



RWS INFORMATIE

Basisstochasten BOI2023

Statistiek en statistische onzekerheid

Datum	juli 2026
Versie	2.1
Status	DEFINITIEF

Colofon

Project	Basisstochasten BOI2023
Uitgegeven door	Rijkswaterstaat WVL
Datum	juli 2026
Versie	2.1
Status	DEFINITIEF
Projectnummer HKV	PR5612.10

Versiebeheer

1.0	3 april 2026	Versie na interne review (door Jan Stijnen)
1.1	26 juni 2026	Versie na externe review (Rijkswaterstaat)
2.0	1 juli 2026	Definitieve versie
2.1	13 juli 2026	Aangepaste faalkans Hollandsche IJsselkering

Auteurs

Bastiaan Kuijper	HKV lijn in water
Jochem Caspers	HKV lijn in water



Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat



Samenvatting

Dit rapport beschrijft de statistische gegevens die ten grondslag liggen aan de hydraulische belastingen voor de beoordeling en het ontwerp van primaire waterkeringen in Nederland. Het vormt een bouwsteen voor de hydraulische belastingen die binnen het nieuwe Beoordelings- en ontwerpinstrumentarium van 2023 (BOI2023) zijn bepaald en beschikbaar gesteld aan waterbeheerders voor de beoordeling en het ontwerp van hun primaire waterkeringen. De gerapporteerde statistieken geven aan hoe groot de kans voor een bepaald zichtjaar is op extreme waarden van bepaalde basisstochasten zoals rivierafvoer, zeewaterstand, meerpeil en windsnelheid. Deze stochasten bepalen gezamenlijk de hydraulische belasting op dijken, kades en andere waterkeringen.

Ten opzichte van de vorige beoordelingsronde (LBO-1) is de meeste statistiek geactualiseerd. Het zichtjaar voor de beoordeling is opgeschoven van 2023 naar 2035. Voor de rivierafvoer van de Rijntakken en de Maas is deze opnieuw afgeleid met een verbeterd model dat rekening houdt met overstromingen in Duitsland en België. Bij extreme situaties vallen de berekende afvoeren daardoor lager uit dan voorheen. Voor het IJsselmeer en Markermeer liggen de meerpeilen ook wat lager, doordat rekening is gehouden met de uitbreiding van de spui- en pompcapaciteit bij de Afsluitdijk die momenteel wordt gerealiseerd. Voor de zeewaterstanden langs de kust is voor het eerst gebruik gemaakt van een combinatie van ruim 8.000 jaar gesimuleerde weerdata en historische meetgegevens, wat betrouwbaardere schattingen oplevert met een kleinere onzekerheidsband. De windstatistiek voor de kust is door het KNMI vernieuwd op basis van ruim 8.000 jaar aan gesimuleerde weerdata, en is geldig voor een set offshore referentielocaties. Dit ter vervangen van eerdere statistieken op basis van metingen die nog beïnvloed werden door de nabijheid en ruwheid van het land. Voor het ontwerp van waterkeringen is overgestapt naar de nieuwste KNMI'23-klimaatscenario's, waarbij de ontwerp horizon verschuift naar 2075 en 2125. De daarbij gehanteerde zeespiegelstijging en toename van rivierafvoeren zijn hoger dan in de vorige ronde.

Naast de beste schatting van extreme waarden is ook de bijbehorende statistische onzekerheid expliciet meegenomen. Meetreeksen zijn beperkt van lengte, waardoor er een marge zit op elke schatting. Door die marge te verwerken in de probabilistische berekeningen ontstaat een robuuster beeld van de daadwerkelijke veiligheid van waterkeringen.

Het rapport beschrijft ook de faalkansen van de grote stormvloedkeringen, zoals de Maeslantkering, de Oosterscheldekering en de Hollandsche IJsselkering. Geactualiseerde faalkansen en voorspelonzekerheden zijn meegenomen in de belastingberekeningen voor de gebieden die door deze keringen worden beschermd. Het rapport bevat tot slot enkele aanbevelingen voor verdere verbetering van methoden en statistiek in toekomstige beoordelingsronden.

Tot slot wordt opgemerkt dat lopend onderzoek vaak nog niet is geland in de gepresenteerde statistieken. Dit omdat is gekozen deze uitsluitend te baseren op afgerond onderzoek. Als gevolg daarvan is de nieuwe kennis naar aanleiding van het zomerhoogwater van 2021 op de Maas nog niet (volledig) in BOI geland.

Inhoud

1	Inleiding	7
2	Regio's, belastingmodellen en basisstochasten	8
3	Overzicht belangrijkste wijzigingen t.o.v. WBI2017	11
4	Afvoerstatistiek	12
4.1	Inleiding	12
4.2	Rijn bij Lobith	14
4.3	Maas bij Borgharen	17
4.4	IJssel bij Olst	21
4.5	Vecht bij Dalfsen	24
5	Meerpeilstatistiek	28
5.1	Inleiding	28
5.2	IJsselmeer	30
5.3	Markermeer	34
5.4	Grevelingenmeer	38
5.5	Veluwerandmeren	41
5.6	Volkerak-Zoommeer	44
6	Zeewaterstandstatistiek	49
6.1	Inleiding	49
6.2	Methode	51
6.3	Basispeilen zonder statistische onzekerheid	52
6.4	Statistische onzekerheid zeewaterstand	53
6.5	Triangulaire interpolatie	54
7	Windstatistiek	57
7.1	Inleiding	57
7.2	Statistiek Schiphol en Deelen	59
7.3	Statistiek kust	62
7.4	Kansverdeling windrichting en ruimtelijke toepassing	66
8	Duinstatistiek	70
8.1	Zeewaterstand	70
8.2	Golfcondities	71
8.3	Lineaire interpolatie	71
9	Correlaties	73
9.1	Inleiding	73
9.2	Correlatie meerpeil-afvoer IJssel- en Vechtdelta	73
9.3	Correlatie meerpeil-afvoer Volkerak-Zoommeer	73
9.4	Correlatie IJssel- en Vechtafvoer	74
9.5	Correlatie Rijn- en Maasafvoer	74
9.6	Correlatie wind en zeewaterstand (Kust)	74
9.7	Correlatie wind en zeewaterstand (Rijn-Maasmonding)	75
10	Stormvloedkeringen en seiches	77
10.1	Europoortkering	77

10.2	Hollandsche IJsselkering	78
10.3	Oosterscheldekering	78
10.4	Ramspolkering	80
10.5	Seiches	80
11	Ontwerp (statistiek 2075 en 2125)	82
11.1	Afvoerstatistiek	82
11.2	Meerpeilstijging	89
11.3	Zeespiegelstijging	89
	Referenties	91
	Bijlagen	
A.	Tijdsmodellering afvoer- en meerpeilgolven	97
A.1	Inleiding	97
A.2	Overschrijdingsfrequentie, overschrijdingskans en kansdichtheid	97
A.3	Modellering met (geknikte) trapezia	98
A.4	Afleiding dagenlijn en duurlijn	99
A.5	Momentane overschrijdingskans	101
A.6	Overzicht parameters afvoer- en meerpeiltrapezia	101
B.	Modellering en uitintegreren statistische onzekerheid	103
B.1	Inleiding	103
B.2	Afleiding en modellering van statistische onzekerheid	104
B.3	Uitintegreren van statistisch onzekerheid	105
B.4	Parameters verschoven lognormale verdeling	105
C.	Afleiding statistiek piekafvoer Olst	108
C.1	Inleiding	108
C.2	Koppeling afvoer Olst aan afvoer Lobith	108
C.3	Omzetting afvoerstatistiek Lobith naar Olst	110
C.4	Vergelijking met WBI2017	111
D.	Afleiding statistiek IJsselmeer en Markermeer met DEZY	112
D.1	Inleiding	112
D.2	Beschrijving model DEZY	112
D.3	Berekening voor zichtjaar 2035	113
D.4	Resulterende meerpeilstatistiek	115
E.	Tabellen zeewaterstandstatistiek - zichtjaar 2035	118
E.1	Statistiek exclusief onzekerheid	118
E.2	Statistische onzekerheid	122
F.	Tabellen windstatistiek	124
F.1	Statistiek exclusief onzekerheid	124
F.2	Statistische onzekerheid	126
G.	Actualisatie parameters Volkermodel	127
G.1	Beschrijving Volkermodel	127
G.2	Actualisatie parameters zeewaterstandstatistiek	128
G.3	Transformatietabel windsnelheid	131
H.	Duurlijnen afvoerstatistiek ontwerp (2075 en 2125)	133

H.1	Rijn bij Lobith	133
H.2	Maas bij Borgharen	134
H.3	Vecht bij Dalfsen	135
I.	Memo windstatistiek Oosterschelde en Westerschelde	137

1 Inleiding

Conform artikel 2.3 uit de Omgevingswet stelt het Rijk¹ regels vast voor het bepalen van de hydraulische belasting en de sterkte van primaire waterkeringen. Dat betekent dat voor alle primaire keringen Hydraulische Belastingen (HB) beschikbaar moeten zijn. Deze worden voor de tweede Landelijke Beoordelingsronde (LBO-2) gebaseerd op de overstromingskans en afgeleid binnen het programma Beoordelings- en Ontwerp Instrumentarium (BOI2023).

Het productieproces om te komen tot hydraulische belastingen staat uitvoerig beschreven in De Waal et al. (2020). Hierin wordt onderscheid gemaakt in de productieprocessen voor fysica, statistiek en rekeninstellingen, die gezamenlijk leiden tot de benodigde HB data voor het probabilistische model. In de voorliggende rapportage ligt het zwaartepunt bij het productieproces statistiek. De productieprocessen voor fysica en rekeninstellingen raken aan de werkzaamheden in dit rapport, maar maken hier geen onderdeel van uit.

In het bijzonder geldt dat voor de modelonzekerheid, die ontstaat door het gebruik van wiskundige recepten (formules) die worden gehanteerd om bepaalde fysische verschijnselen te modelleren, zoals waterbeweging en golfopwekking (zie bijlage B). Zie voor een beschrijving van de modelonzekerheid die gehanteerd wordt binnen BOI2023 de rapportage van de landelijke analyse (RWS, 2026).

De hoofdstukken 4 t/m 10 beschrijven de statistiek voor BOI2023 voor zichtjaar 2035, zoals opgenomen in invoerbestanden met statistiek voor Hydra-Ring (rekenkern die gebruikt wordt door Riskeer) en Hydra-NL. Elk van deze hoofdstukken behandelt een van de basisstochasten (afvoer, meerpeil, etc.) of de correlaties ertussen. Telkens is een beknopte beschrijving gegeven van de manier waarop de betreffende statistiek is afgeleid, inclusief een verwijzing naar relevante achtergrondrapportages, waarin die afleiding gedetailleerd is beschreven. Voorafgaand is in hoofdstuk 2 een overzicht gegeven van alle regio's, belastingmodellen en bijbehorende basisstochasten, en in hoofdstuk 3 een overzicht van de wijzigingen ten opzichte van WBI2017. Gedetailleerdere informatie over die wijzigingen komt aan bod in de beschrijving van de statistiek per basisstochast.

Hoofdstuk 11 beschrijft de statistiek voor de zichtjaren 2075 en 2125, die bedoeld is voor het ontwerp van primaire waterkeringen. Dat betreft de zeespiegelstijging, veranderingen in afvoerstatistiek en meerpeilstijging (afhankelijk van het beschouwde watersysteem).

Tot slot wordt opgemerkt dat lopend onderzoek vaak nog niet is geland in de gepresenteerde statistieken. Dit omdat is gekozen deze uitsluitend te baseren op afgerond onderzoek. Als gevolg daarvan is de nieuwe kennis naar aanleiding van het zomerhoogwater van 2021 op de Maas nog niet (volledig) in BOI geland. Merk daarbij op dat de nieuwe kennis ook voor andere rivieren van belang zou kunnen zijn.

¹ In de praktijk worden deze ontwikkeld binnen het programma BOI.

2 Regio's, belastingmodellen en basisstochasten

De lokale hydraulische belasting op de waterkering hangt af van basisstochasten zoals wind, rivierafvoer en zeewaterstand. Om op een probabilistische wijze de kansverdeling van deze hydraulische belasting te berekenen, combineren de modellen Hydra-Ring en Hydra-NL de statistiek van deze basisstochasten met de databases fysica, die modelresultaten van waterstanden en golfcondities bevatten voor een groot aantal waarden van deze basisstochasten.

Daarbij worden in Hydra-Ring 22 verschillende regio's (ook wel watersystemen) onderscheiden, zoals aangegeven in Tabel 2-1, die zijn op te delen in een aantal belastingmodellen. Het belastingmodel bepaalt welke (typen) basisstochasten van belang zijn voor de betreffende regio en hoe deze probabilistisch worden verwerkt om te komen tot de hydraulische belastingen op de waterkering. Dit is kort samengevat in Tabel 2-2 en wordt in het navolgende nader toegelicht. Het belastingmodel IJssel- en Vechtdelta gaat bijvoorbeeld uit van lokale hydraulische belastingen (waterstand en golfparameters) die afhankelijk zijn van rivierafvoer, meerpeil, wind (richting en snelheid) en toestand van de stormvloedkering. Daarbinnen worden twee aparte regio's/watersystemen onderscheiden, te weten IJsseldelta en Vechtdelta, die allebei uitgaan van het IJsselmeerpeil, de wind bij Schiphol en de toestand van de Ramspolkering, maar elk van een andere rivierafvoer, namelijk de IJssel (te Olst) of de Vecht (te Dalfsen). Voor elk van deze twee regio's geldt dus andere afvoerstatistiek, maar de probabilistische formules waarmee de statistiek van de basisstochasten wordt gecombineerd zijn hetzelfde.

1. Bovenrijn	9. Waddenzee oost	17. Europoort
2. Bovenmaas	10. Waddenzee west	18. Bovenmaas hk*
3. Benedenrijn	11. Hollandse kust noord ²	19. Grevelingenmeer
4. Benedenmaas	12. Hollandse kust midden	20. Veluwerandmeren
5. IJsseldelta	13. Hollandse kust zuid	21. Volkerak-Zoommeer
6. Vechtdelta	14. Oosterschelde	22. Hollandsche IJssel
7. IJsselmeer	15. Westerschelde	
8. Markermeer	16. Duinen	

Tabel 2-1: Overzicht regio's (met nummering zoals deze in Hydra-Ring wordt gehanteerd).

*hk staat voor hoge keringen, zie de toelichting in de tekst verderop.

Belastingmodel	Regio's	Wind	Afvoer	Meerpeil	Zeewaterstand	SVK
Bovenrivieren	1,2,18	X	X			
Benedenrivieren	3,4,17	X	X		X	EPK
Hollandsche IJssel	22	X	X		X	EPK, HIJK
Volkerak-Zoommeer	21	x	X	X	X	EPK
IJssel- en Vechtdelta	5,6	X	X	X		Ramspol
Merengebied	7,8,19,20	X		X		
Oosterschelde	14	X			X	OSK
Kust (dijken)	9,10,11,12,13,15	X			X	
Duinen	16				X	

Tabel 2-2: Overzicht belastingmodellen met bijbehorende regio's en type basisstochasten.

Wind (richting en snelheid) geldt als basisstochast voor (vrijwel) alle regio's en heeft dus overall (in meer of mindere mate) invloed op de lokale hydraulische belasting. Voor de regio Duinen is wind niet als basisstochast opgenomen in Tabel 2-2, omdat in het betreffende belastingmodel omnidirectioneel wordt gerekend met

² Hollandse kust noord wordt in de praktijk niet meer gebruikt, aangezien de Hondsbossche Zeewering bij Petten een duinkering is geworden en de Helderse Zeedijk is toegevoegd aan regio Waddenzee west.

golfcondities die één-op-één zijn gekoppeld aan de zeewaterstand (zie hoofdstuk 8). Dat neemt niet weg dat de invloed van wind wel aanwezig is en impliciet in deze koppeling is verwerkt.

In het belastingmodel Bovenrivieren is de rivierafvoer de dominante basisstochast (wind speelt daar een enigszins ondergeschikte rol). Er worden verschillende regio's onderscheiden, afhankelijk van de betreffende afvoerstochast (Rijn of Maas). Ook is er onderscheid tussen regio 2: Bovenmaas en regio 18: Bovenmaas hk, waarbij hk staat voor hoge keringen. Dat hangt samen met een verschil in de onderliggende databases fysica. In de waterstandsberekeningen voor regio 18 zijn de primaire keringen als 'oneindig hoog' aangehouden, zodat er geen water naar binnendijks gebied stroomt (conform het algemene uitgangspunt m.b.t. systeemwerking). In de waterstandsberekeningen voor regio 2 is het overlopen van de waterkeringen in de Maasvallei echter wel meegenomen, omdat de meeste trajecten in de Maasvallei een significant lagere veiligheidsnorm hebben en het niet meenemen daarvan een flinke vergroting van de ontwerpogave verder benedenstrooms langs de bedijkte Maas zou betekenen. Regio 18 wordt daarom ook wel aangeduid als de Maasvallei, of Limburgse Maas.

In de onderliggende modelschematisaties wordt voor het onderscheid tussen regio 2 en regio 18 ook wel gebruik gemaakt van de termen mkov en mknov, hetgeen staat voor Maaskades overstroombaar en Maaskades niet overstroombaar.

Verder benedenstrooms gaan in de rivierdelta's ook andere basisstochasten een rol spelen. In de IJssel- en Vechtdelta betreft dat het IJsselmeerpeil en de toestand van de Ramspolkering. In de Benedenrivieren betreft dat de zeewaterstand en de toestand van de Europoortkering (EPK), bestaande uit de Maeslantkering en de Hartelkering. Er worden verschillende regio's onderscheiden, afhankelijk van de betreffende afvoerstochast (IJssel/Vecht of Rijn/Maas). Ook is in de Benedenrivieren een aparte regio (Europoort) gedefinieerd vanwege de rol van seiches (zie paragraaf 10.5).

In het geheel van de Rijn-Maasmonding (RMM) worden nog twee andere regio's beschouwd, elk met een eigen belastingmodel: de Hollandsche IJssel en het Volkerak-Zoommeer (VZM). De Hollandsche IJssel vormt een uitbreiding op het belastingmodel voor de Benedenrivieren, doordat hier sprake is van een extra stormvloedkering: de Hollandsche IJsselkering (HIJK). Voor het VZM geldt, dat in het belastingmodel rekening wordt gehouden met de inzet van het VZM voor waterberging als onderdeel van de Ruimte voor de Riviermaatregelen. Deze inzet en de gevolgen daarvan zijn afhankelijk van de waterstand bij Rak Noord en de toestand van de EPK. De hydraulische belastingen op het VZM zijn daarmee afhankelijk van zowel het meerpeil op het VZM zelf als van alle basisstochasten in het belastingmodel Benedenrivieren.

Voor de overige merensystemen (IJsselmeer, Markermeer, Grevelingenmeer en Veluwerandmeren) geldt dat ze onder hetzelfde belastingmodel vallen, omdat de hydraulische belasting alleen afhangt van het betreffende meerpeil, dat wil zeggen de ruimtelijk gemiddelde waterstand op het meer, en de windcondities.

Het belastingmodel voor de Duinen is hierboven reeds benoemd. Voor de harde keringen langs de kust geldt dat de hydraulische belasting afhangt van de zeewaterstand en de windcondities. Doordat de zeewaterstand mede wordt bepaald door de windopzet, is er een sterke correlatie tussen wind en zeewaterstand, althans voor westelijke windrichtingen. Binnen het belastingmodel Kust (dijken) worden verschillende regio's onderscheiden, omdat gevarieerd wordt in het

kuststation dat gebruikt wordt voor de windsnelheid en de correlatie met de zeewaterstand (zie voor meer details hoofdstuk 7 en hoofdstuk 9).

Voor de Oosterschelde geldt een apart belastingmodel, omdat hier naast wind en zeewaterstand ook de toestand van de Oosterscheldekering (OSK) een belangrijke rol speelt. Daarnaast wordt in het belastingmodel rekening gehouden met de stormduur en het faseverschil tussen de piek van de stormopzet en de getijtop, hoewel dit niet expliciet is aangegeven in Tabel 2-2. Zie voor details paragraaf 10.3.

3 Overzicht belangrijkste wijzigingen t.o.v. WBI2017

Voorafgaand aan de beschrijving van de statistiek van de basisstochasten voor BOI2023 geven we een (beknopt) overzicht van de wijzigingen ten opzichte van WBI2017, zoals beschreven in Chbab (2017).

WBI2017	BOI2023
Afvoerstatistiek	
Bovenmaas: afvoerstation Borgharen Benedenmaas: afvoerstation Lith	Voor Boven- én Benedenmaas gebruik van afvoerstation Borgharen (afvoer Lith is komen te vervallen)
Rijn (Lobith) en Maas (Borgharen) afgeleid met GRADE 2.0	Rijn (Lobith) en Maas (Borgharen) afgeleid met GRADE 3.0 — nieuwe neerslaggenerator en betere modellering van overstromingen in Duitsland/België. Afvoeren bij hoge terugkeertijden lager.
IJssel (Olst) afgeleid uit Lobithstatistiek via WAQUA-productieberekeningen	IJssel (Olst) opnieuw afgeleid uit Lobithstatistiek via nieuwe D-HYDRO-productieberekeningen
Vecht (Dalfsen) met pragmatische verwerking van het effect van overstromingen bovenstrooms	Vecht (Dalfsen) bepaald door combinatie van originele werklijn zonder overstromingen plus effect van overstromingen zoals afgeleid met GRADE.
Meerpeilstatistiek	
IJsselmeer en Markermeer op basis van meetreeksen	IJsselmeer en Markermeer afgeleid met model DEZY, inclusief vergroting spui- en pompcapaciteit bij de Afsluitdijk, zeespiegelstijging en GRADE 3.0. Meerpeilen circa 10–15 cm lager.
Markermeer: basisduur 60 dagen	Markermeer: basisduur 30 dagen
Zeewaterstandstatistiek	
Gebaseerd op meetreeksen, met verdeling op basis van Gegeneraliseerde Pareto verdeling	Hybride methode: ~8.000 jaar ECMWF/SEAS5-data plus WAQUA-simulaties gecombineerd met meetgegevens. Gegeneraliseerde Weibullverdeling. Smallere onzekerheidsband.
Correctie HvH → Maasmond: zeewaterstanden Maasmond 2 cm lager dan HvH	Correctie vervallen: statistiek Maasmond gelijk aan Hoek van Holland
Windstatistiek	
Gebaseerd op meetreeksen (39 jaar); exponentiële staartverdeling (Caires, 2009). Kuststations dicht bij de kust; invloed van landruwheid aanwezig.	Voor Kust, Waddenzee, Ooster- en Westerschelde: update o.b.v. nieuwe KNMI-methode o.b.v. ECMWF-SEAS5-modeldatareeks. De windreferentielocaties liggen daar niet langer op/binnen de kustlijn, maar ca. 50 km op zee. Voor de overige watersystemen is de WBI2017-windstatistiek van Schiphol/Deelen overgenomen..
Scheldes: windstation Vlissingen (onbedoeld beschuttingseffect op hele watersysteem, gecorrigeerd voor Oosterschelde, niet voor Westerschelde)	Offshore windstatistiek van ECMWF/SEAS5 vertaald naar Vlake van de Raan (Westerschelde) resp. windstation Vlissingen (Oosterschelde).
Windrichtingskansen: op basis van metingen	Windrichtingskansen: update o.b.v. nieuwe KNMI-methode (ECMWF/SEAS5-modeldatareeks).
Markermeer en Oosterschelde: 12 windrichtingen	Markermeer en Oosterschelde: 16 windrichtingen (omdat er nieuwe productiesommen zijn gemaakt)
Correlaties	
Wind-waterstandcorrelaties gebaseerd op meetgegevens (1979–2008)	Wind-waterstandcorrelaties geactualiseerd op basis van ~8.000 jaar simulaties
Correlatieparameters wind-zeewaterstand Rijn-Maasmonding gebaseerd op WBI2017-zeewaterstandstatistiek	Correlatieparameters Rijn-Maasmonding geactualiseerd op basis van nieuwe zeewaterstandstatistiek
Stormvloedkeringen	
Voorspelfout EPK	Voorspelfout EPK geactualiseerd met WMCN-kust
Faalkans HIJK 1/200 per sluitvraag	Faalkans HIJK 1/1500 per sluitvraag
Faalkansen OSK o.b.v. eerdere analyse	Faalkansen OSK geactualiseerd met de beheerder

Tabel 3-1: Overzicht wijzigingen statistiek BOI2023 t.o.v. WBI2017.

4 Afvoerstatistiek

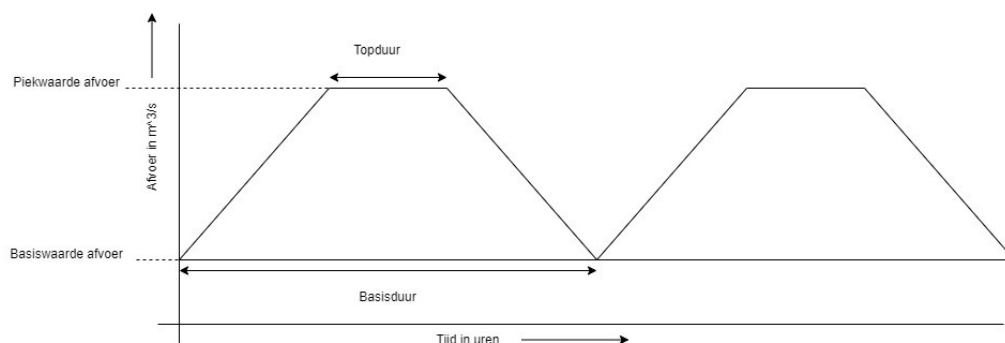
4.1 Inleiding

Rivierafvoer is als basisstochast aanwezig in de Bovenrivieren en de aangrenzende delta's, dat wil zeggen de belastingmodellen Benedenrivieren, Hollandsche IJssel, Volkerak-Zoommeer en de IJssel- en Vechtdelta. Binnen BOI2023 wordt gebruik gemaakt van de afvoerstatistiek op verschillende locaties (afvoerstations), namelijk de Rijn te Lobith, de Maas te Borgharen, de IJssel te Olst en de Vecht te Dalfsen. Tabel 4-1 geeft een overzicht van regio's waarvoor deze stations worden gebruikt.

Afvoerstation	Regio's
Lobith	1: Bovenrijn
	3: Benedenrijn
	17: Europoort
	21: Hollandsche IJssel
	22: Volkerak-Zoommeer
Borgharen	2: Bovenmaas
	4: Benedenmaas
	18: Bovenmaas hk
Olst	5: IJsseldelta
Dalfsen	6: Vechtdelta

Tabel 4-1: Overzicht gebruikte afvoerstation voor regio's met rivierafvoer als basisstochast.

De rivierafvoer is een zogeheten trage stochast. Dat wil zeggen dat de variatie in de tijd relatief klein is ten opzichte van snelle stochasten zoals wind en zeewaterstand. De duur van een storm is meestal circa een dag, de duur van een afvoergolf is typisch één maand. Naast de overschrijdingskans van de piekafvoer is daarom ook het tijdsverloop van de afvoer van belang (de golfvorm). Dit tijdsverloop wordt in het probabilistisch model beschreven met een trapezium, met een basisduur van 30 dagen en een topduur afhankelijk van de piekafvoer. In principe kan in het probabilistisch model ook worden uitgegaan van geknikte trapezia, maar daar is bij de beschouwde afvoerstations niet voor gekozen. Bijlage A geeft nog wat meer details over de tijdsmodellering van afvoer- en meerpeilgolven.



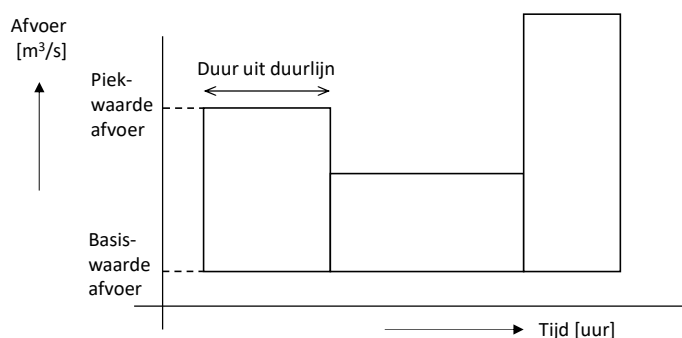
Figuur 4-1: Trapeziummodel voor afvoergolven.

Hydra-Ring kan met twee verschillende numerieke rekenschema's voor tijdintegratie van afvoergolven rekenen: het NTI-rekenschema³ en het FBC-rekenschema⁴

³ Numerieke Tijd Integratie

⁴ Ferry Borges en Castanheta

(Deltares, 2025). Het NTI-schema modelleert afvoergolven als trapezia, zoals hierboven beschreven. Het FBC-schema modelleert de afvoer als opeenvolgende blokken, waarvan de hoogte de afvoer geeft en de breedte de tijdsduur, zie Figuur 4-2. Deze tijdstuur komt overeen met de gemiddelde duur waarmee een afvoerniveau wordt overschreden binnen afvoergolven waarvan de piekwaarde groter of gelijk is aan deze afvoer. Het verband tussen de afvoer en de corresponderende gemiddelde overschrijdingsduur wordt ook wel de duurlijn genoemd. Om te zorgen dat de afvoerstatistiek in het FBC-schema consistent is met de modellering volgens afvoertrapezia, moet de duurlijn worden berekend op basis van de gegeven overschrijdingskansen, de basisduur en de topduur afhankelijk van de piekafvoer. Bijlage A beschrijft de manier waarop de duurlijn wordt afgeleid.



Figuur 4-2: FBC-model voor een afvoergolf.

De benodigde statistiek voor de basisstochast afvoer bestaat uit de overschrijdingskansen van de piekafvoer in de basisduur en de gegevens waarmee het tijdsverloop beschreven wordt, dat wil zeggen: de basiswaarde van de afvoer (minimale afvoer), de topduur afhankelijk van de piekafvoer en de duurlijn, die - zoals gezegd - alleen nodig is voor Hydra-Ring wanneer met het FBC-schema wordt gerekend. In de volgende paragrafen wordt deze statistiek per afvoerstation gepresenteerd, met daarbij een beknopte beschrijving van de manier waarop deze tot stand is gekomen.

De overschrijdingskansen van de piekafvoer hebben een statistische onzekerheid, die het gevolg is van onzekerheid over het type kansverdeling dat gebruikt moet worden en de onzekerheid bij het schatten van de parameters van deze verdeling. In bijlage B is uitgelegd dat de statistische onzekerheid in Hydra-Ring als extra stochast wordt toegevoegd. Voor de basisstochast afvoer wordt daarbij uitgegaan van een additief model, waarbij de statistische onzekerheid een normaal verdeelde stochast is (zie paragraaf B.2). Dat wil zeggen dat de waarde van de statistische onzekerheid wordt gekenmerkt door het gemiddelde (μ) en de standaarddeviatie (σ) en dat deze waarde wordt opgeteld bij de afvoer zonder statistische onzekerheid. Zowel het gemiddelde als de standaarddeviatie mag daarbij afhangen van de afvoer zonder onzekerheid. In de praktijk geldt voor alle afvoerstations die in dit hoofdstuk zijn beschreven, dat de gemiddelde afwijking (μ) altijd gelijk is aan 0 m³/s.

In Hydra-NL wordt de statistische onzekerheid niet als aparte stochast beschouwd, maar is de statistische onzekerheid meegenomen door uit te gaan van de kansverdeling van de basisstochast inclusief statistische onzekerheid. In bijlage B is uitgelegd hoe deze kansverdeling kan worden bepaald door het uitintegreren van de statistische onzekerheid. In het vervolg van dit hoofdstuk is per afvoerstation telkens gegeven: de afvoerstatistiek zonder statistische onzekerheid, de standaarddeviatie van de statistische onzekerheid (σ) en de afvoerstatistiek met statistische onzekerheid, waarbij de laatste alleen benodigd is voor berekeningen met Hydra-NL.

In de tabellen met statistiek van de piekafvoer in de navolgende paragrafen is telkens niet alleen de overschrijdingskans binnen de basisduur gegeven, maar ook de corresponderende terugkeertijd. In bijlage A is uitgelegd dat de overschrijdingskans kan worden omgerekend naar de overschrijdingsfrequentie door vermenigvuldiging met het aantal afvoergolven (basisduren) per winterhalfjaar (180 dagen). Omdat de basisduur voor alle beschouwde afvoerstations 30 dagen is, is de jaarlijkse frequentie altijd gelijk aan 6 maal de overschrijdingskans in de basisduur. De terugkeertijd is gelijk aan 1 gedeeld door de jaarlijkse overschrijdingsfrequentie.

4.2 Rijn bij Lobith

4.2.1 *Overschrijdingskansen piekafvoer en statistische onzekerheid*

De afvoer van de Rijn bij Lobith is een basisstochast voor de regio's Bovenrijn, Benedenrijn, Europoort, het Volkerak-Zoommeer en Hollandsche IJssel. Voor afvoeren met een terugkeertijd van 2 jaar of hoger is de statistiek en de bijbehorende onzekerheid afgeleid met GRADE 3.0 (Hegnauer et al., 2023) en vastgesteld voor toepassing in BOI2023 (Buitink en Sperna Weiland, 2026).

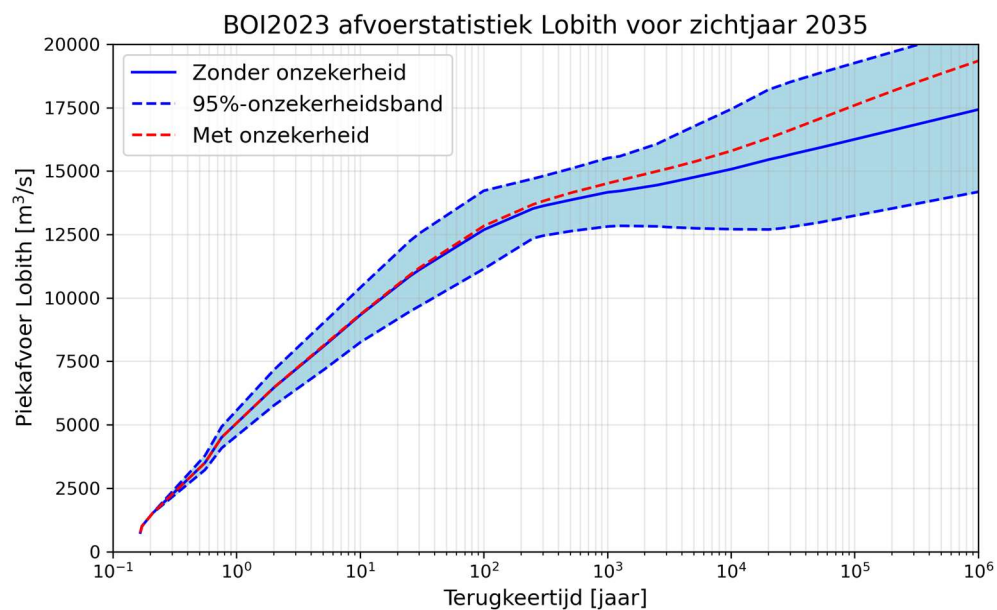
GRADE (Generation of Rainfall and Discharge Extremes) is een combinatie van een stochastische weergenerator, een hydrologisch model en een hydrodynamisch model en wordt gebruikt voor het simuleren van extreme afvoeren in de Rijn bij Lobith en de Maas bij Borgharen en het afleiden van statistiek daarvan. Voor de afvoerstatistiek bij Lobith in WBI2017 werd gebruik gemaakt van GRADE 2.0.

GRADE 3.0 bevat een nieuwe versie van de neerslaggenerator en betere en completere fysieke modellering van overstromingen in Duitsland (omdat anders dan in WBI2017 nu ook de overstromingen tussen Wesel en Lobith gemodelleerd worden). In de afvoerstatistiek van de Rijntakken is dus, net als in WBI2017, rekening gehouden met overstromingen in Duitsland. Op die manier worden hoge afvoergolven afgevlakt via de fysische modellering in het GRADE-instrumentarium (Hegnauer et al., 2023). In de statistiek is het effect van noodmaatregelen (0,5 m zandzakken op groene keringen en kademuuren) in zichtjaar 2035 meegenomen. Voor ontwerpen (zichtjaren 2075 en 2125, zie hoofdstuk 11) zijn scenario's met 0,5 m integrale dijkverhoging gebruikt als benadering voor het scenario met 0,5 m noodmaatregelen. Door de aanpassingen aan GRADE zijn ook de (model)onzekerheden ervan gewijzigd, wat een wijziging geeft aan de statistische onzekerheid in de afvoerstatistiek.

Tabel 4-2 geeft de resulterende statistiek van de piekafvoer bij Lobith voor BOI2023 voor het zichtjaar 2035. Het gemiddelde van de statistische onzekerheid (μ) is altijd 0 m³/s, de standaarddeviatie (σ) is afhankelijk van de waarde zonder onzekerheid. De statistiek voor terugkeertijden kleiner dan 2 jaar is alleen nodig voor Hydra-NL en overgenomen uit het WBI2017-invoerbestand (Geerse, 2016a). Deze laatstgenoemde waarden zijn nog gebaseerd op gegevens uit de HR2006. De afvoeren zonder onzekerheid en bijbehorende σ zijn voor terugkeertijden van $T = 200.000$ jaar en hoger niet gegeven in Buitink en Sperna Weiland (2026), maar bepaald door extrapolatie. Zie hiervoor (Oosterlo, 2026) zoals opgenomen in bijlage E van het generieke uitgangspuntendocument (RWS, 2026). De afleiding van de statistiek inclusief statistische onzekerheid is beschreven in bijlage B (paragraaf B.2). Figuur 4-3 bevat een grafische weergave van de statistiek uit Tabel 4-2.

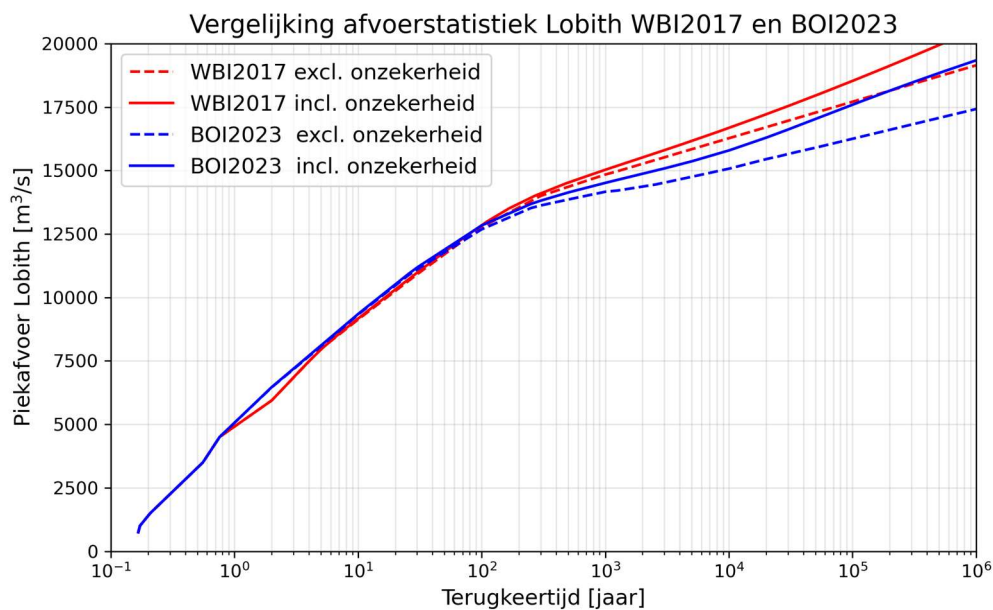
Terugkeer- tijd [jaar]	Ov.-kans per basisduur [-]	Piekafvoer excl. onz. [m ³ /s]	Sigma stat. onzekerheid [m ³ /s]	Piekafvoer incl. onz. [m ³ /s]
1,6667e-01	1,00	750	-	750
1,7182e-01	0,97	1.000	-	1.000
2,0833e-01	0,80	1.500	-	1.500
5,5556e-01	0,30	3.500	-	3.500
7,5758e-01	0,22	4.500	-	4.500
2	8,3333e-02	6.456	356	6.466
5	3,3333e-02	8.066	472	8.101
10	1,6667e-02	9.322	550	9.346
25	6,6667e-03	10.839	707	10.890
30	5,5556e-03	11.103	731	11.178
100	1,6667e-03	12.683	786	12.835
250	6,6667e-04	13.521	599	13.683
300	5,5556e-04	13.623	599	13.812
500	3,3333e-04	13.857	627	14.134
1.000	1,6667e-04	14.163	688	14.514
1.250	1,3333e-04	14.209	698	14.629
2.500	6,6667e-05	14.441	826	14.985
3.000	5,5556e-05	14.521	882	15.080
5.000	3,3333e-05	14.752	1.024	15.361
10.000	1,6667e-05	15.071	1.206	15.790
20.000	8,3333e-06	15.449	1.405	16.292
25.000	6,6667e-06	15.551	1.436	16.467
30.000	5,5556e-06	15.649	1.458	16.612
50.000	3,3333e-06	15.897	1.499	17.028
100.000	1,6667e-06	16.250	1.535	17.594
200.000	8,3333E-07	16.603	1.571	18.144
300.000	5,5556E-07	16.809	1.592	18.457
500.000	3,3333E-07	17.070	1.619	18.839
1.000.000	1,6667E-07	17.423	1.655	19.341

Tabel 4-2: Afvoerstatistiek piekafvoer Rijn bij Lobith voor 2035 (basisduur = 30 dagen).
Op basis van (Buitink en Sperna Weiland, 2026) en voor $T \geq 200.000$ jaar en piekafvoer incl.
onzekerheid op basis van (Oosterlo, 2026).



