenstrooms van respectievelijk Eijsden en Lobith optreden. Overstromingen achterlangs de dijken (negatieve systeemwerking) worden niet meegenomen. Overstromingen in België bij het mijnzakkingsgebied ter hoogte van Born worden niet meegenomen De effecten van overstromingen in België zijn bekend uit de betreffende beleidsstudies.

Varianten van feilbaarheid bij dijkringverbindende keringen

Bij dijkringverbindende keringen is de aanpak iets meer gedifferentieerd. Bij elke dijkringverbindende kering wordt één van de volgende drie aanpakken gevolgd:

1. De kering wordt oneindig hoog en sterk verondersteld en vormt daarmee - net alsdijkringgebiedbeschermende keringen - een buitenrand van het watersysteem. Voorbeelden hiervan zijn de Afsluitdijk en de Houtribdijk.
2. De kering wordt oneindig sterk verondersteld, maar omdat de overstroombaarheid een relevante karakteristiek wordt geacht, wordt de correcte hoogte van de kering in de waterstandsmodellering in rekening gebracht. Voorbeelden hiervan zijn de dijk Ramspol-IJsselmuiden en de hoge grond van de Europoort kering (tussen Maeslant- en de Hartelkering).

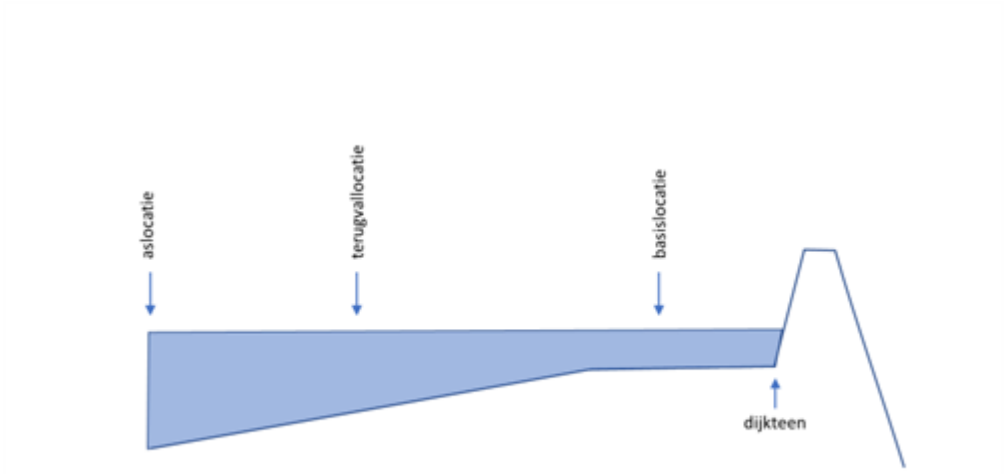
3. De kering wordt zowel eindig hoog als eindig sterk (i.c. feilbaar) verondersteld. Deze aanpak wordt alleen toegepast bij enkele stormvloedkeringen, dat wil zeggen een beweegbaar deel van een dijkringverbindende kering. Dit betreft:

3.1. de Balgstuw Ramspol,
3.2. de Europoortkering (de combinatie van Maeslantkering, Hartelkering en tussengelegen hoge grond),
3.3. de Algerakering (Hollandsche IJsselkering) en
3.4. de Oosterschelde stormvloedkering.

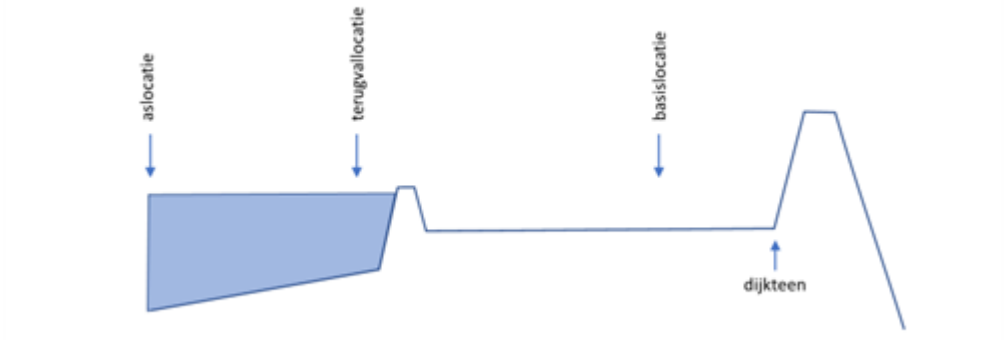
Wat betekent 'lokaal'?

'Lokaal' betekent in de context van de hydraulische belastingen 'ter plaatse van de teen van de waterkering'.

In de praktijk worden condities alleen bepaald op vooraf geselecteerde locaties de 'uitvoerlocaties'. In de huidige modellering zijn geen uitvoerlocaties die daadwerkelijk ter plaatse van de teen liggen. Voor de basisset uitvoerlocaties geldt dat deze locaties weliswaar nabij, maar nog steeds wel op enige afstand van de teen liggen.



Figuur 2a Eerste voorbeeld positie van verschillende uitvoerlocaties ten opzichte van de dijkteen.



Figuur 2b Tweede voorbeeld positie van verschillende uitvoerlocaties ten opzichte van de dijkteen.

De gebruiker kan de condities op deze uitvoerlocaties representatief achten voor de teen van de beschouwde waterkering, maar kan er ook voor kiezen (wanneer daar een fysisch overtuigende aanleiding voor is) de condities naar de teen te vertalen, rekening houdend met het effect van een eventuele dam en/of een voorland tussen de uitvoerlocatie en de teen, zie Transformatie hydraulische belastingen naar de teen.

Afhankelijk van het beschouwde watersysteem bestaan naast de basisset uitvoerlocaties nabij de waterkering nog andere sets uitvoerlocaties. Voorbeelden daarvan zijn:

- uitvoerlocaties nabij het begin van een voorland
- uitvoerlocaties nabij de ingang van een haven
- uitvoerlocaties in de as van een rivier
- uitvoerlocaties op meetlocaties

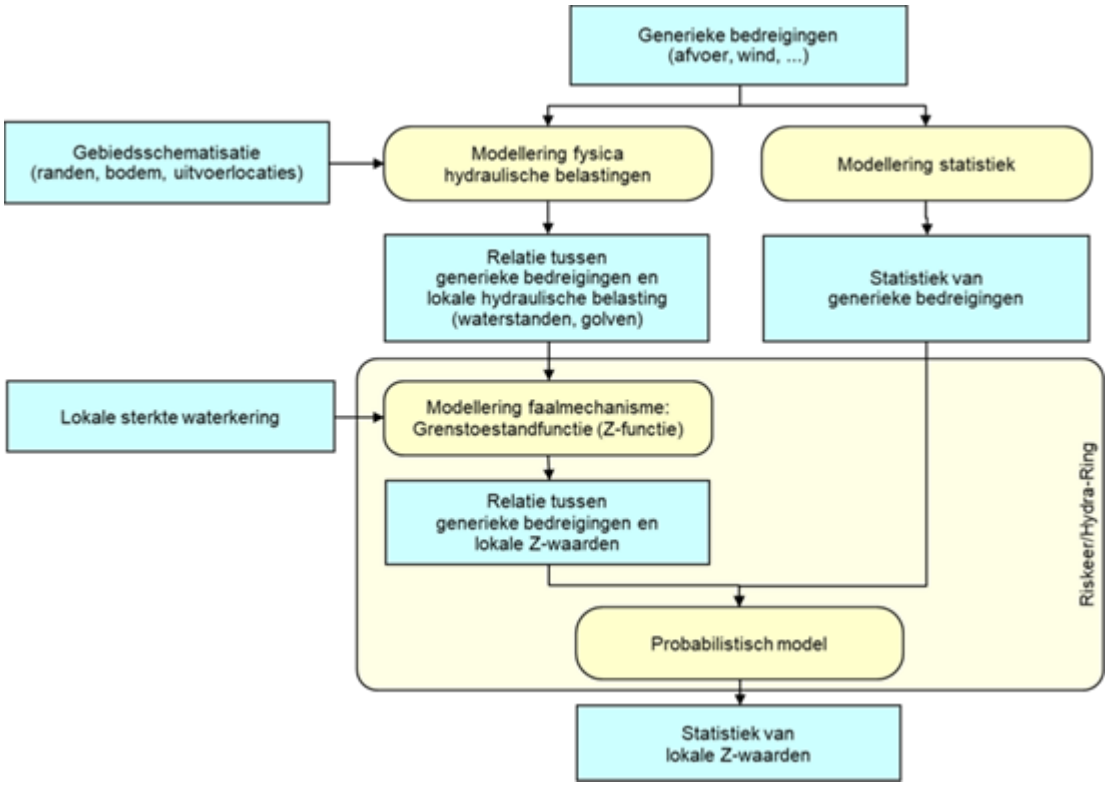
Versie 1.0: 2 juli 2025

Inbedding hydraulische belastingen in probabilistische modellering voor overstromingskansbepaling

Hydraulische belastingen kennen diverse aspecten, die op diverse plekken in de probabilistische bepaling van de overstromingskans een rol spelen. Dit artikel beschrijft deze aspecten en posities in de probabilistische modellering aan de hand van een stroomschema van kernelementen van die modellering.

Stroomschema met kernelementen van de probabilistische modellering

Onderstaande Figuur toont een stroomschema met kernelementen van de probabilistische modellering voor de overstromingskansbepaling. Dit schema is geïntroduceerd in het artikel Uitgangspunten.



Figuur Kernelementen in de probabilistische modellering voor de overstromingskansbepaling.

Hieronder volgen enkele algemene toelichtende opmerkingen bij dit kernschema, een nadere uitleg volgt daarna:

- Belangrijk startpunt in het schema is het blok 'Generieke bedreigingen' (ook wel bedreigingsbronnen). Denk hierbij aan (hoge) rivierafvoeren, windsnelheden en zeewaterstanden. Hierop wordt in de paragraaf Bedreigingsbronnen nader ingegaan.
- In het schema is het onderscheid in de belangrijkste aspecten fysica, statistiek en probabilistiek herkenbaar. In het schema is aan het begin de scheiding herkenbaar tussen de sporen fysica en statistiek van hydraulische belastingen. Deze sporen komen later samen in het probabilistisch model, dat hieronder beknopt beschreven wordt in de paragraaf Hydraulische belastingen in probabilistisch model: belastingmodellen, watersystemen.
- Het eindproduct in dit kernschema bestaat uit het blok 'statistiek van lokale Z-waarden'. Dat is nog geen overstromingskans. Hierop wordt nader ingegaan in de paragraaf Van statistiek van lokale Z-waarde naar overstromingskans dijktraject.
- De blokken 'Relatie tussen bedreigingsbronnen en lokale hydraulische belasting' en 'Statistiek van bedreigingsbronnen' bevatten de hydraulische belastingen informatie, zoals die door het Rijk in de vorm van databases worden opgeleverd.
- Merk op dat de informatie in de blokken 'Relatie tussen bedreigingsbronnen en lokale hydraulische belasting' en 'Statistiek van bedreigingsbronnen' zelf geen beschrijving is van de statistiek van de lokale hydraulische belastingen parameters. In bijzondere toepassingen kan als uitvoer van dit schema de statistiek van de lokale hydraulische belasting parameters verkregen worden, zie hiervoor verder de paragraaf Probabilistisch bepaalde hydraulische belastingen.

Dit kernschema kent diverse beperkingen. De belangrijkste beperkingen zijn:

- Het schema beschouwt alleen de verwerking van de rol van de inherente onzekerheid rond hydraulische belastingen; het schema laat de rol van kennisonzekerheden buiten beschouwing, zie hiervoor het artikel Uitgangspunten.
- Het schema is niet helemaal representatief voor de huidige rekenmethode voor de keringen langs de zoute wateren.

Bedreigingsbronnen

In generieke zin wordt in de probabilistische modellering van de hydraulische belastingen gewerkt met de volgende basisstochasttypen:

- Wind
- Afvoer
- Meerpeil
- Zeewaterstand
- Toestand stormvloedkering

Zie verder Inherente, statistische en modelonzekerheden.

Hydraulische belastingen in probabilistisch model: belastingmodellen, watersystemen

De wateren, die een bedreiging vormen voor de primaire waterkeringen, worden onderverdeeld in watersystemen. Een watersysteem is een gebied waar de waterveiligheid bedreigd wordt door een

specifieke combinatie van bedreigingsbronnen, die de basisstochasten worden genoemd. Ieder watersysteem heeft dus een eigen combinatie van basisstochasten. Daarmee samenhangend heeft ieder watersysteem in de probabilistische modellering een eigen type belasting-events (definitie van bepalende hoogwatergebeurtenissen) en een eigen belastingmodel.

Probabilistisch bepaalde hydraulische belastingen

Het probabilistische model kan ook hydraulische randvoorwaarden bepalen: statistisch representatieve rekenwaarden van de hydraulische belastingparameters voor toepassing bij semi-probabilistisch beschouwde faalmechanismen. Daartoe worden speciale Z-functies toegepast. Zie verder Rekenwaarden voor hydraulische belastingparameters.

Versie 1.0: 2 juli 2025

De 'knip' tussen belastingen en sterkte

In de rekenmethode voor de overstromingskansbepaling worden de kennisvelden 'belastingen' en 'sterkte' samengebracht. Dit artikel beschrijft op welk punt de verbinding wordt gelegd, anders gezegd: waar in de overstromingskansbepaling de 'knip' tussen de twee kennisvelden ligt.

Faalmechanismemodellen

Er bestaan veel verschillende soorten waterkeringen, met als hoofdtypes dijken, dammen, duinen, kunstwerken en hybride keringen. Elk keringtype heeft verschillende manieren waarop de kering kan bezwijken, anders gezegd: er zijn verschillende faalmechanismen. De beschrijving van faalmechanismen behoort tot het kennisveld 'sterkte'.

Voor een probabilistische analyse is voor ieder faalmechanisme een faalmechanismemodel beschikbaar in de vorm van een grenstoestandfunctie, ook wel 'Z-functie' genoemd. De grenstoestandfunctie is de plaats in de berekening waar - per faalmechanisme - de beschrijving van de relevante sterktekenmerken en de beschrijving van de relevante belastingkenmerken samenkomen.

Relevante hydraulische belastingen

De relevante hydraulische belastingen verschillen per faalmechanisme, denk bijvoorbeeld aan:

- Overloopdebiet, bij een waterstand hoger dan de kruin van de waterkering, van belang voor erosie van de kruin en/of het binnentalud van een dijk
- Hydrostatische waterdruk tegen de kering, van belang voor de kracht op een sluisdeur (constructieve sterkte),
- Waterspanningen in en onder het dijklichaam, van belang voor piping onder een dijklichaam en macro-instabiliteit van het dijkprofiel
- Golfoverslag, van belang voor erosie kruin en binnentalud van een dijk
- Golfoploop, van belang voor erosie buitentalud van een dijk
- Golfklappen, van belang voor erosie buitentalud van een dijk
- Golfdrukken, van belang voor de kracht op een sluisdeur (constructieve sterkte)

Generieke hydraulische belastingen

De relevante belastingkenmerken worden in de modellering afgeleid uit:

- de generieke hydraulische belastingparameters (onafhankelijk van de kenmerken van de waterkering):

  - waterstand
  - golfhoogte

- golfperiode
- golfrichting

- en de kenmerken van de waterkering, zoals:

- het keringtype
- de kruinhoogte
- het profiel
- de ruwheid
- de doorlatendheid van (diverse lagen in) het dijkmateriaal en de ondergrond.

De afleiding van de relevante belastingkenmerken uit de generieke belastingparameters wordt beschouwd als onderdeel van de afzonderlijke faalmechanismemodellen. Voorbeeld: de formules voor golfoverslag maken deel uit van het faalmechanismemodel voor 'graserosie kruin en binnentalud'.

In het licht van het bovenstaande worden de diverse genoemde 'relevante belastingkenmerken' 'belasting*effecten*' of ook wel 'interne belastingen' genoemd: zij vormen het resultaat (effect) van de combinatie van de generieke belastingparameters en de kenmerken van de kering, veelal gemodelleerd binnen het faalmechanismemodel.

De beschouwing van de hydraulische belastingen kan zich daarom beperken tot de beschouwing van de generieke hydraulische belastingparameters, die onafhankelijk zijn van de kenmerken van de waterkering. Daarmee is een voor de modellering praktische 'knip' gelegd tussen belastingen en sterkte.

Al enige tijd groeit het inzicht dat ook kenmerken van het verloop van de belasting in de tijd relevant zijn voor diverse faalmechanismemodellen. Hiervoor zijn echter nog geen generieke parameters gespecificeerd. Zie ook het artikel Uitgangspunten.

Versie 1.0: 2 juli 2025

1.3 Zichtjaar

Zichtjaar

Het zichtjaar markeert het einde van de planperiode. Een planperiode is de periode waarvoor de (on)voorziene toekomstige veranderingen en/of maatregelen worden meegenomen in de beoordeling of ontwerp van een primaire waterkering. Voor de beoordeling van primaire waterkeringen ligt het zichtjaar 12 jaar in de toekomst.

Met betrekking tot beoordelen worden verwachte veranderingen in het systeem zoals maatregelen voor de rivierverruiming of veranderingen in het klimaat zoals zeespiegelstijging vaak verdisconteerd in de door het Rijk uitgeleverde databases met hydraulische belastingen voor het beoordelen.

Voor ontwerp van primaire waterkeringen of versterkingen daarvan gelden echter langere planperiodes dan voor de beoordeling, samenhangend met de gewenste levensduur. Meestal wordt uitgegaan van een planperiode van 50 of 100 jaar. In bepaalde situaties verdient het zelfs de voorkeur om uit te gaan van een nog langere planperiode, bijvoorbeeld 200 jaar. Dit geldt bijvoorbeeld voor die situaties waar aanpassing of uitbreiding van het ontwerp niet goed mogelijk is of zeer kostbaar is.

Aspecten waar rekening mee wordt gehouden, gerelateerd aan het zichtjaar zijn:

- De effecten van klimaatveranderingen

- Temperatuur

    - Zeespiegelstijging
    - Meerpeilstijging
    - Veranderingen in rivierafvoer
    - Wind
- Bodemdaling inclusief zetting en klink
- Beleidskeuzes:

    - Beleidskeuzes ten aanzien van de gebiedskenmerken
    - Beleidskeuzes ten aanzien van het waterbeheer

Versie 1.0: 2 juli 2025

Klimaatverandering

Dit artikel behandelt de invloed van klimaatverandering op het ontwerp en de beoordeling van waterkeringen, gegeven een zeker zichtjaar.

Het klimaat in Nederland verandert. Hoe het klimaat verandert is afhankelijk van de wereldwijde temperatuurstijging en van veranderingen van de stromingspatronen van lucht in West Europa, en de daarmee samenhangende verandering in de wind. Het klimaat speelt een belangrijke rol bij infrastructurele projecten en veiligheid tegen overstromingen. Voor een bereikbaar, leefbaar en veilig Nederland is kennis over veranderingen in het klimaat van groot belang.

Klimaatverandering manifesteert zich voornamelijk in een stijging of daling van de gemiddelde temperatuur, verandering van de zeespiegel en de verandering van de hoeveelheid neerslag, maar ook in een (mogelijke) verandering in wind, zonneschijn en verdamping en indirecte effecten (zoals op ijsgang). Voor de waterveiligheid tracht Nederland zich met kustverdediging, rivierdijken en infrastructurele projecten aan deze veranderingen aan te passen. Dat vraagt om investeringen die afhankelijk zijn van een onzekere toekomst. Om effectieve en efficiënte investeringen te kunnen doen is het essentieel om ver vooruit te kijken. In de afgelopen jaren zijn door het KNMI verschillende klimaatscenario's ontwikkeld. Als uitgangspunt bij de ontwikkeling van deze klimaatscenario's gelden de klimaatrapporten van het Intergovernmental Panel on Climate Changes (IPCC).

De belangrijkste en gedeelde kenmerken van bovengenoemde klimaatscenario's voor de klimaatverandering in Nederland zijn:

- De opwarming zet door; hierdoor komen zachte winters en warme zomers vaker voor,
- De winters worden gemiddeld natter en ook de extreme neerslaghoeveelheden nemen toe,
- De hevigheid van extreme regenbuien in de zomer neemt toe, maar het aantal zomerse regendagen wordt juist minder,
- De berekende veranderingen in het windklimaat zijn klein ten opzichte van de natuurlijke grilligheid,
- De zeespiegel blijft stijgen.

Klimaatscenario's

Het KNMI maakt regelmatig nieuwe klimaatscenario's van een mogelijk toekomstig klimaat voor Nederland. Deze KNMI-scenario's vormen de basis voor onderzoek naar de effecten van klimaatveranderingen en adaptatie aan die verandering. Klimaatscenario's hebben meestal een tijdshorizon van 50 of 100 jaar. Als gevolg van klimaatveranderingen verandert het gemiddelde klimaat, maar ook de kans op extremen. Het extreme klimaat kan bovendien anders veranderen dan het gemiddelde klimaat. De kans op extreme neerslag kan bijvoorbeeld toenemen, terwijl de gemiddelde neerslag afneemt. Klimaatscenario's voor de toekomst geven dus informatie over zowel

de gemiddelde verandering als de verandering in extremen. In navolging van het Intergovernmental Panel on Climate Changes, dat regelmatig klimaatrapporten uitbrengt voor de wereldwijde ontwikkelingen van het klimaat, maakt het KNMI op basis van deze rapportage een vertaalslag naar de Nederlandse situatie.
Versie 1.0: 2 juli 2025

Bodemdaling (inclusief zetting en klink)

Dit artikel behandelt de invloed van bodemdaling op het ontwerp en de beoordeling van waterkeringen gegeven een zeker zichtjaar.

Bodemdaling is een factor waar zowel bij het beoordelen als bij het ontwerp van waterkeringen rekening mee moet worden gehouden. De verandering van het bodemniveau in Nederland is het gevolg van één of meer verschillende processen, denk aan:

- tektoniek, isostatie, compactie, rijping, etc.
- delfstofwinning, grondwateronttrekking / polderpeilverandering
- zetting en klink (voornamelijk dijken)
- morfologie (voornamelijk zomerbed)
- onderhoud: baggerwerk (zomerbed), suppletie (voorland)

Deze processen zijn niet allemaal overal in Nederland aan de orde. Het resulterende totale effect van bodemdaling op het bodemniveau varieert dan ook ruimtelijk.

Door de daling van de bodem waar de waterkering op rust, dalen de hoogtekenmerken van de waterkering mee en neemt de effectieve hoogte van de waterkering af, wat effect heeft op de sterkte van de waterkering. Op die manier draagt de bodemdaling bij aan de relatieve zeespiegelstijging. Relatieve zeespiegelstijging is de optelling van de absolute zeespiegelstijging en de bodemdaling, die beiden zorgen dat de zeespiegel stijgt relatief gezien aan de kruinhoogte van de waterkering. Naast de relatieve daling van de waterkering, kan een verandering van bodemniveau ook doorwerken in de hydraulische belastingen op de kering.

Deze bodemdaling kan in laag-liggend Nederland lokaal tot wel 2 centimeter per jaar bedragen. De hoofdoorzaak hiervan is de combinatie van veenafbraak, toenemende belasting op slappe bodems en (toenemende) verlaging van grondwaterstanden. In drooggelegde veengebieden blijft de bodemdaling doorgaan, met meer dan 1 meter per eeuw. Het proces van veenoxidatie wordt nog versneld door de klimaatverandering. In sommige gebieden waar geen veen meer over is, daalt de bodem niet verder. Veranderend landgebruik kan de trend van bodemdaling keren. Waar bijvoorbeeld veenweidegebied uit productie wordt genomen en omgezet in natte natuur wordt het veen niet meer geoxideerd. De omzetting in natte natuur kan grote consequenties hebben voor de waterhuishouding in het betreffende gebied. Er wordt dan meer zoetwater vastgehouden, en er hoeft soms ook minder zout kwelwater weggespoeld te worden. Daar staat wel tegenover dat de verdamping in de zomer toeneemt.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Effect van veranderende gebiedskenmerken op de hydraulische belastingen

Dit artikel behandelt het meenemen van beleidskeuzes, die de gebiedskenmerken beïnvloeden. Hierbij gaat het om keuzes in het kader van het ontwerp en de beoordeling van waterkeringen, gegeven een zeker zichtjaar.

Veranderende gebiedskenmerken die betrekking hebben op beoordeling en ontwerp van waterkeringen zijn in drie categorieën te onderscheiden, namelijk:

- Ligging van primaire keringen
- Onderhoud/aanpassing bodemligging, vegetatie, obstakels
- Beschermde waarde en inwoners (werkt door via de normen)

Soms kan een maatregel inhouden dat de ligging van de primaire kering (in de toekomst) verandert. Denk hierbij bijvoorbeeld aan een dijkteruglegging of de constructie van een bypass in een rivier. Vaak gaat een aanpassing in de ligging van de primaire kering samen met een verandering in de bodemligging, er ontstaat of verdwijnt immers een deel buitendijks gebied. Om het effect van veranderingen in de ligging van de primaire kering of de bodem mee te nemen wordt de gebiedsschematisatie bijgewerkt naar de nieuwe situatie. Vervolgens wordt deze nieuwe gebiedsschematisatie gebruikt in de modellering van waterstanden en golven. Door met productieberekeningen nieuwe databases af te leiden en die te gebruiken worden de effecten uiteindelijk meegenomen in de beoordeling of het ontwerp. Deze zelfde werkwijze wordt aangehouden voor veranderingen in de vegetatie (effect op bodemruwheid in riviersystemen) en de obstakels. Deze laatste twee zaken spelen met name in de uiterwaarden bij riviersystemen.

Om (significante) veranderingen in de beschermde waarde of het aantal inwoners van een dijktraject gebied mee te nemen, moet de omgevingswaarde in de Omgevingswet aangepast te worden.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Waterbeheer

Dit artikel behandelt het meenemen van beleidskeuzes die het waterbeheer beïnvloeden, in het kader van het ontwerp en de beoordeling van waterkeringen gegeven een zeker zichtjaar.

Invloed waterbeheer op hydraulische belastingen

Veranderingen in het waterbeheer kunnen invloed hebben op hydraulische belastingen via effecten op:

- de statistiek van de basisstochasten
- het fysisch gedrag van het watersysteem: de fysische relatie tussen de basisstochasten en de lokale hydraulische belastingen.

Invloed beheer op statistiek basisstochasten

Er is invloed van beheer mogelijk op de statistiek van de basisstochasten:

- afvoer
- meerpeil
- stormvloedkering

Er is in de praktijk geen invloed van beheer mogelijk op de statistiek van de basisstochasten zeewaterstand en wind.

Afvoer

Beheer kan invloed hebben op de statistiek van de basisstochast afvoer. Dit speelt vooral bij (aanpassingen in het) waterbeheer bovenstrooms van het beschouwde watersysteem, oftewel het buitenland. Een concreet voorbeeld hierbij is de vraag in hoeverre rekening wordt gehouden met overstromingen bovenstrooms van het beschouwde watersysteem. Hier kan rekening mee gehouden in de modellering met GRADE, het model dat wordt gebruikt voor het afleiden van de afvoerstatistiek van de Rijn en de Maas (en de benedenstroomse doorwerking daarvan, die mede afhankelijk is van de

gehanteerde afvoerverdeling), zie het artikel Basisststochasttype rivierafvoer.

Meerpeil

Beheer kan invloed hebben op de statistiek van de basisstochast meerpeil, bijvoorbeeld via (aanpassingen in) de volgende beheeraspecten:

- peilbesluiten
- spuien
- pompen

Als onderdeel van het beheer kan 'eenmalig' geïnvesteerd worden in spuicapaciteit en/of pompcapaciteit. Wijzigingen in de peilbesluiten kunnen leiden tot andere inzet van de pomp- en/of spuicapaciteit in het dagelijks beheer.

Stormvloedkering

Beheer kan invloed hebben op de statistiek van de basisstochast stormvloedkering, bijvoorbeeld via (aanpassingen in) de volgende beheeraspecten:

- de faalkans
- de voorspelnauwkeurigheid

Aanpassing (verkleining) van de faalkans vergt investering in het robuuster maken van procedures en/of investeringen in verbetering of vergroting van de redundantie of constructief of werktuigbouwkundig vlak. Aanpassing (verkleining) van de voorspelnauwkeurigheid vergt verbetering in de rekenmodellen waarmee verwachtingen worden opgesteld en/of investering in nauwkeurigere meetinformatie als invoer voor de rekenmodellen.

Menselijke invloed op fysisch gedrag watersysteem

Beheer kan invloed hebben op het fysisch gedrag van het watersysteem: de fysische relatie tussen de basisstochasten en de lokale hydraulische belastingen. Deze invloed is mogelijk via bijvoorbeeld (aanpassingen in) de volgende beheeraspecten:

- de afstelling van regelwerken voor de afvoerverdeling bij de splitsingspunten
- het beheer van lateralen, bijvoorbeeld de toestroming vanuit gemalen
- de inzet van retentiebekkens of noodoverloopgebieden
- de aansturing van stormvloedkering(en):
    - de keuze van sluitpeilen
    - de procedure voor sluiten en openen.