Figuur 4-3: Statistiek piekafvoer Rijn bij Lobith BOI2023 voor zichtjaar 2035.

Figuur 4-4 geeft een vergelijking van de statistiek van de piekafvoer bij Lobith met en zonder statistische onzekerheid met de afvoerstatistiek uit WBI2017. Zoals aangegeven in Buitink en Sperna Weiland (2026), is de afvoerstatistiek voor terugkeertijden onder de 100 jaar vergelijkbaar. Voor terugkeertijden boven 1.000 jaar zijn de GRADE 3.0-afvoeren ongeveer 5% tot 15% lager vergeleken met WBI2017. Dat wordt grotendeels veroorzaakt door het gecombineerde effect van de nieuwe neerslaggenerator en de betere fysieke modellering van overstromingen in Duitsland (het nieuwe hydrodynamische model).



Figuur 4-4: Vergelijking statistiek piekafvoer Rijn bij Lobith WBI2017 en BOI2023.

4.2.2 Topduren en duurlijnen voor trapeziumvormige afvoergolven

Het tijdsverloop van de afvoer van de Rijn bij Lobith wordt in het probabilistisch model beschreven met een trapezium, met een basisduur van 30 dagen en een topduur afhankelijk van de piekafvoer. De basiswaarde van de afvoer, dat wil zeggen de minimale afvoer in dit tijdsverloop, is daarbij gelijk aan 750 m³/s. Het verband tussen de piekafvoer en de bijbehorende topduur is gegeven in Tabel 4-3. Deze gegevens zijn overgenomen uit WBI2017 (Geerse, 2016a).

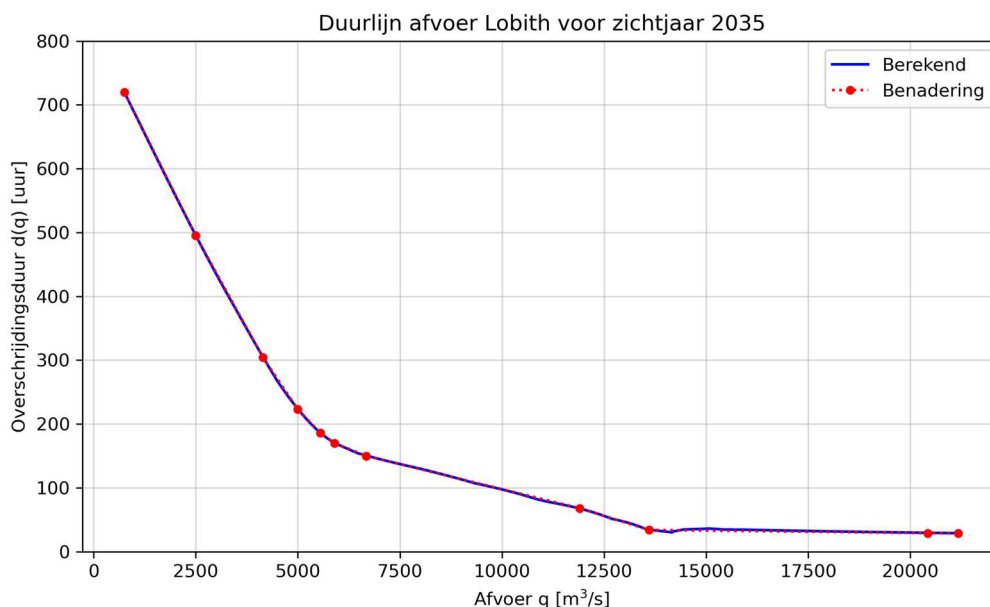
Piekafvoer [m³/s]	Topduur [uur]
750	720
6.000	12
30.000	12

Tabel 4-3: Topduren bij trapeziumvormige afvoergolven op de Rijn bij Lobith.

De duurlijn voor de Rijn bij Lobith is berekend op basis van bovenstaande topduren en de overschrijdingskansen zonder onzekerheid. Bijlage A beschrijft de toegepaste methode. Na toepassing van de methode is de duurlijn vastgelegd op basis van een beperkt aantal knippunten. Het resultaat is gegeven in Tabel 4-4 en Figuur 4-5. De overschrijdingsduur per top convergeert niet naar de minimale topduur in Tabel 4-3. Bedenk echter dat het hier gaat om de overschrijdingsduur van een bepaalde afvoer gegeven dat de piekafvoer nog hoger is. Dit is nader toegelicht in paragraaf A.4.

Afvoer [m ³ /s]	Overschrijdingsduur per top [uur]
750	720
2.500	495
4.150	304
5.000	223
5.550	186
5.900	170
6.675	150
11.900	68
13.600	34
20.425	29
21.175	29

Tabel 4-4: Overschrijdingsduur per top ("duurlijn") afvoer Rijn bij Lobith voor 2035.



Figuur 4-5: Overschrijdingsduur per top afvoer Rijn bij Lobith voor zichtjaar 2035.

4.3 Maas bij Borgharen

4.3.1 Overschrijdingskansen piekafvoer en statistische onzekerheid

De afvoer van de Maas bij Borgharen is een basisstochast voor de regio's Bovenmaas en Benedenmaas. Voor afvoeren met een terugkeertijd van 2 jaar of hoger is de statistiek en de bijbehorende onzekerheid net als voor de Rijn bij Lobith afgeleid met GRADE 3.0 (Hegnauer et al., 2023) en vastgesteld voor toepassing in BOI2023 (Buitink en Sperna Weiland, 2026).

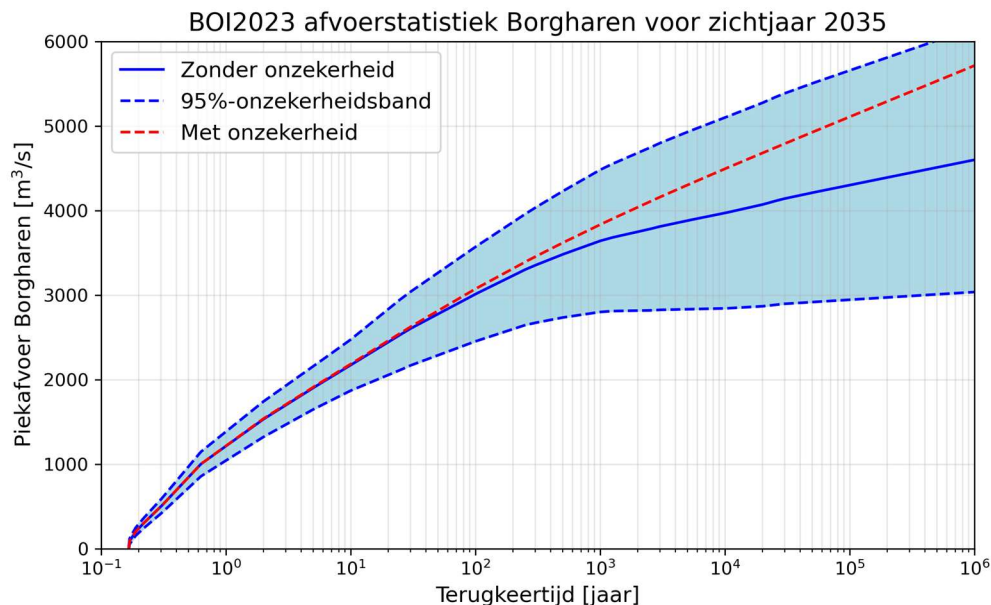
Het GRADE-instrumentarium is reeds beknopt beschreven in paragraaf 4.2. Voor de afvoerstatistiek bij Borgharen in WBI2017 werd gebruik gemaakt van GRADE 2.0. GRADE 3.0 bevat een nieuwe versie van de neerslaggenerator. Daarnaast bevat het een verbeterd hydrodynamisch model, dat ook het effect van overstromen van de Maas in België simuleert. Voor de afvoerstatistiek bij Borgharen is rekening gehouden met het onderlopen van potentieel overstroombare gebieden bovenstrooms van Eijsden (o.a. mijnverzakkingsgebieden) in België, maar niet met de inzet van noodmaatregelen. Net als bij de Rijn worden hoge afvoergolven dus

afgevlakt via de fysische modellering in het GRADE-instrumentarium, zij het dat het effect kleiner is dan bij de Rijn.

Tabel 4-5 geeft de resulterende statistiek van de piekafvoer bij Borgharen voor BOI2023 voor het zichtjaar 2035. Het gemiddelde van de statistische onzekerheid (μ) is altijd 0 m³/s, de standaarddeviatie (σ) is afhankelijk van de waarde exclusief onzekerheid. De statistiek voor terugkeertijden kleiner dan 2 jaar is alleen nodig voor Hydra-NL en overgenomen uit het WBI2017-invoerbestand (Geerse, 2016a). Deze laatstgenoemde waarden zijn nog gebaseerd op gegevens uit de HR2006. De afvoeren zonder onzekerheid en bijbehorende σ zijn voor terugkeertijden van 200.000 jaar en hoger niet gegeven in Buitink en Sperna Weiland (2026), maar bepaald door extrapolatie. Zie hiervoor (Oosterlo, 2026) zoals opgenomen in bijlage E van het generieke uitgangspuntendocument (RWS, 2026). Bijlage B beschrijft de afleiding van de statistiek inclusief statistische onzekerheid (paragraaf B.2). Figuur 4-6 bevat een grafische weergave van de statistiek uit Tabel 4-5.

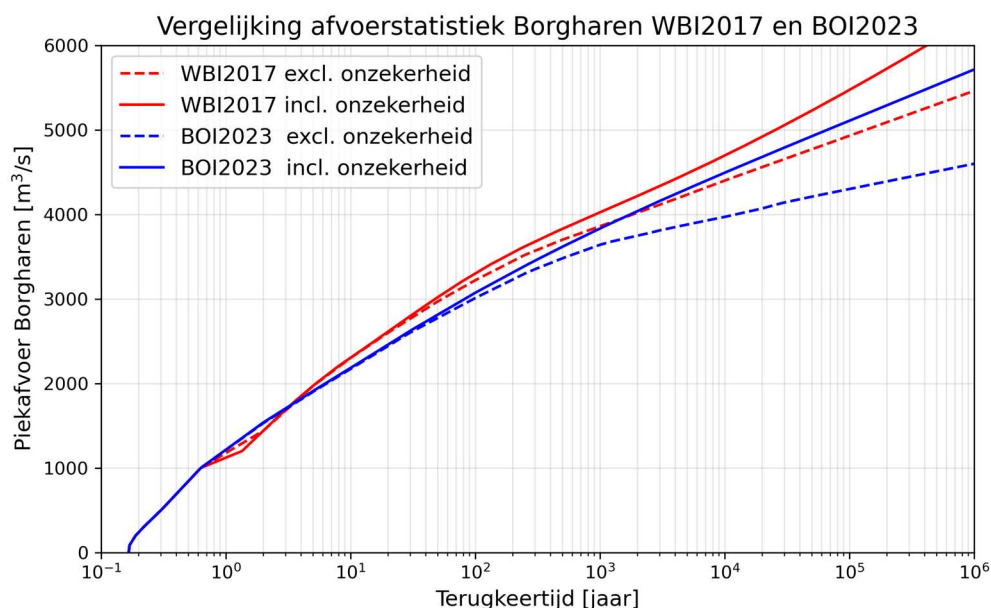
Terugkeer-tijd [jaar]	Ov.-kans per basisduur [-]	Piekafvoer excl. onz. [m ³ /s]	Sigma stat. onzekerheid [m ³ /s]	Piekafvoer incl. onz. [m ³ /s]
1,6667e-01	1,000	0	-	0
1,6750e-01	0,995	75	-	75
1,8939e-01	0,880	200	-	200
2,1930e-01	0,760	300	-	300
3,0303e-01	0,550	500	-	500
6,3131e-01	0,264	1.000	-	1.000
2	8,3333e-02	1.530	107	1.537
5	3,3333e-02	1.900	130	1.909
10	1,6667e-02	2.170	154	2.182
25	6,6667e-03	2.530	213	2.548
30	5,5556e-03	2.600	222	2.621
100	1,6667e-03	3.010	285	3.072
250	6,6667e-04	3.300	335	3.390
300	5,5556e-04	3.350	347	3.451
500	3,3333e-04	3.480	381	3.617
1.000	1,6667e-04	3.640	429	3.833
1.250	1,3333e-04	3.680	444	3.900
2.500	6,6667e-05	3.780	491	4.104
3.000	5,5556e-05	3.810	503	4.157
5.000	3,3333e-05	3.880	535	4.301
10.000	1,6667e-05	3.970	576	4.493
20.000	8,3333e-06	4.070	614	4.680
25.000	6,6667e-06	4.110	626	4.740
30.000	5,5556e-06	4.140	635	4.789
50.000	3,3333e-06	4.210	660	4.925
100.000	1,6667e-06	4.300	692	5.108
200.000	8,3333E-07	4.390	724	5.291
300.000	5,5556E-07	4.443	743	5.397
500.000	3,3333E-07	4.509	766	5.532
1.000.000	1,6667E-07	4.599	798	5.714

Tabel 4-5: Afvoerstatistiek piekafvoer Maas bij Borgharen voor 2035 (basisduur = 30 dagen). Op basis van (Buitink en Sperna Weiland, 2026) en voor $T \geq 200.000$ jaar en piekafvoer incl. onzekerheid op basis van (Oosterlo, 2026).



Figuur 4-6: Statistiek piekaafvoer Maas bij Borgharen BOI2023 voor zichtjaar 2035.

Figuur 4-7 geeft een vergelijking van de statistiek van de piekaafvoer bij Borgharen met en zonder statistische onzekerheid met de afvoerstatistiek uit WBI2017. Zoals aangegeven in Buitink en Sperna Weiland (2026), ligt de afvoerstatistiek zonder onzekerheid in de orde 5% tot 15% lager vergeleken met WBI2017. Dat wordt grotendeels veroorzaakt door het gecombineerde effect van de nieuwe neerslaggenerator en het effect van overstromingen in België. De nieuwe 95% onzekerheidsband is echter breder vergeleken met de onzekerheidsband in WBI2017. Het verschil inclusief statistische onzekerheid is daardoor kleiner. De afvoerstatistiek met onzekerheid ligt (slechts) orde 5% lager dan in WBI2017.



Figuur 4-7: Vergelijking statistiek piekaafvoer Maas bij Borgharen WBI2017 en BOI2023.

4.3.2 Topduren en duurlijnen voor trapeziumvormige afvoergolven

Het tijdsverloop van de afvoer van de Maas bij Borgharen wordt in het probabilistisch model beschreven met een trapezium, met een basisduur van 30 dagen en een topduur afhankelijk van de piekafvoer. De basiswaarde van de afvoer, dat wil zeggen de minimale afvoer in dit tijdsverloop, is daarbij gelijk aan 0 m³/s. Het verband tussen de piekafvoer en de bijbehorende topduur is gegeven in Tabel 4-6. Deze gegevens zijn overgenomen uit WBI2017 (Geerse, 2016a).

Piekafvoer [m ³ /s]	Topduur [uur]
0,0	720
1.315,1	12
6.000,0	12

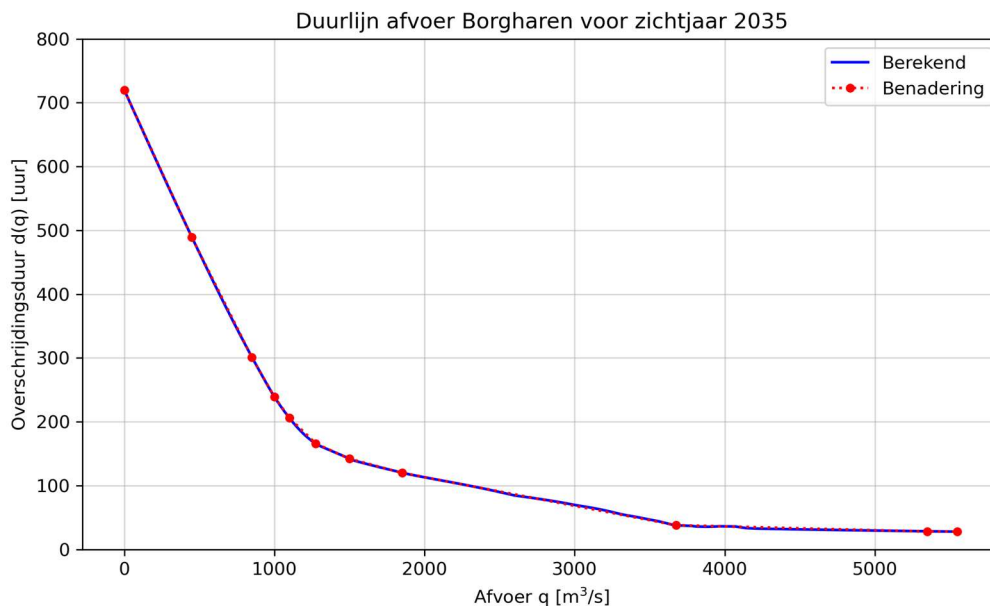
Tabel 4-6: Topduren trapeziumvormige afvoergolven Maas bij Borgharen.

De duurlijn voor de Maas bij Borgharen is berekend op basis van bovenstaande topduren en de overschrijdingskansen zonder onzekerheid. Bijlage A beschrijft de toegepaste methode. Na toepassing van de methode is de duurlijn vastgelegd op van een beperkt aantal knikpunten. Het resultaat is gegeven in Tabel 4-7 en Figuur 4-8.

Afvoer [m ³ /s]	Overschrijdingsduur per top [uur]
0	720
450	489
850	301
1.000	239
1.100	206
1.275	166
1.500	142
1.850	120
3.675	38
5.350	28
5.550	28

Tabel 4-7: Overschrijdingsduur per top ("duurlijn") afvoer Maas bij Borgharen voor 2035.

De overschrijdingsduur per top convergeert niet naar de minimale topduur in Tabel 4-6. Bedenk echter dat het hier gaat om de overschrijdingsduur van een bepaalde afvoer *gegeven* dat de piekafvoer nog hoger is. Dit is nader toegelicht in paragraaf A.4.



Figuur 4-8: Overschrijdingsduur per top afvoer Maas bij Borgharen voor zichtjaar 2035.

4.4 IJssel bij Olst

4.4.1 Overschrijdingskansen piekafvoer en statistische onzekerheid

De afvoer van de IJssel bij Olst is een basisstochast voor de regio IJsseldelta. Voor afvoeren met een terugkeertijd van 2 jaar of hoger is de statistiek en de bijbehorende onzekerheid gebaseerd op de statistiek van de Rijn bij Lobith zoals afgeleid met GRADE 3.0 (zie paragraaf 4.2). Voor het vertalen van de afvoer bij Lobith naar de afvoer bij Olst is gebruik gemaakt van de BOI2023-berekeningen die zijn uitgevoerd met het D-HYDRO-model voor de Rijntakken (Van Lente et al., 2023). De details van deze afleiding zijn beschreven in bijlage C.

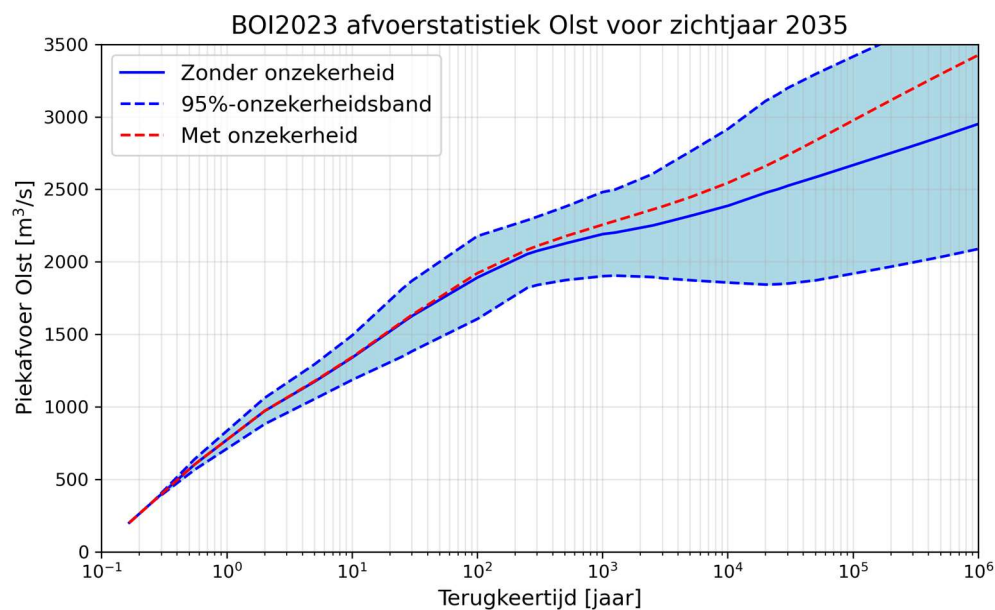
Een belangrijk aspect bij de vertaling van de afvoer bij Lobith naar de afvoer bij Olst is de afvoerverdeling over de splitsingspunten van de Rijntakken. In de D-HYDRO-berekeningen voor de Rijntakken is voor de afvoerverdeling tussen Waal, Lek en IJssel aangesloten bij de huidige beleidsmatige afspraken en fysieke mogelijkheden van de regelwerken. Voor zichtjaar 2035 betekent dat concreet, dat de instellingen van de regelwerken Hondsbroekse Pleij en Pannerden zijn bepaald volgens de beleidsmatige afvoerverdeling bij een stationaire afvoer van 16.000 m³/s (zonder lateralen) bij Lobith. Die afvoerverdeling zorgt ervoor dat de Nederrijn/Lek bij deze afvoer wordt ontzien en beperkt blijft tot 3376 m³/s (Van Lente et al., 2023). Merk op dat bij afvoeren boven 16.000 m³/s de afvoer op de Nederrijn/Lek weer zal toenemen, op basis van de ingestelde afvoerverdeling.

Tabel 4-8 geeft de resulterende statistiek van de piekafvoer bij Olst voor BOI2023 voor het zichtjaar 2035. Het gemiddelde van de statistische onzekerheid (μ) is altijd 0 m³/s, de standaarddeviatie (σ) is afhankelijk van de waarde exclusief onzekerheid. De statistiek voor terugkeertijden kleiner dan 2 jaar is alleen nodig voor Hydra-NL en overgenomen uit het WBI2017-invoerbestand (Geerse, 2016a). Deze laatstgenoemde waarden zijn nog gebaseerd op gegevens uit de HR2006. De afleiding van de statistiek inclusief statistische onzekerheid is beschreven in bijlage

B (paragraaf B.2). Figuur 4-3 bevat een grafische weergave van de statistiek uit Tabel 4-2.

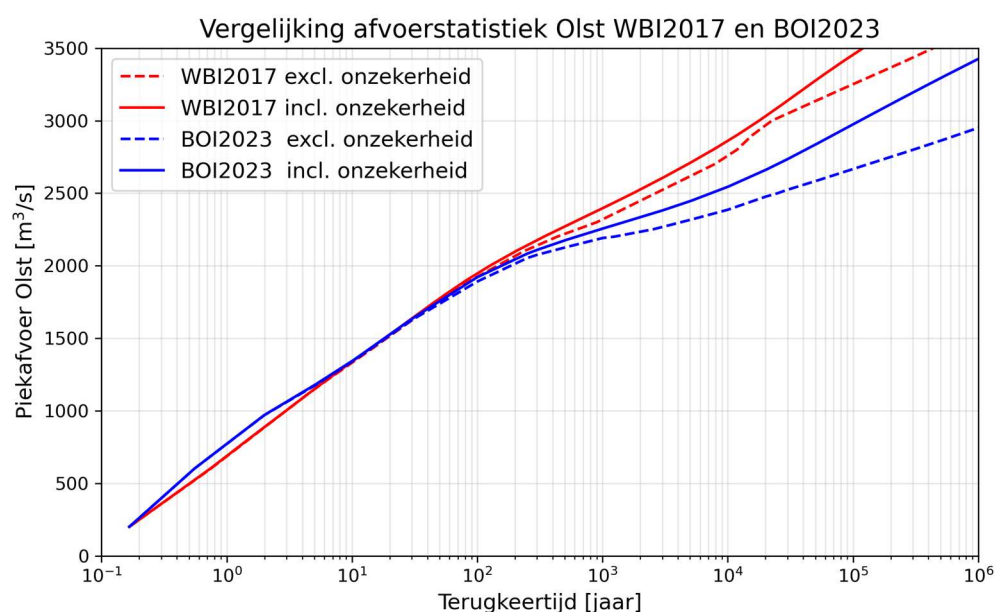
Terugkeer- tijd [jaar]	Ov.-kans per basisduur [-]	Piekafvoer excl. onz. [m ³ /s]	Sigma stat. onzekerheid [m ³ /s]	Piekafvoer incl. onz. [m ³ /s]
1,6667e-01	1,000	200	-	200
5,5006e-01	0,303	600	-	600
2	8,3333e-02	970	46	971
5	3,3333e-02	1.172	61	1.176
10	1,6667e-02	1.338	78	1.342
25	6,6667e-03	1.578	119	1.585
30	5,5556e-03	1.625	124	1.633
100	1,6667e-03	1.891	146	1.921
250	6,6667e-04	2.053	119	2.083
300	5,5556e-04	2.075	120	2.109
500	3,3333e-04	2.126	129	2.175
1.000	1,6667e-04	2.191	148	2.256
1.250	1,3333e-04	2.201	151	2.281
2.500	6,6667e-05	2.250	181	2.360
3.000	5,5556e-05	2.267	194	2.381
5.000	3,3333e-05	2.316	226	2.445
10.000	1,6667e-05	2.386	270	2.544
20.000	8,3333e-06	2.476	323	2.660
25.000	6,6667e-06	2.500	334	2.701
30.000	5,5556e-06	2.524	344	2.735
50.000	3,3333e-06	2.583	363	2.835
100.000	1,6667e-06	2.667	382	2.975
200.000	8,3333E-07	2.750	400	3.114
300.000	5,5556E-07	2.799	410	3.194
500.000	3,3333E-07	2.862	423	3.294
1.000.000	1,6667E-07	2.951	440	3.426

Tabel 4-8: Afvoerstatistiek piekafvoer IJssel bij Olst voor 2035 (basisduur = 30 dagen).



Figuur 4-9: Statistiek piekafvoer IJssel bij Olst BOI2023 voor zichtjaar 2035.

Figuur 4-10 geeft een vergelijking van de statistiek van de piekafvoer bij Olst met en zonder statistische onzekerheid met de afvoerstatistiek uit WBI2017. Voor terugkeertijden onder de 100 jaar is de statistiek vergelijkbaar. Voor hogere terugkeertijden zijn de afvoeren voor BOI2023 duidelijk lager vergeleken met WBI2017, hetgeen een rechtstreeks gevolg is van het feit dat bij Lobith voor de hogere terugkeertijden in BOI2023 ook lagere afvoeren volgen dan in het WBI2017 (zie paragraaf 4.2). In de WBI2017 overschrijdingsfrequentielijnen is een slag zichtbaar bij een terugkeertijd van ca. 10.000 jaar. Deze slag is niet langer aanwezig in de frequentielijnen van BOI2023. Dit komt door de wijziging in de relatie tussen de Rijnafvoer bij Lobith en de IJsselaflower bij Olst, zoals toegelicht in bijlage C.



Figuur 4-10: Vergelijking statistiek piekafvoer IJssel bij Olst WBI2017 en BOI2023.

4.4.2 Topduren en duurlijnen voor trapeziumvormige afvoergolven

Het tijdsverloop van de afvoer van de IJssel bij Olst wordt in het probabilistisch model beschreven met een trapezium, met een basisduur van 30 dagen en een topduur afhankelijk van de piekafvoer. De basiswaarde van de afvoer, dat wil zeggen de minimale afvoer in dit tijdsverloop, is daarbij gelijk aan 200 m³/s. Het verband tussen de piekafvoer en de bijbehorende topduur is gegeven in Tabel 4-9. Deze gegevens zijn overgenomen uit WBI2017 (Geerse, 2016a).

Piekafvoer [m³/s]	Topduur [uur]
200	720
800	24
4.000	24

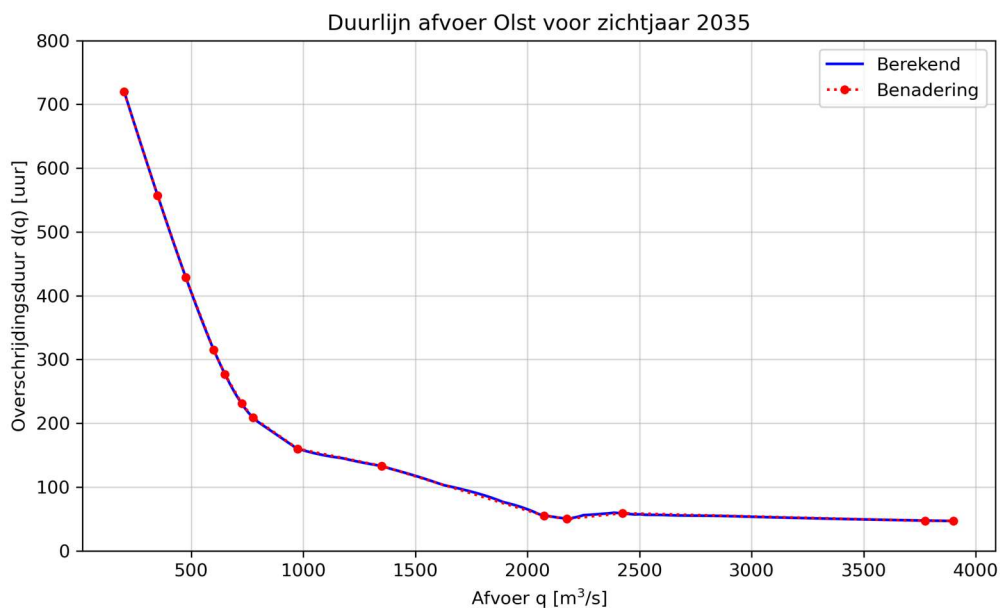
Tabel 4-9: Topduren trapeziumvormige afvoergolven IJssel bij Olst.

De duurlijn voor de IJssel bij Olst is berekend op basis van bovenstaande topduren en de overschrijdingskansen zonder onzekerheid. Bijlage A beschrijft de toegepaste methode. Na toepassing van de methode is de duurlijn vastgelegd op basis van een beperkt aantal knikpunten. Het resultaat is gegeven in Tabel 4-10 en Figuur 4-11.

De overschrijdingsduur per top convergeert niet naar de minimale topduur in Tabel 4-10. Bedenk echter dat het hier gaat om de overschrijdingsduur van een bepaalde afvoer *gegeven* dat de piekafvoer nog hoger is. Dit is nader toegelicht in paragraaf A.4.

Afvoer [m ³ /s]	Overschrijdingsduur per top [uur]
200	720
350	557
475	429
600	315
650	277
725	231
775	209
975	160
1.350	133
2.075	55
2.175	50
2.425	59
3.775	47
3.900	47

Tabel 4-10: Overschrijdingsduur per top ("duurlijn") afvoer IJssel bij Olst voor 2035.



Figuur 4-11: Overschrijdingsduur per top afvoer IJssel bij Olst voor zichtjaar 2035.

4.5 Vecht bij Dalfsen

4.5.1 Overschrijdingskansen piekafvoer en statistische onzekerheid

De afvoer van de Vecht bij Dalfsen is een basistoestochast voor de regio Vechtdelta. Voor WBI2017 is destijds een nieuwe werklijn voor Dalfsen afgeleid, gebaseerd op de HR2006, waarin op een pragmatische werkwijze het effect is meegenomen van overstromingen bovenstrooms van Dalfsen (Geerse, 2016c). Voor BOI2023 is besloten om de werklijn te hanteren zónder het effect van overstromingen en daarop het effect van overstromingen uit GRADE 1.0 Vecht (2026) toe te passen

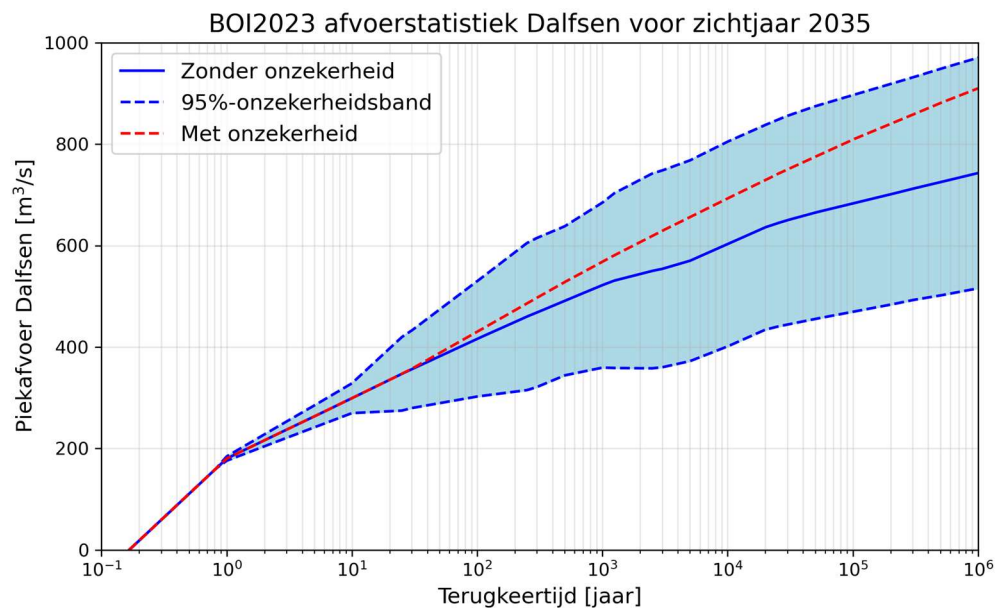
(Buitink et al., 2026). Zo wordt een pragmatische keuze vervangen door echte berekeningen.

Tabel 4-11 geeft de resulterende statistiek van de piekafvoer bij Dalfsen voor BOI2023 voor het zichtjaar 2035. Het gemiddelde van de statistische onzekerheid (μ) is altijd 0 m³/s, de standaarddeviatie (σ) is afhankelijk van de waarde exclusief onzekerheid. De statistiek voor terugkeertijden kleiner dan 2 jaar is alleen nodig voor Hydra-NL en overgenomen uit het WBI2017-invoerbestand (Geerse, 2016a). Deze laatstgenoemde waarden zijn nog gebaseerd op gegevens uit de HR2006. De afvoeren zonder onzekerheid en bijbehorende σ zijn voor terugkeertijden 200.000 jaar en hoger niet gegeven in Buitink et al. (2026), maar bepaald door extrapolatie. Zie hiervoor (Oosterlo, 2026) zoals opgenomen in bijlage E van het generieke uitgangspuntendocument (RWS, 2026). Bijlage B geeft de afleiding van de statistiek inclusief statistische onzekerheid (paragraaf B.2). Figuur 4-12 bevat een grafische weergave van de statistiek uit Tabel 4-2.

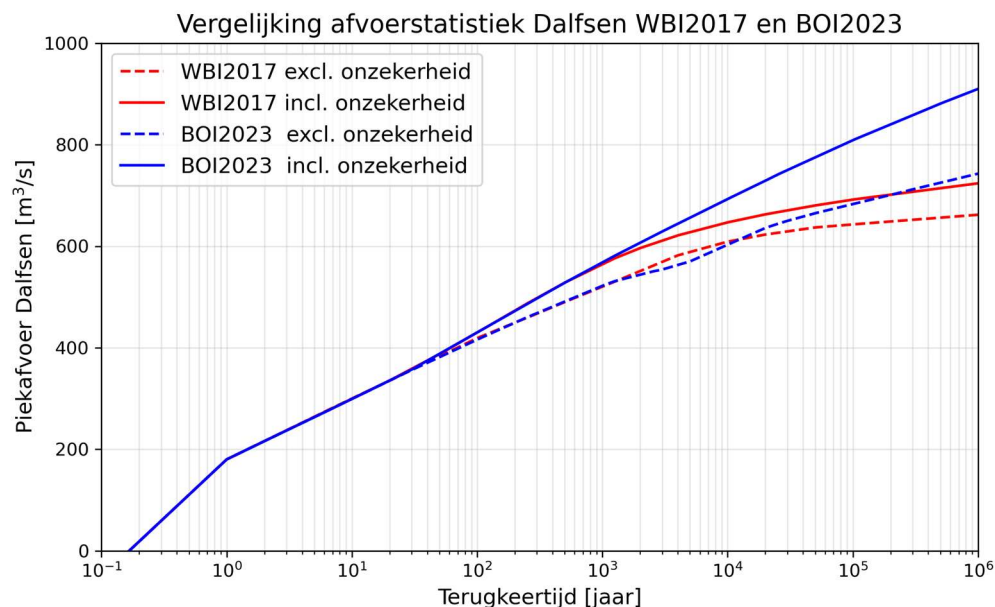
Terugkeer-tijd [jaar]	Ov.-kans per basisduur [-]	Piekafvoer excl. onz. [m ³ /s]	Sigma stat. onzekerheid [m ³ /s]	Piekafvoer incl. onz. [m ³ /s]
1,6667e-01	1	0	-	0
1	1,6667e-01	180	-	180
2	8,3333e-02	216	6	216
5	3,3333e-02	263	11	263
10	1,6667e-02	299	15	299
25	6,6667e-03	347	37	347
30	5,5556e-03	356	39	357
100	1,6667e-03	416	58	430
250	6,6667e-04	460	74	486
300	5,5556e-04	468	75	497
500	3,3333e-04	491	75	528
1.000	1,6667e-04	522	83	568
1.250	1,3333e-04	531	88	581
2.500	6,6667e-05	550	98	619
3.000	5,5556e-05	554	99	629
5.000	3,3333e-05	570	101	656
10.000	1,6667e-05	603	103	693
20.000	8,3333e-06	636	103	729
25.000	6,6667e-06	644	104	741
30.000	5,5556e-06	650	105	750
50.000	3,3333e-06	665	107	775
100.000	1,6667e-06	683	109	809
200.000	8,3333E-07	701	111	840
300.000	5,5556E-07	712	112	858
500.000	3,3333E-07	725	114	881
1.000.000	1,6667E-07	743	116	910

Tabel 4-11: Afvoerstatistiek piekafvoer Vecht bij Dalfsen voor 2035 (basisduur = 30 dagen).

Figuur 4-13 geeft een vergelijking van de statistiek van de piekafvoer bij Dalfsen met en zonder statistische onzekerheid met de afvoerstatistiek uit WBI2017. De nieuwe werklijn buigt veel minder sterk af dan de werklijn uit Geerse (2016c). Inclusief statistische onzekerheid is er tot een terugkeertijd van een miljoen jaar zelfs nauwelijks sprake meer van afbuiging.



Figuur 4-12: Statistiek piekafvoer Vecht bij Dalfsen BOI2023 voor zichtjaar 2035.



Figuur 4-13: Vergelijking statistiek piekafvoer Vecht bij Dalfsen WBI2017 en BOI2023.

4.5.2

Topduren en duurlijnen voor trapeziumvormige afvoergolven

Het tijdsverloop van de afvoer van de Vecht bij Dalfsen wordt in het probabilistisch model beschreven met een trapezium, met een basisduur van 30 dagen en een topduur afhankelijk van de piekafvoer. De basiswaarde van de afvoer, dat wil zeggen de minimale afvoer in dit tijdsverloop, is daarbij gelijk aan 0 m³/s. Het verband tussen de piekafvoer en de bijbehorende topduur is gegeven in Tabel 4-12. Deze gegevens zijn overgenomen uit WBI2017 (Geerse, 2016a).

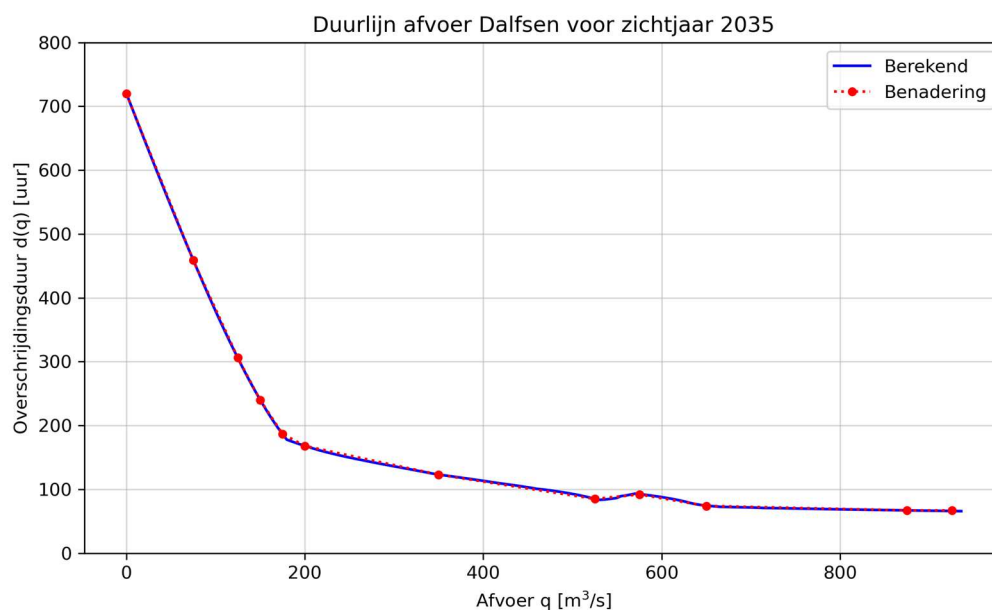
Piekafvoer [m ³ /s]	Topduur [uur]
0	720
180	48
1.000	48

Tabel 4-12: Topduren trapeziumvormige afvoergolven Vecht bij Dalfsen.

De duurlijn voor de Vecht bij Dalfsen is berekend op basis van bovenstaande topduren en de overschrijdingskansen zonder onzekerheid. Bijlage A beschrijft de toegepaste methode. Na toepassing van de methode is de duurlijn vastgelegd op basis van een beperkt aantal knikpunten. Het resultaat is gegeven in Tabel 4-13 en Figuur 4-14. De overschrijdingsduur per top convergeert niet naar de minimale topduur in Tabel 4-13. Bedenk echter dat het hier gaat om de overschrijdingsduur van een bepaalde afvoer *gegeven* dat de piekafvoer nog hoger is. Dit is nader toegelicht in paragraaf A.4.

Afvoer [m ³ /s]	Overschrijdingsduur per top [uur]
0	720
75	459
125	306
150	240
175	187
200	168
350	123
525	85
575	92
675	72
875	67
925	67

Tabel 4-13: Overschrijdingsduur per top ("durlijn") afvoer Vecht bij Dalfsen voor 2035.

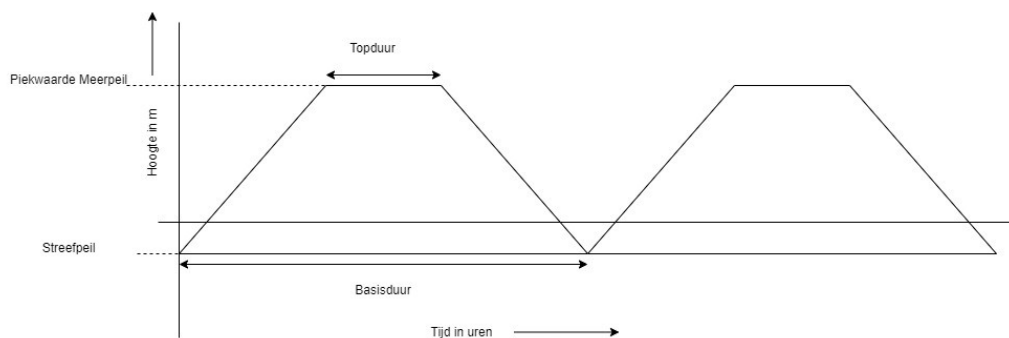


Figuur 4-14: Overschrijdingsduur per top afvoer Vecht bij Dalfsen voor zichtjaar 2035.

5 Meerpeilstatistiek

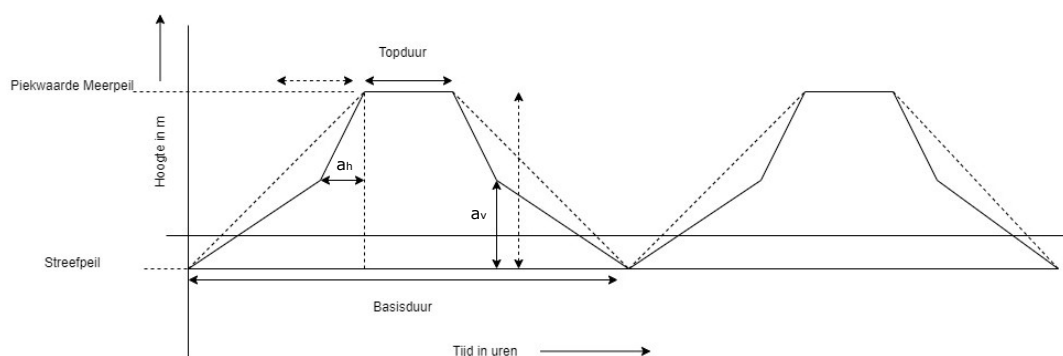
5.1 Inleiding

Het meerpeil is als basisstochast aanwezig bij het IJsselmeer, het Markermeer, het Grevelingenmeer, de Veluwerandmeren en het Volkerak-Zoommeer. Het meerpeil is – net als de rivierafvoer – een zogeheten trage stochast. Dat wil zeggen dat de variatie in de tijd relatief klein is ten opzichte van snelle stochasten zoals wind en zeewaterstand. De duur van een storm is meestal circa een dag, de duur van een meerpeilverloop is typisch één maand. Naast de overschrijdingskans van het piekmeerpeil is daarom ook het tijdsverloop van het meerpeil van belang. Dit tijdsverloop wordt in het probabilistisch model beschreven met een trapezium, met een basisduur van (meestal) 30 dagen en een topduur afhankelijk van het piekmeerpeil. Voor het Grevelingenmeer en de Veluwerandmeren geldt een afwijkende basisduur van respectievelijk 10 en 60 dagen (zie paragraaf 5.4 en paragraaf 5.5).



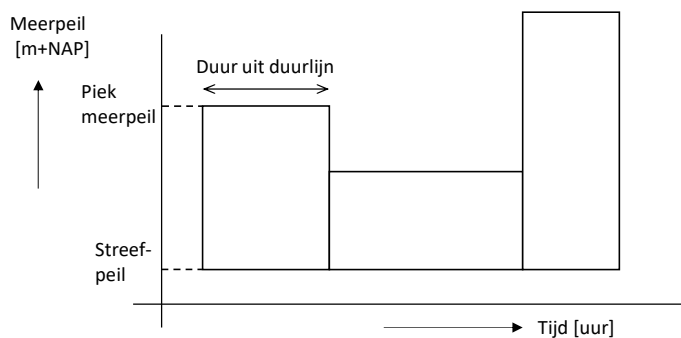
Figuur 5-1: Trapeziummodel voor meerpeilgolven.

Voor het modelleren van het meerpeil van het Volkerak-Zoommeer wordt een variatie op bovenstaand tijdsverloop gebruikt, waarbij wordt uitgegaan van geknikte trapezia, zie Figuur 5-2. Dit geknikte trapezium wordt gekenmerkt door een verticale insnoeringsfactor, die de relatieve hoogte geeft van de knik, en een horizontale insnoeringsfactor, die de relatieve breedte geeft ten opzichte van het ongeknikte trapezium. Zie voor meer informatie bijlage A, waarin de tijdsmodellering van afvoer- en meerpeilgolven gedetailleerd wordt beschreven. Voor de precieze waarden van de insnoeringsfactoren van het Volkerak-Zoommeer wordt verwezen naar paragraaf 5.6.



Figuur 5-2: Geknikt trapeziummodel voor meerpeilgolven, met insnoeringsfactoren a_h en a_v .

Hydra-Ring kan met twee verschillende numerieke tijdschema's voor meerpeilgolven rekenen: het NTI-rekenschema⁵ en het FBC-rekenschema⁶ (Deltares, 2025). Het NTI-schema modelleert meerpeilverlopen als trapezia, zoals hierboven beschreven. Het FBC-schema modelleert het meerpeil als een blok waarvan de hoogte het meerpeil geeft en de breedte de tijdsduur, zie Figuur 5-3. Deze tijdsduur is de gemiddelde duur waarmee het meerpeil wordt overschreden binnen meerpeilverlopen waarvan de piekwaarde groter of gelijk is aan dit meerpeil. Het verband tussen het meerpeil en de corresponderende gemiddelde overschrijdingsduur wordt ook wel de duurlijn genoemd. Om te zorgen dat de afvoerstatistiek in het FBC-schema consistent is met de modellering volgens meerpeiltrapezia, moet de duurlijn worden berekend op basis van de gegeven overschrijdingskansen, de basisduur en de topduur gegeven het piekmeerpeil. Bijlage A beschrijft de manier waarop de duurlijn wordt afgeleid.



Figuur 5-3: FBC-model voor een meerpeilverloop.

De benodigde statistiek voor de basisstochast meerpeil bestaat uit de overschrijdingskansen van het piekmeerpeil in de basisduur en de gegevens waarmee het tijdsverloop beschreven wordt, dat wil zeggen: het streefpeil (minimale meerpeil), de topduur afhankelijk van het piekmeerpeil en de duurlijn, die - zoals gezegd - alleen nodig is voor Hydra-Ring wanneer met het FBC-schema wordt gerekend. In de volgende paragrafen wordt deze statistiek per meer gepresenteerd, met daarbij een beknopte beschrijving van de manier waarop deze tot stand is gekomen.

De overschrijdingskansen van het piekmeerpeil hebben een statistische onzekerheid, die het gevolg is van onzekerheid over het type kansverdeling dat gebruikt moet worden en de onzekerheid bij het schatten van de parameters van deze verdeling. In bijlage B wordt uitgelegd dat de statistische onzekerheid in Hydra-Ring als extra stochast wordt toegevoegd. Voor de basisstochast meerpeil wordt daarbij uitgegaan van een additief model, waarbij de statistische onzekerheid een verschoven lognormaal verdeelde stochast is (zie paragraaf B.2). De waarde van de statistische onzekerheid wordt gekenmerkt door het gemiddelde (μ), de standaarddeviatie (σ) en de verschuiving (ε). Deze waarde wordt opgeteld bij het meerpeil zonder statistische onzekerheid. De genoemde onzekerheidsparameters mogen daarbij afhangen van het meerpeil zonder onzekerheid. In de praktijk geldt voor alle meerpeilstochasten die in dit hoofdstuk worden beschreven, dat de gemiddelde afwijking (μ) altijd gelijk is aan 0 m. Verder geldt altijd, dat het meerpeil zonder onzekerheid plus de bijbehorende verschuiving ε gelijk is aan het minimale meerpeil (streefpeil). Het gevolg daarvan is dat de het meerpeil inclusief statistische

⁵ Numerieke Tijd Integratie

⁶ Ferry Borges en Castanheta

onzekerheid nooit lager kan zijn dan dit streefpeil. Paragraaf B.4 geeft een nadere toelichting op de verschoven lognormale verdeling voor de statistische onzekerheid. In Hydra-NL wordt de statistische onzekerheid niet als aparte stochast beschouwd, maar wordt de statistische onzekerheid meegenomen door uit te gaan van de kansverdeling van de basisstochast inclusief statistische onzekerheid. In bijlage B is uitgelegd hoe deze kansverdeling kan worden bepaald door het uitintegreren van de statistische onzekerheid. In het vervolg van dit hoofdstuk is per meerpeilstochast telkens gegeven: de meerpeilstatistiek zonder statistische onzekerheid, bovengenoemde parameters van de statistische onzekerheid (μ , σ en ϵ) en de meerpeilstatistiek met statistische onzekerheid, die alleen nodig is voor Hydra-NL.

In de tabellen met statistiek van het piekmeerpeil in de navolgende paragrafen is telkens niet alleen de overschrijdingskans binnen de basisduur gegeven, maar ook de corresponderende terugkeertijd. In bijlage A is uitgelegd dat de overschrijdingskans kan worden omgerekend naar de overschrijdingsfrequentie door vermenigvuldiging met het aantal meerpeilgolven (basisduren) per winterhalfjaar (180 dagen). De jaarlijkse frequentie is dus altijd gelijk aan $180/B$ maal de overschrijdingskans binnen de basisduur, waarbij B gelijk is aan de basisduur in dagen. De terugkeertijd is gelijk aan 1 gedeeld door de jaarlijkse overschrijdingsfrequentie.

5.2 IJsselmeer

5.2.1 *Overschrijdingskansen piekmeerpeil en statistische onzekerheid*

Voor BOI2023 is gekozen om de statistiek voor IJsselmeer en Markermeer af te leiden met behulp van het model DEZY (Kuijper en Geerse, 2025), zodanig dat deze consistent is met de vergroting van de afvoercapaciteit bij de Afsluitdijk (aanleg van extra spuisluizen en twee gemalen), afvoerveranderingen en zeespiegelstijging. Bijlage D beschrijft deze afleiding in detail.

DEZY is een probabilistisch model, waarbij een groot aantal synthetische tijdreeksen van (o.a.) neerslag-/rivierafvoer en zeewaterstanden wordt doorgerekend met een relatief eenvoudig reservoirmodel, waarin kenmerken van de aanwezige spuisluizen en/of gemalen in het IJsselmeergebied zijn opgenomen. Om de meerpeilstatistiek voor het zichtjaar 2035 te bepalen, is de invoerstatistiek van DEZY, zoals de afvoerstatistiek van de IJssel en de Vecht, zoveel mogelijk consistent gemaakt met de BOI2023-statistiek voor het zichtjaar 2035 zoals beschreven in dit rapport. Ook is rekening gehouden met de nieuwe spuismiddelen (NSM), die momenteel worden gebouwd bij Den Oever, en gezamenlijk ca. 75% van de huidige spuicapaciteit bij Den Oever betreffen, en de aanleg van twee gemalen bij Den Oever met een totale maximale pompcapaciteit van $300 \text{ m}^3/\text{s}$. Zie bijlage D voor meer details.

De huidige versie van het model DEZY levert geen informatie over de statistische onzekerheid rondom de berekende piekmeerpeilen. Daarom is gekozen voor een pragmatische aanpak, waarbij de parameters van de kansverdeling waarmee deze onzekerheid wordt beschreven gelijk zijn genomen aan de waarden uit WBI2017 (Chbab, 2017). Deze keuze is naar verwachting conservatief, omdat er geen aanleiding is om te veronderstellen dat de onzekerheden in DEZY groter zijn dan de onzekerheid op basis van de voor WBI2017 gebruikte (korte) meetreeksen.

Tabel 5-2 geeft deze onzekerheidsparameters, die afhangen van het beschouwde meerpeil exclusief statistische onzekerheid. Zie paragraaf 5.1 en paragraaf B.4 voor een uitgebreide toelichting op de manier waarop de statistische onzekerheid voor

het meerpeil is gemodelleerd en de betekenis van de bijbehorende parameters van de verschoven lognormale verdeling. Aangenomen is dat de statistische onzekerheid bij streefpeil gelijk is aan nul (de onderste regel in Tabel 5-2 bevat daarom $\sigma=0$ m). De bijbehorende verschuiving ϵ is n t geen nul, omdat deze altijd kleiner dan nul moet zijn, zoals toegelicht in paragraaf B.4.

Tabel 5-1 geeft de resulterende statistiek van het piekmeerpeil van het IJsselmeer voor BOI2023 voor het zichtjaar 2035. Het piekmeerpeil exclusief statistische onzekerheid is, zoals hierboven toegelicht, afgeleid met behulp van het model DEZY. De afleiding van de statistiek inclusief statistische onzekerheid (uitgaande van de parameters uit Tabel 5-2) is beschreven in bijlage B (paragraaf B.2).

Terugkeer-tijd [jaar]	Ov.-kans per basisduur [-]	Piekmeerpeil excl. onz. [m+NAP]	Piekmeerpeil incl. onz. [m+NAP]
1,667e-01	1,000e-00	-0,40	-0,40
0,2	8,333e-01	-0,35	-0,35
0,4	4,167e-01	-0,25	-0,25
1	1,667e-01	-0,09	-0,09
2	8,333e-02	0,02	0,02
4	4,167e-02	0,11	0,11
10	1,667e-02	0,23	0,23
20	8,333e-03	0,32	0,32
40	4,167e-03	0,40	0,40
100	1,667e-03	0,50	0,50
200	8,333e-04	0,58	0,58
400	4,167e-04	0,65	0,66
1.000	1,667e-04	0,74	0,76
2.000	8,333e-05	0,80	0,84
4.000	4,167e-05	0,86	0,92
10.000	1,667e-05	0,94	1,03
20.000	8,333e-06	1,01	1,12
40.000	4,167e-06	1,07	1,21
100.000	1,667e-06	1,14	1,33
200.000	8,333e-07	1,19	1,43
400.000	4,167e-07	1,23	1,54
1.000.000	1,667e-07	1,29	1,69

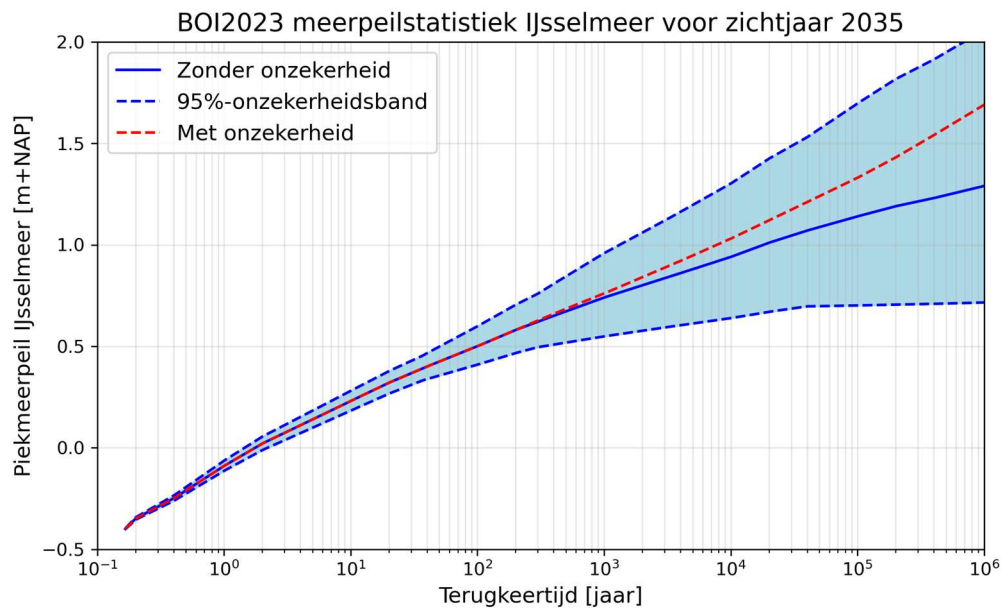
Tabel 5-1: Meerpeilstatistiek IJsselmeer voor 2035 (basisduur = 30 dagen).

Meerpeil [m+NAP]	Mu [m+NAP]	Sigma [m]	Eps [m]
-0,40	0,0	0,000	-0,001
0,39	0,0	0,031	-0,79
0,62	0,0	0,067	-1,02
0,84	0,0	0,136	-1,24
1,07	0,0	0,213	-1,47
1,30	0,0	0,350	-1,70

Tabel 5-2: Gegevens statische onzekerheid van het IJsselmeer.⁷

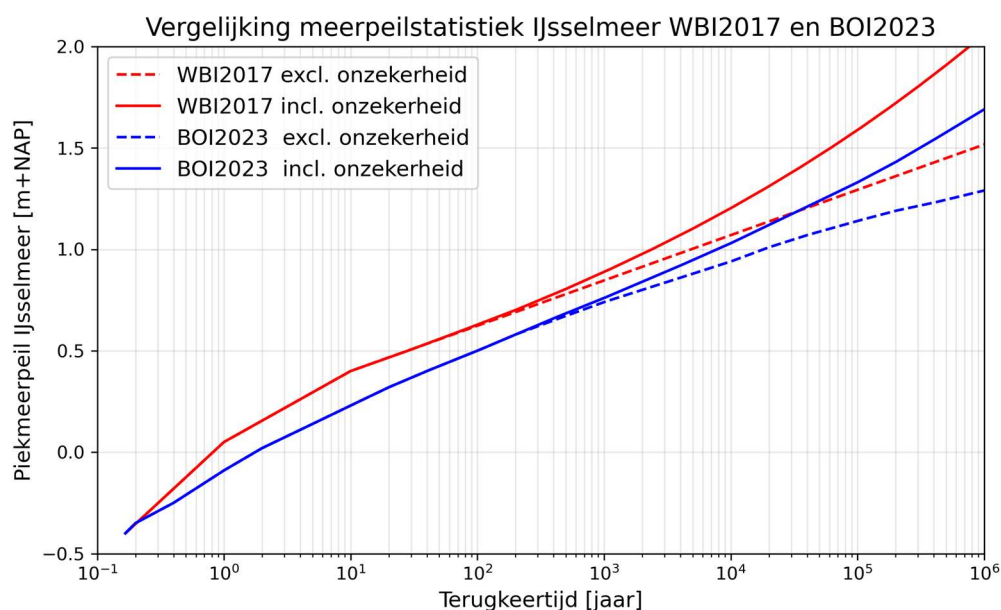
Figuur 5-4 bevat een grafische weergave van de statistiek uit Tabel 5-1, waarbij de 95%-onzekerheidsband is gebaseerd op de onzekerheidsparameters uit Tabel 5-2.

⁷ Door middel van inter-/extrapolatie worden de mu, sigma en eps bij andere meerpeilen berekend.



Figuur 5-4: Statistiek piekmeerpeil van IJsselmeer voor zichtjaar 2035.

Figuur 5-5 geeft een vergelijking van de statistiek van het piekmeerpeil van het IJsselmeer met en zonder statistische onzekerheid met de meerpeilstatistiek uit WBI2017. De meerpeilstatistiek in BOI2023 ligt over vrijwel het gehele bereik aan terugkeertijden ca. 10 – 15 cm lager dan in WBI2017 (het verschil bij meerpeilen inclusief statistische onzekerheid is vanaf terugkeertijden 100.000 jaar zelfs nog iets groter). Dit is het gecombineerde effect van de overstap naar een andere methode voor afleiding van de meerpeilstatistiek (gebruik van DEZY in plaats van meetreeksen) en de aanpassing naar zichtjaar 2035, inclusief de vergroting van de afvoercapaciteit bij de Afsluitdijk. Vooral dat laatste leidt tot lagere meerpeilen dan in WBI2017.



Figuur 5-5: Vergelijking statistiek piekmeerpeil IJsselmeer WBI2017 en BOI2023.

5.2.2 Topduren en duurlijnen voor trapeziumvormige meerpeilgolven

Het tijdsverloop van het meerpeil van het IJsselmeer wordt in het probabilistisch model beschreven met een trapezium, met een basisduur van 30 dagen en een topduur afhankelijk van het piekmeerpeil. Het streefpeil, dat wil zeggen het minimale meerpeil in dit tijdsverloop, is daarbij gelijk aan NAP-0,40 m. Het verband tussen de piekafvoer en de bijbehorende topduur is gegeven in Tabel 5-3. Deze gegevens zijn afgeleid met behulp van DEZY, zoals beschreven in bijlage D.

Piekmeerpeil [m+NAP]	Topduur [uur]
-0,40	720
-0,35	12
1,80	12

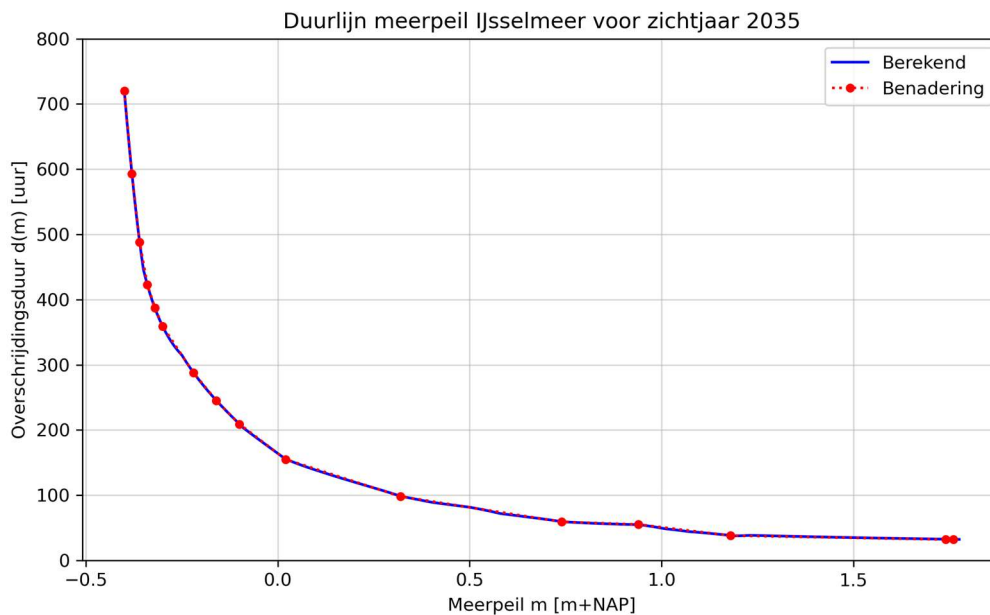
Tabel 5-3: Topduren trapeziumvormige meerpeilgolven IJsselmeer.

De duurlijn voor het meerpeil van het IJsselmeer is berekend op basis van bovenstaande topduren en de overschrijdingskansen zonder onzekerheid. Bijlage A beschrijft de toegepaste methode. Na toepassing van de methode is de duurlijn vastgelegd op basis van een beperkt aantal knikpunten. Het resultaat is gegeven in Tabel 5-4 en Figuur 5-6.

Meerpeil [m+NAP]	Overschrijdingsduur per top [uur]
-0,40	720
-0,38	593
-0,36	488
-0,34	423
-0,32	387
-0,30	359
-0,22	288
-0,16	245
-0,10	209
0,02	155
0,32	98
0,74	59
0,94	55
1,18	38
1,74	32
1,76	32

Tabel 5-4: Overschrijdingsduur per top ("durlijn") meerpeil IJsselmeer voor 2035.

De overschrijdingsduur per top convergeert niet naar de minimale topduur in Tabel 5-3. Bedenk echter dat het hier gaat om de overschrijdingsduur van een bepaald meerpeil *gegeven* dat het piekmeerpeil nog hoger is. Dit wordt nader toegelicht in paragraaf A.4.



Figuur 5-6: Overschrijdingsduur per top meerpeil IJsselmeer voor zichtjaar 2035.

5.3 Markermeer

5.3.1 Overschrijdingskansen piekmeerpeil en statistische onzekerheid

Voor de statistiek van het Markermeer is voor BOI2023, net als bij het IJsselmeer, gekozen om deze af te leiden met behulp van het model DEZY (Kuijper en Geerse, 2025), zodanig dat deze consistent is met de vergroting van de afvoercapaciteit bij de Afsluitdijk (aanleg van extra spuisluizen en twee gemalen), afvoeranderingen (gemalen en de Eem) en de meerpeilen van het IJsselmeer. Het model DEZY is reeds beknopt beschreven in paragraaf 5.2. Bijlage D beschrijft het model en de afleiding van de statistiek voor het IJsselmeer en Markermeer in meer detail.

Een belangrijke aanpassing ten opzichte van WBI2017 is dat de resulterende overschrijdingskansen van het piekmeerpeil zijn gegeven voor een basisduur van 30 dagen, terwijl in WBI2017 voor het Markermeer een basisduur van 60 dagen gold. Deze aanpassing hangt samen met de overstap op het gebruik van het model DEZY.

De huidige versie van het model DEZY levert geen informatie over de statistische onzekerheid rondom de berekende piekmeerpeilen. Daarom is – net als bij het IJsselmeer – gekozen voor een pragmatische aanpak, waarbij de parameters van de kansverdeling waarmee deze onzekerheid wordt beschreven gelijk zijn genomen aan de waarden uit WBI2017 (Chbab, 2017). Tabel 5-6 geeft deze onzekerheidsparameters, die afhangen van het beschouwde meerpeil exclusief statistische onzekerheid. Zie paragraaf 5.1 en paragraaf B.4 voor een uitgebreide toelichting op de manier waarop de statistische onzekerheid voor het meerpeil is gemodelleerd en de betekenis van de bijbehorende parameters van de verschoven lognormale verdeling. Aangenomen is dat de statistische onzekerheid bij streefpeil gelijk is aan nul (de onderste regel in Tabel 5-6 bevat daarom $\sigma=0$ m). De bijbehorende verschuiving ϵ is nét geen nul, omdat deze altijd kleiner dan nul moet zijn (zie paragraaf B.4). Tabel 5-5 geeft de resulterende statistiek van het piekmeerpeil van het Markermeer voor BOI2023 voor het zichtjaar 2035. Het piekmeerpeil exclusief statistische onzekerheid is, zoals hierboven toegelicht, afgeleid met behulp van het model DEZY.

De afleiding van de statistiek inclusief statistische onzekerheid (uitgaande van de parameters uit Tabel 5-6) is beschreven in bijlage B (paragraaf B.2).

Terugkeer-tijd [jaar]	Ov.-kans per basisduur [-]	Piekmeerpeil excl. onz. [m+NAP]	Piekmeerpeil incl. onz. [m+NAP]
1,667e-01	1,000e-00	-0,40	-0,40
0,2	8,333e-01	-0,39	-0,39
0,4	4,167e-01	-0,35	-0,35
1	1,667e-01	-0,25	-0,25
2	8,333e-02	-0,18	-0,18
4	4,167e-02	-0,10	-0,10
10	1,667e-02	-0,01	-0,01
20	8,333e-03	0,06	0,06
40	4,167e-03	0,13	0,13
100	1,667e-03	0,22	0,23
200	8,333e-04	0,28	0,30
400	4,167e-04	0,34	0,37
1.000	1,667e-04	0,40	0,46
2.000	8,333e-05	0,45	0,53
4.000	4,167e-05	0,50	0,60
10.000	1,667e-05	0,56	0,70
20.000	8,333e-06	0,60	0,77
40.000	4,167e-06	0,64	0,85
100.000	1,667e-06	0,68	0,96
200.000	8,333e-07	0,72	1,05
400.000	4,167e-07	0,75	1,14
1.000.000	1,667e-07	0,79	1,26

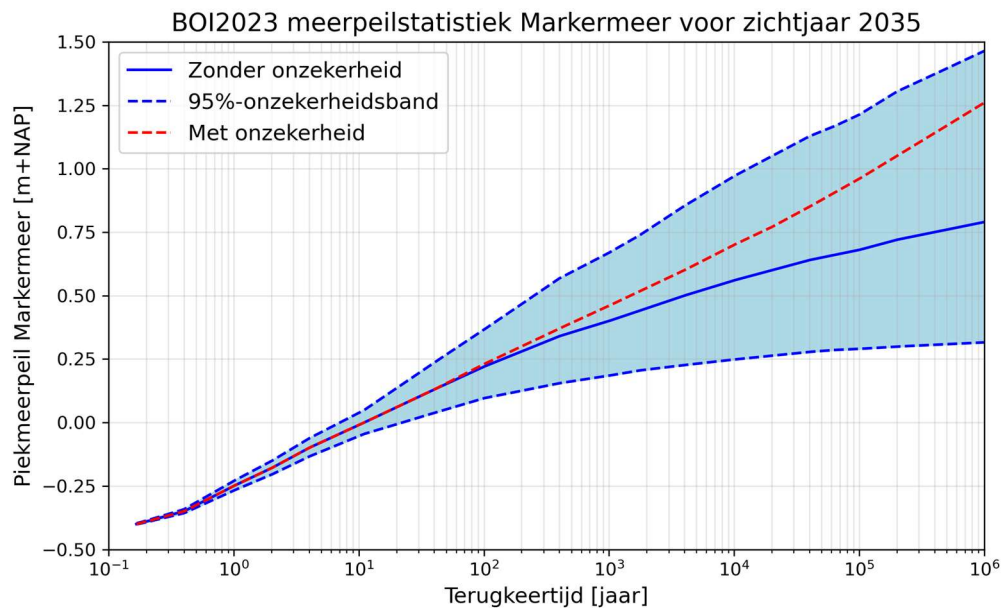
Tabel 5-5: Meerpeilstatistiek Markermeer voor 2035 (basisduur = 30 dagen).

Meerpeil [m+NAP]	Mu [m+NAP]	Sigma [m]	Eps [m]
-0,40	0,0	0,000	-0,001
0,00	0,0	0,024	-0,40
0,22	0,0	0,069	-0,62
0,44	0,0	0,136	-0,84
0,66	0,0	0,226	-1,06
0,89	0,0	0,348	-1,29

Tabel 5-6: Gegevens statische onzekerheid van het Markermeer.⁸

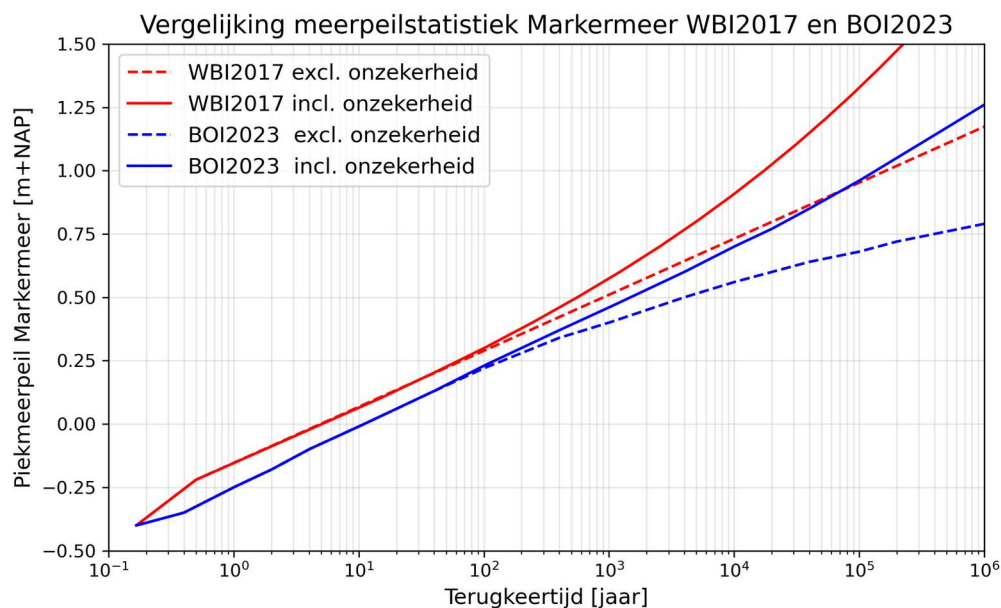
Figuur 5-7 bevat een grafische weergave van de statistiek uit Tabel 5-5, waarbij de 95%-onzekerheidsband is gebaseerd op de onzekerheidsparameters uit Tabel 5-6. Zoals eerder aangegeven, is vanuit pragmatisch oogpunt gekozen om de statistische onzekerheid gelijk te nemen aan WBI2017. Deze keuze is naar verwachting conservatief, omdat er geen aanleiding is om te veronderstellen dat de onzekerheden in DEZY groter zijn dan de onzekerheid op basis van de voor WBI2017 gebruikte (korte) meetreeksen.

⁸ Door middel van inter-/extrapolatie worden de mu, sigma en eps bij andere meerpeilen berekend.



Figuur 5-7: Statistiek piekmeerpeil van Markermeer voor zichtjaar 2035.

Figuur 5-8 geeft een vergelijking van de statistiek van het piekmeerpeil van het Markermeer met en zonder statistische onzekerheid met de meerpeilstatistiek uit WBI2017. De meerpeilstatistiek in BOI2023 ligt voor terugkeertijden onder de 1.000 jaar ca. 5 – 10 cm lager dan in WBI2017. Voor hogere terugkeertijden loopt het verschil verder op. De belangrijkste afvoermogelijkheid voor het Markermeer is richting het IJsselmeer. Aangezien de IJsselmeerpeilen door vergroting van de afvoercapaciteit bij de Afsluitdijk in BOI2023 lager liggen dan in WBI2017 (zie paragraaf 5.2), is het begrijpelijk dat ook de Markermeerpeilen lager liggen. De grotere verschillen in het extreme bereik zijn een gevolg van de overstap naar het gebruik van het model DEZY voor het afleiden van de meerpeilstatistiek.



Figuur 5-8: Vergelijking statistiek piekmeerpeil Markermeer WBI2017 en BOI2023.

5.3.2 Topduren en duurlijnen voor trapeziumvormige meerpeilgolven

Het tijdsverloop van het meerpeil van het Markermeer wordt in het probabilistisch model beschreven met een trapezium, met een basisduur van 30 dagen en een topduur afhankelijk van het piekmeerpeil. Het streefpeil, dat wil zeggen het minimale meerpeil in dit tijdsverloop, is daarbij gelijk aan NAP-0,40 m. Het verband tussen de piekafvoer en de bijbehorende topduur is gegeven in Tabel 5-7. Deze gegevens zijn afgeleid met behulp van DEZY, zoals beschreven in bijlage D.

Piekmeerpeil [m+NAP]	Topduur [uur]
-0,40	720
-0,35	36
1,80	36

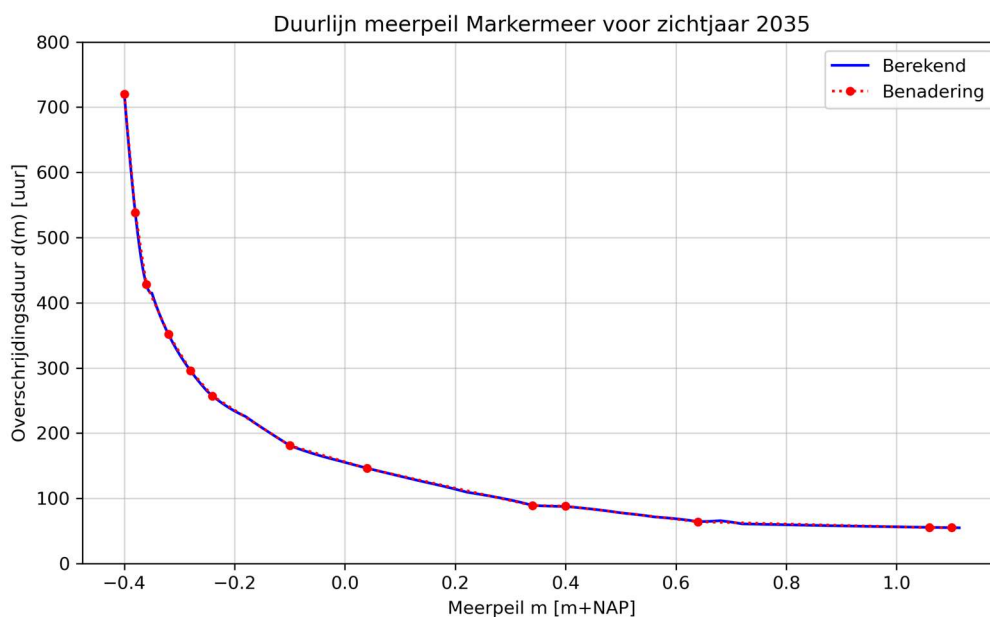
Tabel 5-7: Topduren trapeziumvormige meerpeilgolven Markermeer.

De duurlijn voor het meerpeil van het Markermeer is berekend op basis van bovenstaande topduren en de overschrijdingskansen zonder onzekerheid. Bijlage A beschrijft de toegepaste methode. Na toepassing van de methode is de duurlijn vastgelegd op basis van een beperkt aantal knikpunten. Het resultaat is gegeven in Tabel 5-8 en Figuur 5-9.

Meerpeil [m+NAP]	Overschrijdingsduur per top [uur]
-0,40	720
-0,38	538
-0,36	428
-0,32	352
-0,28	296
-0,24	257
-0,10	181
0,04	146
0,34	89
0,40	88
0,64	64
1,06	55
1,10	55

Tabel 5-8: Overschrijdingsduur per top ("durlijn") meerpeil Markermeer voor 2035.

De overschrijdingsduur per top convergeert niet naar de minimale topduur in Tabel 5-8. Bedenk echter dat het hier gaat om de overschrijdingsduur van een bepaald meerpeil *gegeven* dat het piekmeerpeil nog hoger is. Dit wordt nader toegelicht in paragraaf A.4



Figuur 5-9: Overschrijdingsduur per top meerpeil Markermeer voor zichtjaar 2035.

5.4 Grevelingenmeer

5.4.1 Overschrijdingskansen piekmeerpeil en statistische onzekerheid

De meerpeilstatistiek voor het Grevelingenmeer is onveranderd ten opzichte van WBI2017. De betreffende overschrijdingskansen van het piekmeerpeil zonder statistische onzekerheid (Tabel 5-9) en de bijbehorende topduren (zie paragraaf 5.4.2) zijn afgeleid in Geerse (2012). Deze statistiek is destijds bepaald bij overstap van het model ProMoVera, dat gebruikt werd voor de HR2006 van de C-keringen, naar Hydra-Zoet (voorloper van het huidige Hydra-NL). Daarbij was het doel om statistiek af te leiden voor Hydra-Zoet die zo goed mogelijk overeenstemde met de meerpeilstatistiek zoals daarvoor gebruikt in ProMoVera.

Meerpeil [m+NAP]	Ov.-kans per basisduur excl. onz. [-]	Terugkeertijd [jaar]
-0,23	1,0000e-00	5,556e-02
-0,12	5,5556e-01	0,1
0,18	5,5556e-06	10.000

Tabel 5-9: Meerpeilstatistiek Grevelingenmeer voor 2035 excl. onz. (basisduur 10 dagen).

De statistische onzekerheid en de meerpeilstatistiek inclusief onzekerheid zoals toegepast in WBI2017 zijn afgeleid in Geerse (2016b). Tabel 5-10 geeft deze onzekerheidsparameters, die afhangen van het beschouwde meerpeil exclusief statistische onzekerheid. Zie paragraaf 5.1 en paragraaf B.4 voor een uitgebreide toelichting op de manier waarop de statistische onzekerheid voor het meerpeil is gemodelleerd en de betekenis van de bijbehorende parameters van de verschoven lognormale verdeling. Voor meerpeilen NAP+0,00 m en hoger komt de σ in Tabel 5-10 overeen met de waarden in Tabel 4-3 van Geerse (2016b). Aangenomen is dat de statistische onzekerheid bij streefpeil gelijk is aan nul (de onderste regel in Tabel 5-10 bevat daarom $\sigma=0$ m). De bijbehorende verschuiving ε is n t geen nul, omdat deze altijd kleiner dan nul moet zijn, zoals toegelicht in paragraaf B.4.