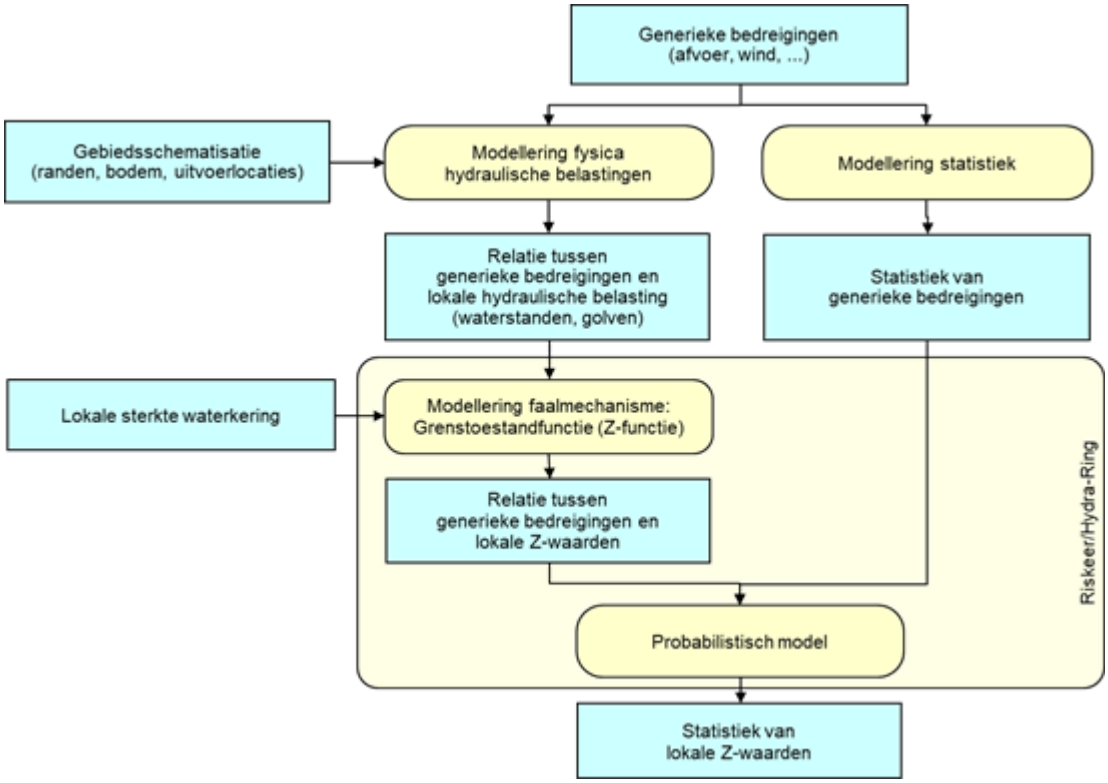
Versie 1.0: 2 juli 2025

2. Fysica-aspecten van hydraulische belastingen

Inleiding fysica van de hydraulische belastingen

Inleiding

De beschouwing van de fysica in de rol van de hydraulische belastingen (waterstanden, golfcondities) bij de bepaling van de overstromingskans bouwt voort op het schema zoals beschreven in het artikel Inbedding hydraulische belastingen in de probabilistische modellering voor overstromingskansbepaling, waar onderstaande figuur ook opgenomen is.



Figuur 1 Kernelementen in de probabilistische modellering voor de overstromingskansbepaling.

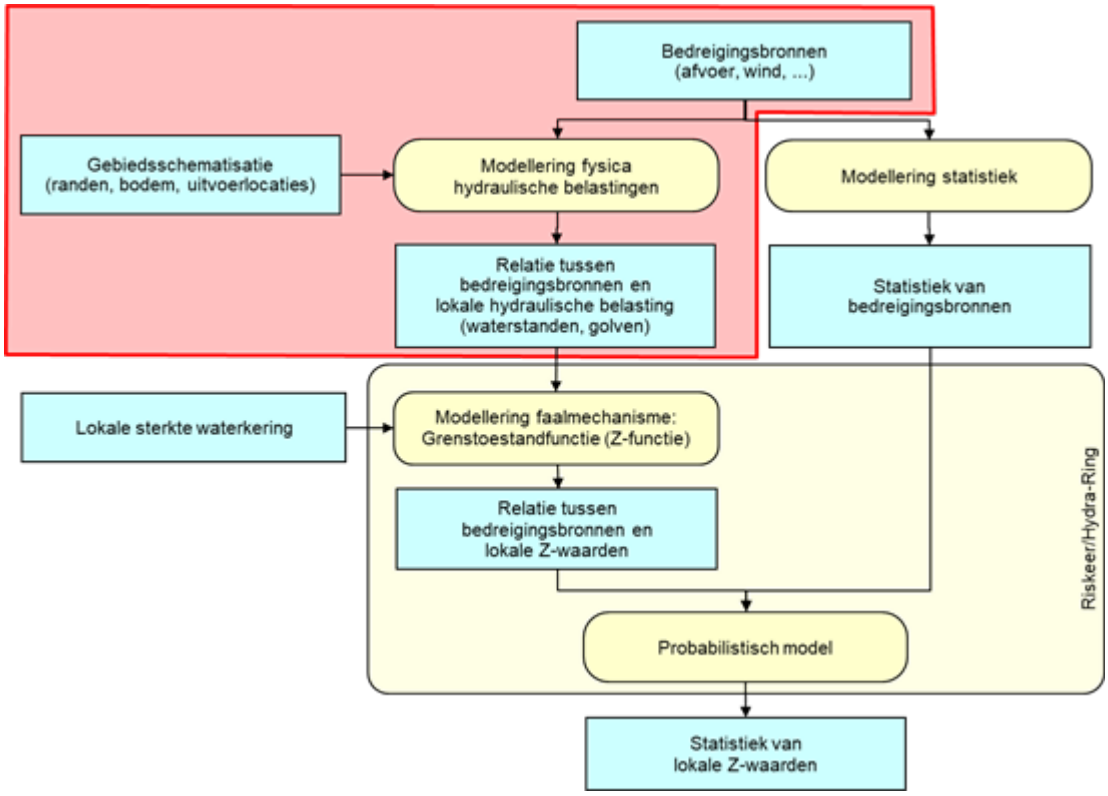
Fysica-aspecten zijn met name van belang in de bepaling van de fysische relatie tussen de basisstochasten en de lokale hydraulische belasting parameters, linksboven in het schema. Deze rol wordt op hoofdlijnen hieronder nader beschreven.

Fysica-aspecten van hydraulische belastingen komen echter ook nog op andere plekken in het schema voor. Daar wordt in de paragraaf Overige fysica van hydraulische belastingen nader op ingegaan.

Kern: bepaling fysische relatie basisstochasten - lokale hydraulische belastingen parameters

Een belangrijk doel van de modellering van de fysica van hydraulische belastingen is het beschrijven van de fysische relatie tussen de lokale hydraulische belastingen (waterstanden, golfcondities) en de generieke bedreigingsbronnen (de basisstochasten: wind, afvoer, enzovoort).

De positie van dit hoofdonderdeel in het algemene schema is in Figuur 2 weergegeven met behulp van een rood kader.



Figuur 2 De positie van hydraulische belastingen fysica (rood omkaderd) in de schematische context op hoofdlijnen.

In de praktijk wordt de fysische relatie in tabelvorm vastgelegd in de vorm van databases. De databases worden beschikbaar gesteld voor gebruik in de software-applicatie Riskeer, met rekenhart Hydra-Ring.

Voor het vullen van de databases wordt een grote verzameling combinaties van basisstochastwaarden doorgerekend. Dit rekenproces wordt aangeduid als de 'productiesommen fysica'. Zie verder het artikel Productieberekeningen fysica.

De fysica-modellering bestaat uit modellen voor wind, waterbeweging (waterstanden en stromingen) en golven. Zie hiervoor het artikel Modellering fysica hydraulische belastingen.

Deze modellen maken elk gebruik van een gebiedsschematisatie. Lees hier meer over in het artikel Gebiedsschematisatie.

Overige fysica van hydraulische belastingen

De bepaling van een representatief belastingverloop in de tijd

Naast de parameters waterstand, golfhoogte, golfperiode en golfrichting is in een aantal gevallen ook informatie nodig over het verloop van de hydraulische belasting in de tijd binnen een belastinggebeurtenis. Voor deze informatie wordt een representatief verloop gehanteerd; er wordt in de probabilistische berekening geen rekening gehouden met onzekerheid rond het verloop in de tijd, zie ook de paragraaf Focus op initiële mechanismen in het artikel Uitgangspunten. De bepaling van het representatief belastingverloop in de tijd wordt behandeld in het artikel Verloop in de tijd.

De bepaling van de modelonzekerheid

De bepaling van de modelonzekerheid rond de (fysica van) hydraulische belastingen staat niet vermeld in het schema van Figuur 2, maar vindt in de praktijk wel plaats binnen het rode kader. De modelonzekerheid heeft namelijk betrekking op de fysische relatie tussen de basisstochasten en de

lokale hydraulische belasting parameters en vormt in die zin extra informatie bij die fysische relatie. Zie verder het artikel Modelonzekerheden in lokale belastingen.

Transformatie van uitvoerlocatie naar dijkteen

De fysische relatie tussen de basisstochasten en de lokale hydraulische belasting parameters wordt bepaald op 'uitvoerlocaties', die dicht bij de teen van de waterkering liggen maar daar om modelmatige redenen niet volledig mee samenvallen, zie het artikel Uitgangspunten. De transformatie van de hydraulische condities van de uitvoerlocatie naar de teen van de dijk is gebaseerd op fysica, zie verder het artikel Transformatie hydraulische belastingen naar de teen.

Rekenwaarden voor hydraulische belasting parameters

Het schema van Figuur 1 kan óók resulteren in rekenwaarden voor hydraulische belastingparameters, bijvoorbeeld door gebruik te maken van speciale Z-functies, lees hier meer over in het artikel Rekenwaarden voor hydraulische belastingparameters.

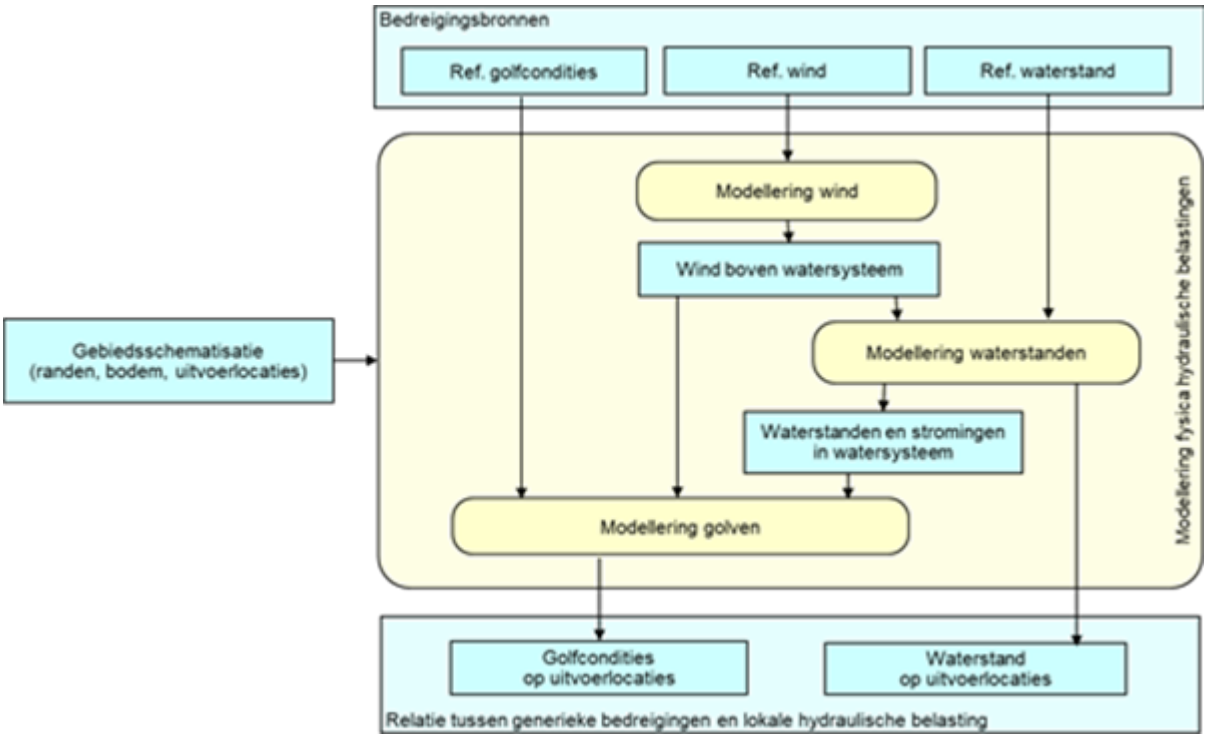
Versie 1.0: 2 juli 2025

2.1 Modellering fysica hydraulische belastingen

Modellering fysica hydraulische belastingen

Nadere detaillering stroomschema

Het schema van onderstaande figuur toont een nadere detaillering van de drie blokken 'Bedreigingsbronnen', 'Modellering fysica' en 'Relatie tussen bedreigingsbronnen en lokale hydraulische belastingen' uit het schema van Figuur 1 in het artikel Uitgangspunten.



Figuur 1 Stroomschema modellering fysica hydraulische belastingen. 'Ref.' staat voor referentiewaarden.

In het schema kunnen vier omhullende blokken worden onderscheiden, Deze noemen we hieronder verder 'verzamelblokken'. De verzamelblokken worden in het vervolg van dit artikel onder aparte tussenkoppen nader beschouwd:

• Het verzamelblok 'Bedreigingsbronnen'

• Het verzamelblok 'Gebiedsschematisatie'

• Het verzamelblok 'Modellering fysica'

• Het verzamelblok 'Relatie tussen bedreigingsbronnen en lokale hydraulische belastingen'

Het verzamelblok 'Bedreigingsbronnen'

De blokken binnen de bedreigingsbronnen zijn in dit schema vereenvoudigd tot referentiewaarden voor respectievelijk golfcondities, wind en waterstand. De informatie in deze blokken heeft in principe alleen betrekking op topwaarden per belastinggebeurtenis, en de statistiek daarvan.

Het blok 'referentiewaarde golfcondities' heeft betrekking op golfcondities die op een buitenrand het beschouwde watersysteem binnenkomen. Dit blok is alleen aan de orde in de zoute wateren, inclusief de Oosterschelde. In de andere watersystemen worden de golven lokaal, dat wil zeggen binnen het watersysteem, opgewekt door de wind.

Het blok 'referentiewaarde wind' betreft de wind (snelheid en richting) op 10 m hoogte op een KNMI-referentiestation zoals bijvoorbeeld Schiphol. De snelheid is deels gecorrigeerd voor beschuttingseffecten.

Met name het blok 'referentiewaarde waterstand' is een generalisatie van basisstochasten: afhankelijk van het watersysteem kan hier sprake zijn van een combinatie van stochasten met betrekking tot afvoer, meerpeil, zeewaterstand (combinatie van getij en stormopzet) en sluitscenario stormvloedkering.

Een nadere beschrijving van de basisstochasten wordt gegeven in het artikel Inherente, statistische en modelonzekerheden.

Het verzamelblok 'Gebiedsschematisatie'

Het verzamelblok 'Gebiedsschematisatie' bevat statische, representatieve informatie over het watersysteem, voor zover die van invloed is op het fysisch gedrag binnen het watersysteem. Denk daarbij bijvoorbeeld aan de ligging van de randen en de bodem. Tevens bevat dit blok de specificatie van de uitvoerlocaties in het watersysteem.

Een nadere beschrijving van de gebiedsschematisatie wordt gegeven in het artikel Gebiedsschematisatie.

Het verzamelblok 'Modellering fysica'

In het verzamelblok 'Modellering fysica' zijn drie afzonderlijke modelleringen zichtbaar voor wind, waterstanden en golfcondities.

Een belangrijk onderdeel van deze drie modelleringen is het omgaan met het tijdaspect binnen een belastinggebeurtenis. Afhankelijk van het watersysteem moet de waarde van de basisstochast (een topwaarde) worden vertaald naar een representatief tijdsverloop binnen de belastinggebeurtenis. Uit het berekende verloop van de hydraulische belasting parameters wordt vervolgens per belastinggebeurtenis weer een representatieve topwaarde per parameter bepaald.

De richtingen van de pijlen in het schema van Figuur 1 geven de op dit moment geldende richting(en) van invloed tussen de modellen weer:

- De modellering van de wind heeft alleen de referentiewind als invoer.
- De modellering van de waterstand heeft als invoer de referentiewaterstand en de wind.

- De modellering van de golven heeft als invoer de referentiegolven, de waterstanden (en stromingen) en de wind.

Anders gezegd:

- De wind kan invloed hebben op de golven en de waterstanden.
- De waterstanden (en stromingen) kunnen samen met de wind invloed hebben op de golven.

Met andere invloedsrichtingen wordt in de huidige modellering geen rekening gehouden. Er wordt dus géén rekening gehouden met de volgende invloedsrichtingen, die in werkelijkheid wel aanwezig kunnen zijn:

- invloed van golven op wind (golfconditie-afhankelijke winddrag)
- invloed van golven op waterstanden (wave setup)
- invloed van golven op stromingen (longshore current)

De modellering van de wind, inclusief winddrag, wordt nader beschouwd in Modellering wind.

De modellering van de waterstanden wordt nader beschouwd in Modellering waterstanden.

De modellering van de golven wordt nader beschouwd in Modellering golfcondities.

Het verzamelblok 'Relatie tussen bedreigingsbronnen en lokale hydraulische belastingen'

Het verzamelblok 'Relatie tussen bedreigingsbronnen en lokale hydraulische belastingen' bevat de tabelvormige relatie tussen de invoerparameters van het proces (de combinaties van waarden voor de basisstochasten; topwaarden) en de uitvoerparameters (de lokale hydraulische belastingparameters; representatieve topwaarden). Deze tabelinformatie is opgeslagen in een database, die door Riskeer kan worden ingelezen.

In de probabilistische modellering wordt niet alleen rekening gehouden met de inherente onzekerheid rond de hydraulische belastingen, maar ook met de modelonzekerheid: de onzekerheid in de fysische relatie tussen de basisstochasten en de lokale hydraulische belastingparameters. De modelonzekerheid wordt nader beschouwd in Modelonzekerheden in lokale belastingen.

Een nadere beschrijving van de bepaling van de relatie tussen bedreigingsbronnen en lokale hydraulische belastingen wordt gegeven in Productieberekeningen fysica.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Modelonzekerheden in lokale belastingen

Naast inherente onzekerheden en statistische onzekerheden spelen modelonzekerheden een belangrijke rol bij de probabilistische modellering binnen het beoordelings- en ontwerpinstrumentarium. In dit artikel wordt de achtergrond van modelonzekerheden van lokale belastingen belicht.

De scope van modelonzekerheden

In de probabilistische modellering wordt voor de meeste watersystemen de statistiek van de lokale belasting op de uitvoerlocaties bepaald vanuit a) de statistiek van de basisstochasten en b) de fysische relatie tussen de basisstochasten en de lokale belasting. Uitzondering hierop vormen de kustgebieden waar de waterstanden door middel van interpolaties zijn verkregen. De lokale belasting wordt weergeven in termen van waterstand al dan niet in combinatie met golfcondities.

De fysische relatie tussen de basisstochasten en de lokale belasting wordt bepaald aan de hand van een groot aantal modelberekeningen. Daarbij worden allerlei aannames gemaakt. Dit veroorzaakt onzekerheid, hier genoemd 'modelonzekerheid in de lokale belastingen'. Modelonzekerheid in de lokale belastingen heeft een bredere betekenis. Onderstaande vier typen onzekerheden vormen samen de modelonzekerheid die doorwerkt in de berekende lokale belastingen:

1. Onzekerheid als gevolg van onzekere modelrandvoorwaarden of invoer; dit type onzekerheid ontstaat doordat modelberekeningen uitgevoerd worden met geschematiseerde/vereenvoudigde randvoorwaarden of invoer. De vorm van de afvoergolf in de tijd als bovenrand voor de modelberekeningen voor het rivierengebied is hiervan een voorbeeld.
2. Onzekerheid als gevolg van vereenvoudigde modellering van fysische processen, schematisaties en kalibratie. Deze onzekerheid ontstaat doordat verschillende fysische processen niet exact beschreven worden maar slechts bij benadering. Een model is immers slechts een benadering van de werkelijkheid.
3. Niet-gemodelleerde aspecten en/of grootheden in de modelberekeningen. Deze onzekerheid ontstaat doordat enkele minder relevante aspecten niet meegenomen worden in de modelberekeningen. Denk aan de sedimentstop van beweegbare keringen of aan het niet bij springtij modelleren of aan laag-frequente golven, die niet worden gemodelleerd.
4. Onzekerheid als gevolg van de discretisatie van basisstochasten (lineair interpoleren in tabel). De discretisatie wordt in de praktijk wel zo fijn gekozen dat de verwachte bijdrage aan de onzekerheid klein is; deze bijdrage wordt dan ook in de praktijk verwaarloosd.

De modelonzekerheden kunnen in principe verschillen per locatie en per belastinggebeurtenis. In de huidige rekenmethode voor de overstromingskansbepaling wordt met deze complexiteit pragmatisch omgegaan:

- De invulling van de modelonzekerheid hydraulische belastingen gebeurt voor een belangrijk deel op basis van deskundigenoordeel, in combinatie met gevoeligheidsanalyses en vergelijkingen tussen modelresultaten en meetgegevens.
- Er wordt geen onderscheid gemaakt tussen de belastinggebeurtenissen.
- Locaties worden niet afzonderlijk, maar in groepen beschouwd op basis van fysica en vastgelegd per traject, zodat onzekerheden per deelgebied in een watersysteem kunnen worden toegekend.
- De modelonzekerheden beschouwen de vertaling van basisstochast naar belasting op de uitvoerlocatie in zijn totaliteit, en geven dus geen informatie over onzekerheden in de tussenliggende stappen die deel uitmaken van die vertaling.

De modelonzekerheid hydraulische belastingen wordt in het probabilistisch model beschreven met stochasten. Dit zijn echter geen basisstochasten: ze vormen geen primaire bedreigingsbron en er worden geen productieberekeningen fysica gemaakt voor verschillende waarden van deze stochasten.

In de huidige probabilistische modellering wordt rekening gehouden met modelonzekerheid in de waterstand en de golfparameters hoogte en periode, omdat die drie onzekerheden het belangrijkste worden geacht. Er wordt geen rekening gehouden met modelonzekerheid in de golfrichting en ook niet met modelonzekerheid in het waterstandsverloop in de tijd

Modelonzekerheden in lokale waterstanden

Voor de fysische relatie tussen de basisstochasten en de lokale waterstand wordt gebruik gemaakt van hydrodynamische modellen. In de meeste watersystemen betreft dit WAQUA respectievelijk D-

Hydro software.
Bij het bepalen van de modelonzekerheden zijn per watersysteem de belangrijkste bronnen van onzekerheid geïdentificeerd. Bij de rivieren valt daarbij te denken aan onzekerheden in de bodemruwheid en de onzekerheid in de afvoerverdeling bij de splitsingspunten. Uitgebreide analyses zijn uitgevoerd hoe deze onzekerheden doorwerken in de lokale waterstand. Deze analyses worden in detail in [Chbab, 2017] beschreven.

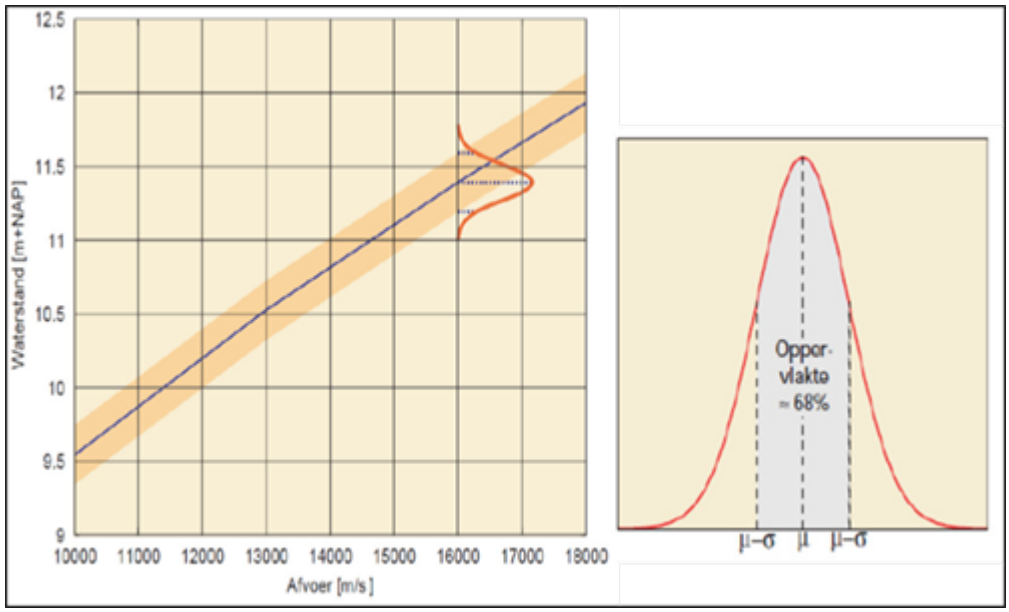
Voor de lokale waterstand geldt dat is aangenomen dat de modelonzekerheid normaal verdeeld is, zie Figuur 1. Met deze verdeling is de kans dat een modelresultaat hoger uitvalt even groot als dat hij lager uitvalt. Modelonzekerheid wordt daarbij uitgedrukt in een gemiddelde μ en een standaardafwijking σ. Bij een gemiddelde μ ongelijk aan 0 is er sprake van een bias in het model. Omdat de productieberekeningen uitgevoerd zijn met gekalibreerde en gevalideerde modellen, waarbij de kalibratie tot doel heeft de bias te minimaliseren, is enkel een standaardafwijking σ van toepassing en is het gemiddelde gelijk aan nul (μ=0). Dit betekent dat verwacht wordt dat het model gemiddeld genomen het goede resultaat weergeeft. De standaardafwijkingen zijn geschat op basis van gevoeligheidsberekeningen en deskundigenoordelen.

Modelonzekerheid voor de waterstand wordt in rekening gebracht als een correctie op de waterstand. In Riskeer wordt een waterstandscorrectie opgeteld bij de waarde van de lokale waterstand, die berekend is met een waterbewegingsmodel. Om modelonzekerheid weer te geven is deze correctie normaal verdeeld verondersteld met gemiddelde μ en standaardafwijking σ, zoals geïllustreerd in Figuur 1.

Formule voor berekening van de waterstand met modelonzekerheid.

Deze waterstand is gelijk aan de waterstand uit het waterbewegingsmodel plus een waarde Δh voor de modelonzekerheid van de waterstand. Δh is afkomstig uit de normale verdeling met verwachtingswaarde μ=0 en standaardafwijking σ.

$$H_{incl} = H_{excl\ (uit\ model)} + \Delta h \qquad \text{met } \Delta h \text{ uit de normale verdeling } N(\mu,\sigma)$$



Figuur 1 Illustratie van onzekerheid in waterstand (als functie van stochast afvoer). In de linker figuur is een 95% betrouwbaarheidsband van 1 m aangehouden: 0,5 m hoger en 0,5 m lager voor het hele bereik.

Merk op dat één waarde voor de standaardafwijking wordt gebruikt voor het hele bereik van de

basisstochasten, die de waterstand bepalen. Dit houdt feitelijk in dat deze standaardafwijking niet afhangt van de herhalingstijd, zoals geïllustreerd in de Figuur: de hoogte van de oranje onzekerheidsband is constant, oftewel: de onzekerheid in de waterstand is onafhankelijk van de basisstochast afvoer. Bij de vaststelling van de standaardafwijking is wel rekening gehouden met extreme situaties. Voor lage terugkeertijden kan er hierdoor sprake zijn van een overschatting van modelonzekerheid in de lokale waterstand, maar dit bereik is in vooral relevant voor de hydraulische belastingen op de bekleding aan de buitenzijde van de kering.
Samengevat worden in de huidige rekenmethode de volgende waarden voor de modelonzekerheid gehanteerd:

- Het gemiddelde is 0,00 m. (Omdat de modelberekeningen uitgevoerd worden met gekalibreerde en gevalideerde modellen, waarbij de kalibratie als doel heeft een bias te minimaliseren, is de keuze gemaakt om voor de modelonzekerheid in lokale waterstand de bias gelijk aan nul te stellen.)
- De standaardafwijking is een veelvoud van 0,05 m en varieert - afhankelijk van de beschouwde locatie - tussen 0,15 m en 0,40 m.

In de huidige rekenmethode is de waarde van de modelonzekerheid voor de waterstand alleen afhankelijk van de locatie. In de praktijk wordt hierbij overigens niet naar individuele locaties gekeken, maar naar deelgebieden binnen een watersysteem: alle locaties binnen een deelgebied krijgen dan dezelfde modelonzekerheid voor de waterstand toegekend.

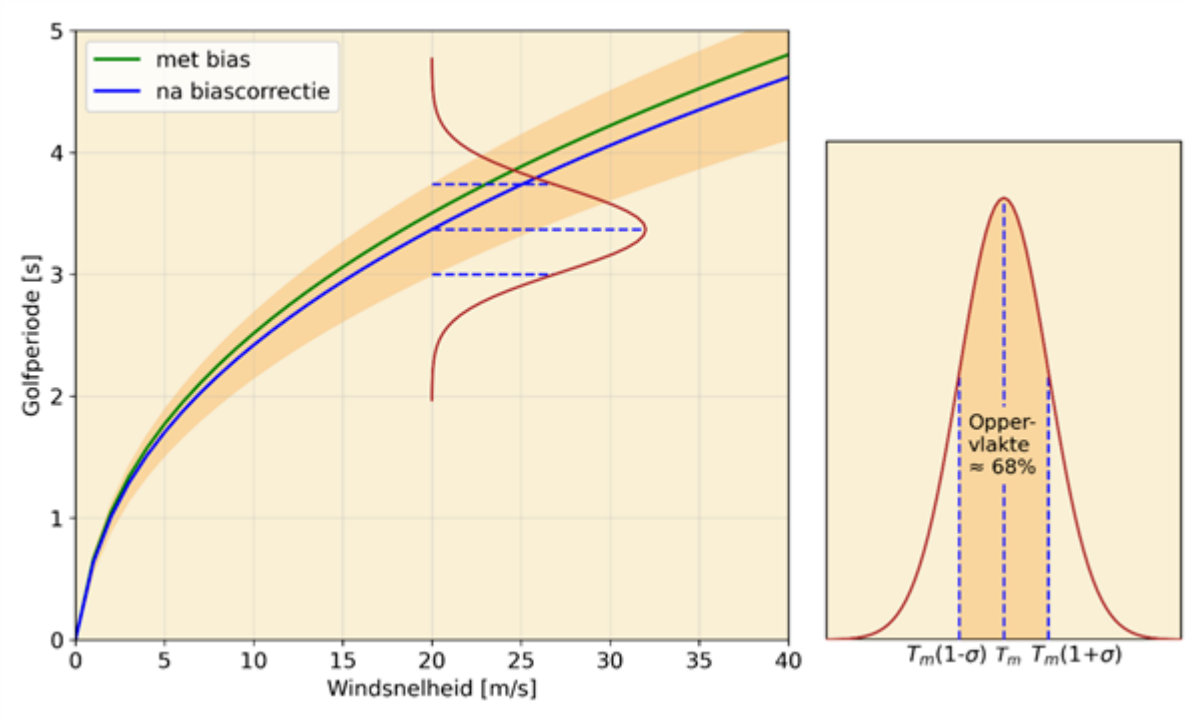
De afgeleide waarden voor de standaardafwijking zijn per cluster van watersystemen in afzonderlijke artikelen weergegeven (samen met de modelonzekerheden in golfcondities):

- Modelonzekerheden Rijntakken en Maas
- Modelonzekerheden Benedenrivieren
- Modelonzekerheden Vecht- en IJsseldelta
- Modelonzekerheden kust
- Modelonzekerheden meren

Modelonzekerheden in golfhoogte en golfperiode

In de fysische relatie tussen de basisstochasten en de lokale golfparameters wordt gebruik gemaakt van golfmodellen (HISWA, SWAN en Bretschneider) met bijbehorende invoer. In het onderstaande wordt ingegaan op de wijze waarop de modelonzekerheden in golfhoogte en golfperiode zijn afgeleid. Op andere golfparameters, zoals golfrichting, wordt geen modelonzekerheid toegepast.