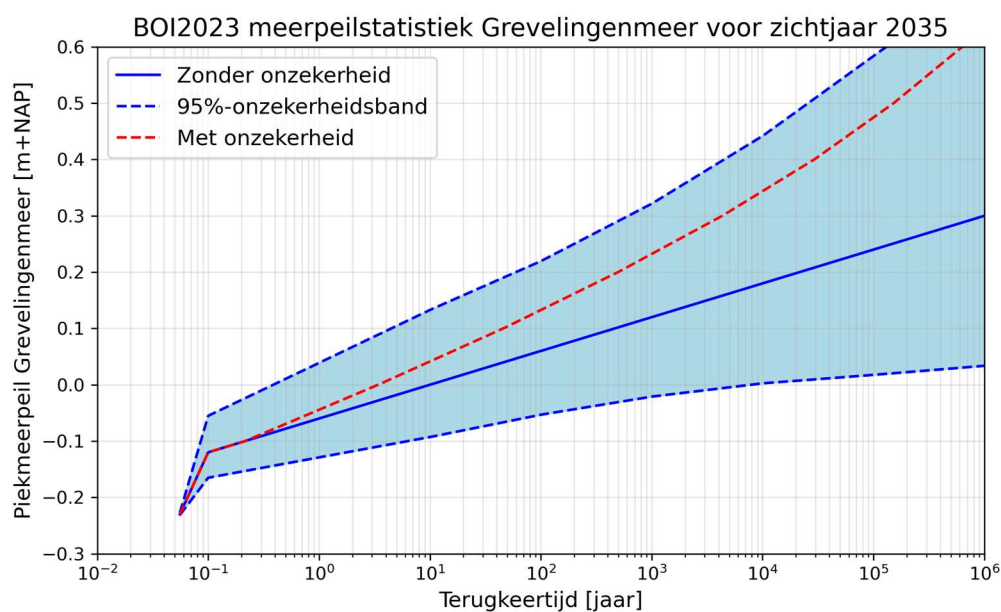
Meerpeil [m+NAP]	Mu [m+NAP]	Sigma [m]	Eps [m]
-0,23	0,0	0,000	-0,001
0,00	0,0	0,058	-0,23
0,06	0,0	0,070	-0,29
0,12	0,0	0,088	-0,35
0,18	0,0	0,113	-0,41
0,24	0,0	0,146	-0,47

Tabel 5-10: Gegevens statistische onzekerheid van het Grevelingenmeer.⁹

Tabel 5-11 geeft de overschrijdingskansen van het piekmeerpeil van het Grevelingenmeer met statistische onzekerheid. Figuur 5-10 bevat een grafische weergave van de statistiek uit Tabel 5-9 en Tabel 5-11, waarbij de 95%-onzekerheidsband is gebaseerd op de onzekerheidsparameters uit Tabel 5-10.

Meerpeil [m+NAP]	Ov.-kans per basisduur incl. onz. [-]	Terugkeertijd [jaar]
-0,23	1,000e-00	5,556e-02
-0,12	5,556e-01	0,1
-0,11	3,785e-01	1,468e-01
-0,10	2,579e-01	2,154e-01
0,00	1,626e-02	3,417e+00
0,10	1,209e-03	4,595e+01
0,20	1,117e-04	4,974e+02
0,30	1,282e-05	4,334e+03
0,40	1,901e-06	2,922e+04
0,50	3,655e-07	1,520e+05
0,60	8,792e-08	6,319e+05
0,70	2,522e-08	2,203e+06

Tabel 5-11: Meerpeilstatistiek Grevelingenmeer voor 2035 incl. onz. (basisduur 10 dagen).



Figuur 5-10: Statistiek piekmeerpeil van Grevelingenmeer voor zichtjaar 2035.

⁹ Door middel van inter-/extrapolatie worden de mu, sigma en eps bij andere meerpeilen berekend.

5.4.2 Topduren en duurlijnen voor trapeziumvormige meerpeilgolven

Het tijdsverloop van het meerpeil van het Grevelingenmeer wordt in het probabilistisch model beschreven met een trapezium, met een basisduur van 10 dagen en een topduur afhankelijk van het piekmeerpeil. Het streefpeil, dat wil zeggen het minimale meerpeil in dit tijdsverloop, is daarbij gelijk aan NAP-0,23 m. Het verband tussen de piekafvoer en de bijbehorende topduur is gegeven in Tabel 5-12. Deze gegevens zijn onveranderd ten opzichte van WBI2017 en eerder reeds afgeleid in Geerse (2012) op basis van meerpeilstatistiek in ProMoVera.

Piekmeerpeil [m+NAP]	Topduur [uur]
-0,23	240
-0,20	240
-0,08	18
1,80	18

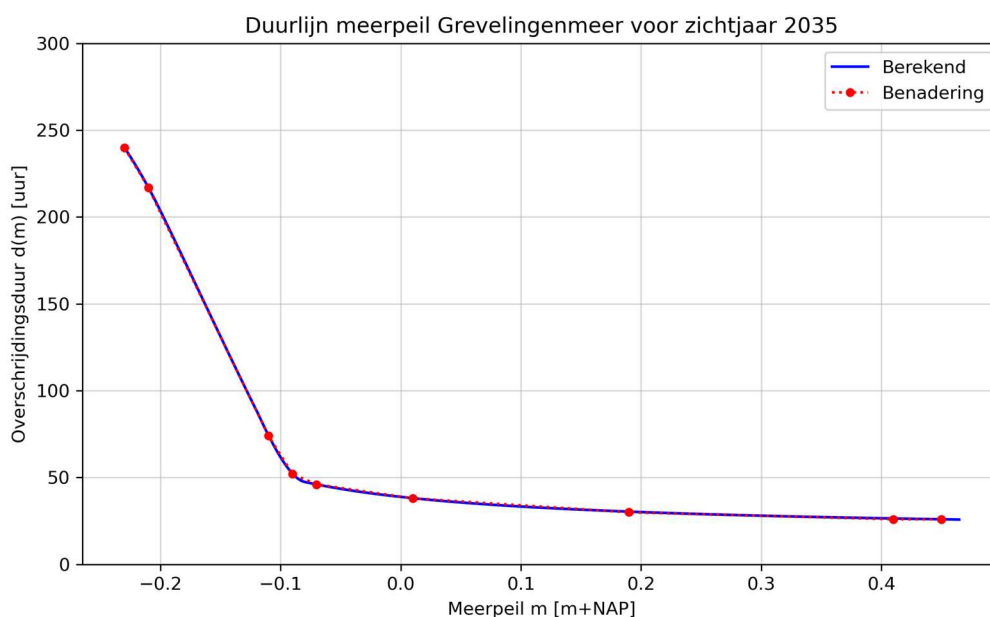
Tabel 5-12: Topduren trapeziumvormige meerpeilgolven Grevelingenmeer.

De duurlijn voor het meerpeil van het Grevelingenmeer is berekend op basis van bovenstaande topduren en de overschrijdingskansen zonder onzekerheid. Bijlage A beschrijft de toegepaste methode. Na toepassing van de methode is de duurlijn vastgelegd op basis van een beperkt aantal knikpunten. Het resultaat is gegeven in Tabel 5-13 en Figuur 5-11.

Meerpeil [m+NAP]	Overschrijdingsduur per top [uur]
-0,23	240
-0,21	217
-0,11	74
-0,09	52
-0,07	46
0,01	38
0,19	30
0,41	26
0,45	26

Tabel 5-13: Overschrijdingsduur per top ("duurlijn") meerpeil Grevelingenmeer voor 2035.

De overschrijdingsduur per top convergeert niet naar de minimale topduur in Tabel 5-13. Bedenk echter dat het hier gaat om de overschrijdingsduur van een bepaald meerpeil *gegeven* dat het piekmeerpeil nog hoger is. Dit wordt nader toegelicht in paragraaf A.4.



Figuur 5-11: Overschrijdingsduur per top meerpeil Grevelingenmeer voor zichtjaar 2035.

5.5 Veluwerandmeren

5.5.1 Overschrijdingskansen piekmeerpeil en statistische onzekerheid

De meerpeilstatistiek voor de Veluwerandmeren is onveranderd ten opzichte van WBI2017. De betreffende overschrijdingskansen van het piekmeerpeil zonder statistische onzekerheid (Tabel 5-14) en de bijbehorende topduren (zie paragraaf 5.5.2) zijn afgeleid in Geerse (2007). Deze statistiek is destijds bepaald om toe passen in Hydra-VIJ (voorloper van het huidige Hydra-NL) ten behoeve van de HR2006 van de C-keringen. Daarbij was het doel om statistiek af te leiden die zo goed mogelijk overeenstemde met de meerpeilstatistiek zoals daarvóór gebruikt in ProMoVera (Vlag en Bak, 2004).

Meerpeil [m+NAP]	Ov.-kans per basisduur excl. onz. [-]	Terugkeertijd [jaar]
-0,30	1,0	3,333e-01
-0,27	0,57	5,848e-01
-0,22	0,45	7,407e-01
-0,10	0,333	1
-0,07	0,1226	2,719e+00
1,00	2,761e-06	1,207e+05

Tabel 5-14: Meerpeilstatistiek Veluwerandmeren voor 2035 excl. onz. (basisduur 60 dagen).

De statistische onzekerheid en de meerpeilstatistiek inclusief onzekerheid zoals toegepast in WBI2017 zijn afgeleid in Geerse (2016b). Tabel 5-15 geeft deze onzekerheidsparameters, die afhangen van het beschouwde meerpeil exclusief statistische onzekerheid. Zie paragraaf 5.1 en paragraaf B.4 voor een uitgebreide toelichting op de manier waarop de statistische onzekerheid voor het meerpeil is gemodelleerd en de betekenis van de bijbehorende parameters van de verschoven lognormale verdeling. Voor meerpeilen NAP+0,06 m en hoger komt de σ in Tabel 5-15 overeen met de waarden in Tabel 4-3 van Geerse (2016b). De aanname is dat de statistische onzekerheid bij streefpeil gelijk is aan nul (de onderste regel in

Tabel 5-15 bevat daarom $\sigma=0$ m). De bijbehorende verschuiving ε is nét geen nul, omdat deze altijd kleiner moet zijn (paragraaf B.4).

Meerpeil [m+NAP]	Mu [m+NAP]	Sigma [m]	Eps [m]
-0,30	0,0	0,000	-0,001
0,06	0,0	0,024	-0,36
0,29	0,0	0,072	-0,59
0,52	0,0	0,141	-0,82
0,75	0,0	0,234	-1,05
0,98	0,0	0,360	-1,28

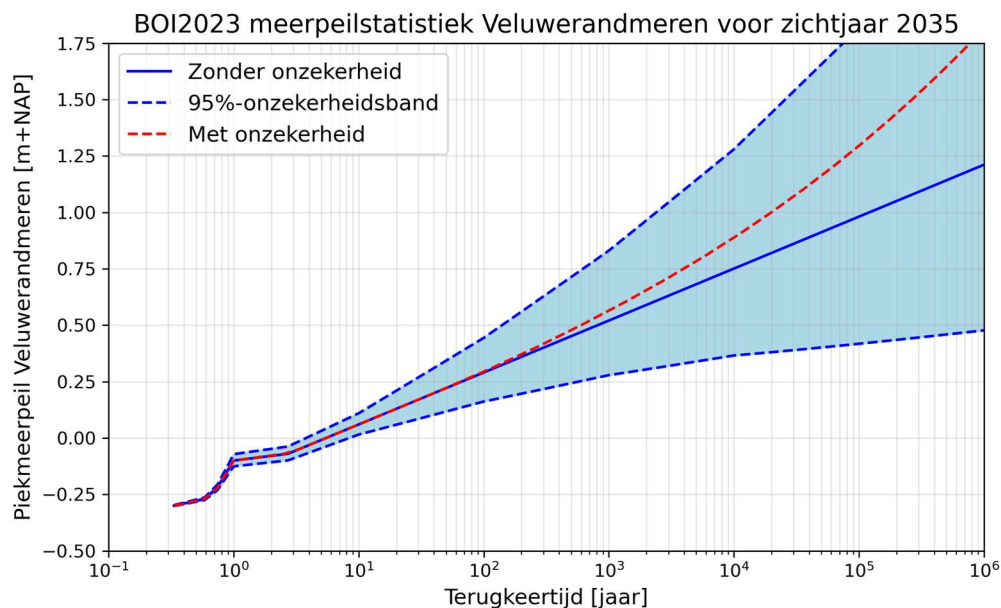
Tabel 5-15: Gegevens statistische onzekerheid van de Veluwerandmeren.¹⁰

Tabel 5-16 geeft de overschrijdingskansen van het piekmeerpeil van de Veluwerandmeren met statistische onzekerheid. Figuur 5-12 bevat een grafische weergave van de statistiek uit Tabel 5-14 en Tabel 5-16, waarbij de 95%-onzekerheidsband is gebaseerd op de onzekerheidsparameters uit Tabel 5-15.

Meerpeil [m+NAP]	Ov.-kans per basisduur incl. onz. [-]	Terug- Keertijd [jaar]	Meerpeil [m+NAP]	Ov.-kans Per basisduur incl. onz. [-]	Terug- Keertijd [jaar]
-0,30	1,000e-00	3,333e-01	0,70	1,196e-04	2,787e+03
-0,27	5,700e-01	5,848e-01	0,80	5,945e-05	5,607e+03
-0,22	4,500e-01	7,407e-01	0,90	3,090e-05	1,079e+04
-0,10	3,330e-01	1	1,00	1,673e-05	1,992e+04
-0,07	1,314e-01	2,537e+00	1,10	9,389e-06	3,550e+04
-0,05	1,004e-01	3,320e+00	1,20	5,445e-06	6,122e+04
0,00	6,088e-02	5,475e+00	1,30	3,253e-06	1,025e+05
0,10	2,239e-02	1,489e+01	1,40	1,997e-06	1,669e+05
0,20	8,237e-03	4,047e+01	1,50	1,255e-06	2,656e+05
0,30	3,154e-03	1,057e+02	1,60	8,063e-07	4,134e+05
0,40	1,285e-03	2,594e+02	1,70	5,277e-07	6,317e+05
0,50	5,557e-04	5,998e+02	1,80	3,512e-07	9,491e+05
0,60	2,521e-04	1,322e+03			

Tabel 5-16: Meerpeilstatistiek Veluwerandmeren voor 2035 incl. onz. (basisduur 60 dagen).

¹⁰ Door middel van inter-/extrapolatie worden de mu, sigma en eps bij andere meerpeilen berekend.



Figuur 5-12: Statistiek piekmeerpeil van Veluwerandmeren voor zichtjaar 2035.

5.5.2 Topduren en duurlijnen voor trapeziumvormige meerpeilgolven

Het tijdsverloop van het meerpeil van de Veluwerandmeren wordt in het probabilistisch model beschreven met een trapezium, met een basisduur van 60 dagen en een topduur afhankelijk van het piekmeerpeil. Het streefpeil, dat wil zeggen het minimale meerpeil in dit tijdsverloop, is daarbij gelijk aan NAP-0,30 m. Het verband tussen de piekafvoer en de bijbehorende topduur is gegeven in Tabel 5-17. Deze gegevens zijn onveranderd ten opzichte van WBI2017 en eerder reeds afgeleid in Geerse (2007) op basis van meerpeilstatistiek in ProMoVera.

Piekmeerpeil [m+NAP]	Topduur [uur]
-0,30	1440
-0,05	72
1,80	72

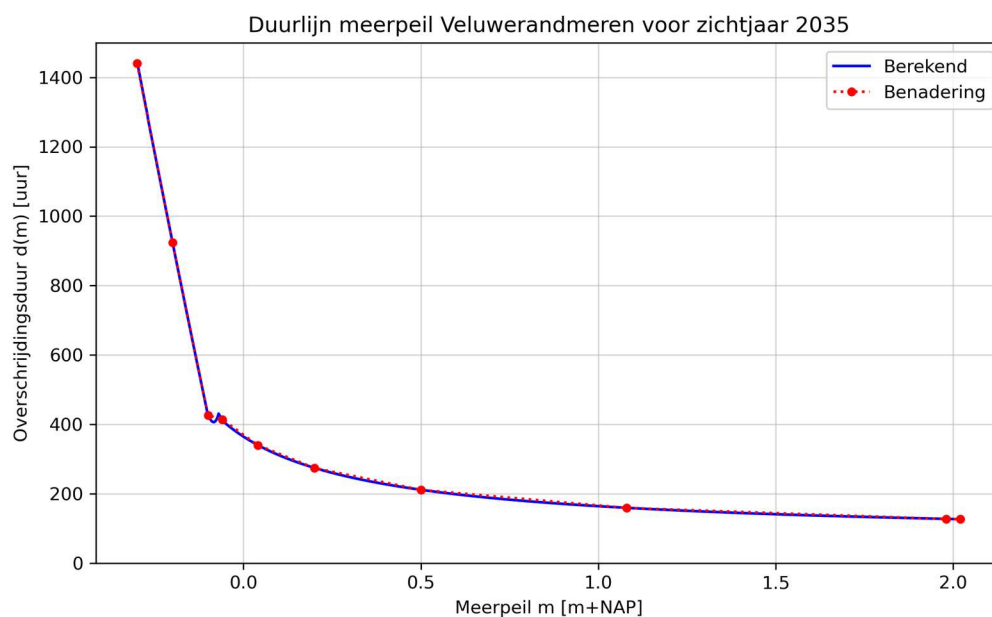
Tabel 5-17: Topduren trapeziumvormige meerpeilgolven Veluwerandmeren.

De duurlijn voor het meerpeil van de Veluwerandmeren is berekend op basis van bovenstaande topduren en de overschrijdingskansen zonder onzekerheid. Bijlage A beschrijft de toegepaste methode. Na toepassing van de methode is de duurlijn vastgelegd op basis van een beperkt aantal knikpunten. Het resultaat is gegeven in Tabel 5-18 en Figuur 5-13.

Meerpeil [m+NAP]	Overschrijdingsduur per top [uur]
-0,30	1440
-0,20	924
-0,10	426
-0,06	414
0,04	340
0,20	274
0,50	211
1,08	159
1,98	127
2,02	127

Tabel 5-18: Overschrijdingsduur per top ("duurlijn") meerpeil Veluwerandmeren voor 2035.

De overschrijdingsduur per top convergeert niet naar de minimale topduur in Tabel 5-18. Bedenk echter dat het hier gaat om de overschrijdingsduur van een bepaald meerpeil *gegeven* dat het piekmeerpeil nog hoger is. Dit is nader toegelicht in paragraaf A.4.



Figuur 5-13: Overschrijdingsduur per top meerpeil Veluwerandmeren voor zichtjaar 2035.

5.6 Volkerak-Zoommeer

5.6.1 Overschrijdingskansen piekmeerpeil en statistische onzekerheid

De meerpeilstatistiek voor het Volkerak-Zoommeer is onveranderd ten opzichte van WBI2017. Hieronder is toegelicht hoe deze statistiek tot stand is gekomen.

In eerste instantie zijn de overschrijdingskansen zonder statistische onzekerheid en de bijbehorende topduren afgeleid in Geerse (2012). Deze statistiek is destijds bepaald bij overstap van het model ProMoVera, dat gebruikt werd voor de HR2006 van de C-keringen, naar Hydra-Zoet (voorloper van het huidige Hydra-NL). Daarbij was het doel om statistiek af te leiden voor Hydra-Zoet die zo goed mogelijk overeenstemde met de meerpeilstatistiek zoals daarvóór gebruikt in ProMoVera.

Later zijn ook de statistische onzekerheid en de meerpeilstatistiek inclusief onzekerheid afgeleid zoals beschreven in Geerse (2016b).

Bovengenoemde meerpeilstatistiek voor het Volkerak-Zoommeer is geldig voor een basisduur van 20 dagen. In 2017 is begonnen met de uitbreiding van het belasting-model voor het Volkerak-Zoommeer, waarbij rekening wordt gehouden met de inzet van het Volkerak-Zoommeer voor waterberging als onderdeel van de Ruimte voor de Rivier maatregelen. Daarbij was het nodig om over te stappen op statistiek voor een basisduur van 30 dagen, om aan te sluiten bij de afvoerstatistiek van de Rijn (bij Lobith), die als gevolg van deze maatregel van invloed is op de hydraulische belastingen op het Volkerak-Zoommeer.

De omzetting van de meerpeilstatistiek van het Volkerak-Zoommeer bij een basisduur van 20 dagen naar meerpeilstatistiek bij een basisduur van 30 dagen, zoals toegepast in WBI2017, is beschreven in Geerse et al. (2017).

Tabel 5-19 bevat de betreffende overschrijdingskansen van het piekmeerpeil zonder statistische onzekerheid. Tabel 5-20 geeft deze parameters van de statistische onzekerheid, die afhangen van het beschouwde meerpeil exclusief statistische onzekerheid, en Tabel 5-21 geeft de overschrijdingskansen van het piekmeerpeil van het Volkerak-Zoommeer met statistische onzekerheid. Zie paragraaf 5.1 en paragraaf B.4 voor een uitgebreide toelichting op de manier waarop de statistische onzekerheid voor het meerpeil is gemodelleerd en de betekenis van de bijbehorende parameters van de verschoven lognormale verdeling. In tegenstelling tot Tabel 2-7 in Geerse et al. (2017) is op de onderste regel in Tabel 5-20 een verschuiving $\epsilon \neq 0$ opgenomen, omdat deze waarde altijd kleiner dan nul moet zijn (zie paragraaf B.4).

Meerpeil [m+NAP]	Ov.-kans per basisduur excl. onz. [-]	Terugkeertijd [jaar]
0,05	1,000e-00	1,667e-01
0,12	6,000e-01	2,778e-01
0,22	1,667e-01	1
0,94	1,667e-05	10.000
1,12	1,667e-06	100.000

Tabel 5-19: Meerpeilstatistiek Volkerak-Zoommeer voor 2035 excl. onz. (basisduur 30 dagen).

Meerpeil [m+NAP]	Mu [m+NAP]	Sigma [m]	Eps [m]
0,05	0,0	0,0000	-0,001
0,40	0,0	0,0705	-0,35
0,58	0,0	0,1071	-0,53
0,76	0,0	0,1617	-0,71
0,94	0,0	0,2311	-0,89
1,12	0,0	0,3113	-1,07
1,84	0,0	0,7000	-1,79

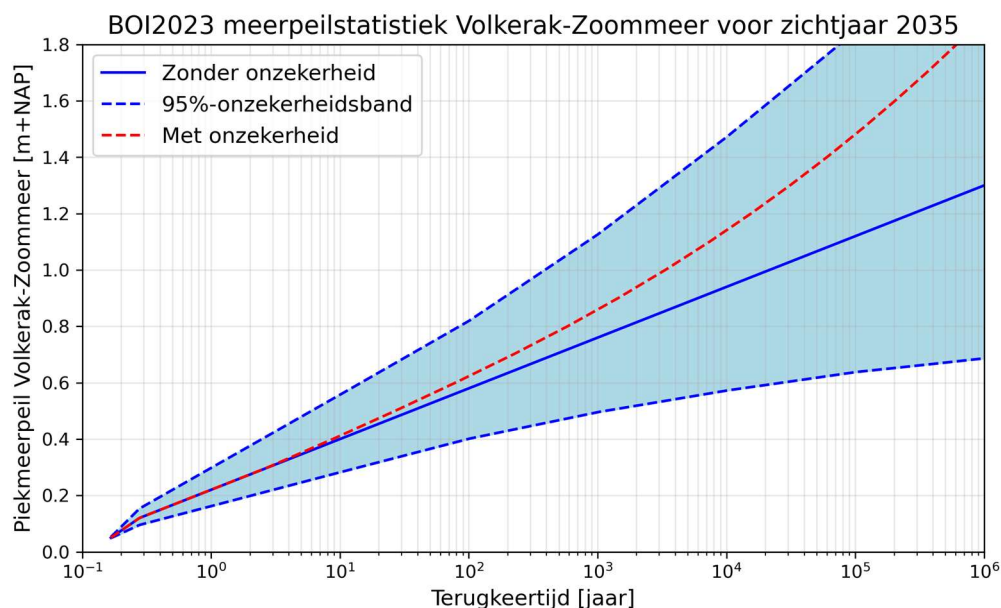
Tabel 5-20: Gegevens statische onzekerheid van het Volkerak-Zoommeer.¹¹

¹¹ Door middel van inter-/extrapolatie worden de mu, sigma en eps bij andere meerpeilen berekend.

Meerpeil [m+NAP]	Ov.-kans per basisduur incl. onz. [-]	Terug- Keertijd [jaar]	Meerpeil [m+NAP]	Ov.-kans per basisduur incl. onz. [-]	Terug- Keertijd [jaar]
0,05	1,000e-00	1,667e-01	1,50	1,484e-06	1,123E+05
0,12	6,000e-01	2,778e-01	1,60	8,206e-07	2,031E+05
0,22	1,669e-01	9,986E-01	1,70	4,668e-07	3,570E+05
0,30	6,032e-02	2,763E+00	1,80	2,725e-07	6,116E+05
0,40	1,896e-02	8,790E+00	1,90	1,630e-07	1,022E+06
0,50	6,219e-03	2,680E+01	2,00	9,960e-08	1,673E+06
0,60	2,117e-03	7,873E+01	2,10	6,212e-08	2,683E+06
0,70	7,546e-04	2,209E+02	2,20	3,947e-08	4,223E+06
0,80	2,858e-04	5,832E+02	2,30	2,552e-08	6,531E+06
0,90	1,157e-04	1,441E+03	2,40	1,676e-08	9,944E+06
1,00	4,974e-05	3,351E+03	2,60	7,544e-09	2,209E+07
1,10	2,259e-05	7,378E+03	2,70	5,160e-09	3,230E+07
1,20	1,076e-05	1,549E+04	2,80	3,571e-09	4,667E+07
1,30	5,356e-06	3,112E+04	2,90	2,498e-09	6,672E+07
1,40	2,771e-06	6,015E+04	3,00	1,765e-09	9,443E+07

Tabel 5-21: Meerpeilstatistiek Volkerak-Zoommeer voor 2035 incl. onz. (basisduur 30 dagen).

Figuur 5-14 bevat een grafische weergave van de statistiek uit Tabel 5-19 en Tabel 5-21, waarbij de 95%-onzekerheidsband is gebaseerd op de onzekerheidsparameters uit Tabel 5-20. Dit komt overeen met Figuur 2-15 in Geerse et al. (2017).



Figuur 5-14: Statistiek piekmeerpeil van Volkerak-Zoommeer voor zichtjaar 2035.

5.6.2

Topduren en duurlijnen voor trapeziumvormige meerpeilgolven

Het tijdsverloop van het meerpeil van het Volkerak-Zoommeer wordt in het probabilistisch model beschreven met een trapezium, met een basisduur van 30 dagen en een topduur afhankelijk van het piekmeerpeil. Het streefpeil, dat wil zeggen het minimale meerpeil in dit tijdsverloop, is daarbij gelijk aan NAP+0,05 m. Het verband tussen de piekafvoer en de bijbehorende topduur is gegeven in Tabel 5-22. Deze gegevens zijn onveranderd ten opzichte van WBI2017 en afgeleid

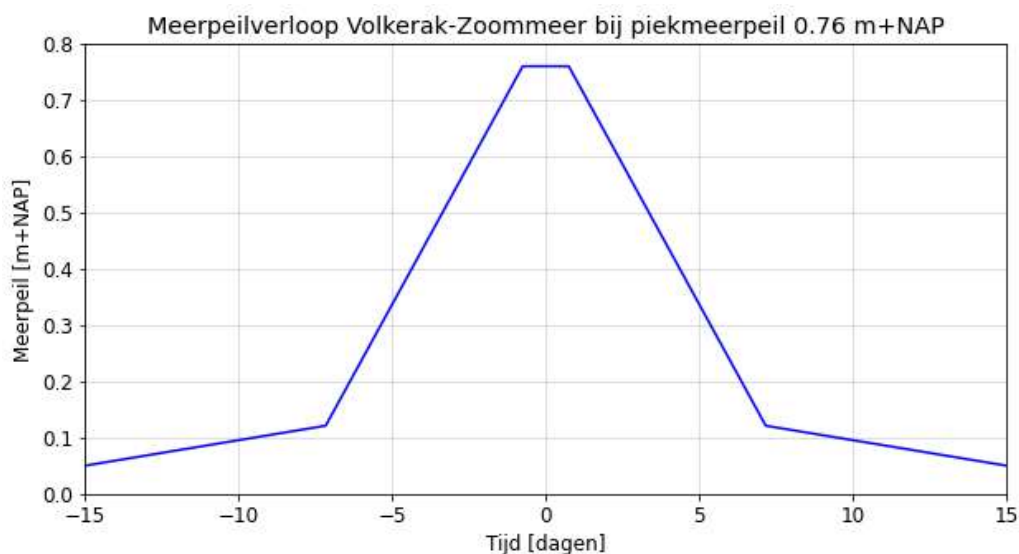
in Geerse et al. (2017) bij het omzetten van de meerpeilstatistiek voor het Volkerak-Zoommeer van een basisduur van 20 dagen naar een duur van 30 dagen.

Piekmeerpeil [m+NAP]	Topduur [uur]
0,05	720
0,12	100
0,22	36
1,80	36

Tabel 5-22: Topduren trapeziumvormige meerpeilgolven Volkerak-Zoommeer.

Voor het Volkerak-Zoommeer wordt uitgegaan van *geknikte* meerpeiltrapezia, met een verticale insnoeringsfactor van 10% (de relatieve hoogte van de knik), en een horizontale insnoeringsfactor van 50% (de relatieve breedte ten opzichte van het ongeknikte trapezium). Zie voor meer informatie bijlage A, waarin de tijdsmodellering van afvoer- en meerpeilgolven gedetailleerd wordt beschreven.

Figuur 5-15 geeft bij wijze van voorbeeld het meerpeilverloop bij een piekmeerpeil van NAP+0,76 m. De bijbehorende topduur is gelijk aan 36 uur (Tabel 5-22). Het meerpeilverloop begint op NAP+0,05 m (streefpeil), de hoogte van de knik is volgens formule (A-3) gelijk aan NAP+0,121 m en de overschrijdingsduur op deze hoogte is volgens formule (A-4) gelijk aan 343,8 uur oftewel ca. 14,3 dagen.



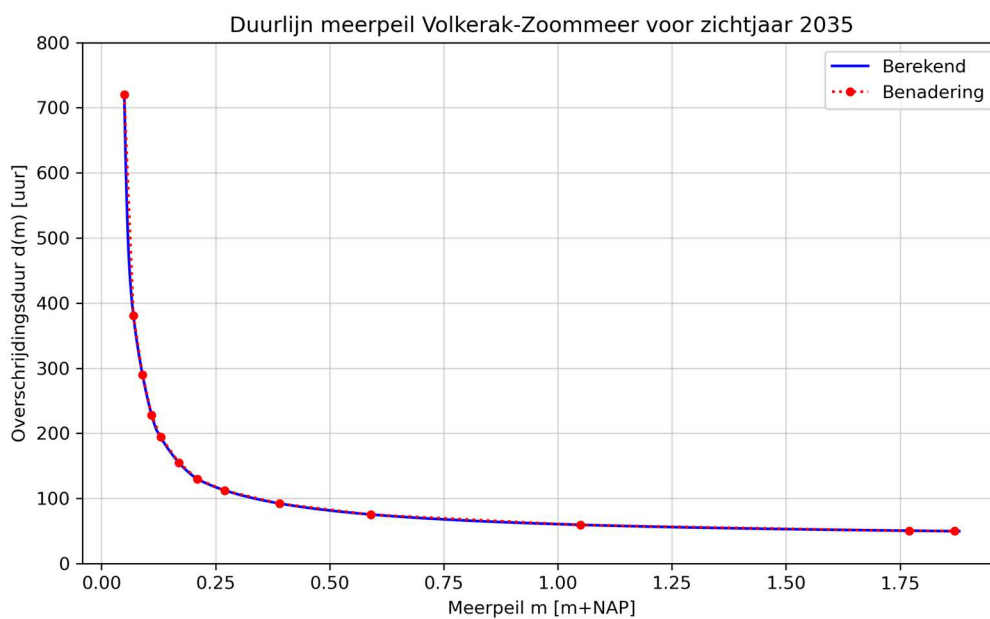
Figuur 5-15: Voorbeeld meerpeilverloop Volkerak-Zoommeer met geknikt trapezium.

De duurlijn voor het meerpeil van het Volkerak-Zoommeer is berekend op basis van bovenstaande topduren en de overschrijdingskansen zonder onzekerheid. Bijlage A beschrijft de toegepaste methode. Na toepassing van de methode is de duurlijn vastgelegd op basis van een beperkt aantal knikpunten. Het resultaat is gegeven in Tabel 5-23 en Figuur 5-16.

Meerpeil [m+NAP]	Overschrijdingsduur per top [uur]
0,05	720
0,07	381
0,09	290
0,11	228
0,13	194
0,17	155
0,21	130
0,27	112
0,39	92
0,59	75
1,05	59
1,77	50
1,87	50

Tabel 5-23: Overschrijdingsduur per top ("duurlijn") meerpeil Volkerak-Zoommeer voor 2035.

De overschrijdingsduur per top convergeert niet naar de minimale topduur in Tabel 5-23. Bedenk echter dat het hier gaat om de overschrijdingsduur van een bepaald meerpeil *gegeven* dat het piekmeerpeil nog hoger is. Dit is nader toegelicht in paragraaf A.4.



Figuur 5-16: Overschrijdingsduur per top meerpeil Volkerak-Zoommeer voor zichtjaar 2035.

6 Zeewaterstandstatistiek

6.1 Inleiding

De zeewaterstand is als basisstochast aanwezig langs de kust en de aangrenzende deltabekkens, dat wil zeggen de belastingmodellen Kust (dijken) en Duinen, Benedenrivieren (BER), Hollandsche IJssel (HIJ), Volkerak-Zoommeer (VZM) en de Oosterschelde. Binnen BOI2023 wordt gebruik gemaakt van de zeewaterstandstatistiek op verschillende kuststations. De afleiding van de zeewaterstandstatistiek voor duinen wijkt wat af van die voor de overige kuststations en is apart beschreven bij de duinstatistiek (hoofdstuk 8). Tabel 6-1 geeft een overzicht van de overige kuststations en de belastingmodellen waarvoor deze worden gebruikt.

Kuststation	RDx [m]	RDx [m]	Belastingmodel		
			Kust (dijken)	BER HIJ/VZM	Oosterschelde
Delfzijl	258.000	594.430	X		
Den Helder	111.850	553.230	X		
Den Oever Buiten	132.030	549.440	X		
Hansweert	59.050	384.960	X		
Harlingen	156.480	576.550	X		
Hoek van Holland	67.930	445.000	X	X	
Huibertgat	221.990	621.330	X		
IJmuiden	98.430	497.500	X		
Lauwersoog	208.850	602.790	X		
Oosterschelde Buiten (OS11)	23.013	407.778	X		X
Vlissingen	30.480	385.220	X		
West Terschelling	143.870	597.420	X		

Tabel 6-1: Overzicht gebruik kuststations zeewaterstandstatistiek in belastingmodellen.



Figuur 6-1: Ligging kuststations zeewaterstandstatistiek BOI2023.

De zeewaterstand wordt bepaald door getij en windopzet en is daarom – net als de windsnelheid – een zogeheten snelle stochast. Dat wil zeggen dat de variatie in de tijd relatief groot is ten opzichte van trage stochasten als afvoer en meerpeil. De duur van een storm is namelijk meestal circa een dag, terwijl de duur van afvoer- of meerpeilgolf veel langer is (typisch één maand).

Doordat de zeewaterstand mede wordt bepaald door de windopzet, is er een sterke correlatie tussen wind en zeewaterstand, althans voor westelijke windrichtingen. In hoofdstuk 9 is een beschrijving gegeven van het correlatiemodel voor wind en zeewaterstand en de (afleiding van de) bijbehorende correlatieparameters. In de navolgende paragrafen beperken we ons tot de marginale zeewaterstandstatistiek.

De benodigde statistiek voor de zeewaterstand bestaat uit de overschrijdingskansen van de piekwaterstand in een 12 uursperiode conditioneel op de windrichting. Deze worden in het probabilistisch model gecombineerd met de windrichtingskansen. Het huidige belastingmodel voor de Kust (dijken) gaat nog uit van 12 windrichtingsectoren van 30° (gelijk aan WBI2017). Voor alle kuststations uit Tabel 6-1 is daarom zeewaterstandstatistiek voor 12 windrichtingen nodig. De huidige belastingmodellen in de Rijn-Maasmonding (Benedenrivieren, Hollandsche IJssel, Volkerak-Zoommeer) en het belastingmodel voor de Oosterschelde gaan echter uit van 16 windrichtingsectoren van 22,5°. Voor zowel Hoek van Holland als Oosterschelde Buiten (OS11) is daarom ook zeewaterstand-statistiek voor 16 windrichtingen nodig.

In principe wordt in de belastingmodellen in de Rijn-Maasmonding de zeewaterstandstatistiek bij Maasmond gebruikt. Hiervoor is echter gebruik gemaakt van de zeewaterstandstatistiek bij Hoek van Holland, vandaar dat dit in Tabel 6-1 ook op die manier is aangegeven. In WBI2017 werd hiervoor een correctie toegepast, waarbij de zeewaterstanden bij Maasmond 2 cm lager werden genomen dan de waterstanden bij Hoek van Holland (Geerse, 2003). In BOI2023 wordt deze correctie niet langer toegepast, waardoor de statistiek bij Maasmond gelijk is aan de statistiek bij Hoek van Holland, met dit verschil dat voor locatie Maasmond dus wordt uitgegaan van statistiek voor 16 windrichtingsectoren.

De overschrijdingskansen van de zeewaterstand hebben een statistische onzekerheid, die het gevolg is van onzekerheid over het type kansverdeling dat gebruikt moet worden en de onzekerheid bij het schatten van de parameters van deze verdeling. In bijlage B wordt uitgelegd dat de statistische onzekerheid in Hydra-Ring als extra stochast wordt toegevoegd. Voor de basisstochast zeewaterstand wordt daarbij uitgegaan van een additief model, waarbij de statistische onzekerheid een normaal verdeelde stochast is (zie paragraaf B.2). Dat wil zeggen dat de waarde van de statistische onzekerheid wordt gekenmerkt door het gemiddelde (μ) en de standaarddeviatie (σ) en dat deze waarde wordt opgeteld bij de zeewaterstand zonder statistische onzekerheid. Zowel het gemiddelde als de standaarddeviatie mag daarbij afhangen van de zeewaterstand zonder onzekerheid. In de praktijk geldt voor alle kuststations, dat de gemiddelde afwijking (μ) altijd gelijk is aan 0 m.

In Hydra-NL wordt de statistische onzekerheid niet als aparte stochast beschouwd, maar is de statistische onzekerheid meegenomen door uit te gaan van de kansverdeling van de basisstochast inclusief statistische onzekerheid. In bijlage B is uitgelegd hoe deze kansverdeling kan worden bepaald door het uitintegreren van de statistische onzekerheid.

6.2 Methode

Voor de zeewaterstand zit een grote onzekerheid in de schattingen van de terugkeerwaarden uit uitsluitend meetgegevens. Schattingen op basis van de Gegeneraliseerde Pareto (GP) staartverdeling die in het verleden is toegepast in de basispeilenstudie (Dillingh et al., 1993) hebben dan ook een breed betrouwbaarheidsinterval.

Het KNMI heeft de afgelopen jaren uitgebreid onderzoek gedaan naar het gebruik van gesimuleerde weergegevens en daaruit afgeleide simulaties van waterstanden langs de Nederlandse kust. Dit is gedaan om nieuwe schattingen van terugkeerwaarden te bepalen die aanzienlijk nauwkeuriger zijn dan schattingen die uitsluitend op meetgegevens zijn gebaseerd. Effectief zijn ruim 8.000 jaar gesimuleerde gegevens gebruikt, waardoor schattingen van hoge precisie gemaakt kunnen worden. Echter, om systematische fouten in modelsimulaties van de zeewaterstanden te corrigeren zijn ook meetgegevens gebruikt (De Valk en van den Brink, 2026).

Gesimuleerde gegevens zijn met name van waarde voor de schatting van de vormparameter van de staartverdeling, want dit is de dominante bron van onzekerheid in schattingen van staartverdelingen¹². Fouten in de schaal- en locatieparameter zijn nauwkeurig te corrigeren aan de hand van relatief kleine datasets van meetgegevens (De Valk en van den Brink, 2020, 2021).

Een aantal klassieke en nieuwe benaderingen voor de staartverdeling zijn getest over een breed bereik van terugkeertijden. De staart van de Gegeneraliseerde Weibull (GW) verdeling is geschikt gebleken voor zowel de basisstochasten wind als zeewaterstand. Voor meer details verwijzen we naar (De Valk en van den Brink, 2021). De precieze formule van de Gegeneraliseerde Weibull verdeling is gegeven in Bijlage E.

Schattingen van de zeewaterstand zijn gebaseerd op een astronomisch-getij-tijdreeks plus stormopzetberekeningen op basis van het WAQUA-DCSMv5-model geforceerd met de laatste generatie van seizoensvoorspellingen (SEAS5) van het European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) voor de stations Vlissingen, Hoek van Holland, IJmuiden, Den Helder, Harlingen, Delfzijl en Hansweert. De parameters van de GW-staartverdeling zijn geschat uit een extremewaardenfit op de ECMWF/SEAS5-WAQUA-zeewaterstand. Voor meer details over de methode verwijzen we naar Appendix C-F in De Valk en van den Brink (2026)¹³.

De windrichtingsafhankelijkheid voor de zeewaterstand is uit metingen geschat, omdat een belangrijk deel van de statistiek (nl. de drempel- en schaalparameter) ook is gebaseerd op metingen. Tabel 6-2 geeft een overzicht van de stations die zijn gebruikt voor de correctie van omnidirectionele terugkeerwaarden, en voor de correctie van de richtingsafhankelijkheid.