Modelonzekerheden voor de golfparameters golfhoogte en golfperiode worden in rekening gebracht als een correctie van deze golfparameters. Onderzoek leert dat de berekende golfparameters een bias bevatten. Het is een relatieve bias met gemiddelde μ. Dit betekent dat de absolute afwijking groter is naarmate de golfparameter groter is. De bias in een golfparameter wordt daarom gecorrigeerd met een vermenigvuldigingsfactor, waarvan het gemiddelde μ onderdeel is. Vervolgens wordt de modelonzekerheid in de golfparameter verwerkt. Omdat ook de modelonzekerheid relatief is, gebeurt ook dit met een vermenigvuldigingsfactor. Deze vermenigvuldigingsfactor is normaal verdeeld zonder bias en met standaardafwijking σ. Voor de golfparameter met modelonzekerheid is de absolute bandbreedte hiermee groter naarmate de golfparameter groter is. Onderstaande figuur is een illustratie voor de golfperiode voor de correctie van de bias en het meenemen van modelonzekerheid.



Figuur 2 Illustratie van de onzekerheid in de golfperiode (als functie van de windsnelheid)

De onzekerheid in de golven wordt binnen Hydra-Ring en Hydra-NL als volgt verwerkt op de golfparameters van de golfgroeimodellen:

Formule voor berekening van de waarde van een golfparameter met correctie voor de systematische fout en met modelonzekerheid.

Deze waarde is gelijk aan de golfparameter uit het golfmodel zonder correctie voor de systematische fout en zonder modelonzekerheid maal de correctie voor de systematische fout en maal de parameterwaarde voor de modelonzekerheid. De parameterwaarde voor de modelonzekerheid is afkomstig uit de normale verdeling met verwachtingswaarde 1 en standaardafwijking σ.

Het zijn drie overeenkomstige formules, respectievelijk voor de golfhoogte H_{m0} en de periodematen $T_{m-1,0}$ en T_p.

$$H_{m0,incl} = f_{H_{m0}} \; H_{m0,excl} \; z_{H_{m0}} \qquad \text{met } z_{H_{m0}} \text{ uit de normale verdeling } N(1,\sigma_{H_{m0}})$$

$$T_{m-1,0,incl} = f_{T_{m-1,0}} \; T_{m-1,0,excl} \; z_{T_{m-1,0}} \qquad \text{met } z_{T_{m-1,0}} \text{ uit de normale verdeling } N(1,\sigma_{T_{m-1,0}})$$

$$T_{p,incl} = f_{T_p} \; T_{p,excl} \; z_{T_p} \qquad \text{met } z_{T_p} \text{ uit de normale verdeling } N(1,\sigma_{T_p})$$

In deze formules duidt het subscript 'excl' op de golfgegevens zonder correctie voor de systematische fout en zonder modelonzekerheid en het subscript 'incl' op golfgegevens met de correctie en met modelonzekerheid.

De vermenigvuldigingsfactor voor de biascorrectie wordt gegeven door:

$$f_{biascorrectie} = \frac{1}{1+\mu}$$

In de WBI2017 databases is deze correctiewaarde incorrect opgenomen als 1+μ. ,zie [Groeneweg, 2018

]. z_x is een stochast met een normale verdeling met gemiddelde 1 en standaardafwijking σ_x. De golfparameters met correctie voor de systematische fout en met modelonzekerheid worden gebruikt in de berekeningen met het probabilistische model.
De modelonzekerheidswaarden μ en σ voor de golfparameters zijn voor alle hoofdsystemen van Nederland overzichtelijk weergegeven in onderstaande tabel (afkomstig uit [Chbab, 2017b]). Deze waarden zijn verkregen door metingen en modeluitkomsten te vergelijken. Een negatieve waarde van het gemiddelde geeft een onderschatting van de werkelijkheid door het gehanteerde model weer. Het modelresultaat moet dan gecorrigeerd worden met een correctiefactor groter dan 1.

Tabel Modelonzekerheden significante golfhoogte H_{m0} en periodematen $T_{m-1,0}$ en T_p voor drie gedefinieerde hoofdsystemen: gemiddelde (μ) en standaardafwijking (σ) van de relatieve verschillen.

Hoofdsysteem	**golfmodel**	**H_{m0} μ**	H_{m0} σ	$T_{m-1,0}$ μ	$T_{m-1,0}$ σ	**T_p μ**	**T_p σ**
I. Kust, IJsselmeer	SWAN	-0,01	0,19	-0,04	0,11	-	-
II. Brede wateren in riviereng ebied/randmeren	SWAN	-0,06	0,15	-0,11	0,04	-0,01	0,07
III. Smalle wateren in riviereng ebied, Eemvallei	Bretschneider	-0,04	0,27	-	-	0,03	0,13
IV. Markermeer - IJburg	SWAN	-0,05	0,11	0,04	0,08	-0,04	0,05
V. Markermeer - overig (excl. IJburg)	HISWA (wordt SWAN)	-0,02	0,20	-	-	0,16	0,11

Aanvullende opmerkingen

Omdat de beschikbare meetdata om de modelonzekerheid in de golfparameters af te leiden beperkt is, is het niet realistisch om deze locatie-afhankelijk te kwantificeren. Dat betekent dat de afgeleide verdeling voor de modelonzekerheden voor alle locaties gelijk is genomen in een hoofdsysteem. Om dezelfde reden is de modelonzekerheid in de golfcondities niet afhankelijk van de basisstochasten en is dus de verdeling gelijk voor alle terugkeertijden.

Naast de marginale verdelingen van de modelonzekerheid in de golfhoogte en golfperiode, is er in de praktijk ook sprake van een correlatie tussen beide. In principe is deze correlatie afgeleid in [Smale, 2018]. Voor WBI-2017 is echter gekozen om in het probabilistische model de modelonzekerheden in golfhoogte en in golfperiode vooralsnog als onafhankelijk te beschouwen.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Modellering wind

In dit artikel wordt de modellering van de wind ten behoeve van de hydraulische belastingen op waterkeringen beschouwd.

Inleiding

Bij de bepaling van de hydraulische belastingen op de primaire waterkeringen in Nederland is de bedreigingsbron 'storm' geparametriseerd tot de basisstochast wind: windrichting en topwaarde van de potentiële windsnelheid op de gekozen referentielocatie.

Voor de aansturing van de modellen voor waterstanden en golven is het nodig dat de waarde van de basisstochast wind wordt vertaald naar een windgebeurtenis: een windveld in ruimte en tijd op een standaardhoogte van 10 m boven het open water van het beschouwde watersysteem. Deze vertaling wordt hier het 'windmodel' genoemd.

In de praktijk kunnen stormen onderling aanzienlijke verschillen vertonen, zowel wat betreft variatie in de ruimte als wat betreft variatie in de tijd. De onzekerheid die uit deze variatie voortvloeit blijkt echter voor de bepaling van de topwaarde van de waterstand en bijbehorende golfcondities in de meeste watersystemen niet zo heel belangrijk te zijn: voor die bepaling kan gewerkt worden met een geschikt gekozen 'representatieve' windgebeurtenis. Dit is wat in het huidige windmodel gebeurt: het windmodel koppelt aan iedere realisatie van de basisstochast wind één windgebeurtenis. Als echter de focus niet meer alleen bij de topwaarde van de waterstand ligt, maar ook de bepaling van bijvoorbeeld de duur van een hoge waterstand en/of golfbelasting van belang is, dan zal anders omgegaan moeten worden met de mogelijke verschillen tussen stormen [De Waal, 2021].

Voor het windmodel bestaan geen complete uitwerkingsvarianten met een eigen naam. Er zijn dus ook geen versienummers bij een windmodelnaam. In de huidige praktijk van de productie van hydraulische belastingen data is het windmodel pragmatisch uitgewerkt in de vorm van een beperkte verzameling formules en afspraken: een analytisch model. Daarbij worden de volgende aspecten onderscheiden:

- transformatie in de ruimte
- winddragcoëfficiënt
- het stormverloop in de tijd
- faseverschil met getij

De uitwerking van deze aspecten van het windmodel is niet voor alle watersystemen hetzelfde. Bij de nadere beschrijving van deze modelaspecten in dit artikel wordt echter slechts gekeken naar de hoofdlijnen van de meest voorkomende invulling. Voor de meer gedetailleerde, watersysteem-specifieke invulling wordt verwezen naar de achtergronddocumenten die horen bij de databases met

de Hydraulische belastingen.
Het in dit artikel beschouwde windmodel betreft de modellering van wind in het kader van de productieberekeningen fysica. Binnen de rekenmethode voor de overstromingskansbepaling zijn nog andere kaders voor windmodellering, namelijk het probabilistisch model en de beschrijving van de statistiek. Daarnaast wordt ook voor de operationele berichtgeving in het kader van de waterveiligheid gebruik gemaakt van windmodellering, doorgaans als onderdeel van een numeriek meteorologisch model.

Transformatie in de ruimte

In de meeste watersystemen worden in het windmodel de volgende pragmatische aannames gehanteerd:

- De wind boven het watersysteem is ruimtelijk uniform. Er wordt in de meeste watersystemen dus geen rekening gehouden met grootschalige variaties en met mogelijke effecten van omringend land aan de randen van het watersysteem.
- De windrichting en de potentiële windsnelheid boven het watersysteem zijn gelijk aan de windrichting en de potentiële windsnelheid op de referentielocatie van de basisstochast wind voor het watersysteem.
- Voor de vertaling van de potentiële windsnelheid naar de open-water windsnelheid wordt gebruik gemaakt van de zogenaamde open-water transformatie. Hierin speelt de gekozen dragformulering een rol. Soms is ook nog sprake van aanvullende transformatiefactoren.

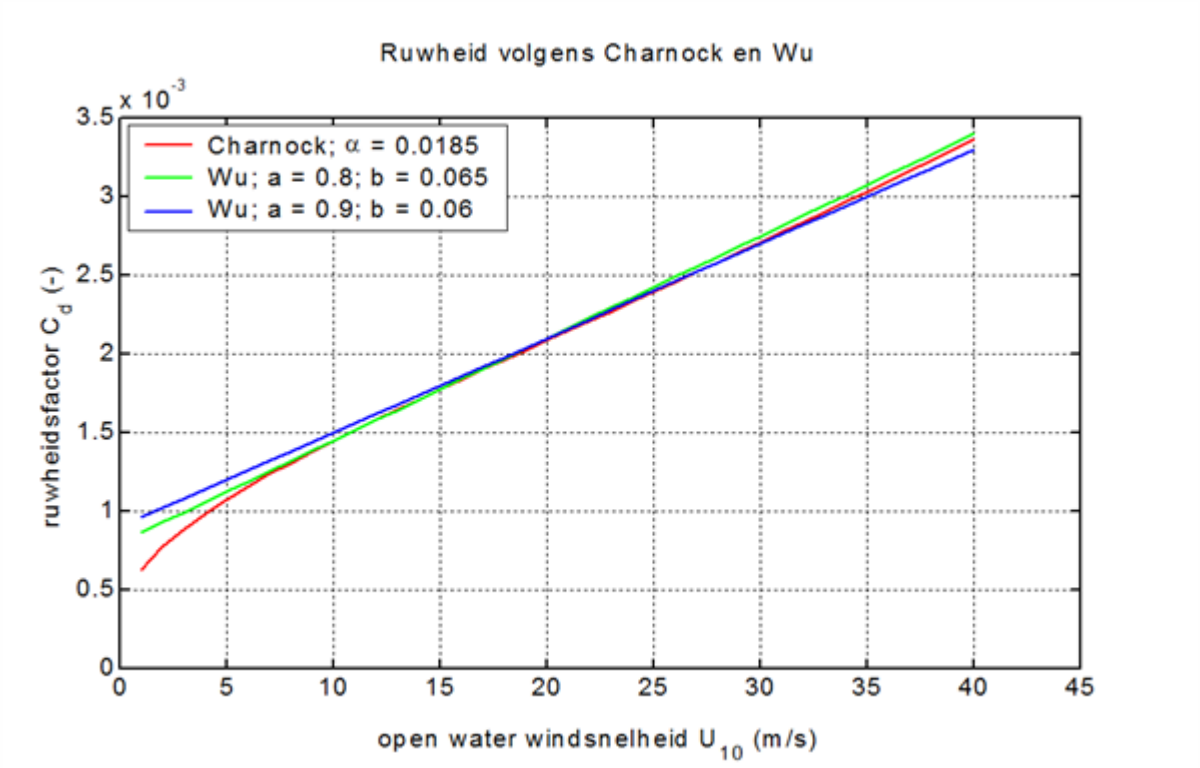
Winddragcoëfficiënt

In de windmodellering speelt de ruwheid van het aardoppervlak een belangrijke rol, met name bij transformatie in de ruimte en de daarbinnen toegepaste open-water transformatie. De ruwheid wordt beschreven in de vorm van een (wind-)dragcoëfficiënt. Hieronder wordt nader ingegaan op de modellering van de ruwheid - c.q. dragcoëfficient - van met name het wateroppervlak.

Het aardoppervlak bestaat uit land òf water. Voor verschillende soorten landoppervlakken kan een bijbehorende (vaste) waarde voor de ruwheid worden gehanteerd. De ruwheid van een wateroppervlak heeft echter geen vaste waarde, omdat de vorm (en beweging) van het wateroppervlak varieert.

In geavanceerde en relatief complexe windmodellering wordt de ruwheid van het wateroppervlak gerelateerd aan de lokale golfkarakteristieken, die uiteraard mede afhangen van de lokale wind. Dergelijke ruwheidsschattingen zijn echter nog behoorlijk onzeker. In de praktijk wordt doorgaans gebruik gemaakt van een eenvoudiger en pragmatischer aanpak, waarin de ruwheid van het wateroppervlak wordt gerelateerd aan alléén de lokale windsnelheid. Zo'n relatie wordt een dragrelatie of dragformulering genoemd.

In deze relatie geldt in de basis: bij een grotere windsnelheid hoort een grotere wateroppervlakteruwheid (dragcoëfficiënt). Er bestaan verschillende uitwerkingsvarianten voor deze basisrelatie, met als bekendste voorbeelden 'Charnock' en 'Wu'. Dergelijke dragformuleringen bevatten constanten. Die constanten kunnen zo gekozen worden dat de basis van de verschillende dragformuleringen praktisch op hetzelfde neerkomt (in het bereik van relevante windsnelheden), zie Figuur 1.



Figuur 1 Ruwheidsfactor volgens Charnock en Wu, overgenomen uit [De Waal, 2003].

Inmiddels bestaat consensus dat voor zeer hoge windsnelheden bovengenoemde basisrelatie niet meer geldt: bij toenemende windsnelheid neemt de drag vanaf een bepaald punt niet meer toe (en zou met nog hogere windsnelheden mogelijk zelfs kunnen gaan afnemen). In de huidige praktijk wordt dit inzicht toegepast door de basis-dragrelatie bij een windsnelheid van 30 m/s 'af te kappen', dat wil zeggen: voor alle windnelheden groter dan 30 m/s de drag gelijk te houden aan de waarde die hoort bij 30 m/s. Voor de bepaling van de hydraulische belastingen van WBI2017 kwam dit inzicht overigens te laat om overal te kunnen toepassen. Het inzicht is in WBI2017 daarom alleen toegepast voor het watersysteem IJsselmeer, en dan nog alleen via een nabewerking in de windstatistiek.

Ook binnen het waterstandmodel en het golfmodel speelt modellering van de ruwheid van het wateroppervlak een rol. Het is belangrijk dat de gekozen modellering van de ruwheid van het wateroppervlak consistent is binnen de gebruikte combinatie van windmodel, waterstandmodel en golfmodel, zie ook [De Waal, 2003].

Stormverloop in de tijd

De beschrijving van het verloop van de windsnelheid en -richting in de tijd is vooral van belang als invoer voor het waterstandmodel, maar in sommige gevallen ook voor het golfmodel. In de toepassing van het golfmodel wordt weliswaar uitgegaan van een quasi-stationaire toestand, maar in sommige watersystemen worden golven voor meerdere tijdstippen tijdens of rond de top van de storm berekend. En in sommige gevallen zijn de windsnelheid en windrichting voor die tijdstippen niet identiek.

Verloop van de snelheid in de tijd

Ten aanzien van de variatie van de windsnelheid in de tijd kunnen in de modellering de volgende varianten worden onderscheiden:

1. Trapezium

1.1. topduur 1 uur
1.2. topduur 2 uur
1.3. topduur 4 uur

2. Trapezium met lange top (4 uur), maar zonder achterflank

De trapeziumvorm van variant 1 wordt het meest toegepast. Wel bestaan nog verschillen in de toegepaste topduur.

Variant 2 is alleen van toepassing in (een deel van) de relatief oude hydraulische belastingen data voor het Markermeer.

In variant 3 is sprake van een relatief brede basis en een zeer korte topduur. Deze variant wordt alleen gebruikt in de Oosterschelde.

In de achtergronddocumenten bij de databases met Hydraulische belastingen wordt per watersysteem beschreven welke variant is toegepast.

Verloop van de richting in de tijd

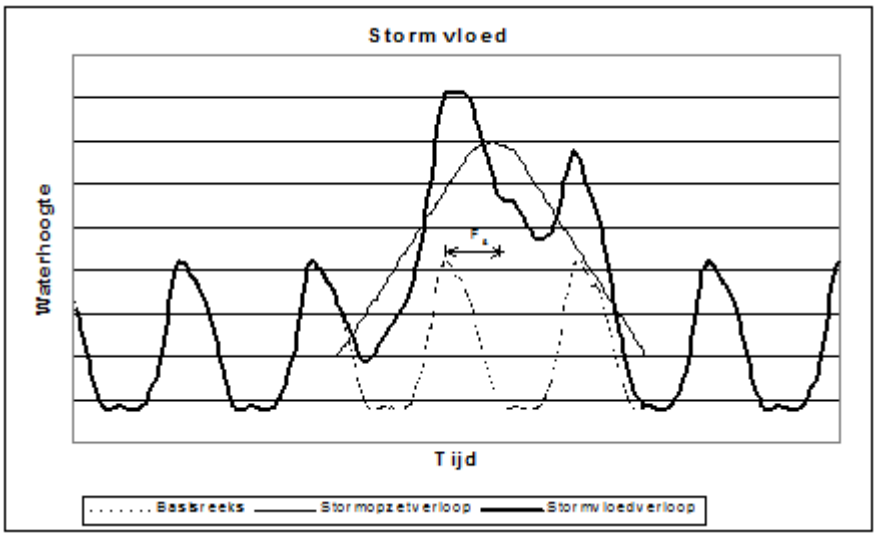
Ten aanzien van de variatie van de windrichting in de tijd kunnen in de huidige windmodellering de volgende varianten worden onderscheiden:

1. Constant
2. Lineair, met knik op het moment van de stormtop
3. Errorfunctie

In de achtergronddocumenten bij de databases met Hydraulische belastingen wordt per watersysteem beschreven welke variant is toegepast.

Faseverschil met getij

In watersystemen waar ook het getij een rol speelt, is de timing van de stormopzettop in relatie tot de getijtop van belang. Deze timing wordt doorgaans kortweg 'het faseverschil met het getij' genoemd. In sommige watersystemen, zoals de Benedenrivieren, volstaat de keuze van één representatieve waarde voor dit faseverschil. Maar in bijvoorbeeld de Oosterschelde wordt in het probabilistisch model van WBI-2017 rekening gehouden met de onzekerheid rond dit faseverschil en worden meerdere waarden voor het faseverschil toegepast in de productieberekeningen fysica. Merk op dat er in de toekomst mogelijk wordt overgestapt naar één waarde voor het faseverschil.



Figuur 2 Voorbeeld van getij, stormopzet, faseverschil (F_s) en resulterend waterstandverloop, zoals gehanteerd in de Benedenrivieren.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Modellering waterstanden

In dit artikel wordt de modellering van waterstanden ten behoeve van de hydraulische belastingen op waterkeringen beschouwd.

Modellering waterstanden generiek

Bij de modellering van de waterstanden en stromingen voor de bepaling van de hydraulische belastingen data wordt gebruik gemaakt van verschillende modellen. Hierbij is sprake van een aantal gemeenschappelijke kenmerken:

- De modellen zijn numeriek.
- De modellen rekenen dieptegemiddeld.
- De modellen rekenen tijdsafhankelijk.

De belangrijkste invoergegevens betreffen, zie ook het schema van Figuur 1 in het artikel Inleiding fysica:

- De gebiedsschematisatie
- De referentie-waterstanden; een combinatie van stochasten met betrekking tot
  - afvoer
  - meerpeil
  - zeewaterstand (de combinatie van getij en stormopzet)
  - het sluitscenario van eventuele stormvloedkeringen
- De wind boven het watersysteem in ruimte en tijd.

In de modellering waterstand wordt geen rekening gehouden met invloed van ruimtelijke variatie in luchtdruk.

De vertaling van de stochastenwaardencombinaties naar (tijdsafhankelijke) invoer voor het numerieke model maakt deel uit van de modellering waterstand. Hierbij kunnen ook keuzes aan de orde zijn voor bijvoorbeeld laterale toestromingen.

De waterstandsmodellering levert twee vormen van output:

- een veld van waterstanden (en eventueel stromingen) in het gehele watersysteem, als invoer voor de modellering van de golven
- topwaarden van de waterstand op de uitvoerlocaties

De waterstanden worden gegeven in meter ten opzichte van NAP.

Bij de productie van hydraulische belastingen data is sprake van de inzet van de volgende rekenmodellen:

- Waqua
- Sobek
- Implic
- D-Hydro

Modellering waterstanden met WAQUA

WAQUA is een numeriek tweedimensionaal dieptegemiddeld model, bedoeld voor het berekenen van tijdsafhankelijke waterstanden, waterstromingen en concentraties van opgeloste stoffen in open wateren. De dieptegemiddelde aard van het model wil zeggen dat het werkt met gemiddelde waterstromingen en concentraties. WAQUA veronderstelt dat deze niet variëren over de diepte van de gesimuleerde rivier of zee.

WAQUA is onderdeel van het SIMONA pakket. SIMONA staat voor SImulatie MOdellen NAtte waterstaat. Zie ook de IPLO.

Modellering waterstanden met SOBEK

SOBEK is een numeriek eendimensionaal dieptegemiddeld netwerk-model, bedoeld voor het berekenen van tijdsafhankelijke waterstanden en stromingen. In een SOBEK-schematisatie wordt het betreffende gebied geschematiseerd tot een netwerk van eendimensionale takken en knopen. In de takken worden de bodemligging, stroomvoerende en bergende profielen en de hydraulische ruwheid gedefinieerd. Dit vormt de geometrieschematisatie tezamen met de informatie van eventueel aanwezige kunstwerken zoals informatie over ligging, afmetingen en andere relevante gegevens (bijvoorbeeld verliescoëfficiënten).

Zie ook de website van Deltares.

Modellering waterstanden met IMPLIC

IMPLIC is een numeriek eendimensionaal dieptegemiddeld netwerk-model, dat lange tijd specifiek gebruikt is voor de Oosterschelde.

Modellering waterstanden met D-Hydro

De D-Hydro Suite is de opvolger van onder andere SIMONA en SOBEK. De waterstandsmodellering binnen D-Hydro vindt plaats in het dieptegemiddelde model D-Flow FM.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Modellering golfcondities

In dit artikel wordt de modellering van de golfcondities ten behoeve van de hydraulische belastingen op waterkeringen beschouwd.

Modellering golfcondities generiek

Bij de modellering van de golven voor de bepaling van de hydraulische belastingen data wordt gebruik gemaakt van verschillende modellen. Gemeenschappelijke kenmerk is dat de modellen (quasi-) stationair rekenen.

De belangrijkste invoergegevens betreffen, zie ook het schema van Figuur 2 in het artikel Inleiding fysica:

- De gebiedsschematisatie
- De referentie-golven (alleen voor de zoute getijwateren)
- De wind boven het watersysteem in ruimte en tijd
- De waterstanden en stromingen in het watersysteem.

De golfmodellering levert per uitvoerlocatie de combinatie van de volgende golfparameters:

- golfhoogte: significante golfhoogte H_{m0} dan wel H_s in m

- golfperiode: piekperiode T_p en/of spectraal gemiddelde periode $T_{m-1,0}$ in s
- golfrichting volgens nautische conventie in °N

Bij de productie van hydraulische belastingendata is sprake van de inzet van de volgende rekenmodellen:

- SWAN
- HISWA
- Bretschneider

Modellering golfcondities met SWAN

SWAN (Simulating WAves Nearshore) is een numeriek volledig spectraal dieptegemiddeld golfmodel, wat betekent dat golfenergie wordt opgedeeld in verschillende frequentie- en richtingscomponenten, die elk op basis van balansvergelijkingen worden doorgerekend en vervolgens gecombineerd. SWAN is bedoeld voor het berekenen van golven in tijd en ruimte, rekening houdend met de invloed van wind, waterdiepte en waterstroming, en met de invloed van wisselwerkingen tussen de golven onderling.
Zie verder www.swan.tudelft.nl.

Modellering golfcondities met HISWA

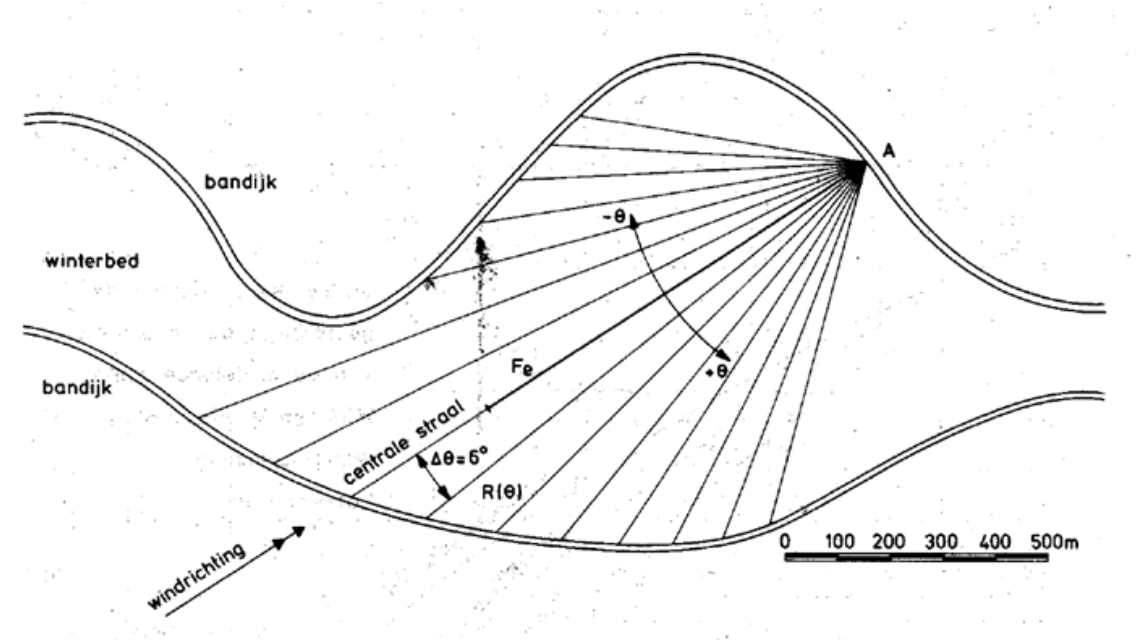
HISWA (HIndcasting Shallow water WAves) is een numeriek dieptegemiddeld golfmodel en in zekere zin een voorloper van SWAN. HISWA is niet volledig spectraal, maar werkt met een geparametriseerd spectrum. Dat betekent dat het spectrum - de verdeling van de golfenergie over de frequenties en richtingen - wordt beschreven met slechts enkele parameters. Het model beschrijft de veranderingen in deze parameters in ruimte en tijd en kijkt niet naar afzonderlijke frequentie- en richtingscomponenten binnen het spectrum. HISWA is bedoeld voor het berekenen van golven in tijd en ruimte, rekening houdend met de invloed van wind, waterdiepte en waterstroming.
HISWA is opgevolgd door SWAN en is sinds eind jaren negentig niet meer gangbaar.

Modellering golfcondities met Bretschneider

Op smalle wateren worden de golfcondities met behulp van de empirische golfgroeikromme van Bretschneider [TAW, 1985] bepaald. Toepassing van de formule van Bretschneider vergt een veel verdergaande schematisering (sterkere vereenvoudiging) van het gebied dan de modellen SWAN en HISWA.
Hieronder wordt uitgelegd hoe de benodigde invoer voor Bretschneider wordt bepaald, hoe vervolgens de golfcondities worden bepaald .

Strijklengtes en bodemligging

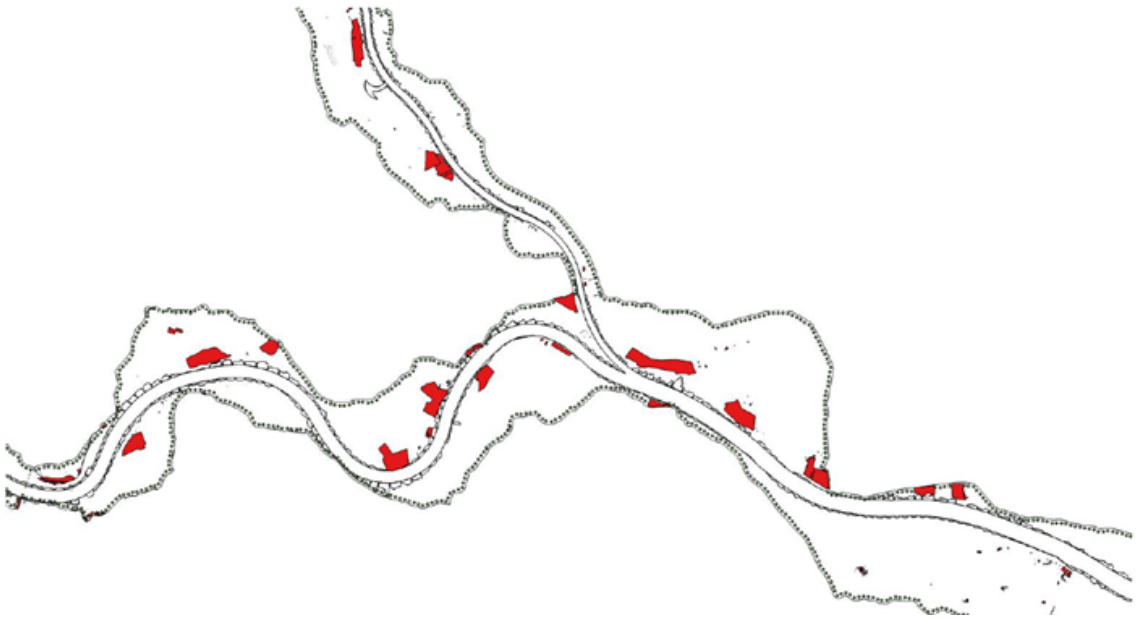
De meest eenvoudige wijze om golfcondities te berekenen is het hanteren van een golfgroeikromme. Een golfgroeikromme zoals door Bretschneider afgeleid, bepaalt de golfcondities op basis van een effectieve strijklengte, een gemiddelde bodemligging en een bepaalde windsnelheid. De effectieve strijklengte wordt per windrichting bepaald als gewogen gemiddelde van de lengte van de projectie van de raaien op de windrichting, binnen een waaier naar de bovenwindse oeverlijn (zie Figuur 1). Een dergelijke benadering is te rechtvaardigen als de golfcondities aan de teen van de dijk voornamelijk door windgroei gedomineerd worden, zoals bijvoorbeeld op smalle wateren van de rivieren.



Figuur 1 Definitie van raaien gehanteerd voor strijklengte en bodemligging voor Bretschneider.

De strijklengtes worden bepaald met behulp van de shapefiles[1] die de buitenkruinlijnen van de primaire keringen volgen. Hoogwatervrije gebieden en obstakels zijn daaruit verwijderd.

Bij de bepaling van de gemiddelde bodemligging wordt slechts in beperkte mate rekening gehouden met hoogwatervrije gebieden. Hoogwatervrije gebieden zijn gebieden waar een “oneindig” hoog element gerealiseerd is of kan worden. Dat is overigens alleen mogelijk als daarvoor een vergunning is afgegeven. Er is slechts een beperkt aantal van dergelijke hoogwatervrije gebieden aanwezig in het gehele rivierengebied. Een voorbeeld wordt gegeven in Figuur 2, waarin de zwarte punten de uitvoerlocaties zijn en de rode vlakken de hoogwatervrije, vergunde gebieden.



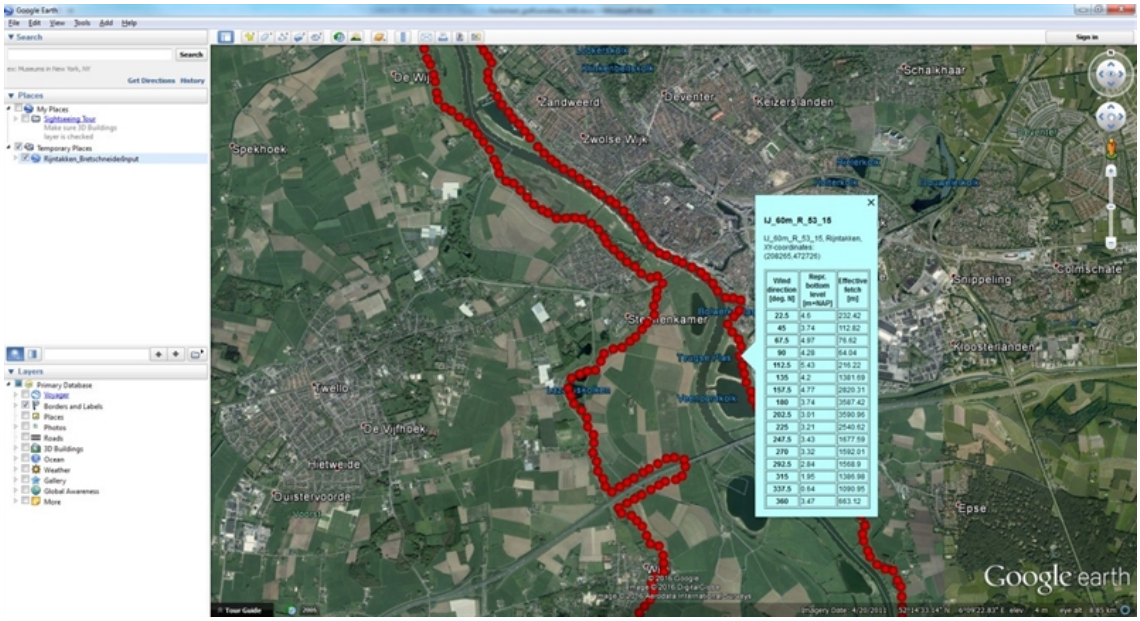
Figuur 2 Voorbeeld van hoogwatervrij vergunde elementen (rood) in het rivierengebied (Pannerdense Kop).

Het niet meenemen van deze gebieden in de strijklengtebepaling wordt als conservatief, maar niet overconservatief beschouwd. Te zien is in Figuur 2 dat in veel gevallen de strijklengte slechts voor een

beperkt aantal windsectoren korter zou worden door het meenemen van hoogwatervrije gebieden. Voor de overige windrichtingen blijft de strijklengte ongewijzigd, waardoor het effect (na uitvoeren probabilistische berekening) beperkt zal zijn. Dit komt doordat er een weging van verschillende windrichtingen plaatsvindt, wat ertoe leidt dat een afname van strijklengte (en dus golfcondities) in één windrichting 'gedeeltelijk gecompenseerd' wordt door de andere windrichtingen. Alleen in de gevallen waar het hoogwatervrije gebied meerdere sectoren significant beïnvloedt, kan een significant effect verwacht worden. Dit is bijvoorbeeld het geval als het hoogwatervrije gebied direct voor de uitvoerlocatie gelegen is. In die gevallen kan het hoogwatervrije gebied meegenomen worden als voorland via de voorlandmodule (Transformatie hydraulische belastingen met de DaF module). Daarin wordt de golfhoogte aangepast als gevolg van shoaling (opsteilen van golven door verkleining van de waterdiepte) en golfdissipatie door breken en bodemwrijving over het laatste stuk van de beschouwde uitvoerlocatie tot aan de teen van dijk.
De hoogwatervrije terreinen zijn niet meegenomen in de strijklengtebepaling, maar wel meegenomen in de bepaling van de gemiddelde bodemligging. De bodemligging van de hoogwatervrije gebieden betreft meestal de actuele hoogte, hoogwater vrije terreinen worden daarbij niet 'oneindig' hoog verondersteld.

Het hanteren van een gemiddelde strijklengte en daarbij behorende gemiddelde bodemligging vereenvoudigt de werkelijkheid in sterke mate. Er wordt als het ware gerekend met een bak met uniforme diepte. In gevallen waarin sprake is van een sterke variatie in de bodemligging en een ondieper gebied vlak bij de uitvoerlocatie leidt deze gekozen aanpak tot een (beperkte) overschatting van de golfcondities. Toepassing van de voorlandmodule kan deze overschatting deels teniet doen. Het omgekeerde kan het geval zijn als de bodemligging vlak bij de uitvoerlocatie juist dieper is. In het rivierengebied is hier niet vaak sprake van, omdat het winterbed (dat het grootste deel van de strijklengte beslaat) vaak relatief vlak is. Uitzondering hierop zijn situaties waar het zomerbed vlak langs de uitvoerlocatie loopt of als sprake is van grote ontgrondingsplassen langs de raai waarover het representatieve bodemniveau is bepaald. Daarnaast moet worden opgemerkt dat het effect van stroming niet wordt meegenomen in deze wijze van golfmodellering. Daar waar de stroomgeul vlak langs de kering loopt kan de huidige aanpak tot onnauwkeurige resultaten leiden, niet noodzakelijkerwijs conservatief.

De afgeleide strijklengtes en bodemliggingen per windrichtingssector per uitvoerlocatie zijn opgenomen in een Google-Earth file, welke beschreven is in [Camarena Calderon, 2015]. Figuur 3 toont een snapshot van deze file.



Figuur 3 Snapshot van de Google-Earth-file met gehanteerde strijklengtes en bodemliggingen per windrichting.

Bepaling van de golfcondities en opslag in de hydraulische databases

De hydraulische databases dienen voor iedere combinatie van windsnelheid, windrichting en eventuele andere basisstochastwaarden, zoals meerpeil, zeewaterstand en afvoerdebiet golfcondities te bevatten. Voor iedere combinatie van de basisstochastwaarden is met het hydrodynamisch model WAQUA de lokale waterstand bepaald (Modellering waterstanden). Per windrichting is de gemiddelde waterdiepte d bepaald door de lokale waterstand bij de windrichtingsafhankelijke representatieve bodemligging op te tellen.

Voor iedere locatie is de significante golfhoogte H_s en significante golfperiode T_s volgens de formule van Bretschneider bepaald bij een bepaalde windsnelheid en windrichting. Als invoer voor de formule is de windsnelheid, de windrichtingsafhankelijke effectieve strijklengte F en waterdiepte d gehanteerd:

$$\bar{H} = 0.283 \tanh\left(0.530\bar{d}^{0.75}\right) \tanh\left[\frac{0.0125\bar{F}^{0.42}}{\tanh\left(0.53\bar{d}^{0.75}\right)}\right] \qquad (1)$$

$$\bar{T} = 2.4\pi \tanh\left(0.833\bar{d}^{0.375}\right) \tanh\left[\frac{0.077\bar{F}^{0.25}}{\tanh\left(0.833\bar{d}^{0.375}\right)}\right] \qquad (2)$$

$$\bar{d} = \frac{dg}{U^2}, \bar{F} = \frac{Fg}{U^2} \qquad (3)$$

$$\bar{H} = \frac{H_s g}{U^2}, \bar{T} = \frac{T_s g}{U} \qquad (4)$$

waarbij de symbolen in de formules de volgende betekenis hebben:

g = zwaartekrachtsversnelling [m/s²]
u = wind snelheid op 10 m hoogte [m/s]
d = waterdiepte [m]
F = effectieve strijklengte [m]

H_s = significante golfhoogte [m]
T_s = significante golfperiode [s]
H = dimensieloze significante golfhoogte [-]
T = dimensieloze significante golfperiode [-]
d = dimensieloze waterdiepte [-]
F = dimensieloze effectieve strijklengte [-]
De significante golfhoogte ($H_{m0} = H_s$), de piekperiode T_p (vertaald vanuit T_s door te vermenigvuldigen met een factor 1.08) en de gemiddelde golfrichting (gelijk aan windrichting) worden opgeslagen in de hydraulische database.

In WBI2017 zijn voor het eerst de golfcondities voor de smalle wateren in een database opgeslagen. Voorheen werden de effectieve strijklengtes en het representatieve bodemniveau opgeslagen in databases en werd binnen het probabilistisch model (Hydra-Zoet) de Bretschneiderberekening uitgevoerd. Daarbij is het specifiek in Hydra-NL voor een gebruiker ook mogelijk om te corrigeren voor de invloed van bijvoorbeeld hoogwatervrije terreinen op de strijklengte. De werkwijze staat uitgebreid beschreven in paragraaf 5.4 van [Duits, 2019].

[1] Uitwisselingsformaat voor geografische informatie als ligging, attributen en indices van objecten, afkomstig uit Baselines schematisaties.

Versie 1.0: 2 juli 2025

2.2 Gebiedsschematisatie

Gebiedsschematisatie

In dit artikel wordt de schematisatie van de gebiedsinformatie ten behoeve van de modellering van hydraulische belastingen op waterkeringen behandeld.

De schematisatie bevat de beschrijving van het door te rekenen gebied, en is geprojecteerd op het rekenrooster. Per rekenroostercel zijn de relevante fysieke kenmerken van het gebied geschematiseerd. Naast het primaire doel van een schematisatie om een gebied zo goed mogelijk in actuele toestand te beschrijven kan een schematisatie ook tot doel hebben een beoogde toestand vast te leggen. In de laatste variant kunnen mogelijke scenario's worden doorgerekend. Denk hierbij aan beoogde vegetatie, of vergunde maar nog niet gerealiseerde maatregelen.

Rijkswaterstaat zet modelschematisaties in ten behoeve van de eigen primaire processen, zoals vergunningverlening en handhaving, operationeel waterbeheer, planvorming/beleidsvragen en beoordeling, ontwerp en risicoberekeningen.

In de rekenmodellen worden gebiedsschematisaties gebruikt. Algemene uitgangspunten bij deze gebiedsschematisaties zijn:

- De begrenzing van het watersysteem sluit aan op de lijn die de ligging van de primaire waterkeringen aangeeft (de dijkringlijn).
- De schematisatie is zoveel mogelijk representatief voor de verwachte toestand op de peildatum van de betreffende beoordelingsronde (meestal aan het eind van de beoordelingsperiode) of voor het te beschouwen zichtjaar in het geval van ontwerpen.

Bij het opzetten van de schematisatie dient een basisjaar of referentie te worden beschouwd. Nieuwe en aangepaste maatregelen worden aangebracht, gewijzigd, verbeterd of ingemixt; deze worden vervolgens opgenomen in Baseline en daarna geconverteerd naar invoer voor de desbetreffende modellen.

Relevante informatie

De belangrijke fysische processen om te modelleren in het kader van het beoordelen en ontwerpen van waterkeringen zijn: waterstanden, wind en golven. Voor een juiste modellering van deze processen is de volgende relevante gebiedsinformatie benodigd:

- ligging kering (en eventuele hoge gronden)
- open randen
- bodemligging
- obstakels
- bodemruwheid
- waterbeheerinstrumenten, zoals stormvloedkeringen, overlaten, splitsingspunten en lateralen

Beheer gebiedsinformatie: Baseline

Voor het beheer van de voor hydraulische modellen relevante gebiedsinformatie maakt Rijkswaterstaat gebruik van Baseline.

Baseline is een database en applicatie voor de opslag, het raadplegen, bewerken en presenteren van gegevens van watersystemen.

De Baseline database bevat gegevens over bodemhoogte, obstakels zoals dammen en kribben, kades, hoge gronden en vegetatie. De Baseline database wordt regelmatig geactualiseerd, op basis van onder andere lodingen. De gebiedsinformatie binnen Baseline vormt de basis van de gebiedsschematisatie voor hydraulische modellen.

Het beheer van de gebiedsinformatie met Baseline zorgt voor maximale consistentie in de gebiedsschematisaties van eenzelfde gebied (in Nederland) in verschillende toepassingen.

Versie 1.0: 2 juli 2025

2.3 Productieberekeningen voor de fysische relatie tussen basisstochasten en hydraulische belasting parameters in tabelvorm

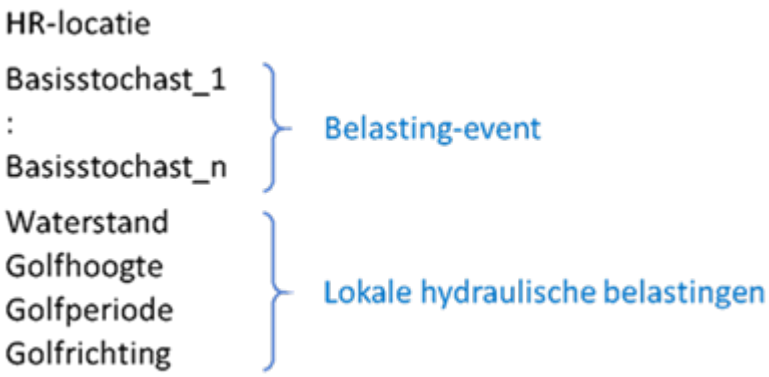
Productieberekeningen voor de fysische relatie tussen basisstochasten en hydraulische belasting parameters in tabelvorm

Dit artikel beschouwt het construeren van databases fysica door uitvoering van productieberekeningen.

Doel van de productieberekeningen

De productieberekeningen fysica hebben tot doel databases te genereren waarin de fysische relatie wordt gelegd tussen de basisstochasten enerzijds en de lokale hydraulische belastingen anderzijds.

De essentie van de data in de hydraulische databases kan beschouwd worden als een tabel. Deze tabel heeft in generieke zin de kolommen zoals gegeven in Figuur 1.



Figuur 1 De kolommen in de tabel met de fysische relatie tussen de basisstochasten en de lokale hydraulische belastingen parameters.

Elke regel in de tabel bevat de lokale hydraulische belastingen voor één belastinggebeurtenis, voor één uitvoerlocatie.

Welke combinatie van basisstochasten (de betekenis c.q. kop van kolom 1 t/m n) aan de orde is, verschilt per watersysteem. Voorbeeld: voor het watersysteem IJsselmeer is sprake van drie basisstochasten, namelijk IJsselmeerpeil, windrichting te Schiphol en windsnelheid te Schiphol.

Elk belastinggebeurtenis wordt gekarakteriseerd door een specifieke combinatie van waarden van de basisstochasten. Voorbeeld: één van de belastinggebeurtenissen voor het IJsselmeer zou gekenmerkt kunnen worden door: IJsselmeerpeil = NAP -0.40 m; windrichting te Schiphol = 270°; windsnelheid te Schiphol = 24 m/s.

Ieder belastinggebeurtenis geeft de hydraulische condities voor alle uitvoerlocaties in het beschouwde watersysteem. De verzameling belastinggebeurtenissen is voor alle locaties binnen een watersysteem gelijk. Op de keuze van de verzameling stochasten wordt nader ingegaan in de paragraaf Verzameling belastinggebeurtenissen.

Er bestaan verschillende categorieën uitvoerlocaties. De uiteindelijk meest gebruikte uitvoerlocaties zijn de uitvoerlocaties nabij de teen van de waterkering, met een onderlinge afstand van ongeveer 100 m. Zie verder Uitgangspunten.

De hydraulische belastingparameters krijgen elk één waarde per locatie en per event. Deze waarden hebben betrekking op de lokale topwaarden binnen de betreffende belastinggebeurtenis (hoogwatergebeurtenis).

De waarden van de hydraulische belastingparameters worden voor het overgrote deel met modellen berekend. Daarbij is sprake van een windmodel, een waterstandmodel en een golfmodel. Alleen voor speciale belastinggebeurtenissen worden de waarden 'met de hand' ingevuld, zie verder Productieberekeningen waterstanden en Productieberekeningen golven.

De verzameling belastinggebeurtenissen: combinaties van basisstochastwaarden

Het aantal productieberekeningen wordt bepaald door het aantal combinaties van basisstochastwaarden. Omdat het uitvoeren van productieberekeningen tijdrovend en kostbaar is, wordt getracht het aantal combinaties van basisstochastwaarden beperkt te houden. Daarom wordt kritisch gekeken naar de volgende aspecten:

- het relevante bereik (onder- en bovengrens) per basisstochast
- de discretisatie (stappen) binnen het bereik

- de combinaties van basisstochastwaarden

Het relevante bereik per basisstochast bestaat uit de te beschouwen onder- en bovengrens van de basisstochastwaarden. Dit bereik hangt samen met de statistiek van de basisstochast en het relevante kansbereik voor het beschouwde watersysteem. Het relevante kansbereik voor het beschouwde watersysteem volgt uit de normen van de dijktrajecten en de eventueel benodigde vertaling van de normen naar doorsnede-eisen die weer zijn gekoppeld specifieke faalmechanismen.

De discretisatie binnen het bereik bestaat uit de keuze van de reeks waarden tussen de onder- en de bovengrens. Deze keuze wordt afgestemd op het acceptabel klein houden van de fout die in de hydraulische belasting parameters gemaakt wordt bij lineair interpoleren tussen de berekende waarden bij opeenvolgende basisstochastwaarden.

Wanneer elke basisstochast afzonderlijk is gediscretiseerd tot een reeks, wil dat nog niet zeggen dat alle combinaties van waarden uit deze reeksen doorgerekend hoeven te worden: in de praktijk kunnen vaak combinaties worden weggelaten, zoals aflandige windrichtingen.

In sommige watersystemen zijn de basisstochasten niet puur afzonderlijk gediscretiseerd, maar in onderlinge samenhang. Zo kan bijvoorbeeld voor oostelijke windrichtingen een kleiner bereik met daarbinnen een andere reeks stappen in de windsnelheid zijn gehanteerd dan voor westelijke windrichtingen. Deze vorm van optimalisatie heeft wel als nadeel dat de structuur in de resultaten minder inzichtelijk en daarmee minder goed controleerbaar is.

Productieberekeningen / Informatie-uitwisseling tussen de modellen

In de praktijk worden de productieberekeningen fysica in twee afzonderlijke productieprocessen uitgevoerd, namelijk voor

- Waterstanden, zie Productieberekeningen waterstanden
- Golven, zie Productieberekeningen golven

Versie 1.0: 2 juli 2025

Productieberekeningen waterstanden

Dit artikel beschrijft de productieberekeningen fysica ten aanzien van de waterstanden.

Opzet productieberekeningen: combinaties van snelle en trage stochasten

Bij de modellering van de waterstand wordt rekening gehouden met het verloop in de tijd (zie ook Modellering waterstanden). Mede daarom hangt de opzet van de productieberekeningen waterstand af van de vraag welke combinatie van snelle en trage stochasten (Correlatie in lengte en tijd) aan de orde is, oftewel: welk watersysteemtype beschouwd wordt. De volgende varianten in de opzet van de productieberekeningen waterstand kunnen worden onderscheiden:

- Als waterstanden afhangen van alléén een trage stochast, dan wordt in de productieberekeningen waterstanden het aan die trage stochast opgehangen verloop binnen een belastinggebeurtenis als invoer gehanteerd. Voorbeeld: watersysteemtype Bovenrivieren, de afvoer van Rijn of Maas zijn trage stochasten.
- Als waterstanden afhangen van alléén snelle stochasten, dan wordt in de productieberekeningen waterstanden het aan die snelle stochasten opgehangen verloop binnen een belastinggebeurtenis als invoer gehanteerd. Voorbeeld: watersysteemtype Oosterschelde, de windopzet op zee is de snelle stochast.
- Als waterstanden afhangen van een combinatie van tenminste één trage stochast met

tenminste één snelle stochast, dan wordt in de productieberekeningen waterstanden het aan de snelle stochast(en) opgehangen verloop binnen een belastinggebeurtenis als invoer gehanteerd in combinatie met de stationaire waarde voor de trage stochast(en). Voorbeelden: watersysteemtype Benedenrivieren (windopzet op zee is snelle stochast, afvoer Rijn en Maas zijn traag), watersysteemtype Meren (wind is snelle stochast, afvoer en meerpeil zijn trage stochasten).

Opzet productieberekeningen: benadering voor irrelevante windrichtingen

In sommige watersystemen wordt bespaard op het aantal productieberekeningen waterstanden door voor niet-relevant geachte windrichtingen voor alle windsnelheden de waterstanden te noteren die optreden zonder windforcering.

Verwerking productieberekeningen

Een belangrijk onderdeel van de productieberekeningen bestaat uit de verwerking van de 'ruwe' rekenresultaten uit het rekenmodel. Onderdelen van deze verwerking zijn de filtering, controle en de selectie van representatieve topwaarden. De achterliggende gedachte is het verwijderen dan wel gladstrijken van niet-fysische waardes of oscillaties in de rekenresultaten om daarmee realistische topwaarden te genereren en op te slaan in de databases.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Productieberekeningen golven

Dit artikel beschrijft de productieberekeningen fysica ten aanzien van de golfcondities. Deze vragen – vaak meer nog dan de productieberekeningen waterstand – relatief veel rekentijd. In veel watersystemen wordt daarom bespaard op het aantal productieberekeningen golven door niet alle combinaties van basisstochastwaarden door te rekenen, maar te focussen op de afhankelijkheid van de waterstand.

Opzet productieberekeningen: varianten bij waterstand als invoer

Bij de modellering van de golven wordt quasi-stationair gerekend: een of meer momentane condities binnen een storm worden doorgerekend alsof elke afzonderlijke conditie stationair is; er wordt binnen de golfmodellering zelf geen rekening gehouden met het verloop in de tijd (zie ook Modellering golfcondities).

De golfcondities worden bepaald door:

- de windrichting
- de windsnelheid
- de waterstand
- de stroming

In de meeste gevallen wordt het effect van stroming op de golven buiten beschouwing gelaten.

Omdat de golfcondities rechtstreeks afhangen van de windrichting en windsnelheid, worden in de 'productieberekeningen golven' de reeksen waarden van de basisstochasten 'windrichting' en 'windsnelheid' sowieso doorgerekend. Wat betreft de combinaties van de basisstochasten 'windsnelheid' en 'windrichting' kan dus niet worden bespaard op het aantal productieberekeningen golven. De overige basisstochasten zijn niet rechtstreeks van invloed op de golfcondities, maar indirect, namelijk via de (lokale) waterstand. Als meerdere combinaties van die overige stochasten tot dezelfde waterstand leiden, dan hoeven de golven niet voor al die combinaties berekend te worden. Er kan dus worden bespaard op het aantal productieberekeningen golven door niet alle combinaties

van die overige basisstochastwaarden door te rekenen. Hoe die besparing wordt uitgewerkt varieert. De opzet van de productieberekeningen golven hangt daarom voor een belangrijk deel af van de wijze waarop wordt omgegaan met de waterstand als invoerparameter. De volgende varianten in de opzet van de productieberekeningen golven kunnen worden onderscheiden:

1. ruimtelijk variabel waterstandsveld vanuit het waterstandsmodel:
   1.1. bij elk belastinggebeurtenis het momentane veld van waterstanden (en eventueel stromingen) op één tijdstip (variant 1a)
   1.2. bij elk belastinggebeurtenis het veld van maximale waterstanden (variant 1b)
2. ruimtelijk uniforme (horizontale) waterstand

   2.1. generieke hulp-belastinggebeurtenissen gevolgd door interpolatie naar de belastinggebeurtenissen (variant 2a)
   2.2. bij elke locatie alle belastinggebeurtenissen (variant 2b)

Variant 1 is zinvol en haalbaar, als een geavanceerde golfmodellering gewenst is en er naast de windrichting en de windsnelheid maar één andere basisstochast een rol speelt. Dit geldt bijvoorbeeld voor meren.

Variant 1a: bij elk belastinggebeurtenis het momentane veld van waterstanden

In deze variant is het waterstandsveld voor de golfberekening een veld dat op een zeker moment in een belastinggebeurtenis optreedt, bijvoorbeeld aan het eind van de stormtop. In de praktijk worden overigens vaak in ieder belastinggebeurtenis op twee of meer tijdstippen rond de top van de windsnelheid de momentane waterstandsvelden quasi-stationair doorgerekend. Hiermee komen voor iedere locatie meerdere golfcondities per belastinggebeurtenis beschikbaar. Vervolgens worden per locatie de maatgevende golfcondities per belastinggebeurtenis - dat wil zeggen: de maatgevende golfcondities uit de doorgerekende tijdstippen - bepaald en in de database geplaatst.

Variant 1b: bij elk belastinggebeurtenis het veld van maximale waterstanden

In deze variant is het waterstandsveld voor de golfberekening niet een veld dat op een zeker moment in een belastinggebeurtenis optreedt. In plaats daarvan is per belastinggebeurtenis het waterstandsveld voor de golfberekening samengesteld door gedurende de waterstandsberekening (met bijvoorbeeld WAQUA) in iedere roostercel bij te houden wat de maximale waterstand is.

Variant 2a: generieke hulp-belastinggebeurtenissen gevolgd door interpolatie naar de belastinggebeurtenissen

In deze variant worden voor een reeks ruimtelijk uniforme waterstandsniveaus ('horizontale waterstand') de combinaties van windsnelheid en windrichting doorgerekend naar golfcondities. Bij iedere combinatie van windsnelheid en windrichting kunnen vervolgens de golfcondities bij een willekeurige (lokale) waterstand bepaald worden door interpolatie in de resultaten (voor die locatie) voor de reeks doorgerekende waterstanden. Op deze manier kunnen de golfcondities gekoppeld worden aan de combinaties van basisstochasten die gebruikt zijn voor de waterstandsberekeningen. Dit is bijvoorbeeld toegepast voor de SWAN berekeningen in de Benedenrivieren en Oosterschelde.

Iets anders geformuleerd:

In deze variant wordt een set generieke hulp-belastinggebeurtenissen gedefinieerd door een hulp-basisstochast 'horizontale waterstand' te discretiseren en deze te combineren met de reeksen voor de basisstochasten windrichting en windsnelheid. De resultaten kunnen vervolgens per locatie via interpolatie op basis van de lokale waterstand geplaatst worden bij alle belastinggebeurtenissen in de database.

Variant 2b: bij elke locatie alle belastinggebeurtenissen

In deze variant worden bij elke locatie alle belastinggebeurtenissen doorgerekend: de golfcondities worden bij elk belastinggebeurtenis bepaald op basis van de windsnelheid *U*, windrichting *R* en lokale waterstand. Dit kan alleen als het rekenmodel zeer snel en dus eenvoudig is, oftewel wanneer toepassing van het golfmodel Bretschneider acceptabel is.

Opzet productieberekeningen: omgaan met triviale windsnelheden

Doorgaans is windsnelheid nul de ondergrens in de discretisatie van de windsnelheid. In watersystemen waar alle golven lokaal worden opgewekt (en golven dus geen basisstochast zijn), is bij deze windsnelheid geen sprake van golven. Bij deze windsnelheid worden geen productieberekeningen golven uitgevoerd; een golfhoogte, en -periode gelijk aan nul wordt in de database geplaatst.

Versie 1.0: 2 juli 2025

2.4 Bepaling van het representatief verloop in de tijd

Bepaling van het representatief verloop in de tijd

Dit artikel beschrijft de afleiding van het temporele verloop van hydraulische belastingen.

Pragmatische invulling

Naast topwaarden voor de waterstand en de golfcondities is ook informatie nodig over het verloop van de hydraulische belasting in de tijd, zie Belastingen op primaire waterkeringen in Nederland. De beschrijving van de variatie van de hydraulische belasting parameters in de tijd binnen een belastinggebeurtenis is in de huidige modellering vooralsnog pragmatisch ingevuld in de vorm van een representatief verloop van (alleen) de waterstand.