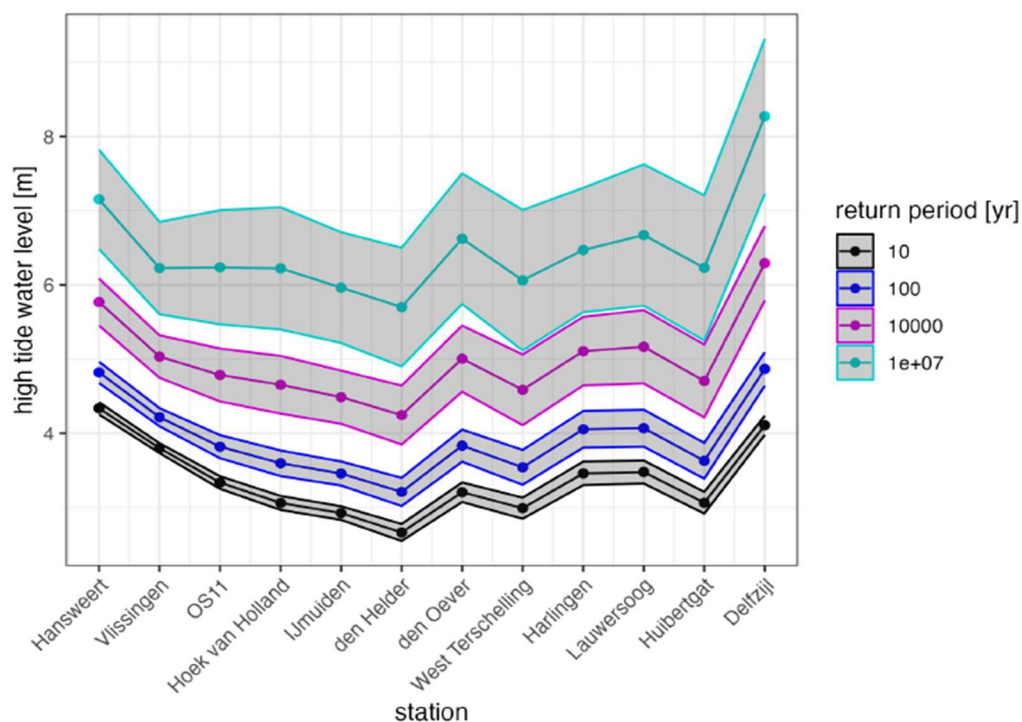
¹² Omdat de systematische fouten in berekeningen van de scheve opzet bij hoge stormopzet vanaf een bepaalde drempel vrijwel lineair met de opzet verlopen (Zijl en Laan, 2021), zou daarom de vormparameter van de waterstand uit gesimuleerde waterstandsgegevens eveneens betrouwbaar moeten zijn (De Valk en Van den Brink, 2023).

¹³ De Valk en Van den Brink (2026) is het sluitstuk voor BOI van de publicatie van KNMI over de wind- en waterstandstatistiek. De feedback van de expertgroep en het contramodel van Kindermann et al. (2026) is hierin verwerkt.

Kuststation	SEAS5/ DCSMv5 data	Correctie omnidirectioneel	Correctie richting- afhankelijkheid
Den Oever Buiten	Den Oever Buiten	Den Helder	Den Helder
Huibertgat	Huibertgat	Harlingen	Harlingen
Lauwersoog	Lauwersoog	Harlingen	Harlingen
OS11	OS11	Hoek van Holland	Vlissingen
West Terschelling	West Terschelling	Harlingen	Harlingen

Tabel 6-2: Kuststations gebruikt voor schattingen uit SEAS5/DCSMv5 gegevens, correctie van omnidirectionele terugkeerwaarden en correctie van richtingsafhankelijkheid (Tabel F-1 van De Valk en Van den Brink, 2026).

Meer detail is gegeven in Bijlage F.3 in De Valk en Van den Brink (2026). Dit leidt tot geschatte terugkeerwaarden van de omnidirectionele waterstand voor diverse kustlocaties (Figuur 6-2).



Figuur 6-2: Schattingen van terugkeerwaarden van de hoogwaterstand voor terugkeertijden van 10, 100, 10.000, 10^7 jaar en hun 95% betrouwbaarheidsintervallen voor zichtjaar 2019 voor verschillende stations langs de Nederlandse kust. Bron: Figuur E-4 van De Valk en Van den Brink (2026).

6.3 Basispeilen zonder statistische onzekerheid

De zeewaterstandstatistiek voor BOI2023 is opnieuw afgeleid door het KNMI met een hybride methode, waarbij gebruik gemaakt is van zowel gesimuleerde weergegevens (met bijbehorende waterstanden) als meetgegevens langs de Nederlandse kust (paragraaf 6.2).

De resulterende zeewaterstandstatistiek voor referentiejaar 2019 is vertaald naar het zichtjaar 2035 uitgaande van een zeespiegelstijging van 3 mm per jaar op alle stations (Keizer et al., 2023), resulterend in een uniforme verhoging van de zeewaterstand met 0,05 m van 2019 tot 2035 (De Valk en van den Brink, 2026). Dit komt overeen met het uitgangspunt van 0,072 m zeespiegelstijging van 2011 tot

2035, zie het rapport met generieke uitgangspunten (RWS, 2026). Tabel 6-3 geeft een beknopt overzicht van de nieuwe basispeilen.

Kuststation	Basispeil 2019 [m+NAP]	Gehanteerde toeslag (2019-2035) [m]
Delfzijl	6,29	0,05
Den Helder	4,26	0,05
Den Oever Buiten*	5,02	0,05
Hansweert	5,77	0,05
Harlingen	5,09	0,05
Hoek van Holland	4,61	0,05
Huibertgat*	4,69	0,05
IJmuiden	4,50	0,05
Lauwersoog*	5,15	0,05
Oosterschelde Buiten (OS11)*	4,74	0,05
Vlissingen	5,03	0,05
West Terschelling*	4,57	0,05

Tabel 6-3: Basispeilen hoofdstations langs de kust (1/10.000 jaar hoogwater) BOI2023. Bij locaties met een (*) zijn de meetgegevens niet gebruikt in de afleiding (zie paragraaf 6.2).

6.4 Statistische onzekerheid zeewaterstand

In WBI2017 is voor de zeewaterstand een reductie met een factor 3 op de spreiding toegepast, maar deze pragmatische keuze was nog niet volledig onderbouwd (De Valk en van den Brink, 2023). In BOI2023 is de nieuwe hybride methode (paragraaf 6.2) gehanteerd om nieuwe schattingen van de hoogwaterstand te bepalen die aanzienlijk nauwkeuriger zijn dan de schattingen die uitsluitend op meetgegevens gebaseerd zijn (8.000 jaar modelsimulaties versus 150 jaar meetgegevens). Daaraan is tevens een bijdrage toegevoegd van de onzekerheden gerelateerd aan de gebruikte modellen, die een significant deel uitmaken van de totale onzekerheid. Zo zijn door het KNMI voor verschillende stations langs de kust omnidirectionele betrouwbaarheidsintervallen afgeleid voor verschillende terugkeertijden van de waterstand.

Modelgerelateerde onzekerheid

Omdat modelsimulaties zijn gebruikt om schattingen van de basisstochasten wind en zeewaterstand te verbeteren, is in de gehanteerde methode ook een onzekerheid door het gebruik van synthetische data in rekening gebracht. Het gaat om onbekende systematische fouten in de uit simulaties afgeleide staartverdelingen, door modelbeperkingen zoals resolutie en vereenvoudigde fysica (De Valk en van den Brink, 2023).

Deze modelgerelateerde onzekerheid in de Gegeneraliseerde Weibull staartverdeling is weergegeven als een normaal verdeelde verstoring op de vormparameter. Deze keuze is gemaakt omdat fouten in schattingen van grote terugkeertijden voornamelijk bepaald worden door fouten in de vormparameter en fouten in schaal- en drempelparameter relatief eenvoudig worden gecorrigeerd aan de hand van meetgegevens. Nadere details van de schatting van onzekerheid in vormparameters is te vinden in subparagraaf 6.3.1 in De Valk en Van den Brink (2026). Overigens zijn ook onzekerheden in de schaalparameter geschat en verdisconteerd, maar het effect daarvan op de totale onzekerheid bleek zeer beperkt te zijn.

Resultaat

Net als in WBI2017 zijn op basis van de percentielen van de zeewaterstanden voor elk station omnidirectionele schattingen gemaakt van de statistische onzekerheid

(afhankelijk van de zeewaterstand) door het fitten van een normale verdeling. Deze zijn in Hydra-Ring als additief model toegevoegd aan de basisstochast zeewaterstand. Het gemiddelde van de normale verdeling is vooraf vastgesteld op 0 m, terwijl de standaardafwijking gefit is met behulp van de 'maximum likelihood' methode. De gevonden spreidingen van de normale verdeling voor de hoofdstations langs de kust zijn, voor een terugkeertijd van 10.000 jaar, weergegeven in Tabel 6-4. Voor de Hollandse en Zeeuwse kust is de geschatte spreiding iets kleiner dan in WBI2017 is gehanteerd, in het Waddengebied is deze ongeveer gelijk. In Bijlage E.2 zijn per kuststation ook de standaarddeviaties (σ) gegeven bij andere waarden van de zeewaterstand zonder onzekerheid.

Kuststation	Basispeil 2035 excl. onz. [m+NAP]	Sigma stat. onz. [m]	Basispeil 2035 incl. onz. [m+NAP]
Delfzijl	6,34	0,238	6,40
Den Helder	4,31	0,199	4,37
Den Oever Buiten	5,07	0,244	5,14
Hansweert	5,82	0,160	5,86
Harlingen	5,14	0,233	5,23
Hoek van Holland	4,66	0,188	4,71
Huibertgat	4,74	0,248	4,84
IJmuiden	4,55	0,178	4,60
Lauwersoog	5,20	0,250	5,29
Oosterschelde Buiten (OS11)	4,79	0,173	4,84
Vlissingen	5,08	0,142	5,12
West Terschelling	4,62	0,241	4,71

Tabel 6-4: Basispeilen hoofdstations langs de kust (1/10.000 jaar hoogwater) inclusief statistische onzekerheid (omnidirectioneel) BOI2023.

Zoals hiervoor reeds opgemerkt, is voor de probabilistische modellen geen gebruik gemaakt van deze omnidirectionele, maar van *richtingsafhankelijke* statistiek. Daarbij is – net als in WBI2017 – wel voor alle windrichtingen gebruik gemaakt van de omnidirectionele parameter σ (per zeewaterstand) zoals hierboven beschreven, wat een licht conservatieve keuze is.

6.5 Triangulaire interpolatie

De vertaling van de waterstanden bij kuststations naar locaties bij de teen van de waterkering geschiedt voor de kustregio's niet middels modelberekeningen maar middels triangulaire interpolaties. Deze aanpak is onveranderd ten opzichte van WBI2017 (en daarvóór). De gehanteerde steunpunten per deelgebied (en subregio) zijn weergegeven in Tabel 6-5 en Figuur 6-3 t/m Figuur 6-5. Dit komt in principe overeen met de indeling in WBI2017, zoals beschreven in Chbab en De Waal (2017). Bij de Hollandse Kust zijn in Tabel 6-5 en Figuur 6-4 echter 3 subregio's gegeven in plaats van de 4 subregio's uit Tabel 4.16 van Chbab en De Waal (2017), omdat de 'oude' subregio I, die dezelfde steunpunten gebruikte als subregio IV in de Waddenzee, in BOI2023 voor geen enkele HR-locatie meer wordt gebruikt. De coördinaten van de steunpunten in Tabel 6-5 zijn terug te vinden in Tabel 6-1.

Deelgebied	Sub-regio	Steunpunt 1	Steunpunt 2	Steunpunt 3
Waddenzee (regio's 9 en 10)	I	Huibertgat	Lauwersoog	Delfzijl
	II	Huibertgat	Lauwersoog	West Terschelling
	III	Harlingen	Lauwersoog	West Terschelling
	IV	Harlingen	Den Oever Buiten	West Terschelling
	V	Den Helder	Den Helder	Den Helder
	VI	Den Helder	Den Oever Buiten	West Terschelling
Hollandse kust (regio's 11, 12 en 13)	I	Den Helder	IJmuiden	IJmuiden virtueel
	II	Den Helder	IJmuiden	Hoek van Holland
	III	OS11	Vlissingen	Hoek van Holland
Westerschelde (regio 15)	-	Hansweert	Vlissingen	Vlissingen virtueel

Tabel 6-5: Gebruikte steunpunten triangulaire interpolatie per deelgebied/subregio.

Conform de werkwijze in WBI2017 wordt voor enkele deelgebieden/subregio's gebruik gemaakt van zogenoemde virtuele stations, zoals aangegeven in Tabel 6-5. De waterstand in een virtueel station is onder alle omstandigheden gelijk gesteld aan de waterstand in het 'werkelijke' station. De waterstand bij het virtuele station IJmuiden bijvoorbeeld is gelijk aan de waterstand bij kuststation IJmuiden. De ligging van de virtuele stations is gegeven in Tabel 6-6. Deze ligging is dusdanig gekozen dat de waterstandsgradiënt de gewenste richting volgt, zoals beschreven in Deltares (2025). In Figuur 6-4 en Figuur 6-5 zijn deze twee virtuele stations aangeduid met de term IJmuiden (Additional) en Vlissingen (Additional).

Steunpunt	RDx [m]	RDx [m]
IJmuiden virtueel	108.133	495.081
Vlissingen virtueel	35.480	393.880

Tabel 6-6: Ligging virtuele steunpunten ten behoeve van de triangulaire interpolatie.

Gezien het beperkte aantal HR-locaties in Figuur 6-4, is de indeling in subregio's voor de Hollandse Kust niet zo duidelijk zichtbaar als bij de Waddenzee (Figuur 6-3). Het komt er echter op neer, dat locaties ten noorden van kuststation IJmuiden in subregio I vallen, locaties ten zuiden van kuststation Hoek van Holland in subregio III en locaties daartussen in subregio II (met de steunpunten zoals in Tabel 6-5).



Figuur 6-3: Indeling subregio's Waddenzee voor steunpunten triangulaire interpolatie.



Figuur 6-4: Indeling subregio's Hollandse Kust voor steunpunten triangulaire interpolatie.



Figuur 6-5: Steunpunten triangulaire interpolatie Westerschelde.

De triangulaire interpolatie in de zeewaterstanden vereist momenteel dat alle kustgebieden één en dezelfde kansverdeling voor de windrichting hanteren. Dit is nodig voor de triangulaire interpolaties, waarbij eenzelfde kuststation wordt gebruikt voor twee of meer regio's (bijvoorbeeld Lauwersoog, dat zowel voor Waddenzee oost als delen van Waddenzee west wordt gebruikt). In het probabilistische model wordt voor het belastingmodel Kust (dijken) dan ook één kansverdeling voor de windrichting gehanteerd voor alle regio's, namelijk die van Hoek van Holland (Chbab, 2017). Zie ook paragraaf 7.4.

7 Windstatistiek

7.1 Inleiding

Wind is als basisstochast aanwezig in alle belastingmodellen. Voor het overzicht is het goed om onderscheid te maken tussen belastingmodellen waarbij windstatistiek van Schiphol of Deelen wordt gebruikt (Tabel 7-1) en belastingmodellen waarbij windstatistiek van kuststations wordt gebruikt (Tabel 7-2).

De windstatistiek voor Schiphol en Deelen is in principe ongewijzigd ten opzichte van WBI2017, zoals beschreven in paragraaf 7.2. Het enige verschil is dat voor het Markermeer is overgestapt van 12 richtingssectoren van 30° naar 16 windrichtingsectoren van 22,5° vanuit consistentie met de overige zoetwatersystemen, waarbij ook nieuwe productiesommen zijn uitgevoerd, zie (Stijnen et al., 2022). Voor de RMM (Benedenrivieren, Hollandsche IJssel en Volkerak-Zoommeer) wordt gebruik gemaakt van windstatistiek inclusief Volkerfactor, zoals toegelicht in paragraaf 7.2.3. Alleen bij het IJsselmeer zijn – net als in WBI2017 – de nieuwste inzichten in winddragafkapping bij extreme windsnelheden *in de statistiek* verdisconteerd in plaats van in de fysica, aangezien voor dit watersysteem geen nieuwe productieberekeningen zijn gemaakt (zie paragraaf 7.2.4).

Belastingmodel	Regio's	Station	Aantal richtingen	Bijzonderheden
Bovenrivieren	1,2,18	Deelen	16	
Benedenrivieren	3,4,17	Schiphol	16	Incl. Volkerfactor (m.u.v. golfcondities bekledingen)
Hollandsche IJssel	22	Schiphol	16	
Volkerak-Zoommeer	21	Schiphol	16	
IJssel- en Vechtdelta	5,6	Schiphol	16	
Merengebied	7,8,19,20	Schiphol	16	- Voor IJsselmeer: incl. correctie voor winddrag - Markermeer in WBI2017 nog 12 windrichtingen

Tabel 7-1: Overzicht gebruik windstatistiek Schiphol/Deelen (ongewijzigd t.o.v. WBI2017).

De windstatistiek voor de kuststations, die wordt gebruikt in de belastingmodellen Kust (dijken) en Oosterschelde is wél gewijzigd ten opzichte van WBI2017. De statistiek voor BOI2023 is opnieuw afgeleid door het KNMI, zoals beschreven in paragraaf 7.3. Figuur 7-1 geeft de ligging van de windstations voor BOI2023.

Regio	Station WBI2017	Station BOI2023	Aantal Richtingen
9. Waddenzee oost	West Terschelling	West Terschelling*	12
10. Waddenzee west	West Terschelling	Den Helder*	12
11. Holl. kust noord	De Kooy	Den Helder*	12
12. Holl. kust midden	IJmuiden	IJmuiden*	12
13. Holl. kust zuid	Hoek van Holland	Hoek van Holland*	12
15. Westerschelde	Vlissingen	Vlakte van de Raan	12
14. Oosterschelde	Vlissingen	Vlissingen	16

Tabel 7-2: Overzicht gebruik windstatistiek kuststations (nieuwe statistiek afgeleid door KNMI). Stations met een * liggen – anders dan in WBI2017 – verder buiten de kust op de Noordzee. Voor BOI2023 is de statistiek voor Vlakte van de Raan en Vlissingen afgeleid uit station Vlissingen (Noordzee) zoals aangegeven in Figuur 7-1. Zie voor verdere toelichting paragraaf 7.3.2. Bij de Oosterschelde zijn nieuwe productiesommen uitgevoerd met 16 windrichtingen.



Figuur 7-1: Ligging stations windstatistiek BOI2023. De statistiek van station Vlissingen (Noordzee) is vertaald naar Vlake van de Raan en Vlissingen, zoals toegelicht in paragraaf 7.3.2. Voor de stations Huibertgat en Delfzijl is wel statistiek afgeleid door het KNMI (zie paragraaf 7.3), maar deze wordt niet gebruikt.

De wind is – net als zeewaterstand – een zogeheten snelle stochast. Dat wil zeggen dat de variatie in de tijd relatief groot is ten opzichte van trage stochasten als afvoer en meerpeil. De duur van een storm is namelijk meestal circa een dag, terwijl de duur van afvoer- of meerpeilgolf veel langer is (typisch één maand).

De benodigde windstatistiek bestaat uit momentane kansen op de windrichting en conditionele overschrijdingskansen van de piekwindsnelheid in een 12 urenperiode conditioneel op de windrichting. In beginsel wordt per regio dezelfde locatie gebruikt voor de statistiek van windsnelheid en windrichting, met uitzondering van de kust. Zoals uitgelegd in paragraaf 6.5, vereist de methode van triangulaire interpolatie in de zeewaterstanden momenteel dat alle kustgebieden slechts één kansverdeling voor de windrichting hanteren. Hiervoor wordt uitgegaan van de windrichtingkansen bij Hoek van Holland, zie paragraaf 7.4. Ook voor de Oosterschelde zijn de windrichtingkansen van Hoek van Holland gehanteerd, zoals uitgelegd in paragraaf 7.4.

De windsnelheid waarop de statistiek betrekking heeft, betreft de potentiële windsnelheid. Dit is de uurgemiddelde windsnelheid op 10 meter hoogte boven homogeen open terrein met een ruwheidslengte van 0,03 m (De Waal, 2003). In de productieberekeningen voor de fysica is bij bijna alle watersystemen echter gebruik gemaakt van de “openwaterwindsnelheid” (De Waal, 2008). Dit geldt zowel voor de waterbeweging als voor de golven. Voor de productieberekeningen is de potentiële windsnelheid daarom getransformeerd naar de openwaterwindsnelheid. Bij deze transformatie is rekening gehouden met de zogeheten winddragafkapping voor openwaterwindsnelheden boven de 30 m/s. Bij het IJsselmeer zijn echter voor BOI2023 geen nieuwe productieberekeningen gemaakt waarin dit effect is meegenomen. Daarom is de winddragafkapping voor dit gebied – net als in WBI2017 – verdisconteerd in de statistiek. Zie voor meer details paragraaf 7.2.4.

Doordat zeewaterstand mede wordt bepaald door de windopzet, is er een sterke correlatie tussen wind en zeewaterstand, althans voor westelijke windrichtingen. In hoofdstuk 9 wordt een beschrijving gegeven van het correlatiemodel voor wind en zeewaterstand en de (afleiding van de) bijbehorende correlatieparameters. In de navolgende paragrafen beperken we ons tot de marginale windstatistiek.

De overschrijdingskansen van de windsnelheid hebben een statistische onzekerheid, die het gevolg is van onzekerheid over het type kansverdeling dat gebruikt moet worden en de onzekerheid bij het schatten van de parameters van deze verdeling. In bijlage B is uitgelegd dat de statistische onzekerheid in Hydra-Ring als extra stochast wordt toegevoegd. Voor de basisstochast windsnelheid wordt daarbij uitgegaan van een begreemd multiplicatief model, waarbij de statistische onzekerheid een normaal verdeelde stochast is (zie paragraaf B.2). Dat wil zeggen dat de waarde van de statistische onzekerheid een factor is met gemiddelde (μ) en standaarddeviatie (σ) en dat de windsnelheid zonder statistische onzekerheid hiermee wordt vermenigvuldigd, waarbij de resulterende windsnelheid inclusief onzekerheid altijd ≥ 0 m/s moet zijn. Zowel het gemiddelde als de standaarddeviatie mag daarbij afhangen van de windsnelheid zonder onzekerheid. In de praktijk geldt voor alle windstations, dat de gemiddelde factor (μ) altijd gelijk is aan 1.

In Hydra-NL wordt de statistische onzekerheid niet als aparte stochast beschouwd, maar wordt de statistische onzekerheid meegenomen door uit te gaan van de kansverdeling van de basisstochast inclusief statistische onzekerheid. In bijlage B is uitgelegd hoe deze kansverdeling kan worden bepaald door het uitintegreren van de statistische onzekerheid.

In het vervolg gaan we eerst in op de manier waarop de windstatistiek voor Schiphol en Deelen (conform WBI2017) is afgeleid en daarna op de veranderingen in BOI2023 voor de kuststations.

7.2 Statistiek Schiphol en Deelen

7.2.1 *Overschrijdingskansen potentiële windsnelheid*

Voor BOI2023 is voor de belastingmodellen Kust (dijken) en Oosterschelde gebruik gemaakt van nieuwe windstatistiek voor de kuststations, zoals afgeleid door het KNMI. De gevolgde methode en resulterende windstatistiek is beschreven in paragraaf 7.3. De windstatistiek voor Schiphol en Deelen, die gebruikt wordt voor de overige belastingmodellen, is in principe niet gewijzigd ten opzichte van WBI2017. Het enige verschil is dat voor het Markermeer is overgestapt van 12 naar 16 windrichtingsectoren en dat hier geen correctie voor winddragafkapping meer wordt toegepast in de statistiek (omdat dit effect is verwerkt in de fysica van de productieberekeningen).

In WBI2017 is de windstatistiek van het KNMI uit 1983 (Wieringa en Rijkoort, 1983) vervangen door de nieuwe windstatistiek uit Caires (2009). Deltares heeft in samenwerking met het KNMI nieuwe windstatistiek voor potentiële windsnelheden afgeleid voor een groot aantal windstations verspreid over heel Nederland (Caires, 2009). Hierbij is gebruik gemaakt van windmetingen van 1970 t/m 2008 (39 jaar). Er zijn statistische analyses uitgevoerd door gebruik te maken van jaarmaxima, met behulp van de Gegeneraliseerde Extreemwaarden verdeling (GEV), en Peaks over Threshold (POT), met behulp van de Gegeneraliseerde Pareto Verdeling (GPV).

In Caires (2009) is geconcludeerd dat de GPV Type I (exponentiële verdeling) op basis van POT series de betere fit is. De geschatte drempelwaardes evenals de parameterschattingen van de exponentiële kansverdeling op basis van POT series zijn weergegeven in Tabel 3.19 t/m Tabel 3.21 in Chbab (2017). Het betreft schattingen van zowel de omnidirectionele als de richtingsafhankelijke situaties. Een overzicht van omnidirectionele kwantielschattingen met een herhalingstijd van gemiddeld eens in 10.000 jaar zijn gegeven in Tabel 7-3.¹⁴ Voor de probabilistische modellen wordt overigens, zoals aangegeven in paragraaf 7.1, geen gebruik gemaakt van omnidirectionele maar van richtingsafhankelijke statistiek.

Station	Windsnelheid [m/s]	Aantal sectoren
De Kooy	38,4	12 (30,0°)
Hoek van Holland	34,9	12 (30,0°)
IJmuiden	35,6	12 (30,0°)
Vlissingen	35,3	12 (30,0°)
West Terschelling	35,8 ¹⁵	12 (30,0°)
Deelen	34,2	16 (22,5°)
Schiphol	35,7	16 (22,5°)

Tabel 7-3: Potentiële windsnelheid (1/10.000 jaar, omnidirectioneel) WBI2017.

De afgeleide windstatistiek uit de POT-series is alleen bruikbaar voor windsnelheden hoger dan de gehanteerde drempelwaardes (overschrijdingsfrequenties van circa 2 keer per jaar), ook het hoge bereik genoemd (Chbab, 2017). Voor probabilistische berekeningen is ook de statistiek van het lage bereik nodig. Deze statistiek is afgeleid door middel van turven op basis van uurlijkse windgegevens. Dit is gebeurd volgens de methode beschreven in Geerse en Verkaik (2010).

7.2.2 Statistische onzekerheid windsnelheid

Per windstation zijn voor WBI2017 schattingen gemaakt van de omnidirectionele statistische onzekerheid en in Hydra-Ring als begrensd multiplicatief model toegevoegd aan de basisstochast windsnelheid. De betrouwbaarheidsintervallen en percentielen van de windsnelheid zijn vrijwel symmetrisch. Daarom is voor de omnidirectionele statistische onzekerheid uitgegaan van een normale verdeling met een gemiddelde factor van 1. De standaardafwijking is afhankelijk van de herhalingstijd en geschat met de maximum-likelihood methode. De standaardafwijking behorende bij het 1/10.000-kwantiel (omnidirectioneel) is uiteindelijk gebruikt voor alle herhalingstijden (en alle windrichtingen) omdat het verschil tussen een constante spreiding en een spreiding afhankelijk van de herhalingstijd op de hydraulische belasting marginaal is (Chbab, 2017). Deze spreidingen van de normale verdeling voor de statistische onzekerheid zijn weergegeven in Tabel 7-4.

¹⁴ Hoewel de windstatistiek conform Caires (2009) in BOI2023 alleen nog gebruikt wordt voor stations Schiphol en Deelen, zijn in deze tabel ook waarden voor de kuststations opgenomen om een vergelijking te kunnen maken met de nieuwe windstatistiek zoals afgeleid door het KNMI en beschreven in paragraaf 7.3.

¹⁵ In de overzichten van Caires (2009) ontbreekt station West-Terschelling. De statistiek is later volgens dezelfde methode bepaald, maar niet in de overzichten verwerkt (Chbab en De Waal, 2017).

Station	Windsnelheid excl. onz. [m/s]	Sigma stat. onz. [-]	Windsnelheid incl. onz. [m/s]
De Kooy	38,4	0,046	39,0
Hoek van Holland	34,9	0,036	35,2
IJmuiden	35,6	0,040	36,0
Vlissingen	35,3	0,042	35,9
West Terschelling	35,8	0,048	36,6
Deelen	34,2	0,046	34,8
Schiphol	35,7	0,047	36,4

Tabel 7-4: Potentiële windsnelheid (1/10.000 jaar, omnidirectioneel) inclusief statistische onzekerheid WBI2017.

7.2.3 Toepassing Volkerfactor in Rijn-Maasmonding

Voor de Rijn-Maasmonding, dat wil zeggen voor de belastingmodellen Beneden-rivieren, Hollandsche IJssel en Volkerak-Zoommeer, is in WBI2017 gebruik gemaakt van een iets aangepaste versie van de windstatistiek van Schiphol zoals hierboven beschreven, waarin de zogenaamde Volkerfactor is opgenomen (Chbab, 2017)¹⁶. Deze factor is geïntroduceerd om rekening te houden met het feit dat de kans dat een getijtop en de piek van de storm samenvallen circa 50% bedraagt (Geerse et al., 2002). In deze aanpak worden de overschrijdingskansen voor de hogere windsnelheden (die T=1 jaar ruim overschrijden) verlaagd met een factor 0,5. Om een vloeiende aansluiting op de lagere (niet aangepaste) windsnelheden te krijgen is een overgangstraject gebruikt, dat ligt rondom de windsnelheid voor T=1 jaar (Geerse, 2016a). Bij het bepalen van de golfcondities voor bekledingen wordt de Volkerfactor overigens niet toegepast en wordt uitgegaan van de originele statistiek voor Schiphol zoals hierboven beschreven. Aangezien de windstatistiek voor Schiphol en Deelen niet wijzigt ten opzichte van WBI2017, geldt de hierboven beschreven toepassing van de Volkerfactor in de Rijn-Maasmonding ook voor de windstatistiek BOI2023, zoals aangegeven in Tabel 7-1 in paragraaf 7.1.

7.2.4 Windstatistiek met correctie voor winddragafkapping

Zoals aangegeven in paragraaf 7.1, wordt de potentiële windsnelheid in de productieberekeningen voor de fysica, zowel voor waterstanden als voor golven, getransformeerd naar de open-water windsnelheid (De Waal, 2008). Een belangrijk concept daarbij is de schuifspanning (winddrag), dat wil zeggen de mate waarin de windsnelheid aangrijpt op het wateroppervlak. Voor openwaterwindsnelheden boven de 30 m/s neemt volgens de laatste inzichten (Van Vledder, 2017) de winddragcoëfficiënt niet verder toe. Omdat deze winddragafkapping bij WBI2017 nog niet was meegenomen in de fysische modellen voor waterbeweging en golven, is destijds besloten om deze te verwerken in de windstatistiek, maar alleen voor regio's waarbij windsnelheden hoger dan 30 m/s bepalend kunnen zijn voor de hydraulische belastingen, te weten IJsselmeer en Markermeer en Oosterschelde (Chbab, 2017). Deze correctie voor winddragafkapping komt erop neer dat telkens gekeken is welke windsnelheid bij toepassing van de oude dragformulering dezelfde schuifspanningssnelheid zou opleveren als de windsnelheid bij toepassing van de nieuwe dragformulering. Zie voor meer details de beschrijving van de correctie in de windstatistiek voor winddragafkapping in paragraaf 3.6.7 van Chbab (2017).

¹⁶ In Chbab (2017) wordt de Volkerfactor alleen genoemd in paragraaf 4.6, bij de bespreking van het correlatiemodel voor de wind-waterstandstatistiek van Maasmond (Benedenrivieren). Deze factor heeft echter ook betrekking op de marginale statistiek van de windsnelheid.

Voor BOI2023 geldt, dat voor de meeste watersystemen nieuwe waterstands- en golfberekeningen zijn uitgevoerd, waarbij winddragafkapping wel is meegenomen. Uitzondering daarop vormt het IJsselmeer (Kuijper en Oomen, 2023). Hier wordt dus ook in BOI2023 gerekend met de windstatistiek voor Schiphol inclusief de correctie voor winddragafkapping, zoals aangegeven in Tabel 7-1 in paragraaf 7.1.

7.3 Statistiek kust

7.3.1 Methode

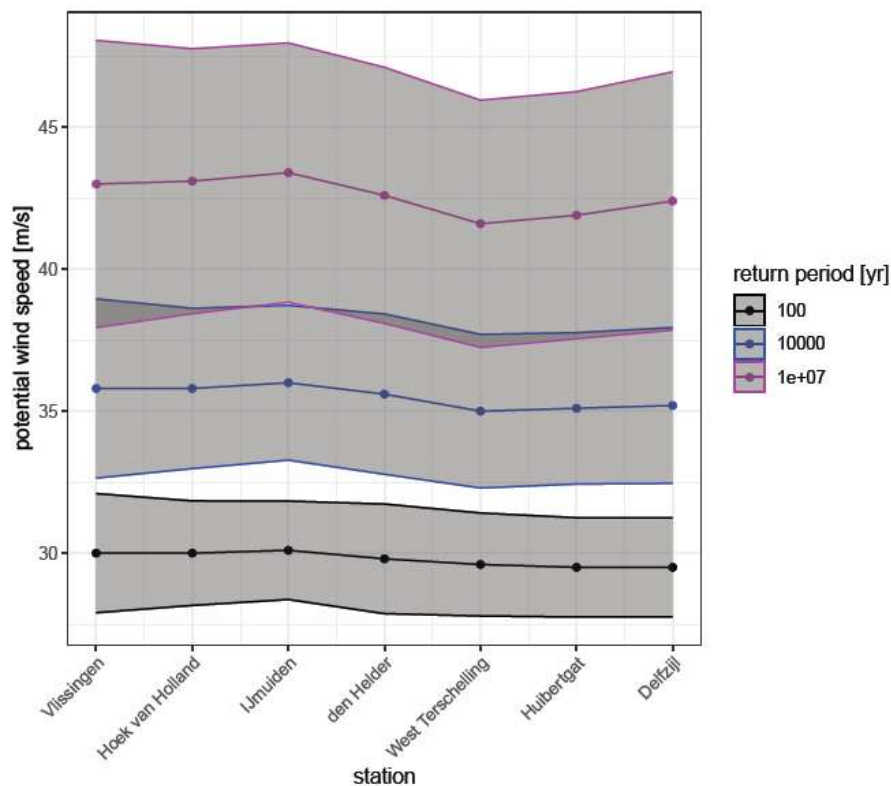
In WBI2017 is ook langs de kust gebruik gemaakt van windstatistiek conform Caires (2009). Voor de potentiële wind is er echter een grote onzekerheid in schattingen van terugkeerwaarden uit meetgegevens. Schattingen op basis van de Gegeneraliseerde Extreemwaarden verdeling Type I (exponentiële staartverdeling) die is toegepast in de SBW-studie van Caires (2009) zijn namelijk gebaseerd op 39 jaar data. Om deze onzekerheid te verkleinen, heeft het KNMI onderzoek gedaan naar het gebruik van gesimuleerde weergegevens voor het bepalen van de staartverdeling van de windschuifspanning (De Valk en van den Brink, 2023). Effectief zijn grofweg 8.000 jaar gesimuleerde gegevens gebruikt, waardoor schattingen van hoge precisie gemaakt kunnen worden.

Een aantal klassieke en nieuwe benaderingen voor de staartverdeling zijn getest voor de schatting van terugkeerwaarden over een breed bereik van terugkeertijden. De Gegeneraliseerde Weibull (GW) staart (een andere formulering van de getransleerde Weibullverdeling) is geschikt gebleken voor zowel de basisstochasten wind als zeewaterstand, en heeft vooral voor wind meerwaarde ten opzichte van andere benaderingen (De Valk en van den Brink, 2021).

De statistiek van de potentiële windsnelheid is direct afgeleid uit bovengenoemde statistiek van de windschuifspanning volgens de formulering in De Waal (2003), in het bijzonder naar formule (3.1) en (3.28) / (2.29) van het genoemde rapport.

Schattingen gebaseerd op de laatste generatie van seizoensvoorspellingen (SEAS5) van het European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) zijn bepaald voor locaties op de Noordzee. Deze SEAS5-data is gebruikt voor locaties die ± 50 km ten noordwesten van de stations Vlissingen, Hoek van Holland, IJmuiden, Den Helder, West-Terschelling, Huibertgat en Delfzijl liggen (Figuur 7-1). De parameters van de GW-staartverdeling zijn geschat uit de SEAS5 windschuifspanning. Voor meer details over de methode verwijzen we naar Appendix F in De Valk en van den Brink (2023).

Figuur 7-2 toont de geschatte terugkeerwaarden van de omnidirectionele potentiële windsnelheid voor verschillende locaties, zoals die volgen uit de resulterende GW-staartverdelingen. Deze vertonen slechts een geringe ruimtelijke variabiliteit langs de Nederlandse kust. In vergelijking met eerdere schattingen in Caires (2009) zijn de huidige waarden van potentiële windsnelheid iets lager, behalve voor aflandige windrichtingen (zie Bijlage F.1). Een verklaring is dat de gebruikte uitvoerpunten van SEAS5 zo gekozen zijn dat de invloed van land minimaal is; de voor de schattingen in WBI2017 gebruikte windmetingen zijn daarentegen bij aflandige wind vrij sterk beïnvloed door de hogere ruwheid van land (De Valk en Van den Brink, 2026).



Figuur 7-2: Schattingen van omnidirectionele terugkeerwaarden van potentiële windsnelheid en hun 95% betrouwbaarheidsintervallen voor terugkeertijden van 100, 10.000, 10^7 jaar (locatie Vlissingen betreft hier locatie Vlissingen (Noordzee) zoals aangegeven in Figuur 7-1). Bron: Figuur E.2 van De Valk en Van den Brink (2026).

7.3.2 Omzetting voor Oosterschelde en Westerschelde

De door het KNMI uit SEAS5 afgeleide windstatistiek is primair representatief voor de Noordzeekust, voor locaties die orde 50 km uit de kust liggen (De Valk en Van den Brink, 2025). In de estuaria Oosterschelde en Westerschelde is in werkelijkheid echter sprake van enige beschutting door omliggende landmassa's.¹⁷ De afgeleide windstatistiek, zoals beschreven in paragraaf 7.3.1, houdt geen rekening met die beschutting en is specifiek voor aanlandige wind (potentieel) te conservatief (te hoge terugkeerwaarden). Daarom is binnen de toepassing van BOI2023 voor de Oosterschelde en Westerschelde een alternatieve aanpak gehanteerd om deze beschuttingseffecten te verdisconteren, waarbij de door het KNMI afgeleide statistiek voor het station Vlissingen buiten de kust – aangeduid als “Vlissingen (Noordzee)” – is vertaald naar locaties dicht bij de kust. Zie ook Tabel 7-2 en Figuur 7-1 in paragraaf 7.1. De werkwijze voor deze omzetting is beschreven in Molendijk et al. (2026), opgenomen als bijlage I, en is hieronder kort toegelicht.

Voor de Westerschelde is in de productieberekeningen een uniform windveld gehanteerd, wat impliceert dat in WBI2017 onbedoeld de lokale beschuttings-effecten van meetstation Vlissingen doorwerken op de hele Westerschelde. Het heeft de voorkeur om de nieuwe windstatistiek op te hangen aan een minder beschutte, maar wel representatieve locatie. Daarom is in BOI2023 gekozen voor het meetstation Vlake van de Raan in de monding van de Westerschelde.

¹⁷ Dat geldt ook voor de Waddenzee, maar daar is gekozen om dit effect te verwaarlozen.

In recent uitgevoerde productieberekeningen voor de Oosterschelde was al rekening gehouden met lokale beschuttingseffecten van meetstation Vlissingen en is via de gehanteerde windvelden in de productieberekeningen reeds gecorrigeerd voor die beschuttingseffecten (Stijnen et al., 2018a). Daarom is voor de Oosterschelde de Noordzeewindstatistiek vertaald naar het meetstation Vlissingen, inclusief de aan die locatie verbonden beschuttingseffecten.

De werkwijze voor de omzetting van de windstatistiek van Vlissingen (Noordzee) naar de meetstations Vlake van de Raan en Vlissingen zoals hierboven genoemd, is gebaseerd op een pilotstudie voor golfberekeningen in de Oosterschelde (Gautier, 2018). Daarin is een ruimtelijk variërend windveld gekoppeld aan meetstation Vlissingen. De factoren relatief aan Vlissingen zijn bepaald door een combinatie van meetdata en modeluitkomsten van HARMONIE. De uiteindelijk in de windvelden toegepaste factoren (Tabel D.2 uit Gautier, 2018), weergegeven in Tabel 7-5) zijn dus een mix van beschuttingseffecten bij Vlissingen in de meetdata en land/water-effecten in HARMONIE-windvelden die zijn afgerond door experts.

Locatie	Uit NOORD (0°N)	Uit OOST (90°N)	Uit ZUID (180°N)	Uit WEST (270°N)
Oosterschelde	1,25	1,05	1	1
Tholen	1	0,95	0,9	0,95
Europlatform	1,25	1,1	1,1	1
Lichteiland Goeree	1,25	1,05	1	1
Vlake van de Raan	1,25	1,05	1	1

Tabel 7-5: Verhouding windsnelheid op genoemde locatie en meetstation Vlissingen, gebaseerd op zowel metingen als modeluitkomsten van HARMONIE. Bron: Tabel D.2 van Gautier (2018).