Welk belastingverloop 'representatief' is hangt in principe af van de vraag welk faalmechanisme wordt beschouwd. In de huidige rekenmethode wordt alleen onderscheid gemaakt tussen geotechnische faalmechanismen (afschuiving binnenwaarts, piping) en faalmechanismen met betrekking tot dijkbekledingen op het buitentalud (steen, asfalt, gras).

Het representatieve belastingverloop is in principe locatie-afhankelijk. In de praktijk wordt het verloop binnen deelgebieden gelijk verondersteld, of wordt gebruik gemaakt van interpolatie tussen het berekende verloop op een aantal uitvoerlocaties met vrij grote onderlinge afstand. Hiervoor is een hulpmiddel beschikbaar: de Waterstandsverlopentool.

Het representatieve waterstandsverloop wordt gegeven in de vorm van een relatief verloop ten opzichte van de topwaarde van de waterstand. Om tot een werkelijk verloop te komen kan de gebruiker voor die topwaarde de waarde invullen die bij de beschouwde terugkeertijd hoort.

Verloop waterstanden

Voor het bepalen van het representatieve waterstandsverloop voor de geotechnische mechanismen wordt anders omgegaan met combinaties van snelle en trage stochasten dan bij de productieberekeningen waterstand.

Als waterstanden afhangen van een combinatie van tenminste één trage stochast met tenminste één snelle stochast, dan wordt een representatief verloop bepaald waarin op beide tijdschalen rekening gehouden wordt met de variatie in de tijd. Bij het kiezen van een representatieve combinatie van stochastwaarden wordt bij hogere terugkeerniveaus van de waterstand gekeken naar de uitsplitsingen naar de stochasten. Hierbij wordt relatief veel gewicht toegekend aan de trage stochast.

Verloop golfcondities

De modellering van de golven gaat uit van stationariteit, zie Modellering golfcondities en levert dus geen informatie over het verloop van de golven in de tijd binnen een belastinggebeurtenis.

Met name de faalmechanismemodellen voor de dijkbekledingen vergen echter wel degelijk informatie over het verloop van de combinatie van waterstand en golven in de tijd binnen een belastinggebeurtenis. Deze informatie wordt met behulp van een tijdelijke pragmatische aanpak (de 'Q-variant') geconstrueerd. Deze aanpak bevat de volgende componenten:

- Bij een gegeven overschrijdingskans worden voor een reeks waterstandsniveaus rekenwaarden van de golfbelastingparameters bepaald:
  - Bij elke afzonderlijke combinatie van waterstandsniveau en overschrijdingskans worden rekenwaarden van de golfbelastingparameters bepaald door in het probabilistische rekenhart van Riskeer, Hydra-Ring, gebruik te maken van een sterk vereenvoudigde benaderende Z-functie.
  - Rekenwaarden van de golfbelastingparameters worden afgeleid uit de illustratiepunten bij de Z-waarde met de gezochte overschrijdingskans.
  - Omdat bij ieder belastinggebeurtenis alleen informatie beschikbaar is over de top-belasting, bevat de Z-functie grove aannames over de golfcondities binnen het belastinggebeurtenis op het moment dat de gezochte waterstand optreedt.
- Na het berekenen van de golfcondities bij de verschillende waterstandsniveaus (met een afzonderlijke probabilistische berekening per waterstandsniveau) wordt deze informatie op basis van het waterstandsniveau gekoppeld met één waterstandsverloop in de tijd om te komen tot het gecombineerde verloop van waterstand en golfcondities: de reken-belastinggebeurtenis.

Merk op dat de golfcondities op verschillende tijdstippen in deze reken-belastinggebeurtenis afkomstig zijn uit totaal verschillende oorspronkelijke belastinggebeurtenis.

Versie 1.0: 2 juli 2025

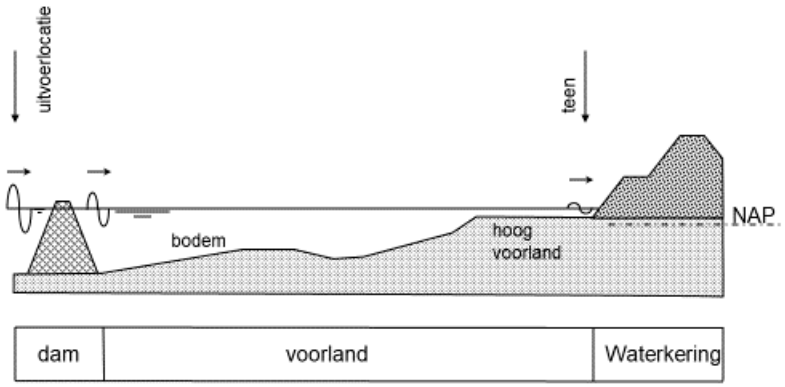
2.5 Transformatie hydraulische belastingen naar de teen

Transformatie hydraulische belastingen naar de teen

Dit artikel beschrijft de transformatie van de hydraulische belastingparameters van de uitvoerlocatie naar de teen van de beschouwde waterkering onder invloed van een dam en/of een voorland.

Transformatie in geval van dam en/of voorland tussen uitvoerlocatie en dijkteen

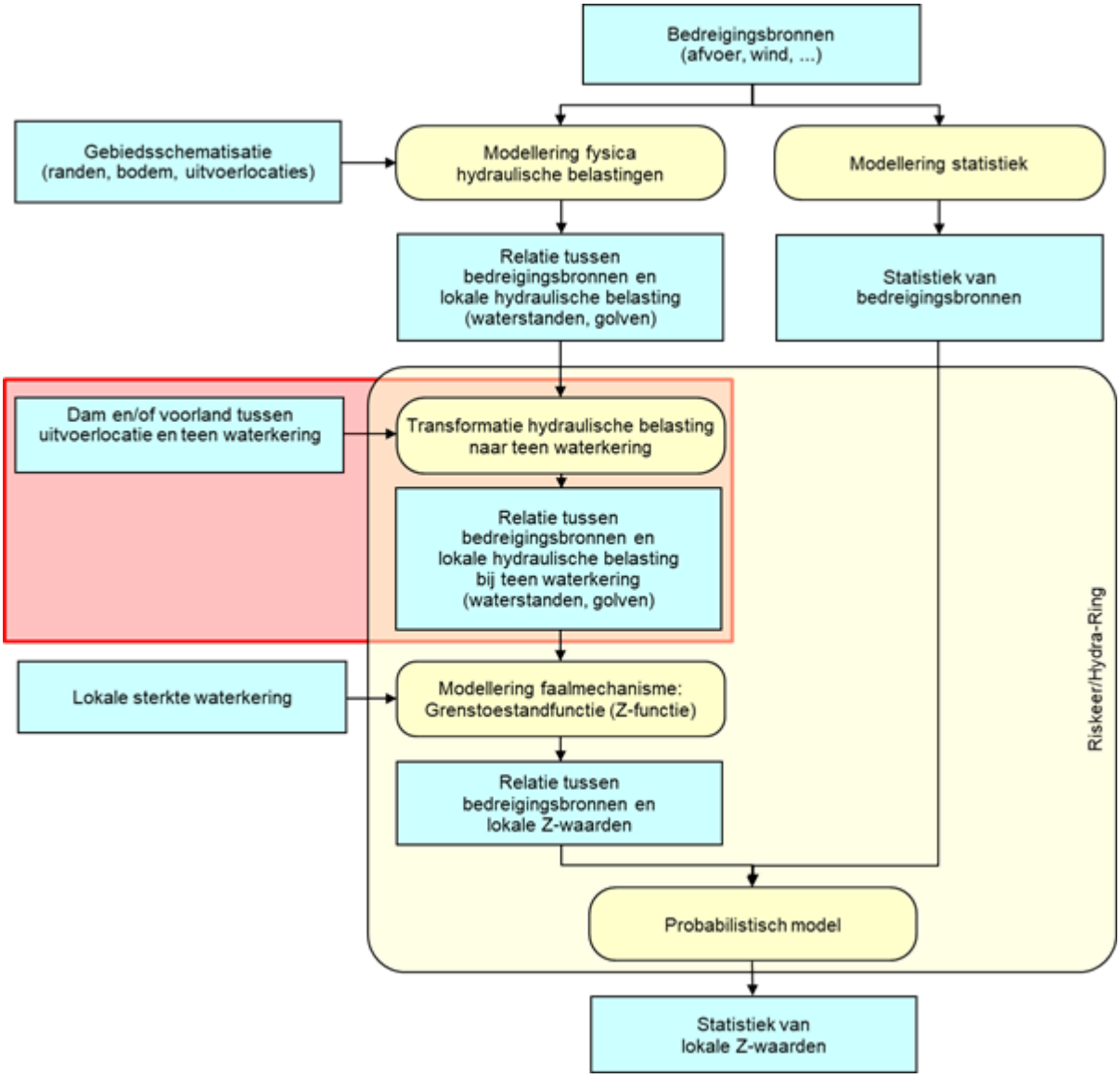
Zie Figuur 1. In geval van een dam en/of een voorland tussen de uitvoerlocatie en dijkteen moeten de effecten daarvan op de hydraulische condities verdisconteerd worden. Dit gebeurt in de vorm van een transformatie.



Figuur 1 Schematische weergave van een dam en voorland tussen de uitvoerlocatie en de dijkteen.

Positionering transformatie

De positionering van de transformatie is schematisch weergegeven in de vorm van het rode blok in Figuur 2. Deze figuur toont de positionering van de transformatie als een kleine uitbreiding op het meer algemene schema dat gegeven is in Modellering fysica hydraulische belastingen en Inbedding hydraulische belastingen in probabilistisch modellering voor overstromingskansbepaling.



Figuur 2 Stroomschema met positionering transformatie hydraulische belastingen naar de dijkteen.

Belangrijke kenmerken van de transformatie worden hieronder behandeld.

Onderdeel Riskeer

Zoals het schema laat zien, vormt de transformatie geen onderdeel van de productieberekeningen fysica, maar is deze opgenomen in het probabilistisch model Riskeer met rekenhart Hydra-Ring.

Invloed eindgebruiker op hydraulische belastingen

De hydraulische belastingen data op de uitvoerlocatie zijn in het algemeen door het Rijk beschikbaar gesteld. De informatie over een dam en/of een voorland wordt echter - net als de informatie over de lokale sterkte van de waterkering - ingebracht door de eindgebruiker: de gebruiker van Riskeer. Daarmee heeft de eindgebruiker invloed op (deze bewerking van) de hydraulische belastingen.

De transformatie gaat uit van een stationaire situatie

Omdat de invoerinformatie over de hydraulische belastingparameters op de uitvoerlocatie geen tijdinformatie bevat, gaat de transformatie-modellering uit van een stationaire situatie.

Geen aanpassing modelonzekerheid

In principe heeft het toepassen van de transformatie naar de dijkteen invloed op de modelonzekerheid rond de hydraulische belasting parameters. Deze invloed is echter niet in generieke zin te bepalen, omdat deze afhangt van de schematisatiekeuzes van de gebruiker.

Een alternatief zou zijn om de gebruiker richtlijnen te geven voor het inschatten van de invloed op de modelonzekerheden, zodat deze invloed in de vorm van aanvullende invoerinformatie in de berekening kan worden meegenomen. Er is echter nog onvoldoende kennis en ervaring om dergelijke richtlijnen op te stellen.

Daarom is in de huidige rekenmethode voor de overstromingskansbepaling de pragmatische keuze gemaakt om de invloed van de transformatie op de modelonzekerheid buiten beschouwing te laten.

Huidige invulling: DaF module

Er zijn meerdere mogelijke invullingen voor de transformatie. In de huidige rekenmethode wordt echter gebruik gemaakt van één model: de DaF module, zie Transformatie hydraulische belastingen met de DaF module.

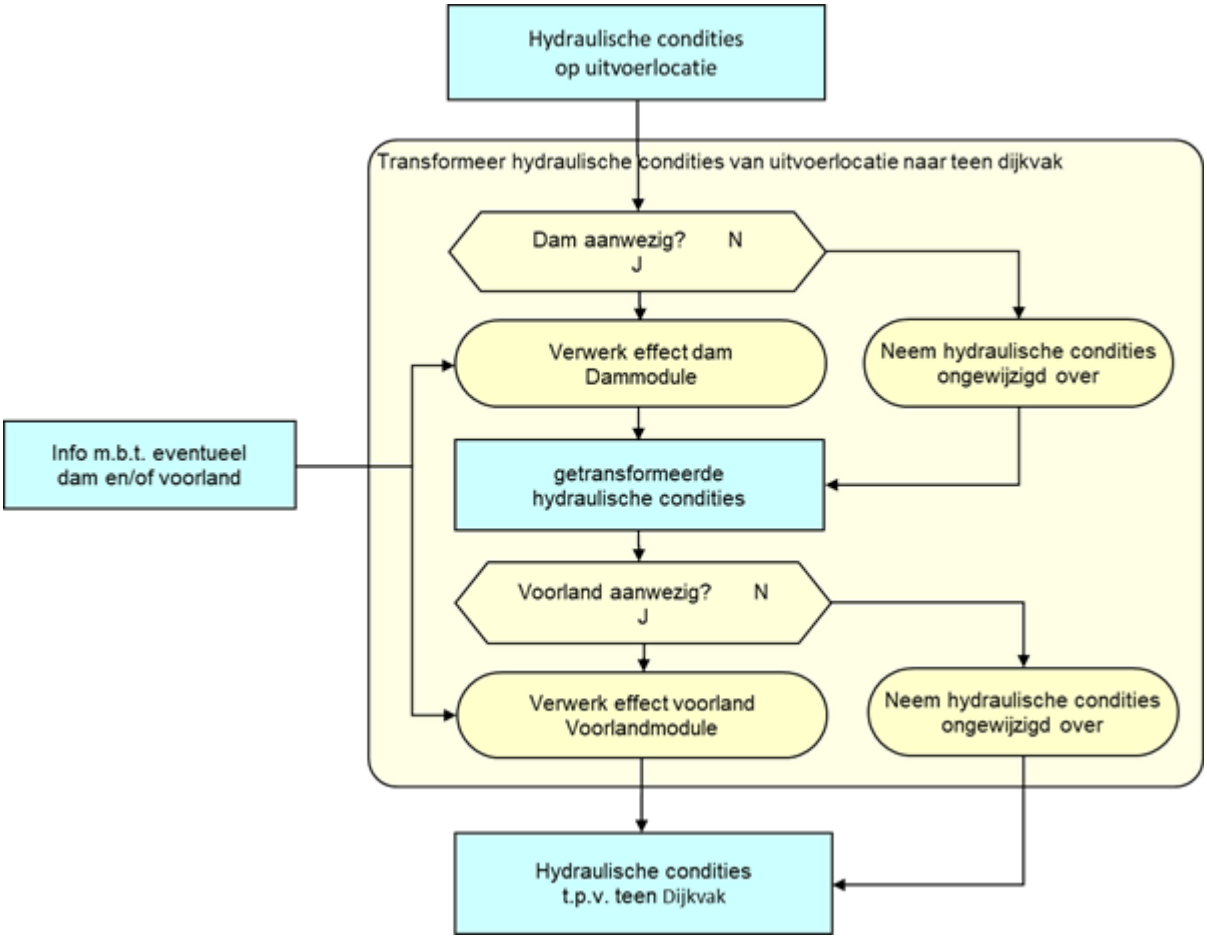
Versie 1.0: 2 juli 2025

Transformatie hydraulische belastingen met de DaF module

Dit artikel beschrijft de kenmerken van de DaF (Dam and Foreshore) -module voor de transformatie van de hydraulische belastingparameters van de uitvoerlocatie naar de teen van de beschouwde waterkering onder invloed van een dam en/of een voorland.

Generiek schema van invulling transformatie

De Figuur toont het stroomschema voor de transformatie van de hydraulische belasting parameters van de uitvoerlocatie naar de dijkteen in de DaF-module.



Figuur Stroomschema voor de transformatie van hydraulische belasting parameters naar de dijkteen in de DaF module.

De DaF-module kan rekening houden met de invloed van maximaal één dam en maximaal één voorland. Als zowel sprake is van een dam als een voorland, dan kan alleen gerekend worden met de volgende volgorde in posities: uitvoerlocatie - dam - voorland - dijkteen.

Aanpassing hydraulische belastingparameters

De DaF-module berekent alleen de transformatie van de golfhoogte en de golfrichting. De DaF-module kan effecten van een dam en voorland op de waterstand en de golfperiode niet berekenen. De DaF-module houdt geen rekening met de invloed van wind op golven.

Modellering effect dam op de golfhoogte

De DaF-module kan het effect van golftransmissie over een dam op de golfhoogte bepalen. Daartoe bevat de DaF-module een analytisch model, gebaseerd op de formules van Goda en Seelig [Rijkswaterstaat, 1990].

Modellering effect voorland op de golfhoogte

De DaF-module kan een aantal effecten van een voorland op de golfhoogte en golfrichting bepalen:

Aanpassing golfhoogte

De DaF-module berekent de effecten van bodemwrijving, shoaling en breking op de golfhoogte, uitgaande van loodrechte golfinval. Daartoe bevat de DaF-module een numeriek eendimensionaal dieptegemiddeld model, dat uitgaat van een stationaire situatie en een geparametriseerd spectrum. Dat betekent dat het spectrum - de verdeling van de golfenergie over de frequenties en richtingen -

wordt beschreven met slechts enkele parameters. Het model beschrijft de veranderingen in deze parameters in ruimte en tijd en kijkt niet naar afzonderlijke frequentie- en richtingscomponenten binnen het spectrum.
Opgemerkt wordt dat de DaF-module niet het effect van wind op de golven (golfgroei) berekent.

Aanpassing golfrichting

De DaF-module berekent de verandering van golfrichting door refractie. Daartoe maakt de DaF-module gebruik van een analytisch model, namelijk de wet van Snellius (zie de Wikipediapagina over de Wet van Snellius). Daarbij wordt alleen gebruik gemaakt van de waterdiepte, golfperiode en de golfrichting op de uitvoerlocatie, waterdiepte op de dijkteenlocatie en de oriëntatie van de dijknormaal.

Merk op dat de DaF-module niet het effect van refractie op de golfhoogte bepaalt.

Versie 1.0: 2 juli 2025

2.6 Rekenwaarden voor hydraulische belastingparameters

Rekenwaarden voor hydraulische belastingparameters

Dit artikel beschrijft de rol van rekenwaarden van belastingparameters binnen de beoordeling en het ontwerp van waterkeringen.

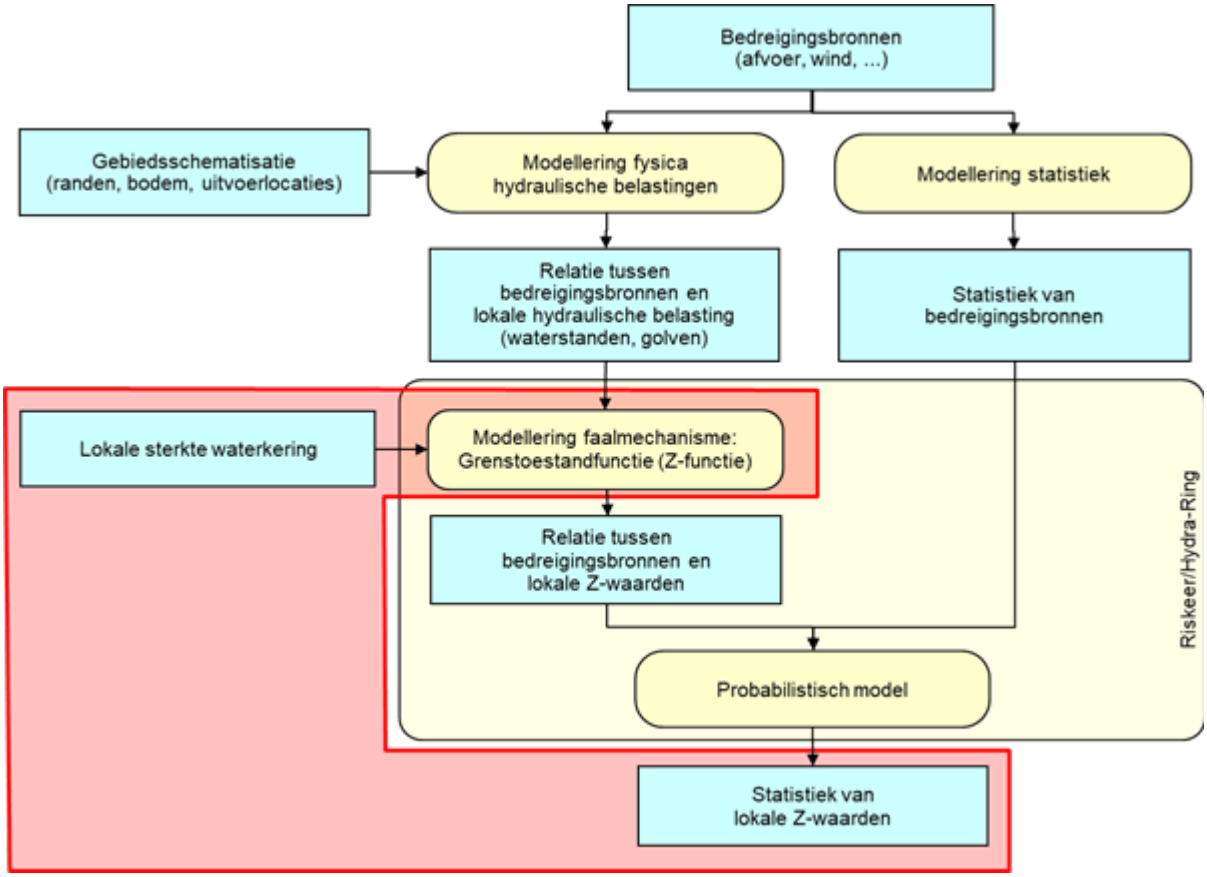
Doel

In sommige gevallen is het gewenst om statistisch representatieve waarden van de hydraulische belasting parameters te bepalen, bijvoorbeeld:

- om te gebruiken als invoer in een semi-probabilistische toets
- om een idee (in de vorm van een representatief voorbeeld) te krijgen van de combinatie van omstandigheden die leidt tot het berekende terugkeerniveau van de Z-waarde.

Positionering

De bepaling van deze vorm van hydraulische belastingen informatie vindt plaats in het rode kader van het algemene schema van onderstaande figuur.



Figuur Stroomschema met positionering van de inzet van een speciale Z-functie ten behoeve van rekenwaarden voor de hydraulische belasting parameters.

Terugkeerniveaus en illustratiepunten

De belangrijkste uitvoer van de probabilistische modellering is de 'statistiek van de Z-waarde', ook wel de 'terugkeerniveaus van de Z-waarde' genoemd. Bij elk terugkeerniveau van de Z-waarde kan de probabilistische modellering ook aanvullende informatie geven, waaronder het 'illustratiepunt'. Deze vorm van extra informatie wordt hieronder nader toegelicht.

Iedere Z-waarde kan door oneindig veel combinaties van waarden voor de stochasten tot stand komen. Die combinaties zijn echter niet allemaal even waarschijnlijk. De combinatie van stochastwaarden met de grootste waarschijnlijkheid noemen we het illustratiepunt bij de beschouwde Z-waarde. De waarden van de hydraulische belasting parameters bij deze combinatie van stochastwaarden beschouwen we als onderdeel van het illustratiepunt.

Het is verleidelijk - maar onjuist! - om te denken dat het illustratiepunt dezelfde 'overschrijdingskans' heeft als de Z-waarde waarbij dit punt bepaald is en dat de condities in het punt daarom als 'maatgevend' beschouwd kunnen worden. Wel kunnen de condities in principe beschouwd worden als representatief voor condities die leiden tot het berekende terugkeerniveau van de Z-waarde.

Een afzonderlijke hydraulische parameter: terugkeerniveaus

De Z-functie kan zo worden ingesteld dat de Z-waarde gelijk is aan de lokale waterstand. In dat geval levert de probabilistische berekening de statistiek van deze lokale waterstand, anders gezegd: de terugkeerniveaus van de lokale waterstand.

Op dezelfde wijze kan de statistiek van de golfhoogte (of de golfperiode) bepaald worden door de Z-functie zo in te stellen dat de Z-waarde gelijk is aan de lokale golfhoogte (dan wel golfperiode).

Algemener geformuleerd:

Wanneer gekeken wordt naar één afzonderlijke hydraulische belasting parameter, dan kan de Z-functie zo ingesteld worden dat de Z-waarde gelijk is aan de beschouwde hydraulische belasting parameter. De probabilistische berekening levert dan de statistiek van deze hydraulische belasting parameter. Daarmee zijn de terugkeerniveaus van de belastingparameter bekend.

Terugkeerniveaus zijn een relatief robuust statistisch kenmerk.

Deze aanpak wordt veel toegepast voor de waterstand. Maar ook voor de golfhoogte wordt deze aanpak wel toegepast, bijvoorbeeld ten behoeve van een eenvoudige toets.

Een combinatie van hydraulische parameters: illustratiepunten

Voor bijvoorbeeld dijkbekledingen is weliswaar een faalmechanismemodel beschikbaar, maar dat is nog niet geschikt voor toepassing in een probabilistisch model. Daarom is een semi-probabilistische aanpak nodig. Er moet gewerkt worden met rekenwaarden voor de hydraulische belasting.

Voor dijkbekledingen is een rekenwaarde van alléén de waterstand of alléén de golfhoogte niet bruikbaar. Ook is het niet realistisch om afzonderlijk bepaalde rekenwaarden te combineren: de rekenwaarde van de waterstand hoort waarschijnlijk bij een andere gebeurtenis dan de rekenwaarde van de golfhoogte. Voor dijkbekledingen is een statistisch representatieve *combinatie* van waterstand en golfcondities nodig.

Het is niet mogelijk om een terugkeerniveau te bepalen van een combinatie van waterstand en golfcondities. In plaats daarvan wordt de volgende aanpak gevolgd om toch tot rekenwaarden te komen:

- Net als bij een afzonderlijke hydraulische parameter wordt een speciale Z-functie gekozen. In dit geval is echter de Z-waarde afhankelijk van een combinatie van twee of meer hydraulische belastingparameters (waterstand, golfhoogte, golfperiode, golfrichting). Deze Z-functie moet de rol van de hydraulische belastingparameters in het faalmechanismemodel zo goed mogelijk benaderen.
- Met een probabilistische berekening wordt het terugkeerniveau van de Z-waarde bepaald bij de gewenste terugkeertijd.
- De combinatie van waterstand en golfcondities in het illustratiepunt bij dit terugkeerniveau van de Z-waarde wordt beschouwd als statistisch representatief: de waarden van de hydraulische belastingparameters in dit illustratiepunt worden verder gebruikt als rekenwaarden in de semi-probabilistische berekening.

Algemener geformuleerd:

Voor diverse faalmechanismemodellen geldt a) dat de combinatie van hydraulische belasting parameters relevant is en b) dat het faalmechanismemodel nog niet geschikt is om als Z-functie gebruikt te worden in het probabilistisch model. Het is niet mogelijk om een terugkeerniveau te bepalen van een *combinatie* van belastingparameters. Dus wanneer niet een afzonderlijke belasting parameter maar juist de combinatie van de belastingparameters relevant is, dan moet een andere aanpak gevolgd worden dan beschreven in Een afzonderlijke hydraulische parameter: terugkeerniveaus. In de huidige rekenmethode wordt dan gewerkt met de combinatie van belastingparameters in het illustratiepunt. Dat illustratiepunt hoort dan bij het terugkeerniveau van een parameter Z, die volgt uit het gebruik van een Z-functie waarin de rol van de hydraulische belasting parameters een benadering vormt van hun rol in het werkelijke faalmechanismemodel. Zie ook Bepaling van het representatief verloop in de tijd.

Een illustratiepunt is een minder nauwkeurig en veel minder robuust statistisch kenmerk dan een terugkeerniveau. De geringere nauwkeurigheid hangt samen met het feit dat de gebruikte Z-functie slechts een benadering geeft van de rol van de hydraulische belasting parameters in het werkelijke faalmechanismemodel. De geringere robuustheid hangt samen met feit dat puur naar de meest waarschijnlijke combinatie van stochastwaarden wordt gezocht: de positie van een maximum. Het is best mogelijk dat de waarschijnlijkheid bij omliggende combinaties van stochastwaarden niet veel kleiner is, of dat de waarschijnlijkheid nevenpieken vertoont bij heel andere combinaties van stochastwaarden. In dergelijke gevallen kan de keuze van het illustratiepunt sterk veranderen bij kleine veranderingen in de invoer van de berekening.

Versie 1.0: 2 juli 2025

3. Statistiek

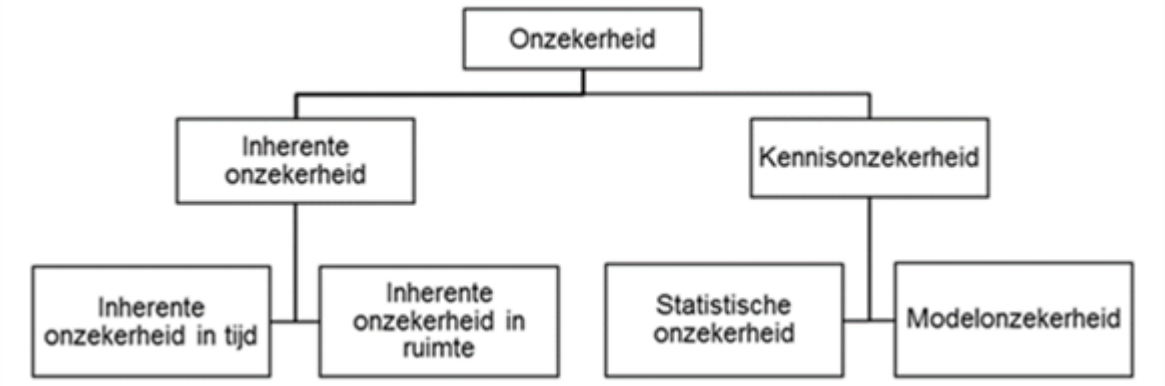
Statistiek van de basisstochasten

In dit artikel wordt beschreven wat onder inherente en statistische onzekerheden wordt verstaan en hoe hier, via statistiek, mee wordt omgegaan voor de berekening van hydraulische belastingen. Tevens wordt de betekenis en verdiscontering van modelonzekerheden toegelicht. De uitleg wordt gegeven op een niveau waarbij beperkte kennis van statistiek benodigd is. Achtergrondkennis is wel nodig wanneer ingegaan wordt op de specifieke statistiek van de basisstochasten van wind, rivierafvoer, zeewaterstand, meerpeil en de toestand van de stormvloedkering.