Voor de omzetting van de windstatistiek van Vlissingen (Noordzee) naar de meetstations Vlake van de Raan en Vlissingen is aangenomen dat de windstatistiek afgeleid in De Valk en Van den Brink (2026) ongeveer overeenkomt met de locatie Europlatform. Dan volgen met behulp van Tabel 7-5 de volgende op de KNMI-offshorewind toe te passen correctiefactoren:

- Oosterschelde (*Europlatform naar Vlissingen*)
Correctiefactoren Noord 0,80; Oost: 0,91; Zuid: 0,91; West: 1,00
- Westerschelde (*Europlatform naar Vlake van de Raan*)
Correctiefactoren Noord 1,00; Oost: 0,95; Zuid: 0,91; West: 1,00

7.3.3 Overschrijdingskansen potentiële windsnelheid

Een overzicht van omnidirectionele kwantielschattingen met een herhalingsstijd van gemiddeld eens in 10.000 jaar, op basis van de nieuwe windstatistiek zoals afgeleid door het KNMI, zijn gegeven in Tabel 7-6. Voor de volledigheid zijn hier ook de windstations Schiphol en Deelen opgenomen, hoewel de windstatistiek voor deze 'landstations' ongewijzigd is ten opzichte van de statistiek uit WBI2017, zoals beschreven in paragraaf 7.2. De omnidirectionele waarden worden hier slechts gepresenteerd om voor de kuststations een vergelijking te kunnen maken met de omnidirectionele waarden uit WBI2017, zoals gegeven in Tabel 7-3. Voor de volledigheid merken we nogmaals op, dat voor de probabilistische modellen géén gebruik gemaakt wordt van deze omnidirectionele statistiek, maar van richtingsafhankelijke statistiek, zoals reeds aangegeven in paragraaf 7.1.

Station	Latitude [-]	Longitude [-]	Windsnelheid [m/s]
Delfzijl	54,00 N	6,50 E	35,3
Den Helder	53,50 N	4,00 E	35,7
Hoek van Holland	52,50 N	3,50 E	35,9
Huibertgat	54,00 N	5,75 E	35,1
IJmuiden	53,00 N	3,75 E	36,0
Vlissingen (Noordzee)	52,00 N	2,75 E	35,9
West Terschelling	53,75 N	4,50 E	35,1
Deelen	52,061 N	5,887 E	34,2
Schiphol	52,315 N	4,790 E	35,7

Tabel 7-6: Potentiële windsnelheid (1/10.000 jaar, omnidirectioneel) BOI2023 voor de stations zoals aangegeven in Figuur 7-1. Voor de stations Vlake van de Raan en Vlissingen zijn geen omnidirectionele waarden beschikbaar, omdat alleen de richtingsafhankelijke statistiek is afgeleid uit de statistiek voor station Vlissingen (Noordzee), zie paragraaf 7.3.2.

7.3.4 Statistische onzekerheid windsnelheid

In De Valk en Van den Brink (2025) is voor BOI2023 een methode ontwikkeld om nieuwe schattingen van de potentiële windsnelheid te bepalen die aanzienlijk nauwkeuriger zijn dan de schattingen die uitsluitend op meetgegevens gebaseerd zijn (8.000 jaar modelsimulaties versus 40 jaar meetgegevens). Met behulp van de bootstrapmethode¹⁸ (inclusief modelgerelateerde onzekerheid) zijn voor verschillende stations omnidirectionele betrouwbaarheidsintervallen afgeleid voor verschillende terugkeertijden van de windsnelheid, zoals hieronder beschreven.

Net als in WBI2017 zijn op basis van de percentielen van de windsnelheid voor elk station omnidirectionele schattingen gemaakt van de statistische onzekerheid door middel van het fitten van een normale verdeling. Deze zijn in Hydra-Ring als begrensd multiplicatief model toegevoegd aan de basisstochast windsnelheid. Het gemiddelde van de normale verdeling is vooraf vastgesteld op 1, terwijl de standaardafwijking gefit is met behulp van de 'maximum likelihood' methode. In WBI2017 is gekozen om de standaardafwijking behorende bij het 1/10.000-kwantiel (omnidirectioneel) te gebruiken voor het gehele bereik van de windsnelheid. Voor BOI2023 is echter aangesloten bij de statistische onzekerheid zoals afgeleid door het KNMI, dat wil zeggen een (omnidirectionele) standaardafwijking die varieert met de windsnelheid. Dat komt overeen met de werkwijze voor de basisstochast zeewaterstand, met dit verschil dat wordt uitgegaan van een additief in plaats van een multiplicatief model.

Voor de meetstations Vlissingen en Vlake van de Raan voor respectievelijk de Oosterschelde en Westerschelde, afgeleid uit de statistiek van locatie Vlissingen (Noordzee) zoals in Figuur 7-1 (zie paragraaf 7.3.2), is de statistische onzekerheid gelijkgenomen aan die van het referentiestation Vlissingen (Noordzee). Onzekerheid door deze omzetting is dus niet expliciet meegenomen.

De gevonden spreidingen van de normale verdeling voor de statistische onzekerheid zijn voor een terugkeertijd van 10.000 jaar weergegeven in Tabel 7-7. Voor de volledigheid zijn hier ook de windstations Schiphol en Deelen opgenomen, hoewel de windstatistiek en de bijbehorende onzekerheid voor deze 'landstations' ongewijzigd is ten opzichte van de statistiek uit WBI2017, zoals beschreven in paragraaf 7.2.

¹⁸ Statistische resampling-methode, waarbij nieuwe steekproeven (met teruglegging) uit de originele dataset worden getrokken om betrouwbaarheidsintervallen af te leiden.

Station	Windsnelheid excl. onz. [m/s]	Sigma stat. onz. [-]	Windsnelheid incl. onz. [m/s]
Delfzijl	35,3	0,034	35,8
Den Helder	35,7	0,036	36,1
Hoek van Holland	35,9	0,043	36,7
Huibertgat	35,1	0,036	35,7
IJmuiden	36,0	0,044	36,8
Vlissingen (Noordzee)	35,9	0,037	36,4
West Terschelling	35,1	0,037	35,7
Deelen	34,2	0,046	34,8
Schiphol	35,7	0,047	36,4

Tabel 7-7: Potentiële windsnelheid (1/10.000 jaar, omnidirectioneel) inclusief statistische onzekerheid BOI2023. Voor de stations Vlakte van de Raan en Vlissingen zijn geen omnidirectionele waarden beschikbaar, omdat alleen de richtingsafhankelijke statistiek is afgeleid uit de statistiek voor station Vlissingen (Noordzee), zie paragraaf 7.3.2.

7.4 Kansverdeling windrichting en ruimtelijke toepassing

In het probabilistische model wordt gebruik gemaakt van windsectoren van 30° of 22,5° (12 of 16 windrichtingen), afhankelijk van het beschouwde watersysteem. Tabel 7-8 geeft een overzicht van het aantal windrichtingen per belastingmodel, het station dat gebruikt is voor de betreffende kansverdeling en of dit gewijzigd is ten opzichte van WBI2017. Onder Tabel 7-8 volgt een nadere toelichting hierop.

Belastingmodel	Regio's	Aantal richtingen	Station kansverdeling windrichting	Gewijzigd t.o.v. WBI2017?
Bovenrivieren	1,2,18	16	Deelen	Nee
Benedenrivieren	3,4,17	16	Schiphol	
Hollandsche IJssel	22	16	Schiphol	
Volkerak-Zoommeer	21	16	Schiphol	
IJssel- en Vechtdelta	5,6	16	Schiphol	
Merengebied	7,8,19,20	16	Schiphol	
Oosterschelde	14	16	Hoek van Holland	Ja
Kust (dijken)	9,10,11,12,13,15	12	Hoek van Holland	

Tabel 7-8: Overzicht aantal en kansverdeling windrichtingen per belastingmodel.

7.4.1 Windrichtingstatistiek Schiphol en Deelen

Zoals aangegeven in paragraaf 7.1, is voor de meeste belastingmodellen gebruik gemaakt van de 'landstations' Schiphol of Deelen met 16 windrichtingen. De bijbehorende kansverdeling is ongewijzigd t.o.v. WBI2017, waarbij nogmaals wordt opgemerkt, dat voor het Markermeer is overgestapt van 12 windrichtingsectoren van 30° naar 16 windrichtingsectoren van 22,5° vanuit consistentie met de overige zoetwatersystemen, waarbij ook nieuwe productiesommen zijn uitgevoerd, zie (Stijnen et al., 2022).

Tabel 7-9 en Figuur 7-3 geven de windrichtingkansen voor Schiphol en Deelen. Zoals aangegeven in paragraaf 3.6.3 van Chbab (2017) zijn deze destijds afgeleid uit de windmetingen zoals gebruikt bij het afleiden van de statistiek volgens (Caires, 2009) en vervolgens omgerekend van 12 naar 16 windrichtingen volgens het recept uit Geerse (2003).

Windrichting [° t.o.v. N]	Schiphol [-]	Deelen [-]
22,5	0,025466057	0,029622854
45,0	0,037003166	0,039755137
67,5	0,060780865	0,058682803
90,0	0,052690820	0,061215874
112,5	0,045304256	0,052842668
135,0	0,051705944	0,064945117
157,5	0,066690116	0,061778778
180,0	0,091593387	0,077047565
202,5	0,123320436	0,123135379
225,0	0,112768203	0,136152547
247,5	0,100105522	0,113073459
270,0	0,075202251	0,059667886
292,5	0,050087935	0,041373487
315,0	0,039606050	0,032437377
337,5	0,036932817	0,026878694
360,0	0,030742174	0,021390374

Tabel 7-9: Kansverdeling windrichting (16 sectoren) voor stations Schiphol en Deelen.



Figuur 7-3: Kansverdeling windrichting (16 sectoren) voor stations Schiphol en Deelen.

7.4.2

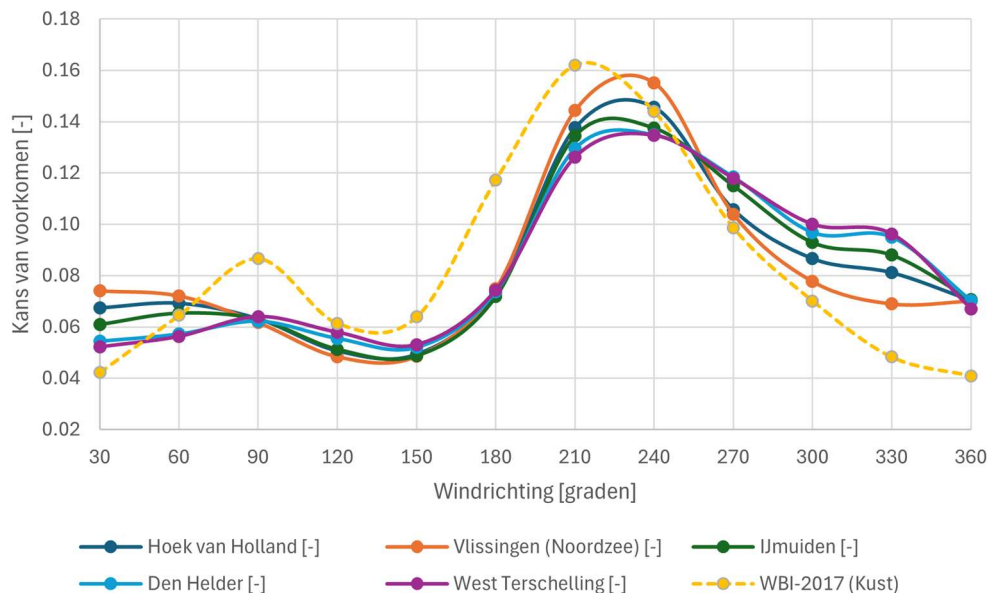
Windrichtingstatistiek kuststations

Langs de kust is gebruik gemaakt van diverse windstations (zie Tabel 7-2 in paragraaf 7.1), met statistiek die voor BOI2023 opnieuw is afgeleid door het KNMI. Voor de windrichting wordt echter gebruik gemaakt van één windstation. Dit is nodig voor de triangulaire interpolatie in de zeewaterstanden (zie paragraaf 6.5), waarbij eenzelfde zeewaterstandstation wordt gebruikt voor twee of meer regio's (bijvoorbeeld Lauwersoog, dat zowel voor Waddenzee oost als delen van Waddenzee west wordt gebruikt).

Kust (dijken)

Voor het belastingmodel Kust (dijken) is de kansverdeling van de windrichting van Hoek van Holland representatief gesteld voor alle regio's. In Chbab (2017) is in paragraaf 6.3.2 (Figuur 6.17) te zien dat Hoek van Holland bij benadering het gemiddelde van de kustlocaties representeert (ook al zijn er nog zeker verschillen). Dezelfde conclusie geldt ook voor de windrichtingskansen afgeleid uit de synthetische reeksen van SEAS5. Figuur 7-4 en Tabel 7-10 geven de windrichting-

kansen zoals afgeleid door het KNMI voor de (relevante) kuststations uit Figuur 7-1. Ook hier geldt dat Hoek van Holland een goede benadering geeft voor de gemiddelde waarden van alle stations. Figuur 7-4 geeft (ter vergelijking) ook de richtingskansen voor Hoek van Holland conform WBI2017. Duidelijk is te zien dat het zwaartepunt van de nieuwe BOI2023-windrichtingskansen zich verplaatst heeft van 210 graden bij WBI2017 naar 240 graden.



Figuur 7-4: Kansverdeling windrichting (12 sectoren) kust. Station Hoek van Holland is in BOI2023 gebruikt voor alle kustregio's. Ter vergelijking is ook de windrichtingstatistiek voor Hoek van Holland uit WBI2017 gegeven, die destijds ook voor alle kustregio's werd gebruikt.

Windrichting [° t.o.v. N]	West Terschelling [-]	Den Helder [-]	IJmuiden [-]	Hoek van Holland [-]	Vlissingen (Noordzee) [-]
30	0,0522	0,0544	0,0610	0,0674	0,0741
60	0,0563	0,0572	0,0654	0,0692	0,0721
90	0,0640	0,0622	0,0630	0,0631	0,0617
120	0,0579	0,0555	0,0513	0,0506	0,0484
150	0,0531	0,0520	0,0488	0,0493	0,0486
180	0,0744	0,0738	0,0719	0,0735	0,0749
210	0,1262	0,1296	0,1345	0,1376	0,1444
240	0,1347	0,1349	0,1375	0,1456	0,1551
270	0,1179	0,1184	0,1150	0,1057	0,1039
300	0,1000	0,0968	0,0929	0,0866	0,0777
330	0,0962	0,0950	0,0880	0,0811	0,0690
360	0,0671	0,0702	0,0707	0,0703	0,0701

Tabel 7-10: Kansverdeling windrichting (12 sectoren) kuststations. Hoek van Holland is gearceerd om te benadrukken dat die kansen in BOI2023 voor alle kustregio's zijn gebruikt.

Oosterschelde

In het belastingmodel voor de Oosterschelde is geen gebruik gemaakt van triangulaire interpolatie in de zeewaterstand, maar wordt toch (ook) gebruik gemaakt van de windrichtingskansen van Hoek van Holland. Er zijn namelijk alleen windrichtingskansen beschikbaar voor het station Vlissingen (Noordzee) en de verschillen ten opzichte van het station Hoek van Holland zijn daarbij dusdanig klein dat het KNMI geadviseerd heeft niet verder te differentiëren en voor de hele kust,

inclusief Oosterschelde, uit te gaan van dezelfde kansverdeling voor de windrichting. Tabel 7-11 geeft de kansverdeling van de windrichting bij Hoek van Holland met 16 sectoren van 22,5°, die is gehanteerd voor het belastingmodel Oosterschelde.

Windrichting [° t.o.v. N]	Hoek van Holland [-]
22,5	0,0487
45,0	0,0536
67,5	0,0499
90,0	0,0484
112,5	0,0390
135,0	0,0360
157,5	0,0384
180,0	0,0565
202,5	0,0853
225,0	0,1264
247,5	0,0964
270,0	0,0804
292,5	0,0662
315,0	0,0626
337,5	0,0588
360,0	0,0534

Tabel 7-11: Kansverdeling windrichting (16 sectoren) Hoek van Holland, die voor BOI203 is gebruikt in het belastingmodel voor de Oosterschelde.

8 Duinstatistiek

De Duinen, ook wel zandige kust, vormen een aparte regio in Hydra-Ring (regio 16) met een eigen belastingmodel. Anders dan voor watersystemen met harde keringen, worden voor dit watersysteem de golfcondities via een deterministische relatie afgeleid van de zeewaterstand. Onlangs is de zeewaterstandstatistiek voor duinafslagberekeningen afgeleid, zie (De Valk en Van den Brink, 2026). De relaties voor de golfgerelateerde parameters (piekgolfhoogte en -periode) zijn sinds de HR2006 ongewijzigd. Deze randvoorwaarden zijn vigerend voor BOI2023. De benodigde hydraulische randvoorwaarden komen hieronder kort aan de orde, voor een uitgebreide beschrijving verwijzen we naar (De Valk en Van den Brink, 2026), (Steetzel et al., 2023) en (Boers et al., 2014).

Voor toepassingen in relatie tot het BOI-basisinstrumentarium is een nieuw semi-probabilistisch rekenvoorschrift afgeleid voor XBeach op basis van probabilistische modelberekeningen met XBeach van gemodelleerde afslaglengtes (Steetzel et al., 2023). De databases met rekenwaarden voor XBeach voor BOI zijn met de tool 'Preprocessor Duinen' van Hydra-Ring afgeleid (Wojciechowska, 2022).

8.1 Zeewaterstand

De zandige keringen langs de hele kust worden net als de harde keringen belast door een combinatie van getij en stormopzet, aangedreven door de wind. Ten behoeve van duinafslagsommen zijn omnidirectionele rekenpeilen nodig. Hiervoor is invoer nodig van zeewaterstanden behorende bij verschillende steunpunten op diep water. De ligging van alle steunpunten is gegeven in Tabel 8-1 en Figuur 8-1. De steunpunten voor duinen liggen op de rand van diepwater (NAP-20 m dieptelijn) en niet bij de meetstations zoals bij dijken.

De zeewaterstandsstatistiek voor duinen is afgeleid met eenzelfde methode als die voor de harde keringen; deze methode is behandeld in paragraaf 6.2 van dit rapport. Voor Duinen is echter alleen omnidirectionele statistiek benodigd. De windrichtingsafhankelijkheid is dus niet verwerkt. De omnidirectionele statistiek is gegeven in Bijlage E.

Steunpunt	Code	RDx [m]	RDy [m]	Kuststation (zie paragraaf)
Vlissingen	VI	-7.797*	380.645	Vlissingen
Hoek van Holland	HvH	58.748	450.830	Hoek van Holland
IJmuiden	IJm	79.249	501.800	IJmuiden
Den Helder	DH	98.372	549.340	Den Helder
Eierlandse Gat	EG	106.514	587.985	Texel Noordzee
Extra steunpunt (ES)	ES	150.000	621.230	**
Borkum	Bo	221.990	621.330	Huibertgat

* De echte locatie (29.571, 384.893) is in Hydra-Ring aangepast om interpolatieproblemen te voorkomen.

** De waterstand bij ES is bepaald via een lineaire interpolatie tussen "Texel Noordzee" en "Huibertgat".

Tabel 8-1: Steunpunten Duinen (Deltares, 2025).

Voor de duinen is statistiek voor de kustlocatie Texel Noordzee nodig. Deze locatie maakt geen onderdeel uit van de locaties voor de harde keringen. Omdat deze locatie maar 26 jaar aan meetgegevens bevat, is voor de afleiding van de omni-

directionele statistiek een wat afwijkende methode gehanteerd ten opzichte van de overige kustlocaties. Voor meer details zie Bijlage F.4 uit De Valk en van den Brink (2026). Om ervoor te zorgen dat in het noorden de hydraulische randvoorwaarden bij benadering de NAP-20 m dieptelijn volgen, is een extra steunpunt gedefinieerd tussen Steunpunt Eierlandse Gat en Borkum (RWS, 2007). Tabel 8-2 geeft een overzicht van de omnidirectionele statistiek.

Terugkeer-tijd [jaar]	Vlissingen [m+NAP]	Hoek van Holland [m+NAP]	IJmuiden [m+NAP]	Den Helder [m+NAP]	Texel Noordzee [m+NAP]	Huibertgat [m+NAP]
1	3,42	2,57	2,42	2,14	2,15	2,52
10	3,85	3,10	2,97	2,71	2,67	3,11
100	4,26	3,63	3,51	3,26	3,16	3,67
1.000	4,68	4,14	4,04	3,79	3,64	4,21
10.000	5,08	4,66	4,55	4,31	4,11	4,74
100.000	5,48	5,16	5,06	4,81	4,56	5,25
1.000.000	5,88	5,67	5,55	5,30	5,01	5,75
10.000.000	6,27	6,17	6,05	5,78	5,44	6,25

Tabel 8-2: Overzicht omnidirectionele zeewaterstanden (m+NAP) voor Duinen.

De bijbehorende omnidirectionele onzekerheid is in Hydra-Ring ('Preprocessor Duinen') als additief model toegevoegd aan de basisstochast zeewaterstand (afhankelijk van de herhalingstijd). Deze onzekerheid is weergegeven in Bijlage E.2.

8.2 Golfcondities

Naast de zeewaterstand bestaat de invoer voor het duinafslagmodel uit omnidirectionele golfcondities, te weten de golfhoogte (H_s) en de golfpiekperiode (T_p). Deze worden bepaald op diep water op de doorgaande NAP-20 m dieptelijn. De golfhoogten en golfperioden ter plaatse van de steunpunten op diep water hangt af van de zeewaterstand. Deze relatie is in BOI2023 onveranderd ten opzichte van WBI2017 en HR2006. Voor meer informatie verwijzen we naar (Deltares, 2025).

8.3 Lineaire interpolatie

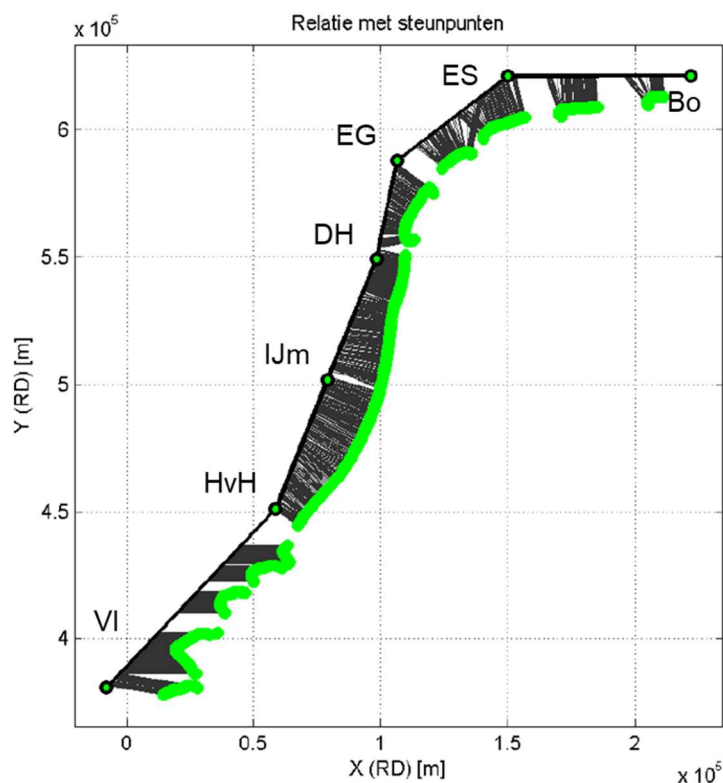
In de 'Preprocessor Duinen' van Hydra-Ring is een methode opgenomen voor het uitvoeren van de ruimtelijke, lineaire interpolatie. Als resultaat hiervan zijn de zeewaterstand en golfcondities op de uitvoerlocaties¹⁹ tussen de zeven steunpunten eenduidig beschreven. Deze methode is gebaseerd op de voor WBI2017 uitgewerkte methodiek als beschreven in Boers et al. (2014). In Hydra-Ring wordt vervolgens de lokale belasting berekend inclusief de statistische onzekerheid (Deltares, 2025).

In het kader van de update van Hydra-Ring zijn hierin op een aantal onderdelen nog kleine correcties aangebracht. Deze hebben primair te maken met het gebruik van afwijkende raaioriëntaties in met name de Zuidwestelijke Delta (RWS, 2022), (Deltares, 2025).

Om voor alle uitvoerlocaties langs de kust zeewaterstanden en golftrandvoorwaarden vast te stellen, dient te worden geïnterpoleerd tussen de steunpunten (Boers et al, 2014). Dit wordt op de volgende manier gedaan (RWS, 2007):

¹⁹ Voor zandige waterkeringen langs de Noordzeekust kan de uitvoerlocatie worden gedefinieerd als de 20-meterdieptelijn. Dit was ook al het geval bij de WBI2017; deze definitie geldt nu tevens voor de Deltakust.

- Voor elk uitvoerpunt wordt een benadering gegeven van de normaallijn ten opzichte van de kust. In de meeste gevallen betreft dit de oriëntatie van de JARKUS-raai (behalve koppen van de Waddeneilanden en de Deltakust²⁰).
- Als de (benadering van) de normaallijn is vastgesteld, wordt het snijpunt bepaald tussen deze lijn en de lijn die de verbinding vormt tussen twee steunpunten.
- Vervolgens worden de golfrandvoorwaarden voor het betreffende punt afgeleid van de lineair geïnterpoleerde waarden tussen de twee steunpunten.



Figuur 8-1: De benaderde normaallijnen ten opzichte van de kust voor de ruimtelijke interpolatie van golfrandvoorwaarden in Rijksdriehoekcoördinatenstelsel (HR Duinen voor WT12017).

Meer recent zijn updates toegevoegd aan deze methode, zoals:

- het definiëren van een nieuw steunpunt (Vlissingen) voor golven en waterstanden, om een optimalere lijn tussen de steunpunten te krijgen (RWS, 2022);
- definiëren van meer uitvoerlocaties voor XBeach 1DH, zoals de Brouwersdam, Veersegatdam en de eilandkoppen en -staarten in de Wadden (Deltares, 2026).

²⁰ Bij een sterke kromming van de kust kan het voorkomen dat bij gebruik van de eigenlijke oriëntatie een snijpunt wordt gevonden op een plek die weinig relatie heeft met de golfrandvoorwaarden die bij de locatie op de kust kunnen optreden.

9 Correlaties

9.1 Inleiding

Diverse basisstochasten zijn onderling (positief) gecorreleerd. Zo gaan verhoogde IJsselmeerpeilen vaak samen met verhoogde afvoeren op de IJssel en de Vecht, en gaan hoge zeewaterstanden gepaard met extreme windsnelheden uit zuidwestelijk tot noordelijke windrichtingen. In de probabilistische en productieberekeningen van BOI2023 is rekening gehouden met de correlaties tussen verschillende basisstochasten. In dit hoofdstuk zijn de relevante correlaties beschreven.

In Geerse en Diermanse (2006) en Volker (1987) zijn enkele correlatiemodellen beschreven die gebruikt kunnen worden voor het modelleren van correlaties tussen basisstochasten, waaronder:

- het CS-model (model met Constante Spreiding),
- het VS-model (model met Variabele Spreiding),
- het PCR-model (model PC-Ring) en
- het Volkermodel.

Het PCR-model is geïmplementeerd in Hydra-Ring. Het CS-model en het VS-model zijn geïmplementeerd in Hydra-NL. De genoemde modellen hebben overeenkomsten, maar er zijn ook enige verschillen; zie (Geerse en Diermanse, 2006) voor nadere details. Het Volkermodel is geïmplementeerd in Hydra-Ring en Hydra-NL, maar ook daar zijn enige verschillen, zie (Caspers et al, 2026).

9.2 Correlatie meerpeil-afvoer IJssel- en Vechtdelta

De correlatie tussen het IJsselmeermeerpeil en de afvoer van de IJssel bij Olst of de Vecht bij Dalfsen is in Hydra-Ring gemodelleerd met het PCR-model. In Hydra-Ring wordt een s -waarde²¹ van 1,2 gehanteerd voor zowel de IJsseldelta (correlatie IJsselafoer-IJsselmeerpeil) als de Vechtdelta (correlatie Vechtafoer-IJsselmeerpeil). In Hydra-NL wordt eenzelfde s -waarde gehanteerd in het CS-model. Uit onderzoek naar de verschillen tussen het CS-model en het PCR-model (Diermanse, 2016) is geconcludeerd dat het PCR-model een kleine fout (ca. 5%) introduceert. Deze fout geldt voornamelijk voor kortere herhalingstijden (rond 1 jaar). Omdat bij dergelijke afvoeren het meerpeil/de wind de waterstand in grote mate beïnvloed, is een dergelijke fout daardoor verwaarloosbaar (Chbab, 2017).

9.3 Correlatie meerpeil-afvoer Volkerak-Zoommeer

Zoals uitgelegd in hoofdstuk 2, wordt in het belastingmodel voor het Volkerak-Zoommeer (VZM) rekening gehouden met de inzet van het VZM voor waterberging als onderdeel van de Ruimte voor de Riviermaatregelen. Deze inzet en de gevolgen daarvan zijn afhankelijk van de waterstand bij Rak Noord en de toestand van de Europoortkering (EPK). De hydraulische belastingen op het VZM zijn daarmee afhankelijk van zowel het meerpeil op het VZM zelf als van alle basisstochasten in het belastingmodel Benedenrivieren, waaronder de rivierafvoer. In het belastingmodel voor het VZM betreft dat de Rijnafvoer bij Lobith.

²¹ Parameter die de mate van correlatie weergeeft tussen twee stochasten. Lage waarden van s duiden op een sterke correlatie (0 is volledige correlatie), hoge waarden van s duiden op een zwakke correlatie.

Bij de ontwikkeling van het belastingmodel voor het VZM inclusief het effect van waterberging (Geerse et al., 2017) is ook de correlatie tussen meerpeil op het VZM en de Rijnaafvoer bij Lobith onderzocht. Zoals beschreven in paragraaf 2.3 van het genoemde rapport, is destijds uiteindelijk gekozen om – net als voor de IJssel- en Vechtdelta – uit te gaan van een s -waarde van 1,2 om de correlatie tussen meerpeil en afvoer te beschrijven, die (net als bij de correlatie tussen meerpeil en afvoer in de IJssel- en Vechtdelta) in Hydra-Ring voor het PCR-model wordt gehanteerd en in Hydra-NL voor het CS-model.

9.4 Correlatie IJssel- en Vechtafvoer

De correlatie tussen de IJssel- en Vechtafvoer is voor de probabilistische berekeningen met Hydra-Ring niet nodig, omdat voor de IJsseldelta de IJsselaafvoer als basisstochast geldt met de Vechtafvoer daaraan gerelateerd en voor de Vechtdelta de Vechtafvoer met de IJsselaafvoer daaraan gelinkt (Geerse, 2006). Deze aanpak is onveranderd ten opzichte van WTI2011 en WBI2017. Voor de productieberekeningen van waterstanden is wel rekening gehouden met de correlatie tussen IJssel- en Vechtafvoer, waarbij is uitgegaan van een deterministisch verband. Zie voor details Daggenvoorde en Duits (2021).

9.5 Correlatie Rijn- en Maasafvoer

De correlatie tussen de afvoer van de Rijn bij Lobith en die van de Maas bij Borgharen speelt een rol bij zowel de productieberekeningen als bij de probabilistische berekeningen met Hydra-NL en Hydra-Ring. Net als in WBI2017 is in BOI2023 uitgegaan van maximale correlatie tussen Rijn en Maas, ook wel de 1-op-1 relatie genoemd, zie voor uitgebreide motivatie (Geerse, 2013). De 1-op-1 relatie tussen Rijn en Maas t.b.v. BOI2023 is bepaald op basis van werklijnen van de Rijn- en de Maasafvoer (Oosterlo, 2026). De aanname van volledige afhankelijkheid, door middel van de 1-op-1 relatie, maakt een correlatiemodel voor Rijn en Maasafvoer in probabilistische berekeningen overbodig (Chbab, 2017).

9.6 Correlatie wind en zeewaterstand (Kust)

De wind-waterstandsstatistiek is in WBI2017 geactualiseerd voor alle kustregio's; hierbij zijn zes hoofdstations (zie Tabel 4.1 en 4.2 uit Chbab, 2017) gehanteerd. De correlaties (s -waarden) zijn bepaald op basis van simultane waarnemingen boven een drempelwaarde over een periode van 1979-2002 (of 2008), zoals beschreven in De Weerts en Diermanse (2004). Het gehanteerde correlatiemodel is het PCR-model in Hydra-Ring en het CS-model in Hydra-NL.

In De Valk en Van den Brink (2025) zijn gesimuleerde weergegevens en daarvan afgeleide simulaties van waterstand langs de Nederlandse kust (grootweg 8.000 jaar) gebruikt om de wind-waterstandsstatistiek te actualiseren. Om s te schatten zijn simultane waarden van windschuifspanning en hoogwater in de simulaties getransformeerd naar waarden van de gestandaardiseerde variabelen. De parameter s is vervolgens geschat als de standaardafwijking van de verschillen van de gestandaardiseerde waarden, berekend over alle datapunten waarvoor de som van de gestandaardiseerde waarden boven een bepaalde drempel ligt. In tegenstelling tot de in De Valk en Van den Brink (2025) gehanteerde drempel van de hoogste 1.000 datapunten is in BOI2023 het advies uit Caspers et al. (2026) overgenomen om het 98,8-percentiel te hanteren. Deze drempel komt beter overeen met de gehanteerde drempels van de marginale wind- en zeewaterstandstatistiek.

Tabel 9-1 en Tabel 9-2 geven voor respectievelijk de belastingmodellen Kust (dijken) met 12 windsectoren en Oosterschelde met 16 windsectoren een overzicht van de door het KNMI gebruikte SEAS5 windlocatie en DCSMv5 waterstandlocatie plus de resulterende correlatiecoëfficiënten (*s*-waarden). Hierbij geldt dat de gepresenteerde *s*-waarde bij een bepaalde windrichting geldig is voor alle zeewaterstanden²². Langs de kust (Tabel 9-1) wordt voor windsectoren 30 tot en met 210 graden t.o.v. Noord geen correlatie in rekening gebracht. Deze *s*-waarden zijn over het algemeen rond de 3 à 5, wat een zeer lage correlatie impliceert. Ook voor de Oosterschelde (Tabel 9-2) geldt dat voor de niet gegeven richtingen geen correlatie wordt meegenomen, omdat de afgeleide *s*-waarden dermate groot zijn dat de correlatie verwaarloosbaar is.

De waarden in Tabel 9-1 komen in principe overeen met de waarden in bijlage D van Caspers et al. (2026). Later is echter besloten om voor Waddenzee oost uit te gaan van locatie Lauwersoog, die nog niet genoemd was in Tabel 11 van bijlage D. De *s*-waarden voor de Oosterschelde (Tabel 9-2) ontbreken ook in bijlage D van Caspers et al. (2026), maar komen wel overeen met de toelevering van het KNMI.

Regio	SEAS5 wind	DCSMv5 zws	240°	270°	300°	330°	360°
9. Waddenzee oost	53,50 N 6,25 E	53,417 N 6,25 E	2,8	2,2	1,8	1,6	2,1
10. Waddenzee west	53,25 N 5,50 E	53,25 N 5,375 E	2,5	2,0	1,7	1,7	2,4
11. Holl. kust noord	53,00 N 4,50 E	53,00 N 4,625 E	2,6	2,1	1,9	1,7	2,3
12. Holl. kust midden	52,50 N 4,50 E	52,417 N 4,50 E	2,5	1,9	1,7	1,5	2,0
13. Holl. kust zuid	52,00 N 4,00 E	52,00 N 4,125 E	2,6	1,9	1,6	1,6	2,2
15. Westerschelde	51,50 N 3,50 E	51,417 N 3,50 E	3,0	2,3	1,9	1,8	2,4

Tabel 9-1: Correlatie wind en zeewaterstand Kust (dijken).

SEAS5 wind	DCSMv5 zws	247,5°	270°	292,5°	315°	337,5°	360°	22,5°
51,75 N 3,50 E	51,67 N 3,50 E	2,9	2,3	1,9	1,7	1,7	2,2	3,1

Tabel 9-2: Correlatie wind en zeewaterstand Oosterschelde.

9.7 Correlatie wind en zeewaterstand (Rijn-Maasmonding)

In de RMM (Benedenrivieren, Volkerak-Zoommeer en Hollandsche IJssel) is de basisstochast zeewaterstand gecorreleerd met de windsnelheid en windrichting. Voor de westelijke windrichtingen (ZW, WNW, ..., N) dient rekening te worden gehouden met verhoogde zeewaterstanden bij verhoogde windsnelheden. De hoge zeewaterstanden worden immers veroorzaakt door hoge (NW) windsnelheden. Bij de probabilistische berekeningen wordt daarom gebruik gemaakt gecombineerde wind-waterstandsstatistiek, uitgedrukt als conditionele kansen van de windsnelheid bij Schiphol gegeven de zeewaterstand bij Hoek van Holland²³ en windrichting. Voor

²² In Hydra-NL is voor de kust in principe het VS (variabele spreiding) model geïmplementeerd in plaats van het CS (constante spreiding) model. Door dezelfde waarden uit Tabel 9-1 en Tabel 9-2 echter voor twee verschillende zeewaterstanden op te nemen wordt in de praktijk toch gebruik gemaakt van het CS-model.

²³ In WBI2017 werd gebruik gemaakt van Maasmond, wat werkelijk een vertaling van Hoek van Holland was met een verlaging van 0,02 m (Geerse, 2003). In BOI2023 wordt deze correctie niet langer toegepast, waardoor de statistiek bij Maasmond gelijk is aan de statistiek bij Hoek van Holland (zie paragraaf 6.1).

de (overige) oostelijke windrichtingen zijn zulke conditionele kansen niet nodig voor probabilistische berekeningen (Chbab, 2017).

De correlatie tussen wind en zeewaterstand in het Benedenrivierengebied is in Hydra-Ring en Hydra-NL gemodelleerd met het zogenoemde Volkermodel (Volker, 1987). De wind-waterstandstatistiek uit WBI2017 is niet meer bruikbaar voor BOI2023, omdat de zeewaterstandstatistiek in BOI2023 is aangepast (Hoofdstuk 6). Daarom zijn in Caspers et al. (2026) de benodigde parameters in het Volkermodel geactualiseerd aan de hand van de nieuwe zeewaterstandstatistiek uit De Valk en van den Brink (2026). Deze actualisatie is uitgevoerd op basis van de voorlopige nieuwe zeewaterstandstatistiek, die sindsdien nog een kleine wijziging heeft ondergaan. Volgens dezelfde werkwijze is de actualisatie daarom nogmaals uitgevoerd met de definitieve statistiek zoals beschreven in hoofdstuk 6. Dit wordt uitgebreid beschreven in bijlage G.

10 Stormvloedkeringen en seiches

Dit hoofdstuk beschrijft relevante informatie met betrekking tot de stormvloedkeringen, waarvoor in het probabilistische model rekening wordt gehouden met de kans van falen. Dit betreft de Europoortkering (EPK), bestaande uit de Maeslantkering en de Hartelkering, de Hollandsche IJsselkering (HIJK), de Oosterscheldekering (OSK) en de balgstuw bij Ramspol.

Bij de OSK (paragraaf 10.3) gaan we ook nader in op twee nog niet eerder beschreven stochasten in het belastingmodel voor de Oosterschelde, namelijk de stormduur en het faseverschil tussen de piek van de stormopzet en de getijtop, hoewel deze strikt genomen geen betrekking hebben op de stormvloedkering zelf.

Tot slot wordt in paragraaf 10.5 ingegaan op de omgang met seiches, die relevant zijn voor de regio Europoort binnen het belastingmodel voor de Benedenrivieren.

10.1 Europoortkering

Het (gezamenlijke) sluitcommando voor de EPK wordt gegeven zodra de verwachte waterstanden te Rotterdam en Dordrecht de zogeheten sluitpeilen overschrijden. Het sluitcriterium voor Rotterdam is vastgesteld op NAP+3,00 m en dat voor Dordrecht op NAP+2,90 m. Deze twee plaatsen worden representatief geacht voor het gehele gebied achter de keringen. Om te bepalen of de sluitcriteria voor Rotterdam en Dordrecht gehaald zullen worden, wordt in de praktijk gebruik gemaakt van het zogenaamde Beslis- en Ondersteunend Systeem (BOS). Invoer voor het BOS is de voorspelde zeewaterstand te Hoek van Holland. Deze waterstandvoorspelling wordt afgegeven door het Watermanagementcentrum Nederland (WMCN).

De voorspelling van de zeewaterstand op basis waarvan de beslissing genomen wordt om de stormvloedkeringen te sluiten, gaat gepaard met onzekerheid. Deze onzekerheid wordt sinds WT2011 meegenomen in de bepaling van de hydraulische belastingen en deze aanpak blijft gehandhaafd en onveranderd in BOI2023. De nauwkeurigheid van de voorspelling bij Hoek van Holland wordt gemodelleerd door een normale verdeling. Tot nu toe zijn hiervoor gegevens vanuit de HR2006 gebruikt: een normale verdeling met een gemiddelde $\mu = -0,09$ m en een standaardafwijking $\sigma = 0,18$ m (wat betekent dat de SVSD-voorspelling gemiddeld structureel 9 cm te laag bleek). Inmiddels zijn 25 jaar aan nieuwe data beschikbaar en is overgestapt naar nieuwe modellen. Daarom is aan het Watermanagementcentrum Nederland (WMCN) gevraagd een analyse uit te voeren op basis van de nieuwste gegevens. Dit heeft geresulteerd in het memo "Kwaliteit verwachtingen voor Europoortkering vanuit WMCN-Kust en Benedenrivieren" (Verboeket en Netel, 2025). Op basis hiervan heeft Rijkswaterstaat een besluit genomen over de in BOI2023 te hanteren waarden (Oosterlo, 2025): de nieuwe analyse levert een normale verdeling met gemiddelde $\mu = -0,05$ m en standaardafwijking $\sigma = 0,13$ m. Deze waarden zijn opgenomen in zowel Hydra-Ring als Hydra-NL. Zoals hierboven al aangegeven, staat een negatief gemiddelde voor een onderschatting, hetgeen wil zeggen dat de verwachting gemiddeld lager is dan de opgetreden waterstand.

De faalkans van de EPK is in BOI2023 gelijk gesteld aan 1/100 per sluitvraag. Dit is onveranderd ten opzichte van WTI2011 en WBI2017. Voor de Hartelkering geldt een maximale toelaatbare faalkans van 1/10. De faalkans van de Hartelkering heeft

echter bijna geen invloed op de waterstanden bij de norm van achterliggende keringen, daarom is de faalkans gelijk gesteld aan de faalkans van de Maeslantkering (Chbab, 2017).

10.2 **Hollandsche IJsselkering**

De stormvloedkering Hollandse IJssel (HIJK) ligt bij Krimpen aan de IJssel, nabij de monding van de Hollandse IJssel. De kering bestaat uit een stuw met twee schuiven en een sluis. Zoals grotendeels al aangegeven in Chbab (2017) geldt op hoofdlijnen: De kering wordt bij een naderende storm gesloten om een waterstand van NAP+2,25 m bij Krimpen aan de IJssel (binnenzijde van de kering) te voorkomen. Vanwege onzekerheid in de waterstandsverwachtingen wordt de kering bij een lager operationeel sluitpeil gesloten. Daarbij wordt ook nog onderscheid gemaakt tussen een (getrapte) peilsluiting en een kenteringsluiting, afhankelijk van of er sprake is van waterbezwaar en de verwachte waterstand bij Hoek van Holland. Details van de sluitstrategie voor de HIJK zijn terug te vinden in hoofdstuk 2.6 van Honingh et al. (2022). De keuzes ten aanzien van het beheer van de Hollandse IJsselkering en het sluitproces volgen uit het bestuursakkoord (RWS, 2024).

De faalkans van de HIJK is in BOI2023 gelijkgesteld aan 1/1500 per sluitvraag, conform de Omgevingswet.

10.3 **Oosterscheldekering**

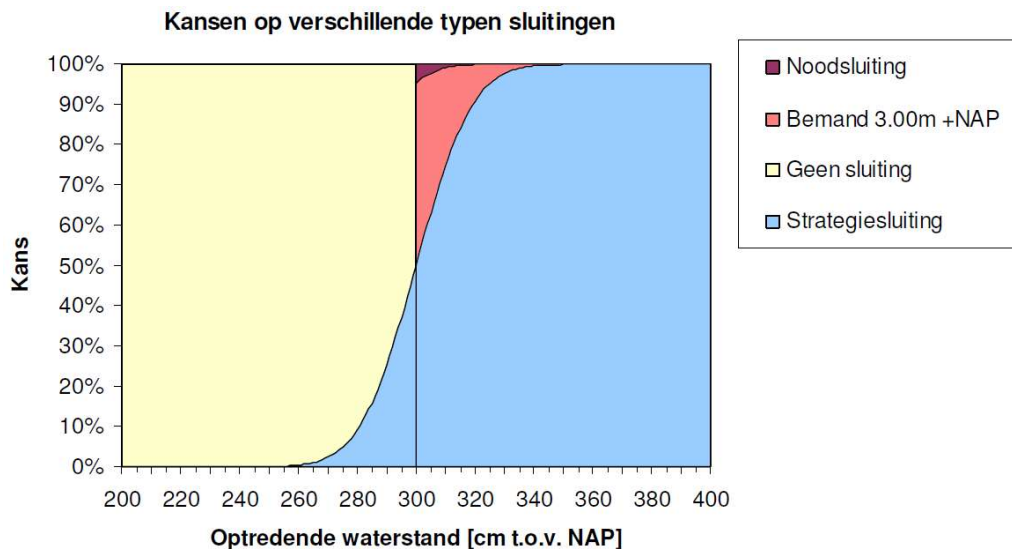
In BOI20203 wordt in de probabilistische modellen Hydra-Ring en Hydra-NL gerekend met het belastingmodel zoals beschreven in Geerse en Stijnen (2016), dat gebaseerd is op het Prestatiepeilenmodel voor de OSK (Van Manen, 2008).

10.3.1 *Besliskansen*

De OSK sluit bij een verwachte zeewaterstand buitengaats (Roompot Buiten) van NAP+3,00 m. Als een waterstand van NAP+2,75 m wordt verwacht, wordt het Beslisteam Sluiting Oosterscheldekering bijeengeroepen. Op basis van de weersvoorspellingen, in combinatie met lokale gegevens en het te verwachten getij, beslist dit team of de OSK gesloten wordt. Als bij hoge waterstanden iets mis gaat met de alarmering of bediening, is er het noodsluitsysteem, dat bij NAP+3,00 m de schuiven automatisch sluit (Chbab, 2017). In het probabilistisch model zijn daarom de volgende typen sluitingen onderscheiden, naast de situatie waarin er helemaal geen sprake is van een sluitingsprocedure (geen sluiten):

1. Strategiesluiting: de verwachting is dusdanig ver van tevoren boven de NAP+3,00 m dat het beslisteam aanwezig is (bemande kering) en sprake is van een reguliere sluiting op basis van de weersvoorspellingen, gecombineerd met lokale gegevens van het te verwachten getij.
2. Handmatige (nood)sluiting: de verwachting is lange tijd onder de NAP+3,00 m, maar wél dusdanig ver van te voren boven de NAP+2,75 m dat het beslisteam aanwezig is. In dat geval volgt een handmatige (ook wel bemande) noodsluiting, die qua effect lijkt op een automatische sluiting (met exact dezelfde gevolgen).
3. Noodsluiting door systeem: de waterstand NAP+3,00 m wordt bereikt, maar doordat de verwachting lange tijd onder de NAP+2,75 m is of door andere oorzaken is de kering niet bemand en volgt een automatisch noodsluiting.

De kansen op de verschillende typen sluitingen - afhankelijk van de optredende maximale waterstand (ook wel besliskansen) - zijn beschreven in Van Manen (2008) en weergegeven in Figuur 10-1. De precieze waarden zijn gegeven in bijlage A van het genoemde rapport en vormen invoer voor zowel Hydra-Ring als Hydra-NL.



Figuur 10-1: Besliskansen OSK (Bron: Van Manen, 2008).

10.3.2 Faalkansen

Rijkswaterstaat Zee en Delta heeft geactualiseerde faalkansen afgeleid voor de OSK, waarbij onderscheid gemaakt is tussen de bemande en de onbemande kering, dus met en zonder aanwezigheid van personeel (Zegers, 2025). Bij het afleiden van deze faalkansen is de volgende klasse-indeling voor het aantal falende schuiven gehanteerd: 1 schuif, 2 schuiven, 3 t/m 5 schuiven, 6 t/m 10 schuiven, kwart, helft, driekwart, heel (62 schuiven) en succes (0 schuiven).

In de productieberekeningen voor BOI2023 is in de waterbewegingssommen met WAQUA echter uitgegaan van minder klassen, namelijk: 0, 16, 31 of 62 falende schuiven, om zo het aantal benodigde productieberekeningen behapbaar te houden (Stijnen et al., 2018a). De faalkansen uit Zegers (2025) zijn daarom samengevoegd, zoals aangegeven in Tabel 10-1. De weergegeven faalkans voor 31 falende schuiven is bijvoorbeeld gelijk aan de som van de faalkansen voor de helft en driekwart falende schuiven.

Aantal	Bemand	Onbemand	Gebruikte klassen
0	0,99654249038	0,98908098950	0, 1 of 2 falende schuiven
16	0,00331600000	0,00700900000	3 t/m 5, 6 t/m 10 en kwart falende schuiven
31	0,00009560962	0,00196001050	helft en driekwart falende schuiven
62	0,00004590000	0,00195000000	62 falende schuiven

Tabel 10-1: Faalkansen OSK voor BOI2023 (kansen per sluitvraag).

10.3.3 Stormduur en faseverschil

Naast de zeewaterstand, de windcondities en de toestand van de OSK worden in het belastingmodel voor de Oosterschelde nog twee stochasten beschouwd, namelijk de stormduur en het faseverschil tussen de piek van de stormopzet en de getijtop.

Tabel 10-2 geeft de kansen voor de verschillende stormduren in het belastingmodel voor de Oosterschelde voor zowel WBI2017 als BOI2023. De getallen voor WBI2017 waren gebaseerd op de onderliggende logaritmische verdeling voor de stormduur zoals beschreven in Vrouwenfelder en Steenbergen (2007). In de productie-berekeningen voor BOI2023 is in de waterbewegingssommen met WAQUA gerekend met een uitgedunde set, waarin nog slechts 3 stormduren zijn beschouwd. De kansen op de stormduren in WBI2017 zijn analoog daaraan destijds samengevoegd tot 3 klassen, dusdanig dat de verwachtingswaarde ongewijzigd is gebleven.

WBI2017		BOI2023	
Stormduur	Kans	Stormduur	Kans
20	0,055	40	0,475
40	0,414	60	0,349
60	0,353	80	0,176
80	0,131		
100	0,047		

Tabel 10-2: Kansen stormduren in belastingmodel Oosterschelde voor WBI2017 en BOI2023.

Voor het faseverschil werd in WBI2017 nog uitgegaan van 3 waarden (-260, 0 en 260 minuten) met gelijke kans van voorkomen. In de uitgedunde set voor BOI2023 is echter nog maar sprake van 1 faseverschil, namelijk -320 minuten, met kans 1 (Geerse en Stijnen, 2016). Dit wil zeggen dat er altijd vanuit wordt gegaan dat de piek van de stormopzet ná de getijtop (het astronomisch hoogwater) valt.

10.4 Ramspolkering

De Ramspolkering sluit niet uitsluitend op basis van opgetreden waterstanden; de kering gaat dicht indien de waterstand op het Ketelmeer NAP+0,5 m overschrijdt én sprake is van een stroming in oostelijke richting ter plaatse van de kering. De kering opent weer wanneer de waterstand aan de buitenzijde lager wordt dan de waterstand aan de binnenzijde of bij stroming in westelijke richting (door hoge afvoeren op de Vecht) (Chbab, 2017).

De Ramspolkering kan falen. Er is sprake van falen indien de kering niet sluit als dit volgens de geldende sluitcriteria wel zou moeten. Hierbij wordt geen onderscheid gemaakt tussen niet sluiten, niet tijdig sluiten of constructief falen na sluiten. In WBI2017 is voor de faalkans uitgegaan van de wettelijke normering, dat wil zeggen de maximaal toelaatbare faalkans in 2050, die 1/100 per sluitvraag bedraagt (Chbab, 2017). Deze faalkans is onveranderd toegepast voor BOI2023.

10.5 Seiches

Seiches zijn zogenoemde lange golven, opgewekt door meteorologische effecten rondom koufrontpassages en tijdens instabiele weercondities. Dergelijke meteorologische condities kunnen leiden tot grootschalige circulatiepatronen (convectiecellen) die fluctuaties in de wind veroorzaken met tijdschalen van ca. 30 minuten en hoger en die de slingeringen in de waterstand als gevolg hebben met amplitude die dan vaak in de orde grootte van decimeters liggen (Chbab, 2017). In BOI2023 wordt slechts voor één watersysteem een locatieafhankelijke seichetoeslag

(het Netto Seiche-Effect, NSE) toegepast, namelijk het Europoortgebied. Deze seichetoeslag, zoals beschreven in Chbab (2017), wordt getalsmatig overgenomen uit WBI2017 en vertaald van de WBI2017-uitvoerlocaties naar de BOI-locaties. Een verschil ten opzichte van WBI2017 is dat deze (waterstandsafhankelijke) toeslag zowel voor de open als de dichte EPK wordt toegepast en enkel wordt gebruikt voor dijkerosiegerelateerde faalmechanismen en hoogte en betrouwbaarheid sluiten bij kunstwerken. Zie voor meer details daarover het rapport Generieke uitgangspunten hydraulische belastingen BOI2023 (RWS, 2026).

Bij seiches wordt – net als in WBI2017 – rekening gehouden met onzekerheid in de seiches. Hierbij wordt uitgegaan van een multiplicatief model (zie bijlage B.2). De waarde van onzekerheid is een factor is met gemiddelde 1 en standaarddeviatie 0,3 (zie paragraaf 5.5.5 van Chbab, 2017). De seichetoeslag zonder onzekerheid wordt met deze factor vermenigvuldigd.

11 Ontwerp (statistiek 2075 en 2125)

In 2023 heeft het KNMI nieuwe klimaatscenario's gepubliceerd. Keuzes in de totstandkoming van deze klimaatscenario's zijn geaccordeerd door het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (RWS-IenW, 2025). In BOI2023 is overgestapt naar de nieuwste KNMI'23-klimaatscenario's, waar in WBI2017 en OI2014 nog gebruik werd gemaakt van het G of het W⁺ KNMI'06-klimaatscenario (RWS, 2017). Het Ministerie van IenW hanteert, in lijn met het ENW-advies om het standaard het middentempo te hanteren, het *middenscenario* uit de meest recente KNMI'23-scenario's. Dit houdt in dat het SSP2-4.5 scenario is gehanteerd (RWS-IenW, 2025), ook wel het klimaatscenario Mn (midden nat) genoemd. Volgens de KNMI'23-scenario's verandert de windstatistiek niet.

Een van de meest duidelijk aanwijsbare generieke veranderingen voor ontwerpen is de voortschrijding in de tijd. Waar het OI2014 zich voor ontwerpen nog richtte op de zichtjaren 2050 en 2100, richt het BOI2023 zich op 2075 en 2125. Dit uitgangspunt heeft ook consequenties voor de hoeveelheid meerpeilstijging (paragraaf 11.2) en zeespiegelstijging (paragraaf 11.3) waarmee rekening is gehouden.

Het gebruik van het H(n)-scenario, of andere zichtjaren dan 2075 en 2125, kan van belang zijn voor het ontwerpen van complexe en grotere infrastructurele projecten waar maatwerk nodig is. Hiervoor zijn geen waarden afgegeven, maar is een handreiking beschikbaar (Vos et al., 2026).

11.1 Afvoerstatistiek

Voor ontwerpen zijn de resultaten uit GRADE 3.0 gebruikt, met daarop een klimaattoeslag op basis van GRADE 3.1, om zo de werklijnen te transformeren naar afvoerstatistiek die past bij de toekomstige zichtjaren (Buitink en Sperna Weiland, 2026) en (Buitink et al. 2026). Daarnaast is voor ontwerpen voor de Rijntakken rekening gehouden met de inzet van 0,5 m aan noodmaatregelen in Duitsland, waarbij het GRADE-scenario met 0,5 m integrale dijkversterking (versterking van groene dijken, kademuuren, mobiele keringen en hoger gronden) in Duitsland als benadering voor deze keuze is gebruikt. Voor de Maas en de Vecht spelen, conform de beleidsuitgangspunten, noodmaatregelen geen rol. Overigens is voor BOI2023 ook voor beoordelen (zichtjaar 2035) in de afvoerstatistiek van de Rijn bij Lobith rekening gehouden met noodmaatregelen in Duitsland, zie paragraaf 4.2.

11.1.1 Rijn bij Lobith

Tabel 11-1 en Tabel 11-2 geven de statistiek van de piekafvoer bij Lobith voor BOI2023 voor de zichtjaren 2075 en 2125. Het gemiddelde van de statistische onzekerheid (μ) is altijd 0 m³/s, de standaarddeviatie (σ) is afhankelijk van de waarde zonder onzekerheid. De statistiek voor terugkeertijden kleiner dan 2 jaar is alleen nodig voor Hydra-NL en overgenomen uit het WBI2017-invoerbestand (Geerse, 2016a). Deze waarden zijn nog gebaseerd op gegevens uit de HR2006. De afvoeren zonder onzekerheid en bijbehorende σ zijn voor terugkeertijden van $T = 200.000$ jaar en hoger bepaald door extrapolatie. Voor zichtjaar 2125 is daartoe, conform de afspraken zoals vermeld in Oosterlo (2026), de standaarddeviatie bij $T = 100.000$ jaar gelijk genomen aan de waarde bij $T = 50.000$ jaar om te voorkomen dat te ver dalende (of zelfs negatieve) waarden ontstaan. De afleiding van de statistiek inclusief statistische onzekerheid is beschreven in bijlage B

(paragraaf B.2). Figuur 11-1 bevat een grafische weergave van de statistiek in de verschillende zichtjaren.

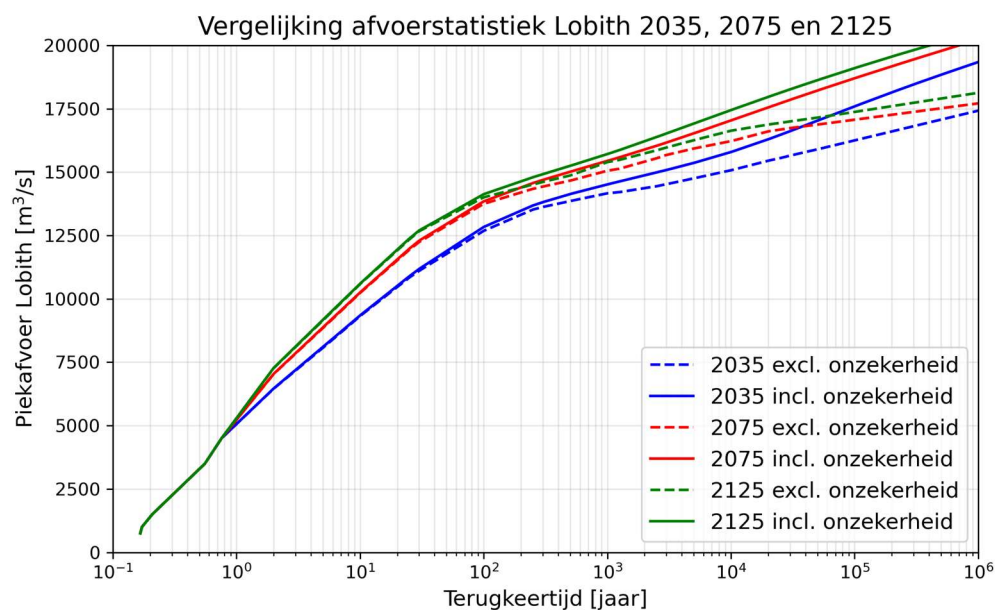
Voor het verband tussen de piekafvoer en de bijbehorende topduur wordt voor ontwerp, net als voor beoordelen, uitgegaan van de relatie uit WBI2017, zoals weergegeven in Tabel 4-3. De duurlijn voor de Rijn bij Lobith is berekend op basis van bovenstaande topduren en de overschrijdingskansen zonder onzekerheid. Bijlage A beschrijft de toegepaste methode. De resulterende duurlijnen voor 2075 en 2125 zijn opgenomen in bijlage H.

Terugkeer-tijd [jaar]	Ov.-kans per basisduur [-]	Piekafvoer excl. onz. [m ³ /s]	Sigma stat. onzekerheid [m ³ /s]	Piekafvoer incl. onz. [m ³ /s]
1,6667e-01	1,00	750	-	750
1,7182e-01	0,97	1.000	-	1.000
2,0833e-01	0,80	1.500	-	1.500
5,5556e-01	0,30	3.500	-	3.500
7,5758e-01	0,22	4.500	-	4.500
2	8,3333e-02	7.034	364	7.043
5	3,3333e-02	8.845	482	8.874
10	1,6667e-02	10.233	570	10.253
25	6,6667e-03	11.934	756	11.976
30	5,5556e-03	12.241	799	12.293
100	1,6667e-03	13.749	662	13.846
250	6,6667e-04	14.339	636	14.568
300	5,5556e-04	14.428	655	14.690
500	3,3333e-04	14.662	714	15.014
1.000	1,6667e-04	15.054	840	15.441
1.250	1,3333e-04	15.132	857	15.581
2.500	6,6667e-05	15.543	996	16.036
3.000	5,5556e-05	15.674	1.061	16.162
5.000	3,3333e-05	15.930	1.172	16.527
10.000	1,6667e-05	16.220	1.238	17.039
20.000	8,3333e-06	16.606	1.352	17.553
25.000	6,6667e-06	16.675	1.388	17.717
30.000	5,5556e-06	16.736	1.428	17.850
50.000	3,3333e-06	16.873	1.513	18.217
100.000	1,6667e-06	17.067	1.593	18.702
200.000	8,3333E-07	17.261	1.673	19.173
300.000	5,5556E-07	17.374	1.720	19.444
500.000	3,3333E-07	17.517	1.779	19.780
1.000.000	1,6667E-07	17.711	1.859	20.230

Tabel 11-1: Afvoerstatistiek piekafvoer Rijn bij Lobith voor 2075 (basisduur = 30 dagen).
Op basis van (Buitink en Sperna Weiland, 2026) en voor $T \geq 200.000$ jaar en piekafvoer incl.
onzekerheid op basis van (Oosterlo, 2026).

Terugkeer- tijd [jaar]	Ov.-kans per basisduur [-]	Piekafvoer excl. onz. [m ³ /s]	Sigma stat. onzekerheid [m ³ /s]	Piekafvoer incl. onz. [m ³ /s]
1,6667e-01	1,00	750	-	750
1,7182e-01	0,97	1.000	-	1.000
2,0833e-01	0,80	1.500	-	1.500
5,5556e-01	0,30	3.500	-	3.500
7,5758e-01	0,22	4.500	-	4.500
2	8,3333e-02	7.266	370	7.276
5	3,3333e-02	9.145	487	9.173
10	1,6667e-02	10.583	579	10.598
25	6,6667e-03	12.341	791	12.377
30	5,5556e-03	12.666	824	12.695
100	1,6667e-03	14.004	618	14.128
250	6,6667e-04	14.508	659	14.797
300	5,5556e-04	14.611	677	14.916
500	3,3333e-04	14.866	770	15.246
1.000	1,6667e-04	15.394	897	15.710
1.250	1,3333e-04	15.480	926	15.867
2.500	6,6667e-05	15.857	1.086	16.382
3.000	5,5556e-05	15.970	1.123	16.522
5.000	3,3333e-05	16.257	1.194	16.915
10.000	1,6667e-05	16.632	1.305	17.446
20.000	8,3333e-06	16.876	1.437	17.966
25.000	6,6667e-06	16.939	1.464	18.130
30.000	5,5556e-06	16.999	1.485	18.262
50.000	3,3333e-06	17.147	1.539	18.626
100.000	1,6667e-06	17.374	1.539	19.102
200.000	8,3333E-07	17.601	1.539	19.557
300.000	5,5556E-07	17.734	1.539	19.813
500.000	3,3333E-07	17.901	1.539	20.125
1.000.000	1,6667E-07	18.128	1.539	20.531

Tabel 11-2: Afvoerstatistiek piekafvoer Rijn bij Lobith voor 2125 (basisduur = 30 dagen).
Op basis van (Buitink en Sperna Weiland, 2026) en voor $T \geq 200.000$ jaar en piekafvoer incl.
onzekerheid op basis van (Oosterlo, 2026).



Figuur 11-1: Vergelijking statistiek piekafvoer Rijn bij Lobith 2035, 2075 en 2125.

11.1.2 Maas bij Borgharen

Tabel 11-3 en Tabel 11-4 geven de statistiek van de piekafvoer bij Borgharen voor BOI2023 voor de zichtjaren 2075 en 2125. Het gemiddelde van de statistische onzekerheid (μ) is altijd 0 m³/s, de standaarddeviatie (σ) is afhankelijk van de waarde zonder onzekerheid. De statistiek voor terugkeertijden kleiner dan 2 jaar is alleen nodig voor Hydra-NL en overgenomen uit het WBI2017-invoerbestand (Geerse, 2016a). Deze waarden zijn nog gebaseerd op gegevens uit de HR2006. De afvoeren zonder onzekerheid en bijbehorende σ zijn voor terugkeertijden van $T = 200.000$ jaar en hoger bepaald door extrapolatie. De afleiding van de statistiek inclusief statistische onzekerheid is beschreven in bijlage B (paragraaf B.2). Figuur 11-2 bevat een grafische weergave van de statistiek in de verschillende zichtjaren.

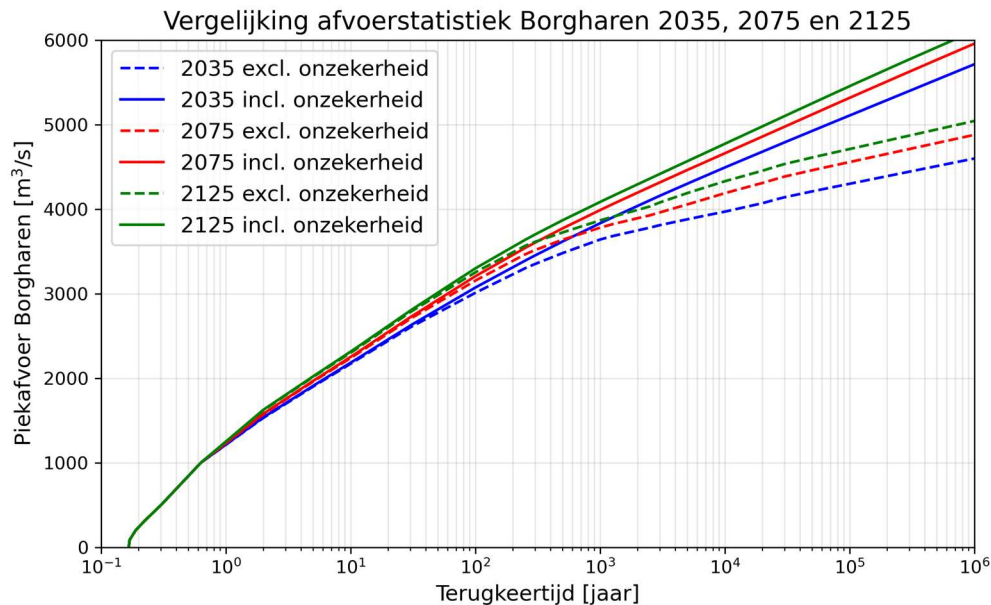
Voor het verband tussen de piekafvoer en de bijbehorende topduur wordt voor ontwerp, net als voor beoordelen, uitgegaan van de relatie uit WBI2017, zoals weergegeven in Tabel 4-6. De duurlijn voor de Maas bij Borgharen is berekend op basis van bovenstaande topduren en de overschrijdingskansen zonder onzekerheid. Bijlage A beschrijft de toegepaste methode. De resulterende duurlijnen voor 2075 en 2125 zijn opgenomen in bijlage H.

Terugkeer-tijd [jaar]	Ov.-kans per basisduur [-]	Piekafvoer excl. onz. [m ³ /s]	Sigma stat. onzekerheid [m ³ /s]	Piekafvoer incl. onz. [m ³ /s]
1,6667e-01	1,000	0	-	0
1,6750e-01	0,995	75	-	75
1,8939e-01	0,880	200	-	200
2,1930e-01	0,760	300	-	300
3,0303e-01	0,550	500	-	500
6,3131e-01	0,264	1.000	-	1.000
2	8,3333e-02	1.572	107	1.579
5	3,3333e-02	1.959	130	1.967
10	1,6667e-02	2.237	154	2.251
25	6,6667e-03	2.622	213	2.642
30	5,5556e-03	2.701	222	2.720
100	1,6667e-03	3.154	285	3.206
250	6,6667e-04	3.464	335	3.540
300	5,5556e-04	3.515	347	3.603
500	3,3333e-04	3.638	381	3.772
1.000	1,6667e-04	3.781	429	3.989
1.250	1,3333e-04	3.821	444	4.057
2.500	6,6667e-05	3.926	491	4.262
3.000	5,5556e-05	3.960	503	4.315
5.000	3,3333e-05	4.055	535	4.463
10.000	1,6667e-05	4.189	576	4.661
20.000	8,3333e-06	4.309	614	4.859
25.000	6,6667e-06	4.352	626	4.922
30.000	5,5556e-06	4.385	635	4.974
50.000	3,3333e-06	4.460	660	5.120
100.000	1,6667e-06	4.557	692	5.317
200.000	8,3333E-07	4.654	724	5.512
300.000	5,5556E-07	4.711	743	5.625
500.000	3,3333E-07	4.782	766	5.767
1.000.000	1,6667E-07	4.879	798	5.958

Tabel 11-3: Afvoerstatistiek piekafvoer Maas bij Borgharen voor 2075 (basisduur = 30 dagen). Op basis van (Buitink en Sperna Weiland, 2026) en voor $T \geq 200.000$ jaar en piekafvoer incl. onzekerheid op basis van (Oosterlo, 2026).

Terugkeer- tijd [jaar]	Ov.-kans per basisduur [-]	Piekafvoer excl. onz. [m³/s]	Sigma stat. onzekerheid [m³/s]	Piekafvoer incl. onz. [m³/s]
1,6667e-01	1,000	0	-	0
1,6750e-01	0,995	75	-	75
1,8939e-01	0,880	200	-	200
2,1930e-01	0,760	300	-	300
3,0303e-01	0,550	500	-	500
6,3131e-01	0,264	1.000	-	1.000
2	8,3333e-02	1.619	107	1.626
5	3,3333e-02	2.013	130	2.021
10	1,6667e-02	2.299	154	2.313
25	6,6667e-03	2.698	213	2.717
30	5,5556e-03	2.780	222	2.798
100	1,6667e-03	3.252	285	3.299
250	6,6667e-04	3.565	335	3.636
300	5,5556e-04	3.612	347	3.699
500	3,3333e-04	3.724	381	3.868
1.000	1,6667e-04	3.867	429	4.085
1.250	1,3333e-04	3.908	444	4.153
2.500	6,6667e-05	4.031	491	4.361
3.000	5,5556e-05	4.078	503	4.415
5.000	3,3333e-05	4.190	535	4.567
10.000	1,6667e-05	4.330	576	4.773
20.000	8,3333e-06	4.454	614	4.979
25.000	6,6667e-06	4.499	626	5.046
30.000	5,5556e-06	4.533	635	5.100
50.000	3,3333e-06	4.611	660	5.251
100.000	1,6667e-06	4.711	692	5.455
200.000	8,3333E-07	4.811	724	5.655
300.000	5,5556E-07	4.869	743	5.771
500.000	3,3333E-07	4.943	766	5.915
1.000.000	1,6667E-07	5.043	798	6.109

Tabel 11-4: Afvoerstatistiek piekafvoer Maas bij Borgharen voor 2125 (basisduur = 30 dagen).
Op basis van (Buitink en Sperna Weiland, 2026) en voor $T \geq 200.000$ jaar en piekafvoer incl.
onzekerheid op basis van (Oosterlo, 2026).



Figuur 11-2: Vergelijking statistiek piekafvoer Maas bij Borgharen 2035, 2075 en 2125.

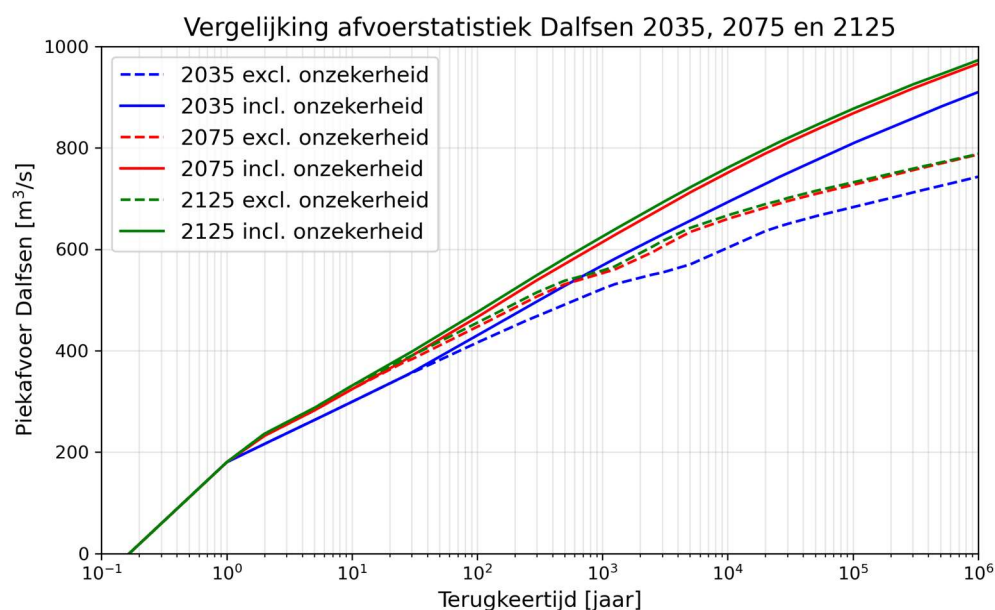
11.1.3 IJssel bij Olst

Op dit moment is het nog niet mogelijk om statistiek voor Olst te genereren, omdat daarvoor de productieberekeningen van de Rijntakken voor ontwerpen nodig zijn. Die zijn nodig om de vertaling van de afvoer van Lobith naar Olst te maken, maar op het moment van schrijven nog niet beschikbaar. Bij de uitlevering van de databases voor ontwerpen eind 2026 wordt voorliggend rapport hierop aangevuld.

11.1.4 Vecht bij Dalfsen

Tabel 11-5 en Tabel 11-6 geven de statistiek van de piekafvoer bij Dalfsen voor BOI2023 voor de zichtjaren 2075 en 2125. Het gemiddelde van de statistische onzekerheid (μ) is altijd 0 m³/s, de standaarddeviatie (σ) is afhankelijk van de waarde zonder onzekerheid. De statistiek voor terugkeertijden kleiner dan 2 jaar is alleen nodig voor Hydra-NL en overgenomen uit het WBI2017-invoerbestand (Geerse, 2016a). Deze waarden zijn nog gebaseerd op gegevens uit de HR2006. De afvoeren zonder onzekerheid en bijbehorende σ zijn voor terugkeertijden van $T = 200.000$ jaar en hoger bepaald door extrapolatie. Voor zowel zichtjaar 2075 als zichtjaar 2125 is daartoe, conform de afspraken zoals vermeld in Oosterlo (2026), de standaarddeviatie bij $T = 100.000$ jaar gelijk genomen aan de waarde bij $T = 50.000$ jaar om te voorkomen dat te ver dalende (of zelfs negatieve) waarden ontstaan. De afleiding van de statistiek inclusief statistische onzekerheid is beschreven in bijlage B (paragraaf B.2). Figuur 11-3 bevat een grafische weergave van de statistiek in de verschillende zichtjaren.

Voor het verband tussen de piekafvoer en de bijbehorende topduur wordt voor ontwerp, net als voor beoordelen, uitgegaan van de relatie uit WBI2017, zoals weergegeven in Tabel 4-12. De duurlijn voor de Vecht bij Dalfsen is berekend op basis van bovenstaande topduren en de overschrijdingskansen zonder onzekerheid. Bijlage A beschrijft de toegepaste methode. De resulterende duurlijnen voor 2075 en 2125 zijn opgenomen in bijlage H.



Figuur 11-3: Vergelijking statistiek piekafvoer Vecht bij Dalfsen 2035, 2075 en 2125.

Terugkeer- tijd [jaar]	Ov.-kans per basisduur [-]	Piekafvoer excl. onz. [m³/s]	Sigma stat. onzekerheid [m³/s]	Piekafvoer incl. onz. [m³/s]
1,6667e-01	1	0	-	0
1	1,6667e-01	180	-	180
2	8,3333e-02	232	8	232
5	3,3333e-02	282	13	282
10	1,6667e-02	324	29	324
25	6,6667e-03	375	43	378
30	5,5556e-03	383	45	390
100	1,6667e-03	447	69	466
250	6,6667e-04	497	75	527
300	5,5556e-04	507	77	539
500	3,3333e-04	531	88	571
1.000	1,6667e-04	553	99	614
1.250	1,3333e-04	560	100	628
2.500	6,6667e-05	594	103	670
3.000	5,5556e-05	605	103	681
5.000	3,3333e-05	634	104	712
10.000	1,6667e-05	660	106	751
20.000	8,3333e-06	682	109	789
25.000	6,6667e-06	689	110	800
30.000	5,5556e-06	695	111	810
50.000	3,3333e-06	709	111	835
100.000	1,6667e-06	727	111	868
200.000	8,3333e-07	745	111	899
300.000	5,5556e-07	756	111	917
500.000	3,3333e-07	769	111	938
1.000.000	1,6667e-07	787	111	966

Tabel 11-5: Afvoerstatistiek piekafvoer Vecht bij Dalfsen voor 2075 (basisduur = 30 dagen).

Terugkeer- tijd [jaar]	Ov.-kans per basisduur [-]	Piekafvoer excl. onz. [m³/s]	Sigma stat. onzekerheid [m³/s]	Piekafvoer incl. onz. [m³/s]
1,6667e-01	1	0	-	0
1	1,6667e-01	180	-	180
2	8,3333e-02	236	8	236
5	3,3333e-02	287	13	287
10	1,6667e-02	331	33	331
25	6,6667e-03	381	44	387
30	5,5556e-03	390	48	398
100	1,6667e-03	455	72	476
250	6,6667e-04	505	77	537
300	5,5556e-04	515	80	549
500	3,3333e-04	538	92	582
1.000	1,6667e-04	558	99	625
1.250	1,3333e-04	566	101	639
2.500	6,6667e-05	605	104	681
3.000	5,5556e-05	616	104	692
5.000	3,3333e-05	642	104	722
10.000	1,6667e-05	667	107	761
20.000	8,3333e-06	689	110	798
25.000	6,6667e-06	695	111	810
30.000	5,5556e-06	701	111	819
50.000	3,3333e-06	715	110	844
100.000	1,6667e-06	732	110	877
200.000	8,3333e-07	749	110	907
300.000	5,5556e-07	759	110	925
500.000	3,3333e-07	771	110	945
1.000.000	1,6667e-07	788	110	973

Tabel 11-6: Afvoerstatistiek piekafvoer Vecht bij Dalfsen voor 2125 (basisduur = 30 dagen).

11.2 Meerpeilstijging

De meerpeilstatistiek voor beoordelen (zichtjaar 2035) is beschreven in hoofdstuk 5. Voor zowel het Grevelingenmeer, de Veluwerandmeren als het Volkerak-Zoommeer geldt dat in BOI2023 het uitgangspunt voor ontwerpen is dat deze statistiek direct toepasbaar is op andere zichtjaren. Impliciet wordt daarbij aangenomen dat het effect van klimaatverandering op deze meren beperkt is en/of wordt opgevangen met bepaalde systeemmaatregelen.

Voor het IJsselmeer en Markermeer geldt dat niet, aangezien het effect van klimaatverandering hier groter is door toenemende rivierafvoer en zeespiegelstijging, die de afvoer van overtollig water richting de Waddenzee bemoeilijkt. Zoals toegelicht in Davidse (2026) zijn voor de meerpeilstatistiek van het IJssel- en Markermeer in toekomstige zichtjaren de volgende uitgangspunten gehanteerd binnen BOI2023:

1. De meerpeilstatistiek in toekomstige zichtjaren wordt beschreven met een integrale verhoging van de statistiek voor zichtjaar 2035, die is afgeleid met het model DEZY (zie paragraaf 5.2 en paragraaf 5.3).
2. De toegepaste meerpeilstijging gaat uit van de beleidsruimte die er is voor een maximale meerpeilverhoging van 30 cm. Daarbij geldt dat tot 2050 geen meerpeilverhoging plaatsvindt en vanaf 2050 is uitgegaan van een lineair verloop van de meerpeilstijging in de tijd.
3. In tegenstelling tot voorheen wordt voor het IJssel- en Markermeer eenzelfde meerpeilstijging aangehouden, omdat uit recent uitgevoerde studies is gebleken dat een peilverhoging op het IJsselmeer vrijwel 1-op-1 doorwerkt op het Markermeer (zie bijvoorbeeld Remmelzwaal et al., 2019).

Met betrekking tot het eerste punt merken we op dat dit een vereenvoudiging is ten opzichte van de werkelijkheid, aangezien de vorm van de frequentielijn voor het meerpeil juist sterk kan wijzigen, afhankelijk van de manier waarop de benodigde afvoercapaciteit op de Afsluitdijk (passend bij de genoemde beleidsruimte) wordt verdeeld over extra spui- en pompcapaciteit, zie (Davidse, 2026). Omdat op voorhand niet bekend is welke keuzes hier gemaakt zullen worden, is in aansluiting bij WBI2017 gekozen om toch uit te gaan van een integrale meerpeilstijging.

Tabel 5-1 geeft een overzicht van de meerpeilstijging in 2075 en 2125 (ten opzichte van 2035) voor de verschillende meren.²⁴

Meer	2075	2125
IJsselmeer	25 cm	30 cm
Markermeer	25 cm	30 cm
Grevelingenmeer	0 cm	0 cm
Veluwerandmeren	0 cm	0 cm
Volkerak-Zoommeer	0 cm	0 cm

Tabel 11-7: Meerpeilstijging t.o.v. zichtjaar 2035 voor ontwerp (zichtjaren 2075 en 2125).

11.3 Zeespiegelstijging

Voor het ontwerpen van dijken binnen BOI2023 wordt voor het in rekening brengen van zeespiegelstijging het M(n)-scenario gebruikt. Hiervoor is de 83%-percentielwaarde aangehouden. Voor dijkontwerpen wordt gebruik gemaakt van de zeespiegelstijging in zichtjaren 2075 en 2125, welke gegeven worden ten opzichte van het jaar 2011.

²⁴ Daarbij wordt ook de statistische onzekerheid van het meerpeil verschoven, zoals toegelicht in Wojciechowska (2025). Voor de onzekerheidstabellen in hoofdstuk 5 betekent dat, dat de meerpeilen worden verhoogd met de meerpeilstijging uit Tabel 11-7, maar dat de parameters μ , σ en ε niet wijzigen.

Dit leidt tot de volgende uitgangspunten (RWS-IenW, 2025):

- voor de verificatie van ontwerpen is in BOI2023 voor de rivierafvoer het scenario Mn (midden nat) gehanteerd (het SSP2-4.5 scenario), en
- voor de zeespiegelstijging is bij dit scenario Mn (SSP2-4.5) een onzekerheidsband gehanteerd die overeenkomt met de 83%-waarde binnen de bandbreedte.