Bij de beoordeling of ontwerp van een primaire kering op basis van de overstromingskans moet rekening gehouden worden met alle relevante onzekerheden. Onzekerheden zijn onder te verdelen in een aantal soorten, zie Figuur 1. Hieronder gaan we nader in op deze soorten.

Inherente onzekerheid

Inherente onzekerheid wordt ook wel natuurlijke variabiliteit genoemd. Deze soort onzekerheid is het gevolg van de natuurlijke fluctuaties in tijd en/of ruimte van een natuurverschijnsel. Voorbeelden hiervan zijn de variatie in ruimte en tijd van de windsnelheid en de variatie in de tijd van de rivierafvoer. Deze van nature aanwezige onzekerheid kan niet worden gereduceerd door meer onderzoek te doen. Wel kan deze soort onzekerheid worden gemodelleerd door middel van kansverdelingen van variabelen in het probabilistische model (stochasten). In een kansverdeling kan bijvoorbeeld worden vastgelegd dat de kans dat op een KNMI-meetstation een windsnelheid van 30 m/s wordt overschreden kleiner is dan de kans dat een windsnelheid van 10 m/s wordt overschreden.



Figuur 1 Diverse soorten onzekerheid welke bij de beoordeling en ontwerp van primaire keringen in rekening worden gebracht (bron: Vrouwenvelder en Vrijling, 2001).

Kennisonzekerheid

Een andere soort onzekerheid is kennisonzekerheid (ook wel epistemische onzekerheid genoemd). Kennisonzekerheid binnen beoordeling en ontwerp wordt onderverdeeld in modelonzekerheid en statistische onzekerheid.

Modelonzekerheid

Modelonzekerheid ontstaat door het gebruik van vereenvoudigingen en benaderingen in de wiskundige modellen, die fysische processen beschrijven, zoals waterbeweging, golfopwekking en golfvoortplanting. Deze onzekerheid kan in theorie gereduceerd worden door betere wiskundige modellen te maken of nauwkeurigere modelinvoer te gebruiken. In de praktijk is dit vaak beperkt mogelijk, door gebrek aan metingen of beperkingen aan de praktisch acceptabele rekentijd van het model.

Statistische onzekerheid

Statistische onzekerheid is gerelateerd aan de onzekere schatting/keuze van de kansverdelingen die de basisstochasten moeten beschrijven. Dit type onzekerheid is het gevolg van een beperkt aantal gegevens of metingen. Metingen zijn doorgaans beschikbaar voor een periode van orde grootte 100 jaar. Als we op basis van zo'n meetreeks de kansverdeling willen bepalen tot een herhalingstijd van 100 jaar, dan is van nature al sprake van onzekerheid in de statistische beschrijving. In verband met de geldende normen voor de waterkeringen moet de statistiek echter beschreven worden voor herhalingstijden van orde grootte 10.000 jaar of meer, dus aanzienlijk groter dan waarvoor een meetreeks beschikbaar is. Dat betekent dat de statistische beschrijving een forse extrapolatie moet bevatten en dat brengt extra onzekerheid met zich mee.

De statistische onzekerheid kan in theorie gereduceerd worden, maar in de praktijk blijkt dit vaak lastig. Er kan namelijk elk jaar slechts één meetwaarde aan een reeks van jaarmaxima worden toegevoegd. Bovendien is het van belang dat de meetreeks homogeen is, dus geen trends of andere veranderingen bevat. Door bijvoorbeeld klimaatverandering en/of menselijke ingrepen is van een echt homogene meetreeks van 100 jaar of langer zelden sprake.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Basisstochasttype wind

In dit artikel worden de kansverdelingen van het basisstochasttype wind beschreven. Deze zijn per meetlocatie verschillend.

Wind is van belang voor windopzet langs de kust, op de meren en in de overgangsgebieden in het Benedenrivierengebied en de IJssel-Vecht delta. Daarnaast is wind van belang voor de generatie van golven. Golven zijn in alle watersystemen van belang. In de bepaling van de hydraulische belastingen speelt wind in bijna alle watersystemen een rol als basisstochast. Alleen bij watersystemen die gerelateerd zijn aan het mechanisme 'duinafslag' wordt niet de wind zelf gebruikt als stochast. In dat geval wordt de statistiek van de zeewaterstand gebruikt in plaats van de wind. De golven worden vervolgens bepaald via een deterministische relatie, die gekoppeld is aan de statistiek van de zeewaterstand.

De basisstochast wind is een snelle stochast, dat wil zeggen een stochast waarvan de waarde relatief snel fluctueert in de tijd. De statistische beschrijving beperkt zich tot de statistiek van het winterhalfjaar. Binnen het winterhalfjaar worden geen deelperioden onderscheiden.

Kansverdelingen

De basisstochast wind bestaat uit twee componenten: de windrichting en de windsnelheid. Naast de

kansverdelingen van deze componenten is de statistische onzekerheid van de windsnelheid afgeleid. In door het Rijk beschikbaar gestelde databases met hydraulische belastingen wordt gebruik gemaakt van de windstatistiek van meerdere stations. Een overzicht van deze stations is gegeven in de tabel. Afhankelijk van het beschouwde watersysteem worden windsectoren van 30 graden of 22,5 graden (12 resp. 16 windrichtingen) gebruikt. Voor een overzicht van de watersystemen, zie de tabel.

Tabel Windstations Hydra-Ring

Windstation	Watersysteem
Schiphol	Benedenrijn, Benedenmaas, IJsseldelta, Vechtdelta, IJsselmeer, Markermeer, Europoort
Deelen	Bovenrijn, Bovenmaas
West-Terschelling	Waddenzee-West, Waddenzee-Oost
De Kooy/Texelhors	Hollandse Kust Noord
IJmuiden	Hollandse Kust Midden
Hoek van Holland	Hollandse Kust Zuid
Vlissingen	Oosterschelde, Westerschelde

Voor elk van bovengenoemde stations is de directionele (per richtingssector) en omni-directionele (over alle richtingssectoren) kansverdeling van de windsnelheid, de kans op elk van de windrichtingssectoren (12 of 16) en de statistische onzekerheid gegeven.

Afleiding van kansverdelingen

Onderstaand geven we een samenvatting van de belangrijkste stappen in de afleiding van de statistieken en de aannames die daaraan ten grondslag liggen.

Statistiek windsnelheid

De windsnelheid is een continue stochast. De (windrichtingsafhankelijke) overschrijdingskansen van de windsnelheid worden gespecificeerd voor een referentie locatie. Doorgaans is dit een KNMI-meetstation. Voor veel watersystemen wordt de statistiek gebruikt die is afgeleid voor KNMI-meetstation Schiphol.

Het belastingmodel voor enkele watersystemen gaat uit van 16 windrichtingen van 22,5 graden in plaats van 12 richtingssectoren van 30 graden. Dit geldt voor de zoete wateren. De richtingsafhankelijke windstatistiek voor 16 sectoren is verkregen door middel van een omrekening

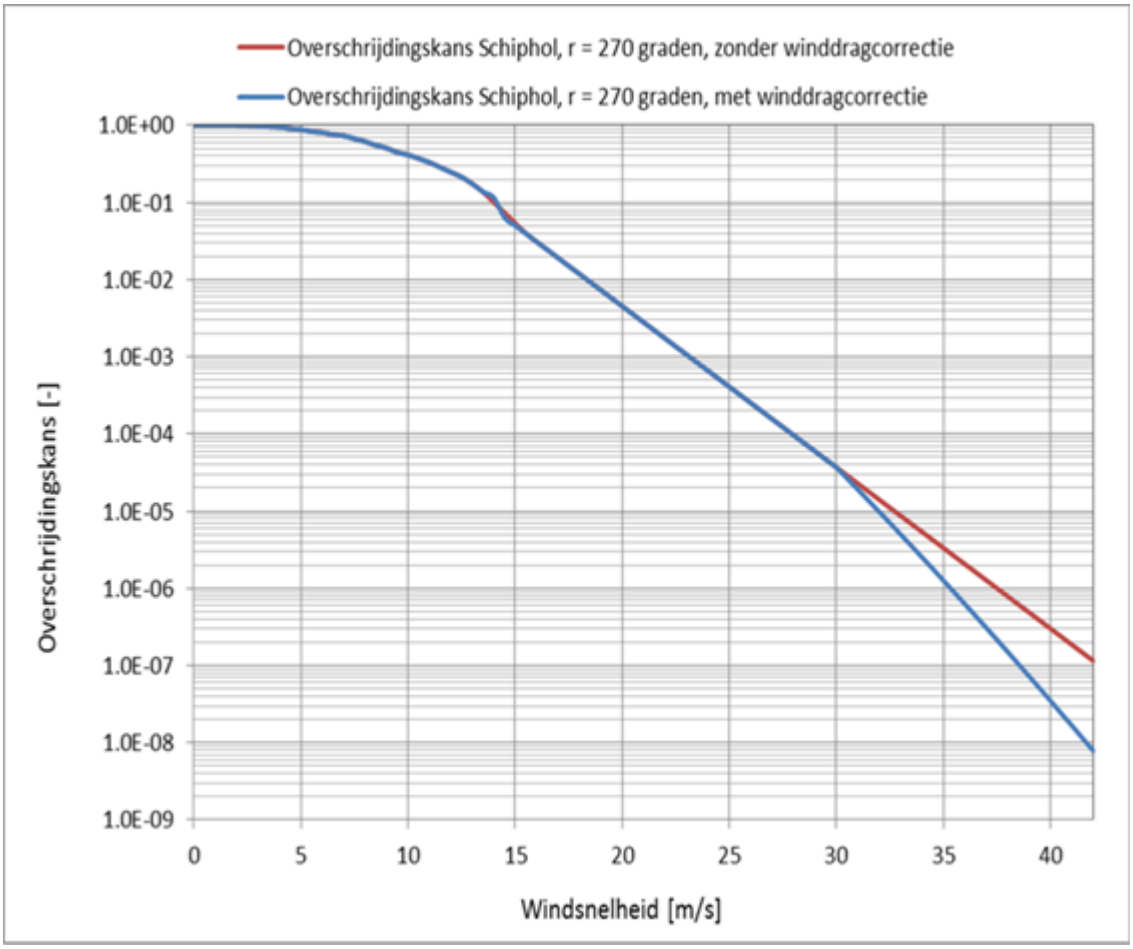
van 12 naar 16 sectoren. Hiervoor is de procedure gebruikt, zoals beschreven in [Geerse, 2010]. Het betreft de locaties Schiphol en Deelen.

Correctie windstatistiek voor winddrag

Golven groeien omdat wind momentum overdraagt aan het vrije wateroppervlak. Deze overdracht is groter naarmate de wrijvingskracht, oftewel de drag, die de wind op het grensvlak van atmosfeer en wateroppervlak ondervindt, groter is. De drag is groter naarmate het wateroppervlak ruwer is. In het algemeen geldt dat hoe hoger de windsnelheid, hoe groter de ruwheid. De momentum overdracht wordt gekarakteriseerd door de winddrag-coëfficiënt. Een veel gebruikte definitie hiervoor is die van [Wu, 1982]; deze gaat uit van een lineair verband tussen windsnelheid en ruwheid, waarbij de ruwheid toeneemt met toenemende windsnelheid. Volgens nieuwe inzichten moet er echter een bovengrens zijn aan de winddragcoëfficiënt. Het fysisch mechanisme dat hieraan ten grondslag ligt, is dat de wind onder extreme omstandigheden minder grip krijgt op het wateroppervlak door het afwaaien van de golftoppen. Hierdoor worden de dalen tussen individuele golven gevuld met schuim en waterdruppels. Deze effecten leiden tot een verzadiging en mogelijk zelfs een afname van de winddrag.

Vanwege de afvlakking of zelfs afname van de wind zullen voor extreme windsnelheden de windopzet en golfcondities, en daarmee de hydraulische belastingen, significant lager zijn dan wanneer wordt vastgehouden aan de lineaire toename van de winddrag met de windsnelheid. In de wetenschappelijke wereld is er op dit moment consensus dat de winddrag coëfficiënt niet verder toeneemt bij windsnelheden boven de 30 m/s.

De statistiek van de potentiële wind van Schiphol en Vlissingen is zodanig aangepast dat de overschrijdingskans van de open-water windsnelheid op basis van de oude formulering wordt toegekend aan de open-water windsnelheid, die wordt verkregen bij toepassing van de nieuwe formulering. Omdat de windstatistiek betrekking heeft op potentiële wind moet deze eerst naar open-water wind worden omgezet alvorens bovengenoemde stap uitgevoerd wordt. De relatie tussen potentiële windsnelheid en open-water windsnelheid bevat ook de winddrag. Ook hier is dus rekening gehouden met de begrenzing boven een open-water wind van 30 m/s. Zie voor meer details [Van Vledder, 2015]. De aanpassing leidt tot kleinere overschrijdingskansen van windsnelheden boven de 30 m/s. Ter illustratie toont Figuur 1 voor windrichting West (r = 270 graden) de overschrijdingskansen van de windsnelheid met én zonder winddrag-correctie. Te zien is dat de correctie alleen voor windsnelheden groter dan 30 m/s effect heeft op de overschrijdingskansen.

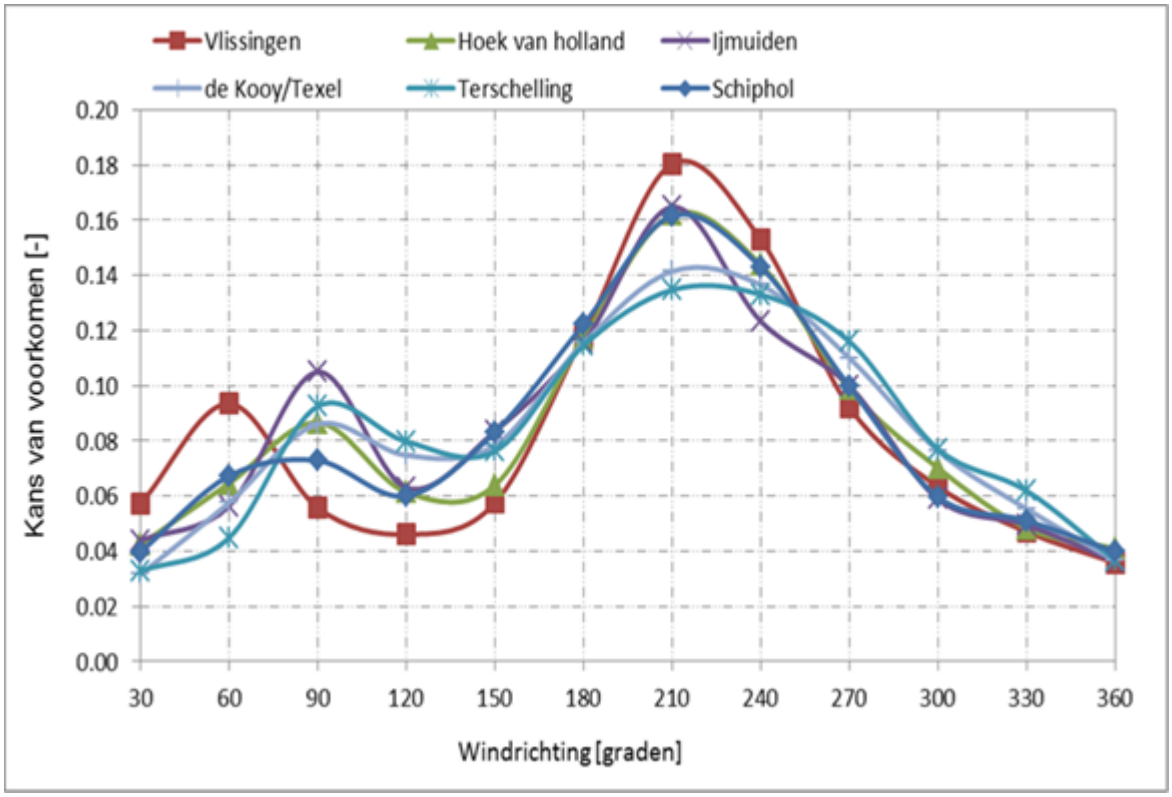


Figuur 1 Relatie windsnelheid en overschrijdingskans voor station Schiphol, 16 richtingssectoren, periode van 12 uur: met winddrag correctie (blauw) en zonder (rood).

Statistiek windrichting

De windrichting is behandeld als een discrete stochast: de stochast heeft in de rekenmethode een beperkt aantal mogelijke realisaties. In de zoete watersystemen wordt standaard uitgegaan van de 16 windrichtingen: 22.5, 45.0, ..., 360.0 graden ten opzichte van Noord. Voor de kustsystemen, i.e. Hollandse Kust en de estuaria wordt gewerkt met 12 windrichtingen: 30, 60, ..., 360 graden ten opzichte van Noord. Elk van deze windrichting-realisaties representeert de windrichtingsector rond de betreffende windrichting.

De windmetingen zoals gebruikt voor het afleiden van de statistiek van de windsnelheid, zijn ook gebruikt voor het schatten van de kansverdeling van de windrichting. Voor Schiphol en de kuststations Vlissingen, Hoek van Holland, IJmuiden, De Kooij/Texelhors en West-Terschelling zijn de kansverdelingen van de windrichting voor sectoren van 30 graden bepaald. Figuur 2 toont de kans op voorkomen van verschillende windrichtingen voor deze stations. Voor Schiphol en Deelen is de statistiek bepaald voor sectoren van 22.5 graad.

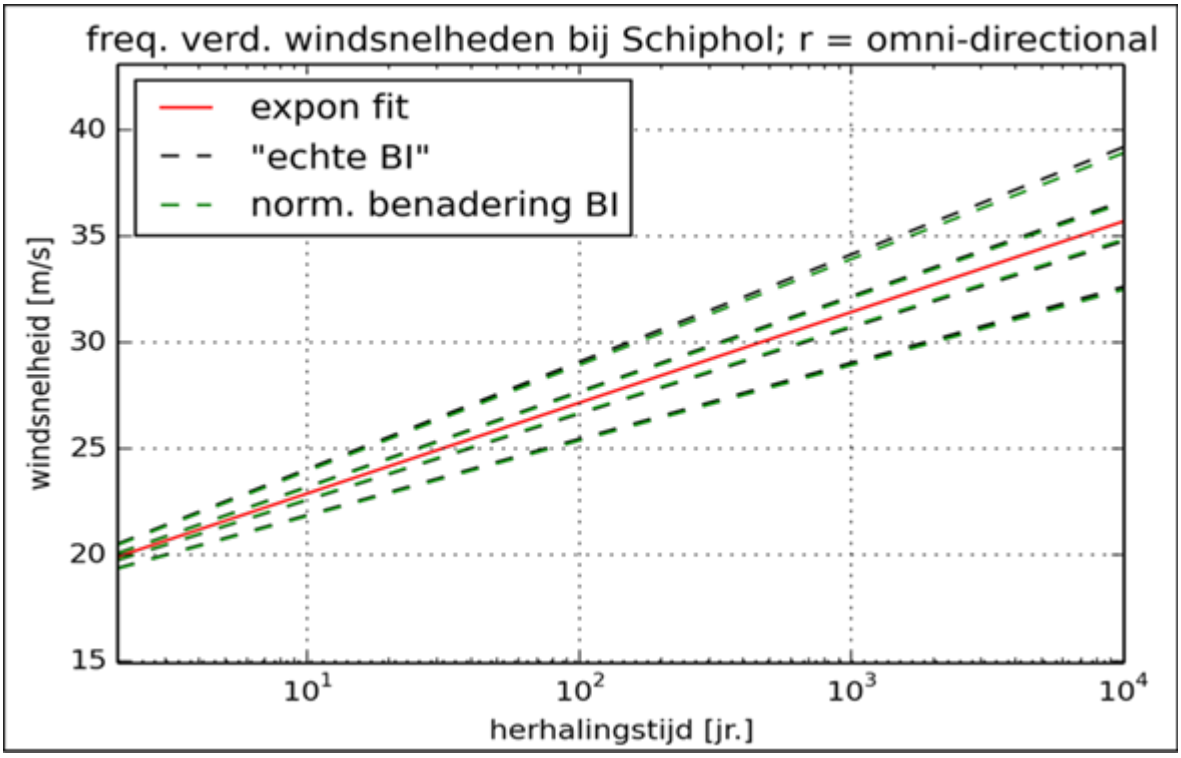


Figuur 2 Kansverdeling van de windrichting voor Schiphol en de 5 windstations die gebruikt worden voor de kustgebieden, sectoren van 30 graden.

Statistische onzekerheid windsnelheid

De statistiek van de windsnelheid bij verschillende stations is hierboven beschreven. Per station zijn zowel de omni-directionele als de richtingsafhankelijke frequentieverdelingen van de windsnelheid beschikbaar, inclusief de bijbehorende 95%-betrouwbaarheidsintervallen. Per windstation zijn schattingen gemaakt van de statistische onzekerheid.

De betrouwbaarheidsintervallen en percentielen van de windsnelheid zijn nagenoeg symmetrisch. Daarom is voor het schatten van de statistische onzekerheid gekozen voor de (symmetrische) normaalverdeling. De statistische onzekerheid is in Riskeer geïmplementeerd als een factor (multiplicatief model). Die factor heeft een gemiddelde 1 en een spreiding σ. Ter illustratie beschrijft Figuur 3 de windsnelheid bij Schiphol voor de omni-directionele situatie. De rode lijn beschrijft de fit van de exponentiële verdeling voor de windsnelheid zoals hierboven beschreven. De zwarte gestippelde lijnen representeren de percentielen (van boven naar beneden) 97,5%, 70%, 30% en 2,5% en de groene gestippelde lijnen de benaderingen door de normale verdeling met parameters. Deze zijn nagenoeg gelijk.



Figuur 3 Werklijn van de omni-directionele windsnelheid (rood) bij Schiphol, inclusief 2,5%, 30%, 70% en 95% percentielen (zwart) en hun schattingen door de normale verdeling met parameters (groen).

Enkele verkennende testberekeningen met Hydra-Ring hebben laten zien dat het meenemen van een richtingsafhankelijke statistische onzekerheid tot dezelfde resultaten leidt als enkel de omni-directionele statistische onzekerheid toegepast op alle richtingssectoren. Daarom wordt de statistische onzekerheid behorende bij de omni-directionele situatie ook gebruikt voor de richtingsafhankelijke windstatistiek.

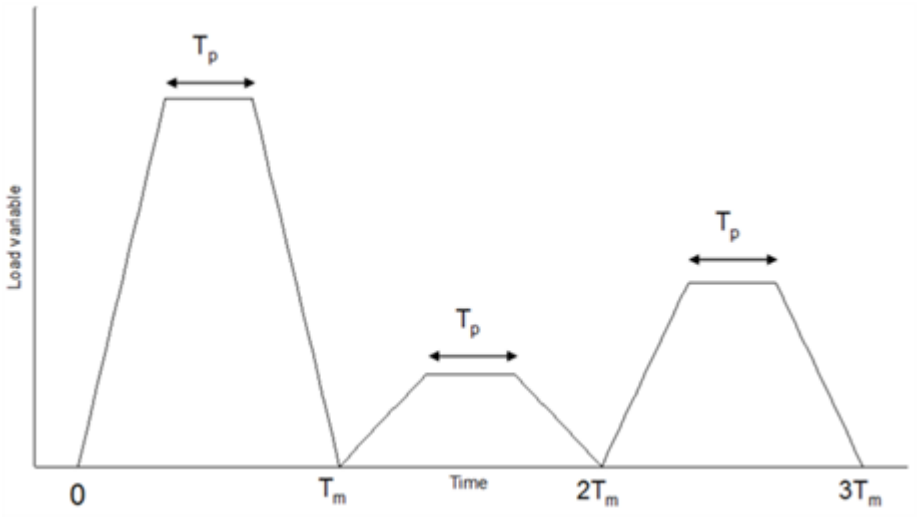
De afgeleide statistische onzekerheid van de windsnelheid is afhankelijk van de herhalingstijd. Verkennende berekeningen met Hydra-Ring hebben laten zien dat het verschil tussen een constante spreiding en een spreiding die afhankelijk is van de herhalingstijd op de hydraulische belasting slechts enkele millimeters is. Om die reden wordt voor het schatten van de statistische onzekerheid een constante spreiding gehanteerd. Hiervoor is de spreiding behorende bij het 10.000 jaar-kwantiel gebruikt.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Basisstochasttype rivierafvoer

In dit artikel wordt ingegaan op het basisstochasttype rivierafvoer en wat de basis vormt voor de bepaling van de statistiek van dit basisstochasttype. De statistische beschrijving beperkt zich tot de statistiek van het winterhalfjaar. Binnen het winterhalfjaar worden geen deelperioden onderscheiden.

Rivierafvoer is een trage stochast, dat wil zeggen de variatie in de tijd van de afvoer op een bepaald punt is klein ten opzichte van bijvoorbeeld de variatie in de tijd van wind. De stormduur is in de orde van 1 dag, de duur van een afvoergolf typische een maand.



Figuur 1 Modellering van de tijdvariatie van een afvoergolf.

De statistiek beschrijft de overschrijdingskans van de piek van de afvoer tijdens een hoogwatergolf. Naast de statistiek van de piekwaarden is de evolutie van de rivierafvoer in de tijd van belang. Dit noemen we de golfvorm. In het probabilistisch model beschrijven we het verloop in de tijd van de afvoergolven met trapezia met een basisduur T_m van 30 dagen en een topduur T_p, die deterministisch afhangt van de topwaarde (zie figuur 1). Onzekerheid rond het verloop van de afvoer voor en na de top binnen een afvoergolf wordt niet in de beschouwing betrokken. De totale duren en topduren zijn afhankelijk van het afvoerniveau en zijn weergegeven per riviertak in de achtergronddocumentatie bij de door het Rijk uitgegeven databases met hydraulische belastingen.

De statistische informatie voor de afvoerstochasten bestaat uit overschrijdingsfrequenties van topwaarden, de statistische onzekerheden rond de topwaarden en de deterministische beschrijving van de relatie tussen topwaarde en topduur.

In het beoordelings- en ontwerpinstrumentarium wordt gebruik gemaakt van de afvoerstatistiek van meerdere locaties. Een overzicht van deze locaties is gegeven in de tabel.

Tabel Gebruikte afvoerstations per watersysteem.

Locatie	Watersysteem
Lobith	Bovenrijn, Benedenrijn
Borgharen	Bovenmaas – bovenstrooms Boxmeer
Lith	Bovenmaas – benedentrooms Boxmeer, Benedenmaas
Olst	IJsseldelta

Dalfsen	Vechtdelta

De statistische onzekerheid wordt beschreven in de vorm van een toeslag op de afvoertopwaarde (additieve onzekerheidsmodellering), met gemiddelde van (veelal) o m^3/s en een spreiding die afhangt van de topwaarde.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Basisstochasttype zeewaterstand

Dit artikel gaat in op het basisstochasttype zeewaterstand en wat de basis vormt voor de bepaling van de statistiek van dit basisstochasttype. De beschrijving is op hoofdlijnen. Voor details wordt verwezen naar de artikelen voor de afzonderlijke kuststations.

De zeewaterstand wordt bepaald door getij en windopzet. Dit maakt dat zeewaterstand een snelle stochast is, dat wil zeggen dat de variatie in de tijd groot is, op de schaal van een storm. De stormduur is typisch 1-2 dagen, hetgeen kort is ten opzichte van de variatie in bijvoorbeeld afvoer en meerpeil met een typische duur van één maand.

De statistische informatie voor de zeewaterstandstochasten bestaat uit overschrijdingsfrequenties van topwaarden en de statistische onzekerheden rond de topwaarden. Het tijdsverloop van de zeewaterstand wordt gemodelleerd door superpositie van de stormopzet en het gemiddeld astronomisch getij. De stormopzet wordt weergegeven middels een trapeziumvorm met een locatie afhankelijke basisduur en topduur. Er wordt een vast faseverschil tussen stormopzet en getij gehanteerd, welke ook locatie afhankelijk is. Onzekerheid rond het verloop voor en na de top binnen een stormopzetpiek wordt niet in de beschouwing betrokken. De locatie afhankelijke parameters zijn weergegeven in de achtergronddocumentatie bij de door het Rijk uitgegeven databases met hydraulische belastingen.

Ten slotte is ook de correlatie tussen wind en zeewaterstand van belang. Dit wordt beschreven middels een correlatiemodel, welke in detail beschreven is in de achtergronddocumentatie bij de databases met de hydraulische belastingen.

Peilmeetstations

Voor de belastingmodellen voor de Waddenzee, Hollandse kust, Oosterschelde en Westerschelde is zeewaterstandstatistiek afgeleid voor 12 stations waarvoor waterstandsmetingen beschikbaar zijn. Het gaat om de stations Delfzijl, Den Helder, Den Oever, Hansweert, Harlingen, Hoek van Holland Huibertgat, IJmuiden, Lauwersoog, Oosterschelde (OS11), Terschelling West en Vlissingen.

Voor de belastingmodellen Benedenrivieren en Europoort wordt gebruik gemaakt van de statistiek voor station Maasmond. Onderstaande tabel geeft een overzicht van welke peilmeetstations worden gebruikt voor welke regio's, inclusief de ligging van de stations, gebaseerd op informatie uit [Chbab, 2017].

Tabel 1 Overzicht stations zeewaterstand.

Peilmeetstation	RDx [m]	RDy [m]	Regio's
Delfzijl	258000	594430	Waddenzee (Oost)
Huibertgat	221990	621330	Waddenzee (Oost/West)
Lauwersoog	208850	602790	Waddenzee (Oost/West)
Harlingen	156480	576550	Waddenzee (Oost/West), Hollandse kust (Noord)
Terschelling West	143870	597420	Waddenzee (Oost/West), Hollandse kust (Noord)
Den Oever	132030	549440	Waddenzee (West), Hollandse kust (Noord)
Den Helder	111850	553230	Waddenzee (West), Hollandse kust (Noord/Midden/Zuid)
IJmuiden	98430	497500	Hollandse kust (Noord/Midden/Zuid)
Hoek van Holland	67930	445000	Hollandse kust (Midden/Zuid)
Oosterschelde (OS11)	23013	407778	Hollandse kust (Zuid), Oosterschelde
Vlissingen	30480	385220	Hollandse kust (Zuid), Westerschelde
Hansweert	59050	384960	Westerschelde

Versie 1.0: 2 juli 2025

Basisstochasttype meerpeil

Dit artikel beschrijft het basisstochasttype meerpeil. De beschrijving is op hoofdlijnen. Voor details wordt verwezen naar de achtergronddocumenten bij de databases met de hydraulische belastingen.

Meerpeilstatistiek is benodigd voor het IJsselmeer, het Markermeer, de Veluwerandmeren, de Grevelingen en het Volkerak-Zoommeer. Het meerpeil is de ruimtelijk gemiddelde waterstand op het meer. Deze gemiddelde peilen zijn gereguleerd en nemen toe als de toevoer op het meer (bijv. als gevolg van toevoer door rivieren en gemalen) groter is dan de afvoercapaciteit (o.b.v. pompen en spuien). De statistiek beschrijft de overschrijdingskans van piek van de gemiddelde waterstand op het meer tijdens deze gebeurtenissen.

De toevoer vanaf de rivieren maakt dat de variatie in de tijd klein is ten opzichte van de variatie van waterstanden tijdens een storm. Daarom wordt het meerpeil een trage stochast genoemd, met een typische tijdschaal van één maand.

Het tijdsverloop van het meerpeil (de meerpeilgolven) wordt gemodelleerd door middel van zogeheten trapezia. Dat wil zeggen dat het meerpeil vanaf het begintijdstip lineair oploopt tot het piekmeerpeil, vervolgens gedurende de topduur op dit niveau blijft en daarna weer lineair afneemt tot het streefpeil. De totale tijdsduur, aangeduid als basisduur, verschilt per meer en dat geldt ook voor de topduur, die afhankelijk is van het piekmeerpeil.

Statistische onzekerheid

Er wordt expliciet rekening gehouden met de statistische onzekerheid van het meerpeil. De statistische onzekerheid vormt in het belastingmodel een aparte stochast, die wordt opgeteld bij het meerpeil exclusief onzekerheid (additief model). De kansverdeling van deze stochast wordt beschreven met een verschoven lognormale verdeling met gemiddelde (μ) gelijk aan nul en standaarddeviatie (σ) en verschuiving (ε) afhankelijk van het meerpeil. Deze zijn per meer verschillend. De waarden worden weergegeven in de achtergronddocumentatie bij de databases met hydraulische belastingen.

Correlatie met rivierafvoer

Er zijn twee watersystemen waar rekening gehouden moet worden met correlaties tussen meerpeil en rivierafvoer. Dat betreft de Vecht-IJsseldelta (correlatie IJsselmeerpeil met IJssel- en Vechtafvoer) en het Volkerak-Zoommeer (correlatie meerpeil met Rijnafvoer). In het laatste geval hangt de inzet van het Volkerak-Zoommeer voor waterberging namelijk mede af van de Rijnafvoer.

Bekend is dat hoge meerpeilen vaak samengaan met verhoogde afvoeren. Er is dus sprake van positieve correlatie. Er wordt gebruik gemaakt van een parametrisch model om de correlatie tussen afvoer en meerpeil te beschrijven. Voor details wordt verwezen naar de achtergronddocumentatie bij de databases met de hydraulische belastingen.

DEZY/DEVO

De afgelopen jaren zijn in opdracht van Rijkswaterstaat alternatieve modellen ontwikkeld om meerpeilstatistiek te kunnen bepalen. Het model DEZY voor het IJsselmeergebied (IJsselmeer, Markermeer en Noordzeekanaal / Amsterdam-Rijnkanaal) en het model DEVO voor het Volkerak-Zoommeer. Hierbij wordt niet uitgegaan van metingen, maar van een soortgelijke modelopzet als Riskeer / Hydra-NL. Dat wil zeggen dat de lokale belasting (in dit geval het meerpeil) wordt berekend

voor een groot aantal combinaties van basisstochasten en vervolgens wordt gecombineerd met de statistiek van deze basisstochasten.
In de ontwikkelde modellen voor het bepalen van meerpeilstatistiek wordt een groot aantal synthetische tijdreeksen geconstrueerd van (o.a.) de neerslag- en rivierafvoer, elk met een bijbehorende kans van optreden. Voor elk van deze tijdreeksen bepaalt het model het bijbehorende waterstandsverloop met behulp van een relatief eenvoudig reservoirmodel, waarin de kenmerken van de aanwezige spuisluizen en/of gemalen zijn opgenomen. De resulterende verlopen worden gewogen met de kans van optreden om de gevraagde meerpeilstatistiek te bepalen.

In eerste instantie zijn volgens deze modelopzet verschillende losstaande programma's ontwikkeld voor het IJsselmeergebied DEZY: Dagelijkse en Extreme waarden voor het Zuyderzee gebied [Geerse, 2015a] en het Volkerak-Zoommeer DEVO: Dagelijkse en Extreme waarden voor het Volkerak-Zoommeer; [Geerse, 2015b]. In 2020 is gestart met de integratie hiervan tot één rekenmodel, waarbij gekozen is om de naamgeving van het model voor het IJsselmeergebied te blijven gebruiken voor het geïntegreerde model. Hierin komt tot uitdrukking dat de statistiek die wordt afgeleid slaat op zowel de piekwaterstanden als de dagelijkse waterstanden.

Bovengenoemde modellen voor het IJsselmeergebied en het Volkerak-Zoommeer zijn ontwikkeld voor toepassing in diverse beleidsstudies. Hiermee kan niet alleen de actuele meerpeilstatistiek worden bepaald, maar ook het effect van klimaatverandering en bepaalde maatregelen (zoals plaatsing van pompen en/of het uitbreiden van spuicapaciteit) in beeld worden gebracht.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Basisstochasttype toestand van de stormvloedkering

Dit artikel beschrijft op hoofdlijnen de toestand van de stormvloedkeringen, die als stochasten aanwezig zijn in de belastingmodellen.

Stormvloedkeringen

Een stormvloedkering is een waterbouwkundige constructie die bij stormvloed of springtij moet verhinderen dat er grote hoeveelheden water de monding van een rivier of zeearm instromen en stroomopwaarts tot overstromingen leiden. Het gaat om beweegbare kunstwerken die sluiten bij extreem hoogwater.

Voor het keren van zeewater zijn tijdens de Deltawerken vier stormvloedkeringen aangelegd:

- de Hollandsche IJsselkering in de Hollandsche IJssel bij Krimpen aan den IJssel,
- de Hartelkering in het Hartelkanaal bij Spijkenisse,
- de Maeslantkering in de Nieuwe Waterweg bij Hoek van Holland, en
- de Oosterscheldekering langs de Oosterschelde.

Daarnaast is bij Ramspol de Ramspolkering aangelegd om de Vechtdelta af te sluiten van het Ketelmeer, waar hoge waterstanden kunnen ontstaan tijdens (noord)westerstormen door opwaaiing vanuit het IJsselmeer.

Bij de landelijke storm van 3 januari 2018 trad de nog niet eerder opgetreden situatie op dat alle vijf de Nederlandse keringen tijdens dezelfde stormgebeurtenis werden gesloten.



Figuur 1 De Hartelkering in het Hartelkanaal in gesloten stand bij een test tijdens de testfase. (Bron: https://beeldbank.rws.nl, Rijkswaterstaat)

Sluitcriteria

Het sluiten van een stormvloedkering kan plaats vinden op basis van waterstandsvoorspellingen of op basis van de optredende waterstand ter plaatse van de kering. De Europoortkering (Maeslant- en Hartelkering) en de Hollandsche IJsselkering sluiten op basis van waterstandsvoorspellingen en de Ramspolkering sluit op basis van de overschrijding van het sluitpeil in combinatie met de stromingsrichting, de sluiting is dan een peilsluiting. Bij sluitingen op basis van voorspellingen is de sluiting of een peilsluiting of een sluiting bij stroomkentering van eb naar vloed. Het type sluiting is dan afhankelijk van de omstandigheden. Zo sluit de Europoortkering bij hoge Rijnafvoeren op stroomkentering en bij lage afvoeren op peil. De Oosterscheldekering kan gesloten worden door een strategiesluiting of een noodsluiting. In het eerste geval sluit de Oosterscheldekering op basis van voorspellingen; in het tweede geval is de sluiting een peilsluiting.

Falen van een stormvloedkering

Er is sprake van falen als de kering niet sluit wanneer dit volgens het geldende sluitcriterium wel zou moeten. Hierbij wordt in het instrumentarium geen onderscheid gemaakt tussen 'niet sluiten', 'niet tijdig sluiten' of 'constructief falen na sluiten'. De belastingmodellen rekenen vrijwel allemaal met één faaloptie en die heeft een faalkans per sluitvraag.

De aanpak voor de Oosterscheldekering wijkt af van die van de andere stormvloedkering, vanwege het grote aantal schuiven (62). Om die reden worden er meerdere faalopties in het belastingmodel gehanteerd, en niet alleen maar de toestanden volledig functioneren en volledig falen. Deze faalopties variëren van het niet sluiten van één schuif tot het niet sluiten van alle 62 schuiven van de

Oosterscheldekering.
Voor de Europoortkering wordt gewerkt met een faalkans van 1/100 per sluitvraag. Dat betekent dat de kering in 99 van de 100 sluitvragen goed functioneert. Als de Europoortkering gemiddeld eens per 10 jaar sluit, dan mislukt de sluiting dus gemiddeld eens in de 1000 jaar.

Toestanden stormvloedkering in belastingmodel

De belastingmodellen werken met meerdere toestanden van de stormvloedkeringen. Vaak zijn het er twee, namelijk een open en een gesloten kering.

1. Bij een open kering is de kering (a) conform het sluitregime open of (b) is deze open terwijl deze conform het sluitregime gesloten zou moeten zijn.
2. Bij een gesloten kering is de kering (a) conform het sluitregime gesloten of (b) is deze gesloten terwijl deze conform het sluitregime open zou moeten zijn.

Bij sluiting van de Europoort- en Hollandsche IJsselkering wordt gebruik gemaakt van voorspelling. Het is dan mogelijk dat de kering gesloten is, terwijl de kering open zou moeten (bovenstaande situatie 2b). Dit is bijvoorbeeld als de voorspelling van de waterstand te ongunstig was en dat de daadwerkelijk opgetreden waterstand niet voor sluiting zou zorgen. Bij sluiting van de Ramspolkering wordt geen gebruik gemaakt van voorspellingen, maar van gemeten waterstanden. De situatie dat de kering gesloten is terwijl die open moet zijn (bovenstaande situatie 2b) is dan niet mogelijk.

Voor de Oosterscheldekering zijn er veel toestanden in het belastingmodel. Daar worden zowel de strategiesluiting als de noodsluiting gecombineerd met de aantallen falende schuiven. Als gewerkt wordt met 9 verschillende aantallen falende schuiven, bijvoorbeeld 0, 1, 2, 5, 10, 16, 31, 47 en 62, dan zijn er 18 toestanden van de Oosterscheldekering in het belastingmodel. Het aantal toestanden kan overigens ook als 17 geteld worden omdat de toestand bij een strategiesluiting met een geheel falende Oosterscheldekering (62 schuiven) dezelfde toestand is als een noodsluiting met een geheel falende Oosterscheldekering.

Versie 1.0: 2 juli 2025

4. Probabilistiek

Watersysteemtypen en belastingmodellen

Voor het beoordelen van de veiligheid van waterkeringen en het ontwerp van deze keringen is het van groot belang om kennis te hebben van de grootte van de hydraulische belastingen op de keringen. De grootte van de hydraulische belastingen kan verschillende oorzaken hebben. Op rivieren speelt de rivierafvoer een grote rol, langs de kust de wind. Dat maakt ook dat er niet één manier bestaat om hydraulische belastingen langs alle waterkeringen uit te rekenen, met andere woorden er bestaat niet één belastingmodel voor heel Nederland. In dit artikel wordt uitgelegd hoe een belastingmodel is gedefinieerd en hoe de belastingmodellen van verschillende watersystemen in Nederland er uit zien. Hieruit volgt de definitie van watersysteemtype.

Bij het beoordelen of ontwerpen van een waterkering is de berekening van de faalkans van een (primaire) waterkering, rekening houdend met verschillende faalmechanismen, van groot belang. Bij de berekening van de faalkans spelen de statistiek van de lokale hydraulische belastingen en de statistiek van de lokale sterkte van de kering (in relatie tot de diverse faalmechanismen) een belangrijke rol. Naast de bepaling van de faalkans biedt Riskeer ook de optie om de statistiek van alleen de lokale hydraulische belastingen te bepalen.

Helaas is er geen (meet-) informatie beschikbaar over de lokale waterstanden en golven bij alle

waterkeringen, waaruit de statistiek zou kunnen worden afgeleid. In de praktijk wordt daarom die statistiek afgeleid uit:

- de statistiek van de belangrijkste oorzaken van hoge lokale hydraulische belastingen (bedreigingen)
- de fysische relatie tussen die oorzaken van hoge belastingen en de lokale hydraulische belastingen

Voorbeelden van oorzaken van hoge belastingen zijn (hoge) afvoeren, windsnelheden en zeewaterstanden en zullen in het vervolg 'basisstochasten' worden genoemd. Hiervan wordt statistiek bepaald. Deze basisstochasten zijn gekoppeld aan een (referentie-)locatie of station. Voorbeelden van basisstochasten zijn de rivierafvoer bij Lobith en de wind bij Schiphol.

De wateren die een bedreiging kunnen vormen voor de primaire waterkeringen worden onderverdeeld in watersystemen (in Riskeer wordt dit 'regio' genoemd). Een watersysteem is een gebied waar de hydraulische belastingen bepaald worden door een specifieke combinatie van basisstochasten. Daarbij wordt onderscheid gemaakt tussen verschillende typen basisstochasten, zoals wind en afvoer, maar ook tussen basisstochasten van hetzelfde type, zoals afvoer bij Lobith en afvoer bij Borgharen. Figuur 1 geeft een grafische weergave van de indeling van de primaire waterkeringen naar de verschillende watersystemen. In Tabel 1 en 2 is een overzicht gegeven van de watersystemen uit Figuur 1 en hun basisstochastcombinaties.



Figuur 1 Overzichtskaart watersystemen. Bron Ministerie Infrastructuur en Milieu, 2016.

Tabel 1 Watersystemen en watersysteemtypen

Watersysteem	Watersysteemtype Bovenrivieren	Watersysteemtype Benedenrivieren	Watersysteemtype IJssel- en Vechtdelta	Watersysteemtype Meren	Watersysteemtype Kust-harde keringen	Watersysteemtype Oosterschelde	Watersysteemtype Duinen

Bovenrivieren (Rijn)	x					
Bovenrivieren (Maas)	x					
Limburgse Maas	x					
Benedenrivieren (Rijn)		x				
Benedenrivieren (Maas)		x				
Europoort		x				
IJsseldelta			x			
Vechtdelta			x			
IJsselmeer				x		
Markermeer				x		
Waddenzee Oost					x	
Waddenzee West					x	
Hollandse kust Noord					x	

Hollandse kust Midden			x			
Hollandse kust Zuid			x			
Westerschelde			x			
Oosterschelde				x		
Duinen						x
Veluwerandmeer		x				
Grevelingen		x				
Volkerak-Zoommeer						
Hollandse IJssel						
Diefdijk						

Er zijn vijf basisstochasttypes die in verschillende combinaties relevant zijn voor de verschillende watersystemen, namelijk:

- wind (snelheid en richting)
- rivierafvoer
- zeewaterstand
- meerpeil
- toestand van de stormvloedkering

Elk basisstochasttype heeft een specifieke definitie, die samenhangt met de focus op maxima, ook wel topwaarden genoemd. Zo is bijvoorbeeld de stochast 'zeewaterstand' gedefinieerd als het maximum van de waterstand over een getijperiode. De statistiek van de basisstochasten is gebaseerd op deze maxima.

Bij de basisstochasten is niet alleen de topwaarde zelf belang, maar ook de karakteristieke tijdschaal waarbinnen topwaarden zich voordoen. De topwaarden van wind en zeewaterstand worden bepaald door een storm in combinatie met het getij, en die fenomenen hebben een veel kortere duur dan een afvoergolf, die relevant is voor de topwaarden van afvoer en meerpeil. Wind en zeewaterstand noemen we daarom snelle stochasten, rivierafvoer en meerpeil trage stochasten.

Watersystemen met eenzelfde combinatie van basisstochasttypes, bijvoorbeeld de combinatie van wind en meerpeil voor zowel het IJsselmeer als het Markermeer, worden beschouwd als hetzelfde watersysteemtype. Omdat de meerpeilstatistiek van IJsselmeer verschilt van die van het Markermeer, zijn het wel verschillende watersystemen. In totaal onderscheiden we zeven watersysteemtypes:

- Watersysteemtype Bovenrivieren
- Watersysteemtype Benedenrivieren
- Watersysteem IJssel- en Vechtdelta
- Watersysteemtype Meren
- Watersysteemtype Kust
- Watersysteemtype Oosterschelde
- Watersysteemtype Duinen

De watersysteemtypes worden gekarakteriseerd door een specifieke combinatie van basisstochasttypes. In Tabel 2 is voor elk van de zeven watersysteemtypes aangegeven uit welke combinatie van basisstochasttypes deze bestaan. Naast een specifieke combinatie van basisstochasttypes heeft ieder watersysteemtype daarmee samenhangend een eigen type events (definitie van bepalende hoogwatergebeurtenissen) en een eigen belastingmodel in de probabilistische modellering. Merk op dat voor de Hollandse IJssel en het Volkerak-Zoommeer geen aparte watersysteemtypes zijn gedefinieerd. Beiden zijn gebaseerd op het belastingmodel van de Benedenrivieren. Daar zijn de basisstochasten meerpeil Volkerak-Zoommeer en het falen van de Hollandse IJsselkering aan toegevoegd voor de respectievelijke regio's.

Tabel 2 Watersysteemtypes en hun bijbehorende combinatie van basisstochasten

Basisstochasttype	**Watersysteemtype Bovenrivieren**	**Watersysteemtype Benedenrivieren**	**Watersysteemtype IJssel- en Vechtdelta**	**Watersysteemtype Meren**	**Watersysteemtype Kust-harde keringen**	**Watersysteemtype Oosterschelde**	**Watersysteemtype Duinen**
Wind (richting en snelheid)	x	x	x	x	x	x	
Afvoer	x	x	x				

Zeewaterstand	x			x	x	x
Meerpeil		x	x			
Toestand stormvloedkering(en)	x	x			x	

[1] Bij waterkeringen in open verbinding met de zee worden de lokale golfcondities mede bepaald door de golfcondities aan een open rand van het water. In de meeste gevallen wordt echter verondersteld dat deze golfcondities volledig gecorreleerd zijn aan de stochast wind. Alleen voor duinwaterkeringen worden naast de zeewaterstand in plaats van de wind juist de golven op de gebiedsrand als (oorzaak van de lokale) hydraulische belastingen beschouwd.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Watersysteemtype Bovenrivieren

Een watersysteem is gedefinieerd als een gebied waar de hydraulische belastingen bepaald worden door een specifieke combinatie van basisstochasten. Een watersysteemtype wordt gekarakteriseerd door een specifieke combinatie van basisstochasttypes. In dit artikel wordt ingegaan op de karakterisering van het watersysteemtype Bovenrivieren. Voor de bovenrivieren geldt dat de afvoeren hoge (of lage) waterstanden veroorzaken en dat de wind alleen van belang is voor het ontstaan van golven.

Voor watersystemen van het type Bovenrivieren geldt dus dat hydraulische belastingen worden bepaald door de combinatie van twee stochasttypen:

- afvoer
- wind

Waterstanden worden uitsluitend bepaald door de rivierafvoer, opgelegd aan de bovenrand van het watersysteem. De invloed van wind op de waterstand is verwaarloosbaar. De benedenrand van het watersysteem vormt de grens tussen wel en geen invloed van andere bedreigingen, zoals getij en stormopzet vanaf zee of stormopzet vanuit een meer. Toestromingen van beken en kanalen (laterale toestromingen) worden in rekening gebracht als lozing. De waarde van de lozing is direct gekoppeld aan de waarde van de afvoerstochast.

De wind veroorzaakt golven op de bovenrivieren. Er is sprake van relatief smalle wateren en daardoor ook van relatief korte strijklengtes. De golven zijn dan ook relatief klein.

De watersystemen binnen het watersysteemtype Bovenrivieren zijn:

- Rijntakken
- Maas

Versie 1.0: 2 juli 2025

Watersysteemtype Benedenrivieren

Een watersysteem is gedefinieerd als een gebied waar de hydraulische belastingen bepaald worden door een specifieke combinatie van basisstochasten. Een watersysteemtype wordt gekarakteriseerd door een specifieke combinatie van basisstochasttypes. In dit artikel wordt ingegaan op de karakterisering van het watersysteemtype 'Benedenrivieren', ofwel de delta waar zowel de invloed van rivierafvoer (bovenstrooms) als de waterstanden op zee (benedenstrooms) een rol spelen.

Hydraulische belastingen op waterkeringen bestaan uit (het verloop van) lokale waterstanden en golven. Bij waterkeringen in het benedenrivierengebied is de combinatie van de volgende basisstochasttypen bepalend voor de hydraulische belasting.

- Zeewaterstand
- Wind.
- Toestand van de stormvloedkering(en).
- Rivierafvoer.

Hoge waterstanden kunnen optreden door hoge rivierafvoeren, een hoge zeewaterstand, of een combinatie daartussen. De status van aanwezige stormvloedkeringen (open/gesloten) en het verloop van de wind zijn daarbij mede bepalend.

De mate van lokale opzet wordt bepaald door het verloop van de windrichting, het verloop van de windsnelheid, de strijklengte van de wind over het water en het verloop van de waterdiepte langs de strijklengte. Waterstanden op zee kunnen door de wind gedurende enkele uren tot dagen significant stijgen. Deze opzet komt bovenop het astronomisch getij (zee) en werkt stroomopwaarts door. Hoe hoger de rivierafvoer, hoe meer dit de stroomopwaartse invloed van zee beperkt. Andersom geldt dat bij lage rivierafvoeren de invloed van zee juist tot ver stroomopwaarts merkbaar is. Stijging van de zeespiegel zal dan ook effect hebben op de grootte van het overgangsgebied; de grens zal oostwaarts (Lek-Waal-Maas) verschuiven.

Om de waterstanden in de overgangsgebieden bij storm te beperken zijn diverse stormvloedkeringen gebouwd, zoals de Europoortkering in de Rijn-Maasdelta en de Hollandse IJsselkering. Hoe hoger de rivierafvoeren, hoe minder effectief deze stormvloedkeringen zijn, omdat bij gesloten stormvloedkeringen de bekkens erachter vollopen tot er sprake is van 'negatief verval'. Zodra de waterstand in het bekken hoger is dan 'buiten', opent de stormvloedkering weer. Bij hoge rivierafvoeren kan dat al snel na sluiten zijn.

De wind zorgt tijdens een storm ook voor golven. De hoogte van deze golven wordt door dezelfde factoren beïnvloed als de scheefstand, maar op een andere manier. Zo laat een grotere waterdiepte hogere golven toe, maar juist minder scheefstand.

Samengevat is het verloop van waterstanden en golven tijdens een hoogwater in het overgangsgebied afhankelijk van zowel de rivierafvoer, het verloop van waterstanden op zee (getij, wind) en de stormvloedkeringen. Een bepaalde waterstand op een bepaalde plek kan door vele combinaties worden veroorzaakt, wat de belangrijkste reden is om belastingen probabilistisch te berekenen.

Binnen het watersysteemtype Benedenrivieren vallen de volgende vier watersystemen:

1. Benedenrijn
2. Benedenmaas
3. Europoort

4. Hollandsche IJssel

Versie 1.0: 2 juli 2025

Watersysteemtype Meren

Een watersysteem is gedefinieerd als een gebied waar de hydraulische belastingen bepaald worden door een specifieke combinatie van basisstochasten. Een watersysteemtype wordt gekarakteriseerd door een specifieke combinatie van basisstochasttypes. In dit artikel wordt ingegaan op de karakterisering van het watersysteemtype 'Meren'.

Hydraulische belastingen op waterkeringen bestaan uit lokale waterstanden en golven. Bij waterkeringen die bescherming bieden tegen overstromingen vanuit meren is de combinatie van twee stochasttypen bepalend voor de hydraulische belasting:

- meerpeil, en
- wind.

De waterstand op een bepaalde locatie is mede afhankelijk van het meerpeil, de ruimtelijk gemiddelde waterstand. Deze waterstand kan door scheefstand als gevolg van opwaaiing door de wind tijdens een storm echter sterk afwijken van het meerpeil. Deze scheefstand wordt beïnvloed door factoren als de windrichting, de windsnelheid, de strijklengte van de wind over het water, het diepteverloop van het meer en of door het verloop van de oeverlijn opstuwing kan ontstaan. De lokale waterstand is dus afhankelijk van het meerpeil en de scheefstand.

De wind zorgt tijdens een storm ook voor golven. De hoogte van deze golven wordt door dezelfde factoren beïnvloed als de scheefstand, maar op een andere manier. Zo laat een grotere waterdiepte hogere golven toe, maar juist minder scheefstand.

De dynamiek van beide stochasten verschilt sterk. Het meerpeil is afhankelijk van de aan- en afvoer van water binnen het systeem (de waterbalans op het meer) en daarnaast van de omvang en bergingscapaciteit van het watersysteem. Als de aanvoer groter is dan de afvoer kan het meerpeil stijgen. Als gevolg van de afvoeren van rivieren die in de meren uitmonden kan de totale tijdsduur van pieken in meerpeilen enkele weken zijn. Wind daarentegen kan in enkele uren voor zowel scheefstand als golven zorgen.

Binnen het watersysteemtype Meren vallen de volgende watersystemen:

- IJsselmeer
- Markermeer
- Veluwerandmeren
- Grevelingenmeer
- Volkerak-Zoommeer

Afhankelijk van de specifieke locatie van (een onderdeel van) de waterkering kan binnen deze watersystemen onder extreme omstandigheden de maatgevende belasting juist voorkomen bij hoge meerpeilen en lage windsnelheden (zodat sprake is van langdurig verhoogde waterstanden met lage golven), of bij lage meerpeilen en hoge windsnelheden (zodat sprake is van kortdurig verhoogde waterstanden met hoge golven). Merk op dat de kans op het samenvallen van extreem hoge meerpeilen en extreme stormen relatief klein is omdat beide gebeurtenissen grotendeels ongecorreleerd zijn: in veruit de meeste gevallen is dus sprake van of het één of het ander.

Versie 1.0: 2 juli 2025

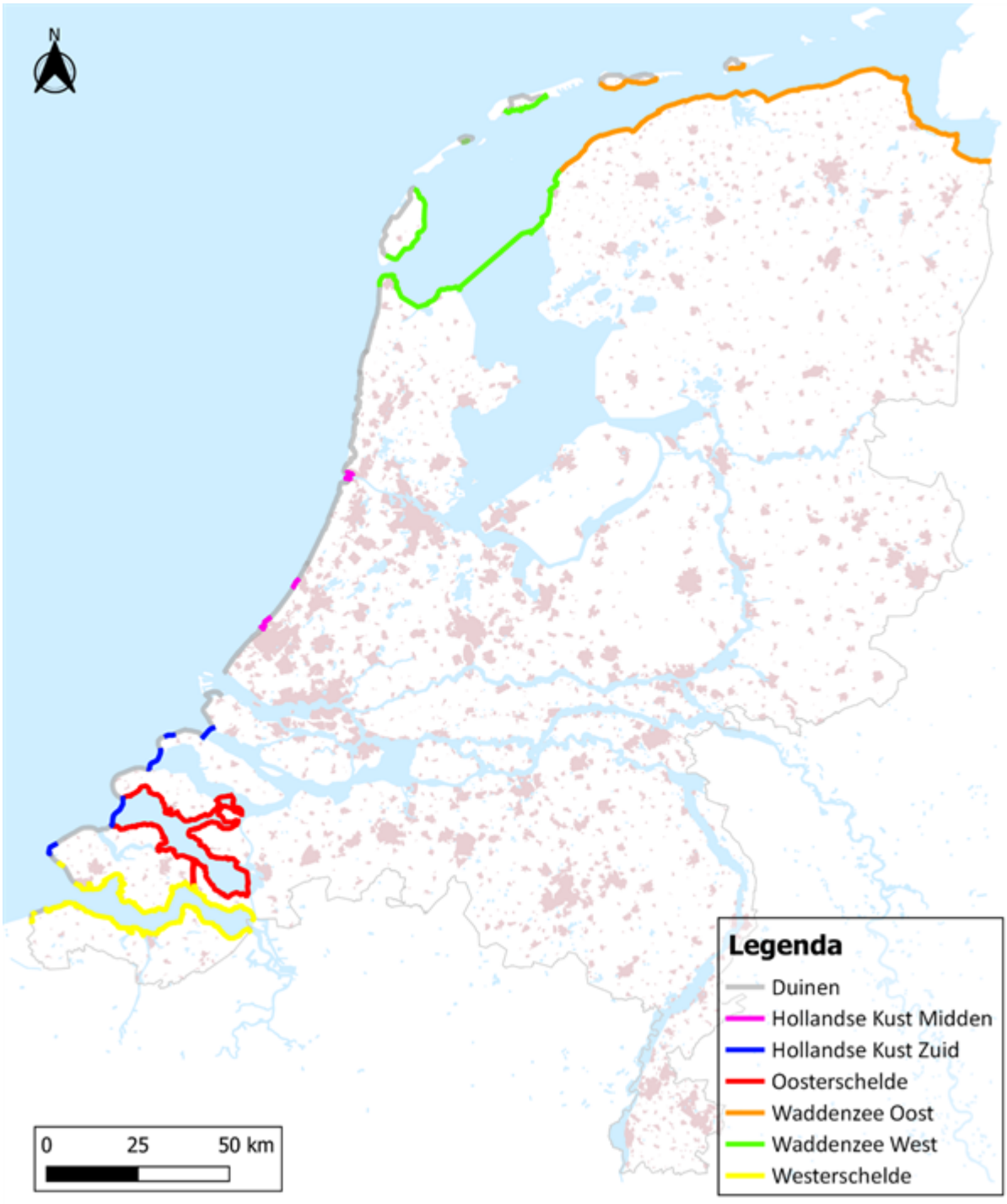
Watersysteemtype Kust

Een watersysteem is gedefinieerd als een gebied waar de hydraulische belastingen bepaald worden door een specifieke combinatie van basisstochasten. Watersystemen met eenzelfde combinatie van basisstochasttypes worden aangemerkt als een watersysteemtype. In dit artikel wordt ingegaan op de karakterisering van het watersysteemtype Kust.

Watersystemen

Onder het watersysteemtype Kust vallen de volgende watersystemen (zie ook Figuur 1):

- Waddenzee (West en Oost).
- Hollandse Kust (Noord, Midden en Zuid).
- Westerschelde.
- Oosterschelde.



Figuur 1 De verschillende watersystemen van het watersysteemtype Kust.

Basisstochasten

De hydraulische belastingen op waterkeringen in het watersysteemtype Kust bestaan uit lokale waterstanden en golven. In het kustgebied worden harde keringen (dijken/dammen en kunstwerken) en duinen aangetroffen. Voor duinen geldt in vergelijking met harde keringen een andere werkwijze om de hydraulische belastingen af te leiden en daarom een andere set basisstochasten.

Harde keringen

Voor harde keringen is de combinatie van de volgende twee stochasten bepalend voor de hydraulische belasting:

- de wind
- de lokale zeewaterstand (bestaand uit het astronomisch getij en opzet).

Beide stochasten zijn snelle stochasten (de waarde fluctueert relatief snel in de tijd) en zijn gecorreleerd. De wind is de primair opwekkende kracht achter golven en bestaat uit twee componenten: de windrichting en -snelheid. Behalve deze componenten wordt de hoogte van de golven ook beïnvloed door de waterdiepte.

De waterdiepte op een bepaalde locatie is afhankelijk van de lokale zeewaterstand. Ook de lokale zeewaterstand is afhankelijk van de wind. Door windopzet kan de waterstand binnen een watersysteem tijdens een storm dan ook (sterk) verschillen. De mate van windopzet is afhankelijk van de windrichting- en snelheid.

Duinen

Voor duinen is de combinatie van de volgende drie stochasten bepalend voor de hydraulische belasting:

- de zeewaterstand
- de significante golfhoogte
- de piekperiode.

De significante golfhoogte en piekperiode zijn geen onafhankelijke stochasten. De golfhoogte is namelijk afhankelijk van de zeewaterstand op diep water en de piekperiode is gekoppeld aan de golfhoogte, beide middels een deterministische relatie.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Watersysteemtype Oosterschelde

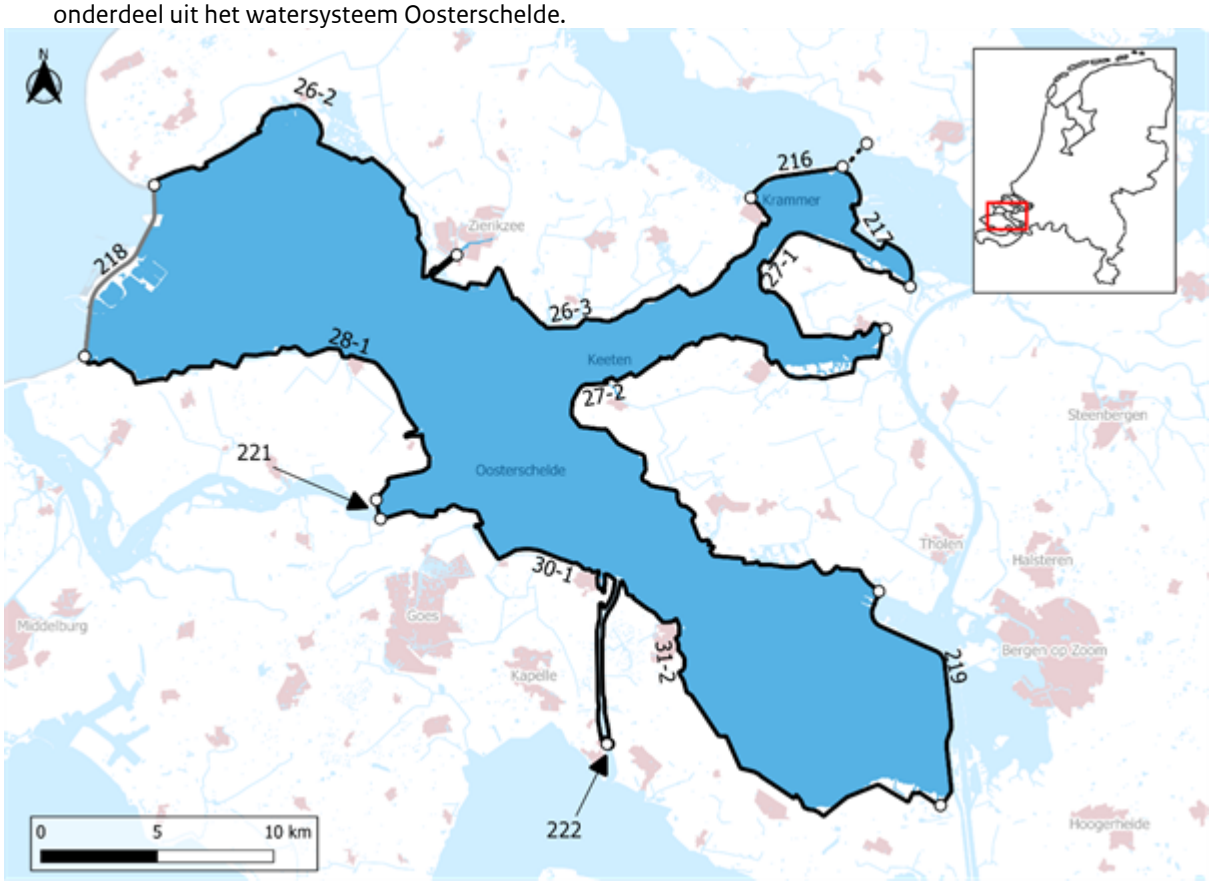
Een watersysteem is gedefinieerd als een gebied waar de hydraulische belastingen bepaald worden door een specifieke combinatie van basisstochasten. Watersystemen met eenzelfde combinatie van basisstochasttypes worden aangemerkt als een watersysteemtype. In dit artikel wordt het watersysteemtype Oosterschelde beschreven. Het artikel bevat een gebiedsbeschrijving, een beschrijving welke dijktrajecten onder dit watersysteem vallen en beschrijving van de fysieke werking van het watersysteem. Als onderdeel van de fysieke werking zijn de bedreigingen (basisstochasten) en is de werking van de Oosterscheldekering toegelicht.

Gebiedsbeschrijving

De Oosterschelde is een afsluitbare zeearm in het zuidwesten van Nederland, in de provincie Zeeland. De westelijke grens van het watersysteem Oosterschelde wordt gevormd door de Oosterscheldekering, die is aangelegd als onderdeel van de Deltawerken en wordt bij stormvloeden ingezet om de Oosterschelde af te sluiten van de Noordzee. De Oosterscheldekering is 9 km lang, waarvan 3 km afsluitbaar. Sluiting vindt plaats bij een verwachte waterstand van NAP+ 3,0 m die gemiddeld één keer per jaar plaatsvindt. Het sluitregime is nader toegelicht in onderstaande paragraaf over de Oosterscheldekering.

In het noordoosten is de Oosterschelde afgesloten van het Grevelingenmeer door middel van de Grevelingendam en afgesloten van het Volkerak-Zoommeer door middel van de Philipsdam. Verder scheidt de Zandkreekdam in het zuidwesten de Oosterschelde van het Veerse Meer en scheidt de Oesterdam in het oosten de Oosterschelde van het Volkerak-Zoommeer. Aan de zuidkant vormt het Kanaal door Zuid-Beveland een verbinding tussen de Westerschelde en de Oosterschelde. Het hele kanaal (tot aan de sluis bij Hansweert die de scheiding vormt tussen beide Scheldes) maakt daarmee

onderdeel uit het watersysteem Oosterschelde.



Figuur 1 Ligging water het watersysteem Oosterschelde inclusief de normtrajecten.

Bij de Grevelingendam vindt uitwisseling met het Grevelingenmeer plaats middels de Flakkeese Spuisluis. In de Philipsdam bevinden zich de Krammersluizen, waarmee volgens een calamiteitenregeling alleen water op de Oosterschelde wordt geloosd bij extreem hoge waterstanden op het Volkerak-Zoommeer (meerpeil boven NAP+0,5 m).

Daarnaast zijn diverse scheepvaartsluizen aanwezig, te weten: de Roompotsluis (Oosterscheldekering), de Grevelingensluis (Grevelingendam), de Zandkreeksluis (Zandkreekdam), sluis Hansweert (Kanaal door Zuid-Beveland) en de Bergsediepsluis (Oesterdam). In de Zandkreekdam bevindt zich ook de Katse Heule en zorgt voor peilbeheer op het Veerse Meer. Tenslotte lozen verschillende poldergemalen en uitwateringssluizen hun water op de Oosterschelde.

Dreigingsbronnen
Beschrijving fysica watersysteem

Hoge zeewaterstanden en hoge golfbelastingen vormen de belangrijkste bedreigingen voor de primaire waterkeringen langs de Oosterschelde. De zeewaterstand en golfbelastingen zijn daarbij weer sterk gecorreleerd met de windsnelheid. Extreme zeewaterstanden worden immers altijd veroorzaakt door stormopzet. Extreme hydraulische belastingen op de Oosterschelde treden hoofdzakelijk op bij stormen met west tot noordelijke windrichtingen (W, NW, N), die gepaard gaan met zeer hoge zeewaterstanden en windsnelheden. Omdat sprake is van een open verbinding met de Noordzee die alleen bij westelijk tot noordelijke stormen wordt afgesloten leidt een hoge afvoer op de regionale systemen of oostelijk georiënteerde stormen niet tot extreme belastingen op de keringen langs de Oosterschelde. Bij sterk verhoogde zeewaterstanden is het de bedoeling dat de Oosterscheldekering gesloten is (ofwel de kering is daadwerkelijk gesloten ofwel onbedoeld open omdat sprake is van niet sluiten, niet tijdig sluiten of constructief falen na sluiten). De maximale

waterstanden op de Oosterschelde worden daardoor beperkt, maar door scheefstand als gevolg van wind kunnen lokaal toch hoge waterstanden optreden. Aangezien noordelijk tot westelijke windrichtingen in de meeste gevallen maatgevend zijn, zullen de waterstanden het hoogst zijn in het zuidoostelijke deel van de Oosterschelde. Daarom is sprake van de volgende dreigingsbronnen (basisstochasten):

- Zeewaterstand
- Wind (snelheid en richting)
- Stormduur
- Toestand van de stormvloedkering (Aantal gesloten schuiven, type sluiting)

De zeewaterstand, windrichting en windsnelheid hebben vooral invloed op het sluiten van de Oosterschelde kering (of sprake is van sluiten en het type sluiting). Tevens speelt het faseverschil tussen de piek van de windopzet en de piek van het getij aan de buitenzijde van de Oosterscheldekering (bij meetstation OS11) een rol. Deze zou als stochast kunnen worden beschouwd. Voor de Oosterschelde is dit faseverschil aangenomen als vaste waarde van 320 minuten, en dus niet als stochast, waar bij de piek van het getij later valt dan de piek van de opzet [Stijnen, 2018]. Deze waarde is in het belastingmodel niet gevarieerd omdat het faseverschil in bijna alle gevallen 320 minuten bedraagt. De bijdrage van andere waarden voor het faseverschil is dus beperkt en om pragmatische redenen verwaarloosd [Geerse, 2016].

De windrichting en -snelheid bepalen de scheefstand in het bassin en zijn de twee meest relevante basisstochasten voor de Oosterschelde. Daarnaast is het functioneren van de Oosterscheldekering van groot belang voor de waterstanden op de Oosterschelde. In de belastingmodellen voor de Oosterschelde wordt rekening gehouden met (1) het type sluiting, (2) mogelijk falen of niet sluiten van de schuiven en (3) de stormduur op de Noordzee:

1. Bij sluiting kan sprake zijn van een reguliere 1-2-1 sluiting (ook wel strategiesluiting genoemd) of een noodsluiting. Bij een noodsluiting is sprake van een latere sluiting van de kering. Hierdoor is sprake van hogere waterstanden op de Oosterschelde in vergelijking met een reguliere 1-2-1 sluiting. Zie de onderstaande paragraaf over de Oosterscheldekering voor meer details over het sluitproces.
2. Bij het falen of niet sluiten van een of meerder schuiven in de kering zijn de waterstanden in de Oosterschelde hoger. Hoe meer schuiven gefaald zijn, hoe hoger de waterstanden op het bekken.
3. Bij een langere stormduur op de Noordzee moet de kering langer dicht blijven. Dit zorgt voor hogere waterstanden op de Oosterschelde.

In de waterstands- en golfmodellering is daarnaast rekening gehouden met transmissie door de Oosterscheldekering. Voor de waterstanden is dit stroming door openstaande schuiven en het lekdebiet door een gesloten kering. Voor de golfbelasting betreft het transmissie door openstaande schuiven en transmissie als gevolg van golfoverslag. Dit zijn echter geen stochasten. Wel is de werking van transmissie in de hydraulische modellen meegenomen.

De werking van de kering heeft naast effect op de piekwaterstand ook invloed op het tijdsverloop van waterstand op de Oosterschelde. In het Oosterschelde bassin is tijdens een open kering sprake van getijslag. Het verloop van de waterstand vertoond dan grote gelijkenis met het typische verloop langs de kust, namelijk een getij als basis met windopzet. Het sluiten van de kering beïnvloedt het verloop van de waterstand. Bij sluiten van de kering is sprake van een constante waterstand op eenzelfde niveau. Dit niveau en de duur hiervan is sterk afhankelijk van de omstandigheden en het sluiten van de kering (windsnelheid, zeewaterstand, stormduur, type sluiting et cetera).

Lokale belasting van de waterkeringen

Vanwege de ligging van de Oosterscheldekering is hoofdzakelijk sprake van lokaal (op het Oosterschelde bassin) opgewerkte golven die zorgen voor hydraulische belastingen op de waterkeringen langs het Oosterschelde bassin. Op de Oosterschelde vallen hoge waterstanden (ongeveer vanaf NAP+3,0 m à NAP+3,5 m) veelal samen met extreme golfbelastingen omdat beide worden gedreven door hoge windsnelheden (het omgekeerde hoeft niet te gelden – zie onderaan deze alinea). De maatgevende combinaties treden op bij wind uit het westen tot noorden. Bij deze windrichtingen zijn vooral voor waterkeringen met een westelijk tot noordelijke oriëntatie sprake van hoge waterstanden (die met name gedreven worden door wind uit westelijke richtingen) en is sprake van golfbelasting. Deze omstandigheden zijn relevant voor alle typen hydraulische belastingen (waterstand, golfoverslag en golfcondities voor bekledingen). In geval van golfbelasting lager op het talud (ongeveer tot NAP+3,0 m à NAP+3,5 m) kunnen deze veroorzaakt worden door een bredere range aan mogelijke windrichtingen. De waterstanden tot de genoemde niveaus zijn namelijk minder uitzonderlijk en kunnen door een brede range aan windrichtingen veroorzaakt worden. Dan is de windrichting maatgevend die zorgt voor de ongunstige belasting op de kering. In deze gevallen hoeven hoge golven dus niet samen te gaan met hoge waterstanden

Op bovenstaande beschrijving op hoofdlijnen zijn twee specifieke situatie uitgelicht:

1. Voor de waterkeringen die oostelijk georiënteerd zijn vallen de zwaarste golfbelastingen niet samen met de hoogste waterstanden. De meest extreme waterstanden kunnen alleen veroorzaakt worden door noordwestelijke windrichtingen. Bij waterkeringen met een oost tot zuidelijke oriëntatie is dan sprake meer van minder zware golfbelasting op de waterkering in vergelijking met andere delen van de Oosterschelde. Extreem hoge waterstanden treden dan dus niet op in combinatie met hoge golfbelastingen. Maatgevende situaties voor golfoverslag of belastingen op bekledingen bij hoge waterstandsniveaus worden dan veelal bepaald door windrichtingen uit een sterker noordelijk of zuidelijker component (bijvoorbeeld N, NNW of , ZZW). Bij deze windrichtingen is sprake van enige windopzet en enige golfslag. Bij de windrichtingen die voor golfaanval het ongunstige zijn (oostelijke wind op oostelijke kering) is geen sprake van opzet van de waterstand. Golfbelasting voor de bekledingen op de laagste niveau (ongeveer tot NAP+3,0 m) kan daarom wel sprake zijn van een maatgevende belasting die veroorzaakt wordt door oostelijke windrichtingen.
2. In de golfmodellering wordt rekening gehouden met golftransmissie door en over de Oosterscheldekering. Bij een gesloten kering is de transmissie beperkt tot transmissie door overslag over de kering. In geval van een open kering is ook sprake van transmissie van golfenergie door de openingen in de kering (afhankelijk van het aantal open schuiven in de kering). Bij de transmissieberekeningen wordt rekening gehouden met de stroming door de schuiven. Voor het grootste deel van de keringen langs de Oosterschelde is het aandeel van transmissie in de totale golfenergie beperkt omdat de bijdrage van lokale golfgroei op de Oosterschelde dan veelal dominant is over transmissie vanuit de Noordzee (gegeven de strijklengtes tot 40 km). Op de dijktracés direct achter de Oosterscheldekering (traject 26-2 en 28-1) heeft transmissie van de golven wel een belangrijke bijdrage aan de lokale golfhoogte. Transmissie van golfenergie door de openingen van de kering heeft hieraan de grootste bijdrage.

Oosterscheldekering

De Oosterscheldekering wordt bediend vanuit het ir. J.W. Topshuis, het bedieningsgebouw dat hoog boven de Noordzee op Neeltje Jans staat. Gemiddeld één keer per jaar moeten de schuiven omlaag wegens extreem hoge waterstand. Er zijn drie verschillende sluitstrategieën:

- Scenario/strategiesluiting (ook wel 1-2-1 scenario). Wanneer de waterstand NAP+2,75 m wordt verwacht, wordt het Beslisteam Sluiting Oosterscheldekering bijeengeroepen. Sluiting vindt plaats als de verwachte waterstand hoger is dan NAP +3,0 m aan de Noordzeezijde van de kering bij Roompot Buiten. In geval van sluiting wordt de 1-2-1 strategie gevolgd. De Oosterscheldekering wordt dan zodanig gesloten dat het hoogwater in de Oosterschelde een niveau bereikt van NAP +1,0 m bij Stavenisse. Na de eerste stormpiek gaat bij kentering (waterstand op de Noordzee en Oosterschelde ongeveer gelijk) de kering weer open. Bij een eventuele tweede piek (vaak een tweede getijpiek binnen dezelfde storm) met een verwachte waterstand hoger dan NAP +3,0 m sluit de OSK op een zodanig moment dat de waterstand in de Oosterschelde een niveau bereikt van NAP +2,0 m bij Stavenisse. Bij kentering gaat de kering opnieuw open en sluit eventueel bij een 3e stormpiek, waarbij de maximale waterstand in de Oosterschelde gelijk is aan NAP +1,0 m bij Stavenisse. De strategie heeft als doel de dijken niet langdurig op één niveau door de golven te belasten.

- Bemande driemetersluiting. Een bemande driemetersluiting vindt plaats wanneer de verwachte waterstand bij Roompot Buiten onder NAP +3,0 m blijft, maar er gedurende de storm blijkt dat de gemeten waterstanden hoger komen dan NAP +3,0 m. Er is dan een aantal minuten tijd om de kering handmatig te sluiten, dit omdat het NSTA (noodsluitsysteem) de kering pas sluit als de gemiddelde gemeten waterstand over de afgelopen tien minuten hoger ligt dan NAP +3,0 m. Door deze wijze van sluiten behoudt het beslissingsteam de controle over het moment van weer openen van de kering, dit in tegenstelling tot een noodsluiting via het NSTA, die dan ook het moment van openen bepaalt.

- Onbemande driemetersluiting (noodsluiting). Een onbemande driemetersluiting vindt plaats wanneer de gemeten waterstand bij Roompot Buiten boven de NAP +3,0 m komt en er niet handmatig wordt gesloten. Het NSTA sluit dan automatisch de kering en zal deze weer openen op het moment dat de gemeten waterstand bij Roompot Buiten lager is dan bij Roompot Binnen. Het NSTA dient als veiligheidsvoorziening voor falen door of uitblijven van menselijk handelen of een foutieve waterstandsverwachting. Een verschil tussen de bemande en onbemande driemetersluiting is dat er bij die laatste ook sprake kan zijn van een noodsluiting bij zeer extreme omstandigheden, bijvoorbeeld doordat het bedienend personeel de Oosterscheldekering niet kan bereiken.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Watersysteemtype IJssel-Vecht delta

Een watersysteem is gedefinieerd als een gebied waar de hydraulische belastingen bepaald worden door een specifieke combinatie van basisstochasten. Een watersysteemtype wordt gekarakteriseerd door een specifieke combinatie van basisstochasttypes. In dit artikel wordt ingegaan op de karakterisering van het watersysteemtype ‘IJssel-Vecht delta’, ofwel de delta waar zowel de invloed van rivierafvoer (bovenstrooms) als de waterstanden op het IJsselmeer/Ketelmeer/Vossemeer (benedenstrooms) een rol spelen.

Hydraulische belastingen op waterkeringen bestaan uit (het verloop van) lokale waterstanden en golven. Bij waterkeringen in de IJssel-Vecht delta is de combinatie van de volgende basisstochasttypen bepalend voor de hydraulische belasting.

- Meerpeil
- Wind
- Toestand van de stormvloedkering

- Rivierafvoer

In de IJssel-Vecht delta kunnen hoge waterstanden optreden door hoge rivierafvoeren, een hoog meerpeil, of een combinatie daartussen. De status van de aanwezige stormvloedkering (open/gesloten) en het verloop van de wind zijn daarbij mede bepalend.

De mate van lokale opzet wordt bepaald door het verloop van de windrichting, het verloop van de windsnelheid, de strijklengte van de wind over het water en het verloop van de waterdiepte langs de strijklengte. Waterstanden kunnen door de wind gedurende enkele uren tot dagen significant stijgen. Deze opzet komt bovenop het meerpeil en werkt stroomopwaarts door. Hoe hoger de rivierafvoer, hoe meer dit de stroomopwaartse invloed van het meer beperkt. Andersom geldt dat bij lage rivierafvoeren de invloed van het meer juist tot ver stroomopwaarts merkbaar is. Stijging van het gemiddeld meerpeil zal dan ook effect hebben op de grootte van het overgangsgebied; de grens zal oostwaarts zuidwaarts op de IJssel verschuiven.

Om de waterstanden in de overgangsgebieden bij storm te beperken is de Ramspolkering in de IJssel-Vechtdelta gebouwd. Hoe hoger de rivierafvoeren, hoe minder effectief deze stormvloedkering is, omdat bij gesloten stormvloedkeringen de bekkens erachter vollopen tot er sprake is van ‘negatief verval’. Zodra de waterstand in het bekken hoger is dan ‘buiten’, opent de stormvloedkering weer. Bij hoge rivierafvoeren kan dat al snel na sluiten zijn.

De wind zorgt tijdens een storm ook voor golven. De hoogte van deze golven wordt door dezelfde factoren beïnvloed als de scheefstand, maar op een andere manier. Zo laat een grotere waterdiepte hogere golven toe, maar juist minder scheefstand.

Samengevat is het verloop van waterstanden en golven tijdens een hoogwater in de IJssel-Vecht delta afhankelijk van zowel de rivierafvoer, het verloop van waterstanden op het IJsselmeer/Ketelmeer/Vossemeer (meerpeil, wind) en de stormvloedkering. Een bepaalde waterstand op een bepaalde plek kan door vele combinaties worden veroorzaakt, wat de belangrijkste reden is om belastingen probabilistisch te berekenen.

Binnen het watersysteemtype IJssel-Vecht delta vallen de volgende twee watersystemen:

1. IJsseldelta
2. Vechtdelta

Versie 1.0: 2 juli 2025

Literatuurverwijzingen

Literatuur

Waal, J.P. de. Basisrapport WBI 2017. Versie 1.2. Deltares rapport 11202225-012-0001, 13 december 2018.

Chbab, E.H. *Achtergrondrapport Hydraulische Belastingen. Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium 2017.* Deltares concept rapport 1230087-008-HYE-000, augustus 2016.

Waal, J.P. de, J. Stijnen en P. van den Bosch. *PBO HB data stappenplan*. Deltares, HKV en Arcadis rapport 11205758-014-GEO-0001, augustus 2020.

De Waal, J.P. *Basisrapport WBI 2017 : Versie 1.2*. Deltares, rapport 11202225-012-0001, december 2018.

Literatuur

Waal, J.P. de. *Deltamodel 1.0. Achtergronden waterveiligheidsbeschouwingen.* Deltares rapport 1205954-001-ZWS-0003, 1 juni 2010.

Deltares. *Aftoppen extreme piekafvoeren Rijn door bovenstroomse overstromingen in Duitsland*. 2012.

Deltares. *Klimaat in de 21e eeuw. Vier scenario's voor Nederland*. KNMI brochure. 2006.

Deltares. *Sectorale ontwikkelingen watervraag*. 2013.

IPCC. *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, 2007.

KNMI, CPB, PBL en LEI. *Deltascenario's voor 2050 en 2100 : nadere uitwerking 2012-2013.* 2013.

Können, G.P. *Climate scenarios for impact studies in the Netherlands update WB21*. KNMI, mei 2001.

PBL, Deltares, LEI, KNMI en CPB. Deltascenario's : verkenning van mogelijke fysieke en sociaaleconomische ontwikkelingen in de 21ste eeuw op basis van KNMI'06 en WLO-scenario's, voor gebruik in het Deltaprogramma 2011 - 2012 (1204151-002 ZWS). 2012.

PBL en LEI. *Regionalisering en kwantificering verhaallijnen Deltascenario's 2012.* 2012.

Van Dorsser, J.C.M. *Scheepvaartscenario's voor Deltaprogramma – 100 jaar later.* 2012.

Bottema, M. *Modelonzekerheden Bretschneider bovenrivieren*. Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving (RWS WVL), maart 2015.

Chbab, E.H. en J. Groeneweg. *Modelonzekerheden belastingen : Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium WBI-2017 ; Versie 8*. Deltares, rapport 1209433-008-HYE-0007, juni 2017.

Smale, A.J. *Correlation between model uncertainties wave height and wave period*. Deltares, rapport 11202225-003-GEO-0002, november 2018.

Van Nieuwkoop, J. *Kwantificering van de onzekerheden van het gebruik van Bretschneider in het bovenrivierengebied*. Deltares, rapport 1209433-007-HYE-0007, maart 2015.

Groeneweg, J. *Inconsistentie in modelonzekerheden golfcondities.* Deltares, september 2018.

Vledder, G.Ph., van. *Stappenplan aanpassing hydraulische Randvoorwaarden op basis van nieuwe inzichten winddrag*. 2017.

Waal, J.P. de. *Windmodellering voor bepaling waterstanden en golven; Een analyse van de bouwstenen*. RIZA werkdocument 2003.118X, juli 2003.

Waal, J.P. de. *Wind input to be used in HBC assessment*. Deltares report 1200103-027-HYE, februari 2010.

Waal, J.P. de. *Consistentiecheck windinformatie in hydraulische belastingen BOI*. Deltares rapport 11206818-026-GEO-0001, 28 april 2021.

Literatuurlijst

Camarena Calderon, A.., A. Smale en J. van Nieuwkoop. *Input database for the Bretschneider wave calculations for narrow river areas.* Deltares rapport 1209433-000-HYE-0013. December 2015.

Duits, M. *Hydra-NL – Gebruikershandleiding – versie 2.7.* HKV rapport PR4022.10. September 2019.

TAW. *Leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken. Deel 1 - Bovenrivierengebied.* Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen. Staatsuitgeverij. 's-Gravenhage, 1985.

Rijkswaterstaat. *Rekenregels voor waterbouwkundig ontwerpen.* Rijkswaterstaat Directie Sluizen en Stuwen, rapport, mei 1990.

Literatuurlijst

Vrouwenvelder, A.C.W.M. en J.K. Vrijling. *Kansen, onzekerheden en hun interpretatie*. Memorandum 2000-CON-DYN/M2107. Delft, 31 januari 2001.

Literatuurlijst

Caires, S. *Extreme wind statistics for the Hydraulic Boundary Conditions for the Dutchprimary water defences*. SBW-Belastingen: Phase 2 of subproject "Wind Modelling". Deltares.rapport 1200264-005, September 2009 .

Chbab, H. en H. de Waal. *Achtergrondrapport Hydraulische Belastingen.* Deltares rapport 1230087-008-HYE-0001-v4, september 2017.

Geerse, C.P.M. en J.W. Verkaik. *Effect nieuwe windstatistiek op toetspeilen en benodigde kruinhoogten.* HKV rapport PR1601.10, februari 2010.

Mood, A. M., F.A. Graybill en D.C. Boes. *Introduction to the theory of statistics*. McGraw-Hill, 1974.

Vledder, G.Ph. van. *Stappenplan aanpassing hydraulische randvoorwaarden op basis van nieuwe inzichten winddrag.* Van Vledder Consulting memo vc55m1r4, 10 december 2015.

Wu, J. *Wind-stress coefficients over sea surface from breeze to hurricane*. Journal of Geophysical Research 87 (C12), 9704–9706 (1987).

Chbab, H. en H. de Waal. *Achtergrondrapport Hydraulische Belastingen*. Deltares rapport 1230087-008-HYE-0001-v4, september 2017.

Literatuurlijst

Geerse, C. en B. Kuijper. Probabilistisch model frequentielijnen IJsselmeergebied; Hoofdrapport van model DEZY. HKV lijn in water, rapport PR3013.10, mei 2015 (a).

Geerse, C. en D. van Haaren. Probabilistisch model meerpeilstatistiek Volkerak-Zoommeer; Hoofdrapport model DEVO. HKV lijn in water, rapport PR3015.10, augustus 2015 (b).

Geerse, C. Werkwijze uitintegreren onzekerheden basisstochasten voor Hydra-NL; Afvoeren, meerpeilen, zeewaterstanden en windsnelheden. HKV lijn in water, rapport 3216.10, december 2015.

Geerse, C. en K. Wojciechowska. Betrouwbaarheidsintervallen voor kwantielen van de overschrijdingsfrequentie; Toepassing voor kuststations en IJsselmeergebied. HKV lijn in water, memorandum PR2829.20, juli 2014.

Chbab, E.H. *Basisstochasten WTI-2017 : Statistiek en statistische onzekerheid*. Deltares, rapport 1209433-012-HYE-0007, juni 2017.

Geerse, C.P.M. en J.W. Stijnen. *Belastingmodel Oosterschelde WBI2017*. HKV, rapport PR3262.10, juni 2016.

Stijnen, J.W., R.J. Daggenvoorde, C.P.M. Geerse en C. Gautier. *Productieberekeningen hydraulica : Controles waterbeweging & vullen HR-databases Oosterschelde*. HKV en Deltares, rapport PR3556.10, januari 2018.