Voor BOI2023 is het referentiejaar 2035 (het zichtjaar van de wettelijke beoordelingsronde die in 2023 is gestart). In hoofdstuk 6 is beschreven hoe het KNMI zeewaterstandstatistiek voor referentiejaar 2019 heeft vertaald naar het zichtjaar 2035 uitgaande van een zeespiegelstijging van 3 mm per jaar op alle stations (Keizer et al., 2023), resulterend in een uniforme verhoging van de zeewaterstand met 0,05 m van 2019 tot 2035 (De Valk en van den Brink, 2026).

Voor de zichtjaren 2075 en 2125 is voor toepassing in BOI2023 daarom nodig om de zeespiegelstijging ten opzichte van 2035 te weten, waarbij relevant is dat de KNMI-klimaatscenario's de zeespiegelstijging ten opzichte van 2011 geven en in de afgegeven zeewaterstandstatistiek voor 2035 dus al een bepaalde correctie zit voor de toename over de periode 2019-2035.

In Bijlage B van het rapport Generieke uitgangspunten hydraulische belastingen BOI2023 (RWS, 2026) is uitgebreid toegelicht hoe, daarmee rekening houdend, de zeespiegelstijging ten opzichte van 2035 is afgeleid. De betreffende waarden, die overeenkomen met Tabel 5 van bijlage B van (RWS,2026) zijn opgenomen in Tabel 11-8.

Zichtjaar	Zeespiegelstijging voor het M-scenario t.o.v. 2035 [cm]
2075	41,4
2125	96,2

Tabel 11-8: Zeespiegelstijging t.o.v. 2035 voor zichtjaren 2075 en 2125 zoals gehanteerd binnen BOI2023 uitgaande van KNMI'23 Mn-scenario (SSP2.45).

Referenties

- Agtersloot en Paarlberg (2016). WAQUA Productieberekeningen Bovenrivieren Rijntakken; Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium 2017. R. Agtersloot en A.J. Paarlberg. In opdracht van Rijkswaterstaat-WVL. Deltares rapport 1220082-001-HYE-013, november 2016.
- Boers et al. (2014). Methode voor het bepalen van HR Duinen voor WTI2017. Marien Boers, Pieter van Geer, Jacco Groeneweg. Deltares rapport 1209433-004, juli 2014.
- Buitink et al. (2025a). Implications of the KNMI'23 climate scenarios for the extreme discharge statistics of the Rhine. J. Buitink, A. Tsiokanos, T. Geertsema, L. Bouaziz, H. van den Brink (KNMI), L. van Voorst (KNMI), J. Beersma (KNMI), en F. Sperna Weiland. Deltares-rapport 11211569-000-ZWS-0001, 23 juni 2025.
- Buitink et al. (2025b). Implications of the KNMI'23 climate scenarios for the extreme discharge statistics of the Meuse. J. Buitink, A. Tsiokanos, T. Geertsema, L. Bouaziz, H. van den Brink (KNMI), L. van Voorst (KNMI), J. Beersma (KNMI) en F. Sperna Weiland. Deltares-rapport 11210368-006-ZWS-0002, 8 juli 2025.
- Buitink et al. (2026). Implications of the KNMI'23 scenarios for the discharge extremes of the Overijsselse Vecht. J. Buitink, C. ten Velden, H. van den Brink (KNMI), J. Beersma (KNMI) en F. Sperna Weiland. Deltares-rapport 11211569-000-ZWS-0001, 3 maart 2026.
- Buitink en Sperna Weiland (2026). Actualisatie werklijnen Rijn en Maas opgesteld voor BOI2023. Werklijnen voor het huidige en toekomstige klimaat, gebaseerd op GRADE 3.0 en KNMI'23 op basis van nadere BOI-beleidskeuzes. Deltares-rapport 11212816-000-ZWS-0002, 26 juni 2026.
- Caires (2009). Extreme wind statistics for the Hydraulic Boundary Conditions for the Dutch primary water defences; SBW-Belastingen: Phase 2 of subproject "Wind Modelling". Deltares, rapport 1200264-005, september 2009.
- Caspers et al. (2026). Wind-zeewaterstandstatistiek; Correlaties Kust en Rijn-Maasmonding. Jochem Caspers, Bastiaan Kuijper en Robin Nicolai. HKV lijn in water, rapport PR5547.10, januari 2026.
- Chbab (2017). Basisstochasten WBI-2017. Statistiek en statistische onzekerheid. Houcine Chbab. In opdracht van Rijkswaterstaat-WVL. Deltares-rapport 1209433-012-HYE-0007, 16 juni 2017.
- Chbab en De Waal (2017). Achtergrondrapport Hydraulische Belastingen; Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium 2017. Houcine Chbab en Hans de Waal. Deltares, rapport 1230087 -008-HYE-0001, september 2017.
- Coumou et al. (2022). Validation of dune erosion model XBeach - Development of 'BOI Sandy Coasts'. L. Coumou, R. van Santen, J. van der Baan, R. McCall, A. de Bakker, E. Quataert en R. de Goede. Deltares en Arcadis. Achtergrond-rapport bij het BOI, gepubliceerd door Rijkswaterstaat, 21 maart 2022.
- Daggenvoorde en Duits (2021). BOI-databases VIJD; Hydraulische randvoorwaarden Vecht-IJsseldelta. R.J. Daggenvoorde en M.T. Duits. HKV lijn in water, rapport PR4280.10, februari 2021.

- Davidse (2016). Meerpeilstatistiek IJsselmeergebied – Uitgangspunten BOI2023. Rien Davidse. Rijkswaterstaat-WVL, memorandum, 6 februari 2026.
- Deltares (2025). Hydra-Ring 25.2.1; Software for the safety assessment of primary flood defences; Technical design; Version 10.0. Deltares, BOI-manual 11211573-102-GEO-0003, november 2025.
- Deltares (2026). Conceptvoorstel synchroniseren locaties JarKus en Hydraulische Belastingen Duinen. Memo ter discussie. Deltares, 11212820-001-GEO-0002, 5 maart 2026.
- Diermanse (2016). Analyse correlatiemodel Vecht- en IJsseldelta. F.L.M. Diermanse. Deltares memo 1230087-000-HYE-0003, 2016.
- Dillingh et al. (1993). De basispeilen langs de Nederlandse kust; Statistisch onderzoek. D. Dillingh, L. de Haan, R. Helmers, G.P. Können en J. van der Malde. Rijkswaterstaat RIKZ, rapport DGW-93,023, april 1993.
- Duits (2023a). Afvoerstatistiek voor Lith en Olst; BOI2023 met zichtjaar 2035. Matthijs Duits. HKV lijn in water, rapport PR4787.10, mei 2023.
- Duits (2023b). Benodigde kruinhoogtes Mastenbroek – IJssel (helpdeskvraag #23 02 1088). HKV lijn in water, memorandum PR4661.10, 15 mei 2023.
- Gautier (2018). Golfberekeningen Pilot Oosterschelde WBI2013. C. Gautier. Deltares rapport 11200556-000, 2018.
- Geerse (2003). Probabilistisch model hydraulische randvoorwaarden beneden-rivierengebied. C.P.M. Geerse. RIZA rapport 2003.128x. Lelystad, 2003.
- Geerse (2006). Hydraulische randvoorwaarden 2006 Vecht- en IJsseldelta - Statistiek IJsselmeerpeil, afvoeren en stormverlopen voor Hydra-VIJ. RIZA – werkdokument 2006.036x. RIZA, afdeling WRV Lelystad, maart 2006
- Geerse (2007). Gegevensverzameling Categorie C keringen; Hydra-VIJ invoer Veluwerandmeer. Chris Geerse. HKV lijn in water, memorandum PR1322.30, 31 oktober 2007.
- Geerse (2012). Statistiek Zeeuwse meren voor Hydra-Zoet. C.P.M. Geerse. HKV lijn in water, rapport PR1564.14, mei 2012.
- Geerse (2013). Belastingmodellen WBI-2017; Gevoeligheidsanalyses en adviezen voor eventuele aanpassingen aan Hydra-Ring. C.P.M. Geerse. HKV lijn in water, rapport PR2647.40, september 2013.
- Geerse (2016a). Werkwijze uitintegreren onzekerheden basisstochasten voor Hydra-NL. Afvoeren, meerpeilen, zeewaterstanden en windsnelheden; Update februari 2016. C.P.M. Geerse. HKV lijn in water, rapport PR3216.10, februari 2016.
- Geerse (2016b). Statistiek kleinere meren inclusief onzekerheid; Veluwerandmeren, Volkerak-Zoommeer en de Grevelingen. Chris Geerse. HKV lijn in water, rapport PR3280.20, september 2016.
- Geerse (2016c). Voorstel voor aanpassing Vechtstatistiek en modelonzekerheid waterstand. Chris Geerse. HKV lijn in water, memorandum PR3280.20, 12 september 2016.
- Geerse en Diermanse (2006). Correlaties en meerdimensionale statistiek. Chris Geerse en Ferdinand Diermanse. HKV lijn in water en WL|Delft Hydraulics, rapport PR1175, november 2006.

- Geerse en Stijnen (2016). Belastingmodel Oosterschelde WT2023. Chris Geerse en Jan Stijnen. HKV lijn in water, rapport PR3362.10, juni 2016.
- Geerse en Verkaik (2010). Effect nieuwe windstatistiek op toetspeilen en benodigde kruinhoogten. C.P.M. Geerse en J.W. Verkaik. HKV lijn in water, rapport PR1601.10, februari 2010. Lelystad.
- Geerse et al. (2002). Wind-waterstandsstatistiek Hoek van Holland. C.P.M. Geerse, M.T. Duits, H.J. Kalk en I.B.M. Lammers. HKV lijn in water, rapport PR456, juli 2002.
- Geerse et al. (2017). Hydra-NL; Statistiek en modelonzekerheden HIJ en VZM. Chris Geerse, Matthijs Duits en Bastiaan Kuijper. HKV lijn in water, rapport PR3598.10, augustus 2017.
- Hegnauer et al. (2023). Generator of Rainfall and Discharge Extremes for the Rhine Final report of GRADE-Rhine version 3.0. M. Hegnauer, J. Beersma, H. van den Brink, R. Leander. Deltares/KNMI rapport 11205237-003-ZWS-0016, Delft, 26 mei 2023.
- Honingh et al. (2022). Hydraulische belastingen Hollandsche IJssel; Voor KP-ZSS en BOI2023. Dorien Honingh, Jan Stijnen, Ton Botterhuis, Cees Oerlemans en Guus Rongen. HKV lijn in water, rapport PR4611.10, juni 2022.
- Keizer et al. (2023). The acceleration of sea-level rise along the coast of the Netherlands started in the 1960s. I. Keizer, D. Le Bars, C. de Valk, A. Jüling, R. van de Wal en S. Drijfhout. *Ocean Science*, 19(4):991-1007.
- Kindermann et al. (2026). Bevindingen code review; Controle van de nieuwe wind- en zeewaterstandstatistiek. Paulina Kindermann, Jochem Caspers en Thomas Molendijk. HKV lijn in water, rapport PR5197.20, januari 2026.
- Kuijper (2016). Pilot ISWP IJsselmeergebied fase 2; Overzicht resultaten DEZY-berekeningen. Bastiaan Kuijper. HKV lijn in water, memorandum PR3294.20, 18 mei 2016.
- Kuijper en Geerse (2025). DEZY versie 5.2; Systeemdokumentatie deel 1: IJsselmeergebied. Bastiaan Kuijper en Chris Geerse. HKV lijn in water, rapport PR5298.10, maart 2025.
- Kuijper en Oomen (2023). Productie databases BOI2023; Kust, IJsselmeer en IJssel- en Vechtdelta. B. Kuijper en M. Oomen. In opdracht van Rijkswaterstaat – WVL. HKV-rapport PR4627.10/W+B-rapport 129806, februari 2023.
- Kuijper en Vermeulen (2025). DEZY-berekeningen afvoercapaciteit Afsluitdijk. Bastiaan Kuijper en Cor-Jan Vermeulen. HKV lijn in water, rapport PR5439.10, september 2025.
- Van Lente et al. (2023). Productieberekeningen BOI2023; Deelrapport perceel 1: Rijntakken. J.W. van Lente, B. Kuijper, A.J. Paarlberg, L. Straatsma en E.E. Sirks. In opdracht van Rijkswaterstaat – WVL. HKV-rapport PR4536.10/W+B-rapport 127040, september 2023.
- Van Manen (2008). Prestatiepeilen Oosterschelde; Vervolg. Sipke van Manen. Rijkswaterstaat Bouwdienst, rapport PPEILSVKO-T-2, 24 april 2008.
- Molendijk et al. (2026). Toepassing windcorrectiefactoren voor Westerschelde en Oosterschelde. Thomas Molendijk, Jochem Caspers en Vincent Vuik. HKV lijn in water, memorandum PR5612.10, 29 januari 2026. *Opgenomen als bijlage I*

- Oosterlo (2025). Besluit voorspelfout Europoortkering t.b.v. BOI. Patrick Oosterlo, 7 juli 2025.
- Oosterlo (2026). Afvoerstatistiek en 1-op-1-relaties ten behoeve van de hydraulische belastingen voor het beoordelen en ontwerpen binnen BOI. P. Oosterlo, Rijkswaterstaat-WVL memorandum, 17 april 2026. [Bijlage E bij generiek uitgangspuntendocument hydraulische belastingen BOI2023 (RWS, 2026)]
- Rommelzwaal et al. (2019). Beleidsaanbevelingen voor het langetermijn peilbeheer in het IJsselmeergebied; Eindrapport Integrale Studie Waterveiligheid en Peilbeheer IJsselmeergebied. Albert Rommelzwaal, Arthur Kors, Ilka Tanczos, Jan Helmer en Herbert Berger. Rijkswaterstaat WVL, juni 2019.
- RWS. (2007). Hydraulische Randvoorwaarden 2006 voor Duinwaterkeringen. Eindrapport. RIKZ/2006.026.
- RWS (2017). Handreiking ontwerpen met overstromingskansen; Veiligheidsfactoren en belastingen bij nieuwe overstromingskansnormen. Versie 4 (definitief). Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving, februari 2017.
- RWS (2022). Uitvoer HR Zandige Waterkeringen. Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving, 30 november 2022.
- RWS (2024). Waterakkoord Hollandsche IJssel en Lek 2024. Uitgegeven door Hoogheemraadschap Rijnland, Hoogheemraadschap Schieland en de Krimpenerwaard Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden Rijkswaterstaat West-Nederland Zuid, 6 mei 2024
- RWS-IenW (2025). Beleidsmatige randvoorwaarden t.b.v. de actualisatie van hydraulische belastingen voor het beoordelen en ontwerpen van primaire waterkeringen. Beslisnota DGWB, Kenmerk IENW/BSK-2025/315422, 10 december 2025.
- RWS (2026). Generieke uitgangspunten hydraulische belastingen BOI2023. Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving, 3 juli 2026.
- Steezel et al. (2023). Semi-Probabilistic model for XBeach - Definition of a semi-probabilistic method for 'BOI Sandy Flood Defences'. Henk Steezel, Klaas Lenstra, Rufus Velhorst en Jos van der Baan. Versie 3.1, 3 Januari 2023.
- Stijnen et al. (2018a). Productieberekeningen hydraulica; Controles waterbeweging & vullen HR-databases Oosterschelde. J.W. Stijnen, R.J. Daggenvoorde, C.P.M. Geerse en C. Gautier. HKV lijn en water en Deltares, rapport PR3556.10, januari 2018.
- Stijnen et al. (2018b). Proef productieberekeningen IJVD met het Nationaal Water Model. Jan Stijnen, Roy Daggenvoorde en Andries Paarlberg. HKV lijn in water, rapport PR3707.10, juni 2018.
- Stijnen et al. (2022). Productieberekeningen BOI2023. Deelrapport perceel 4: Meren. J.W. Stijnen, C. Oerlemans, M.P. Bénit, J. Adema.. In opdracht van Rijkswaterstaat – WVL. HKV-rapport PR4539.10/Arcadis-rapport 30097754, december 2022.
- De Valk en Van den Brink (2020). Estimation of wind speeds with very high return periods from large datasets generated by weather prediction models: statistical aspects. C.F. de Valk en H.W. van den Brink. Report WR-2020-01, KNMI, De Bilt.

- De Valk en Van den Brink (2021). Comparison of tail models and data for extreme value analysis of high tide water levels along the Dutch coast. C.F. de Valk en H.W. van den Brink. Draft report, KNMI, De Bilt.
- De Valk en Van den Brink (2023). Update van de statistiek van extreme zeewaterstand en wind op basis van meetgegevens en modelsimulaties KNMI. C.F. de Valk en H.W. van den Brink. Rapport TR-406, KNMI, De Bilt.
- De Valk en Van den Brink (2026). Een nieuwe statistische analyse van extreme zeewaterstand en wind op zee op basis van meetgegevens en modeldata – geconsolideerde documentatie. C.F. de Valk en H.W. van den Brink. Versie 17 februari 2026, KNMI, De Bilt.
- Verboeket en Netel (2025). Kwaliteit verwachtingen voor Europoortkering vanuit WMCN-Kust en Benedenrivieren. R. Verboeket en J.S. Netel. Memo Rijkswaterstaat Verkeer- en Watermanagement, 19 februari 2025.
- Vlag en Bak (2004). ProMoVera: Probabilistisch model voor de Veluwevloedmeren. D.P. Vlag en C.I. Bak. RIZA-werkdocument 2004.089X. RIZA Lelystad, april 2004.
- Van Vledder (2017). Stappenplan aanpassing hydraulische Randvoorwaarden op basis van nieuwe inzichten winddrag. G. van Vledder. Memo vvc55m1r4, Van Vledder Consulting, 2017.
- Vos et al. (2026). Handelingsperspectief BOI hydraulische belastingen voor andere klimaatscenario's en zichtjaren. Uitgegeven door Rijkswaterstaat-WVL, verwacht in 2026.
- Vrouwenvelder en Steenbergen (2007). Kansberekeningen meetstation OS11. A.C.W.M. Vrouwenvelder en H.M.G.M. Steenbergen. TNO-rapport 2007-D-R0833/B. TNO-Bouw, augustus 2007.
- Vrouwenvelder et al. (2001). Vrouwenvelder en Vrijling, 2001. Kansen, onzekerheden en hun interpretatie. Memorandum 2000-CON-DYN/M2107. Delft, 31 januari 2001.
- De Waal (2003). Windmodellering voor bepaling waterstanden en golven; Een analyse van de bouwstenen. J.P. de Waal. RIZA werkdocument 2003.118x.
- De Waal (2008). Windgolven in HR2011 voor rivieren; Voorstudie naar noodzaak modelverbetering. H. de Waal. Opdrachtgever: Rijkswaterstaat Waterdienst. WL-rapport Q4571.21, Delft, december 2008.
- De Waal et al., (2020). Productie Beheer en Onderhoud (PBO) HB data stappenplan. H. de Waal, J.W. Stijnen en P. van der Bosch. Opdrachtgever Rijkswaterstaat-WVL, Deltares/HKV/Arcadis rapport, kenmerk 11205758-014-GEO-0001 / PR4248.10 / C07021.000025.0120, augustus 2020.
- De Weerts en Diermanse (2004). Golfstatistiek op relatief diepwater 1979-2002. A.H. Weerts en F.L.M. Diermanse. In opdracht van RIKZ, rapport Q3770, december 2004.
- Wieringa en Rijkoort (1983). Windklimaat van Nederland. J. Wieringa en P.J. Rijkoort. KNMI-rapport ISBN 90 12 044669. Staatsdrukkerij, Den Haag, 1983.
- Wojciechowska (2022). Hydraulische databases voor Duinen t.b.v. LBO-2. Karolina Wojciechowska. Deltares memorandum 11208059-005-GEO-0001. Achtergrondrapport bij het BOI, 12 december 2022.

Wojciechowska (2025). Aanpassingen HLCD t.b.v. klimaatscenario's. Karolina Wojciechowska. Deltares memorandum, 8 juli 2025.

Zegers (2025). Faalkansrapportage Oosterscheldekering. N.J. Zegers, 1 oktober 2025.

Zijl en Laan (2021). Impact golfkoppeling DCSM-FM. F. Zijl en S. Laan. Memo 11206814-004-ZKS-0008, Deltares, Delft.

A. Tijdsmodellering afvoer- en meerpeilgolven

A.1 Inleiding

Het tijdsverloop van afvoer- en meerpeilgolven wordt in het probabilistisch model beschreven met een (eventueel geknikt) trapezium met een gegeven basisduur en een topduur afhankelijk van de piekwaarde. Hydra-Ring kan daarnaast ook rekenen met het Ferry-Borges-Castanheta (FBC) rekenschema, waarbij het tijdsverloop wordt gemodelleerd als een blok met een bepaalde hoogte (de piekwaarde) en een breedte (de tijdsduur). Deze tijdstuur is de gemiddelde duur waarmee het afvoer- of meerpeilniveau wordt overschreden binnen golven waarvan de piekwaarde groter of gelijk is aan dit niveau. Het verband tussen het afvoer- of meerpeilniveau en de corresponderende gemiddelde overschrijdingsduur wordt ook wel de duurlijn genoemd. Om te zorgen dat de statistiek in het FBC-schema consistent is met de modellering volgens afvoertrapezia, moet de duurlijn worden berekend op basis van de gegeven overschrijdingskansen, de basisduur, de topduren en knikparameters.

Deze bijlage beschrijft de modellering van afvoer- en meerpeilgolven met behulp van (geknikte) trapezia in meer detail, met als doel om te laten zien hoe met behulp van deze gegevens ook de duurlijn van de afvoer of het meerpeil kan worden afgeleid. Onderstaande beschrijving is gebaseerd op de situatie met afvoergolven, maar is één op één toepasbaar voor de situatie met meerpeilgolven (wanneer piekafvoer/afvoerniveau worden vervangen door piekmeerpeil/meerpeilniveau).

Onderstaande tabel geeft een overzicht van enkele belangrijke parameters in de tijdsmodellering van afvoergolven en de afleiding van de duurlijn. Deze begrippen worden in de navolgende paragrafen nader toegelicht.

Parameter	Omschrijving	Eenheid
$F(K > k)$	Jaarlijkse overschrijdingsfrequentie piekafvoer k , ook wel bekend als de "frequentielijn"	1/jaar
B	Basisduur afvoergolven	Dagen
$q_{\min}$	Basiswaarde afvoergolven (minimale afvoer)	m^3/s
$b(k)$	Topduur afvoergolf met piekwaarde k	Dagen
a_v	Verticale insnoeringsfactor (/knikparameter) afvoertrapezia	-
a_h	Horizontale insnoeringsfactor (/knikparameter) afvoertrapezia	-
$P_B(K > k)$	Overschrijdingskans piekafvoer k binnen basisduur B	-
$f(k)$	Kansdichtheid piekafvoer k	-
$L(q, k)$	Overschrijdingsduur afvoerniveau q in golf met piekafvoer k	Dagen
$q_v(k)$	Afvoerniveau waarbij insnoering plaatsvindt (hoogte van de knik in het afvoertrapezium)	m^3/s
$b'(k)$	Overschrijdingsduur van het afvoerniveau waarbij insnoering plaatsvindt ($L(q, k)$ ter hoogte van de knik)	Dagen
$D(q)$	Gemiddelde overschrijdingsduur afvoerniveau q per jaar, ook wel bekend als de "dagenlijn"	dagen/jaar
$d(q)$	Overschrijdingsduur per top (gemiddelde duur dat afvoerniveau q wordt overschreden binnen afvoergolven waarvan de piekwaarde groter dan of gelijk is aan q), ook wel bekend als de "duurlijn"	dagen
$P(Q > q)$	Momentane overschrijdingskans afvoerniveau q	-

A.2 Overschrijdingsfrequentie, overschrijdingskansen en kansdichtheid

In het probabilistisch model wordt uitgegaan van (alleen) het winterhalfjaar, dat bestaat uit 180 dagen. Daarbinnen worden afvoer- en meerpeilgolven beschouwd

met basisduur B dagen. Voor de jaarlijkse overschrijdingsfrequentie van piekafvoer k geldt dat deze gelijk aan het aantal afvoergolven (basisduren) per winterhalfjaar vermenigvuldigd met de overschrijdingskans van de piekafvoer in de basisduur:

$$F(K > k) = \frac{180}{B} P_B(K > k) \quad (\text{A-1})$$

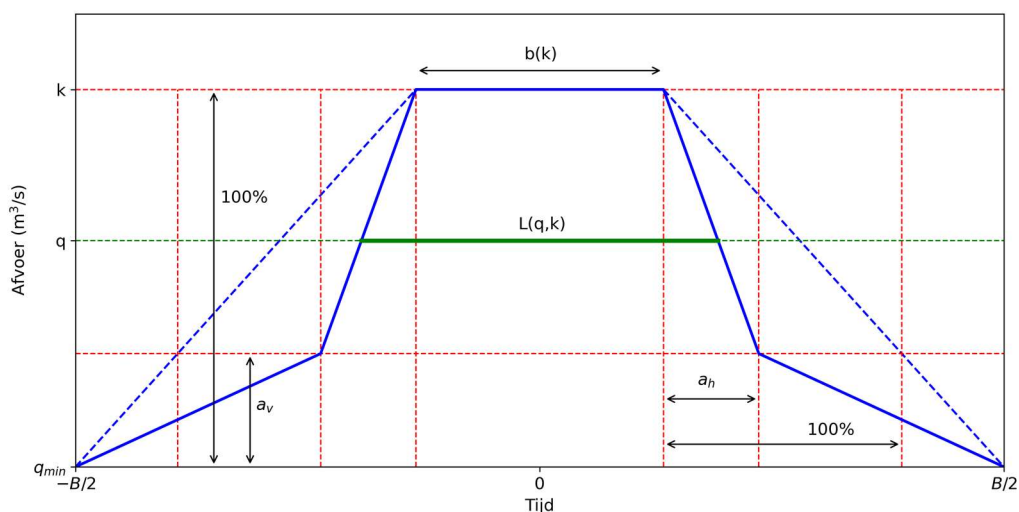
Over het algemeen geldt dat de basisduur voor afvoer- en meerpeilgolven gelijk is aan $B=30$ dagen, zodat de jaarlijkse overschrijdingsfrequentie gelijk is aan 6 maal de overschrijdingskans binnen de basisduur. Uitzonderingen zijn meerpeilgolven op het Grevelingenmeer en de Veluwerandmeren, waarvoor een basisduur van respectievelijk 10 dagen en 60 dagen wordt gehanteerd (zie paragraaf 5.4 en 5.5).

Voor de kansdichtheid van de piekafvoer geldt:

$$f(k) = -\frac{dP_B(K > k)}{dk} \quad (\text{A-2})$$

A.3 Modelling met (geknikte) trapezia

Figuur A-1 geeft de modellering van een afvoergolf als een trapezium schematisch weer. Het trapezium heeft een basisduur van B dagen en een topduur van $b(k)$ dagen, afhankelijk van de piekafvoer k . De dikke blauwe lijn geeft de situatie weer met een geknikt trapezium, dat gedefinieerd wordt door de insnoeringsfactoren a_v en a_h (ook wel knikparameters genoemd). De verticale insnoeringsfactor a_v geeft de relatieve hoogte t.o.v. de piekwaarde waarop het trapezium wordt ingesnoerd. De horizontale insnoeringsfactor a_h geeft de relatieve breedte ten opzichte van het ongeknikte trapezium (in de figuur aangegeven met de onderbroken blauwe lijn). Voor de verticale insnoeringsfactor moet gelden: $0 \leq a_v \leq 1$. De horizontale insnoeringsfactor mag groter dan 1 zijn (in dat geval is er sprake van een verbreding van het trapezium), maar de overschrijdingsduur ter hoogte van de knik mag nooit breder zijn dan de basisduur B . Hieraan wordt voldaan wanneer $0 \leq a_h(1 - a_v) \leq 1$.



Figuur A-1: Insnoeringsfactoren en overschrijdingsduur afvoer q in trapezium met piekafvoer k

In Figuur A-1 is ook de tijdsduur $L(q,k)$ weergegeven, dat is de overschrijdingsduur van afvoerniveau q in een golf met piekafvoer k . Deze tijdsduur ligt eenduidig vast bij gegeven basisduur, piekafvoer, topduur, insnoeringsfactoren en minimale afvoer.

In het navolgende geven we de bijbehorende formules. In paragraaf A.4 wordt de grootte $L(q,k)$ gebruikt om de dagenlijn en de duurlijn af te leiden.

Voor de formule van $L(q,k)$ introduceren we twee hulpgrootheden, namelijk de absolute hoogte van de knik en de overschrijdingsduur ter hoogte van de knik. De absolute hoogte van de knik, oftewel het afvoerniveau waarbij de insnoering plaatsvindt, noten we als $q_v(k)$ en is volgens bovenstaande definities gelijk aan:

$$q_v(k) = q_{min} + a_v(k - q_{min}) \quad (A-3)$$

De overschrijdingsduur ter hoogte van de knik, die dus gelijk is aan $L(q_v(k),k)$, noteren we als $b'(k)$. Het kan eenvoudig worden nagegaan dat hiervoor geldt:

$$b'(k) = b(k) + a_h(1 - a_v)(B - b(k)) \quad (A-4)$$

Merk op, dat $a_h=0$ correspondeert met verticale flanken boven afvoerniveau $q_v(k)$, de absolute hoogte van de knik in het trapezium. In dat geval is de duur ter hoogte van de knik dus gelijk aan de topduur, hetgeen ook blijkt uit formule (A-4).

Nu kan worden geverifieerd dat $L(q,k)$ voor $q_{min} \leq q \leq k$ gegeven wordt door:

$$L(q,k) = \begin{cases} b'(k) + [B - b'(k)] \frac{q_v(k) - q}{q_v(k) - q_{min}}, & q < q_v(k) \\ b'(k) & q = q_v(k) \\ b(k) + [b'(k) - b(k)] \frac{k - q}{k - q_v(k)}, & q > q_v(k) \end{cases} \quad (A-5)$$

Bij insnoeringsfactoren $a_v=1$ en $a_h=1$ is er sprake van een ongeknikt trapezium. In dat geval kan formule (A-5) sterk worden vereenvoudigd, en geldt voor $q_{min} \leq q \leq k$:

$$L(q,k) = b(k) + [B - b(k)] \frac{k - q}{k - q_{min}} \quad (A-6)$$

A.4 Afleiding dagenlijn en duurlijn

In paragraaf A.3 is de formule gegeven voor $L(q,k)$, de overschrijdingsduur van afvoerniveau q in een golf met piekafvoer k , voor de situatie waarin het tijdsverloop wordt gemodelleerd met een (geknikt) trapezium. De gemiddelde duur waarmee niveau q wordt overschreden in een afvoergolf kan gevonden worden door integratie over alle mogelijke piekafvoeren $\geq q$, waarbij gewogen wordt met de kans op die piekafvoer. Deze laatste kansdichtheid is gegeven in paragraaf A.2, formule (A-2). Vermenigvuldiging met het aantal afvoergolven (basisduren) per winterhalfjaar geeft de gemiddelde overschrijdingsduur van afvoerniveau q per jaar voor $q \geq q_{min}$:

$$D(q) = \frac{180}{B} \int_{k=q}^{\infty} L(q,k) f(k) dk \quad (A-7)$$

Bovenstaand verband tussen de afvoer q en het gemiddelde aantal dagen per jaar dat deze wordt overschreden wordt ook wel aangeduid als de "dagenlijn". Merk op, omdat $L(q_{min},k)=B$, dat $D(q_{min})=180$ dagen/jaar. Dat is logisch, omdat het laagste afvoerniveau gedurende het hele winterhalfjaar wordt overschreden.

Een grootheid die hiermee verband houdt is $d(q)$, de overschrijdingsduur per top. Deze is gedefinieerd als de gemiddelde duur dat afvoerniveau q wordt overschreden binnen afvoergolven waarvan de piekwaarde groter dan of gelijk is aan q . Merk op dat dit subtiel anders is dan de gemiddelde duur waarmee niveau q wordt overschreden in een willekeurig afvoergolf, omdat alleen gekeken wordt naar afvoergolven waarin afvoerniveau q daadwerkelijk wordt overschreden.

De overschrijdingsduur per top voor afvoerniveau q wordt verkregen door de gemiddelde overschrijdingsduur per jaar te delen door de frequentie waarmee de piekafvoer niveau q overschrijdt. Er geldt dus voor $q \geq q_{\min}$:

$$d(q) = \frac{D(q)}{F(K > q)} \quad (\text{A-8})$$

Met formule (A-7) voor de gemiddelde overschrijdingsduur per jaar en formule (A-1) voor je jaarlijkse overschrijdingsfrequentie volgt, dat dit ook is te schrijven als:

$$d(q) = \frac{1}{P_B(K > q)} \int_{k=q}^{\infty} L(q, k) f(k) dk \quad (\text{A-9})$$

Met andere woorden: de overschrijdingsduur per top is gelijk aan de gemiddelde duur waarmee niveau q wordt overschreden in een afvoergolf gedeeld door de kans dat de piekafvoer dit niveau q overschrijdt in een basisduur. Deze deling is het gevolg van het feit dat de overschrijdingsduur per top is gedefinieerd als de overschrijdingsduur van niveau q in een afvoergolf *gegeven* dat de piekafvoer $k \geq q$.

Bovenstaand verband tussen de afvoer q en het de gemiddelde overschrijdingsduur per top wordt aangeduid als de "duurlijn". Zoals uitgelegd aan het begin van deze bijlage, is deze duurlijn nodig voor Hydra-Ring wanneer gebruik gemaakt wordt van het FBC-rekenschema, waarbij het tijdsverloop wordt gemodelleerd als een blok met een bepaalde hoogte (de piekwaarde) en een breedte (de tijdsduur). De hoogte wordt dan dus gelijk genomen aan de waarde die volgt uit de opgegeven duurlijn.

Bij het afleiden van de duurlijnen voor Hydra-Ring met behulp van formule (A-9) is voor de overschrijdingskansen van de piekafvoer gebruik gemaakt van de statistiek *zonder* statistische onzekerheid, aangezien de statistische onzekerheid als een aparte stochast wordt behandeld. In Hydra-NL wordt weliswaar gebruik gemaakt van statistiek inclusief statistische onzekerheid, maar daarbij wordt de duurlijn niet gebruikt, omdat altijd wordt uitgegaan van de tijdsmodellering met afvoertrapezia.

Voorbeeld

In de tabellen en figuren in hoofdstuk 4 en 5 is te zien dat de topduur in de praktijk telkens vanaf een zeker niveau constant is, maar dat de overschrijdingsduur per top zelfs bij zeer extreme waarden nog niet gelijk is aan deze minimale topduur. Op het eerste gezicht kan dat tegenintuïtief zijn. Neem als voorbeeld de Rijn bij Lobith. Bij piekafvoeren van 6.000 m³/s en hoger is de topduur gelijk aan 12 uur. Toch is de overschrijdingsduur per top bij bijvoorbeeld een afvoer van 17.000 m³/s nog gelijk aan ruim 31 uur (hetgeen volgt door lineaire interpolatie van de waarden uit Tabel 4-4). Bedenk echter dat het gaat om de overschrijdingsduur *gegeven* dat de piekafvoer nog hoger is. Om een indruk te geven: bij bijvoorbeeld een piekafvoer van 17.500 m³/s is de overschrijdingsduur van 17.000 m³/s volgens formule (A-6) gelijk aan ruim 33 uur. En, *gegeven* dat de piekafvoer hoger is dan 17.000 m³/s, hebben piekafvoeren van 17.500 m³/s of hoger nog een significante bijdrage.

Verschil met WBI2017

De duurlijnen voor afvoer en meerpeil zijn in BOI2023 opnieuw afgeleid met behulp van bovenstaande formules, omdat in veel gevallen de overschrijdingsfrequenties van de piekafvoeren of piekmeerpeilen zijn gewijzigd en in een enkel geval ook de topduren (namelijk voor het IJsselmeer en het Markermeer, zie paragraaf 5.2 en 5.3). Daarnaast is bekend dat de duurlijnen voor WBI2017 foutief waren afgeleid, hetgeen kon leiden tot verschillen tussen Hydra-NL en Hydra-Ring wanneer in het laatste geval gebruik gemaakt werd van het FBC-rekenschema²⁵. Zie bijvoorbeeld Duits (2023b) voor een beschrijving van hiervan. Voor alle afvoer- en meerpeilstochasten is in BOI2023 dus sprake van gewijzigde duurlijnen t.o.v. WBI2017.

A.5 Momentane overschrijdingskans

Voor de volledigheid behandelen we hier ook het begrip momentane kans, hoewel dit geen directe invoer vormt voor het probabilistisch model. Deze kan echter wel afgeleid worden uit de statistiek en de tijdsmodellering zoals hierboven beschreven.

De momentane overschrijdingskans van afvoerniveau q is de kans dat deze op een willekeurig tijdstip wordt overschreden. Dit kan ook worden opgevat als de gemiddelde fractie van de tijd dat dit afvoerniveau wordt overschreden. Stel bijvoorbeeld dat de momentane overschrijdingskans van een afvoerniveau q gelijk is aan 0,10. Dan wordt niveau q dus gemiddeld 10% van de tijd overschreden.

Deze gemiddelde fractie van de tijd kan gevonden worden door de gemiddelde duur waarmee niveau q wordt overschreden in een afvoergolf te delen door de basisduur. Voor de momentane overschrijdingskans geldt daarom voor $q \geq q_{\min}$:

$$P(Q > q) = \frac{1}{B} \int_{k=q}^{\infty} L(q, k) f(k) dk \quad (\text{A-10})$$

Hieruit volgt direct dat er een zeer eenvoudig verband is tussen de dagenlijn (paragraaf A.4) en de momentane kans. Met formule (A-7) volgt namelijk:

$$D(q) = 180 P(Q > q) \quad (\text{A-11})$$

Hier staat in feite niks anders dan dat de gemiddelde overschrijdingsduur van afvoerniveau q gelijk is aan het aantal dagen in het winterhalfjaar vermenigvuldigd met de gemiddelde fractie van de tijd dat afvoerniveau q wordt overschreden.

A.6 Overzicht parameters afvoer- en meerpeiltrapezia

Tenslotte geeft Tabel A-1 een overzicht van de parameters van de afvoer- en meerpeiltrapezia voor de basisstochasten die in dit rapport worden beschreven. Voor meer informatie, waaronder de overschrijdingskansen van de piekwaarden en de topduur als functie van de piekwaarde, wordt verwezen naar de betreffende paragrafen in hoofdstuk 4 (Afvoerstatistiek) en 5 (Meerpeilstatistiek).

²⁵ Ferry Borges en Castanheta

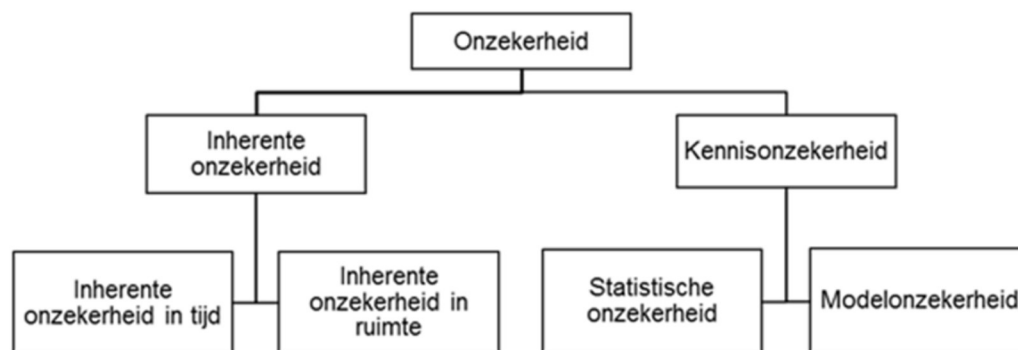
Basisstochast	Basis-duur [dagen]	Basiswaarde	Verticale knikparam. a_v [-]	Horizontale knikparam. a_h [-]
Afvoer Lobith	30	750 m ³ /s	1	1
Afvoer Borgharen	30	0 m ³ /s	1	1
Afvoer Olst	30	200 m ³ /s	1	1
Afvoer Dalfsen	30	0 m ³ /s	1	1
IJsselmeerpeil	30	-0,40 m+NAP	1	1
Markermeerpeil	30	-0,40 m+NAP	1	1
Grevelingenmeer	10	-0,23 m+NAP	1	1
Veluwerandmeren	60	-0,30 m+NAP	1	1
Volkerak-Zoommeer	30	0,05 m+NAP	0,1	0,5

Tabel A-1: Overzicht basisduur, basiswaarde (minimale afvoer/meerpeil) en knikparameters.

B. Modelling en uitintegreren statistische onzekerheid

B.1 Inleiding²⁶

Onzekerheden zijn onder te verdelen in een aantal klassen, zie Figuur B-1 (Vrouwenvelder et al, 2001). Inherente onzekerheid, ook wel natuurlijke variabiliteit genoemd, is het gevolg van de natuurlijke fluctuaties in tijd en/of ruimte van een bepaald fysisch proces zoals hydraulische ruwheid en de rivierafvoer. Deze - van nature aanwezige - onzekerheid kan niet worden gereduceerd, maar wel worden gemodelleerd door middel van kansverdelingen.



Figuur B-1: Belangrijke typen onzekerheden.

Kennisonzekerheid komt hoofdzakelijk terug in model- en statistische onzekerheid. Modelonzekerheid ontstaat door het gebruik van wiskundige recepten (formules) die worden gehanteerd om bepaalde fysische verschijnselen te modelleren, zoals waterbeweging, golfopwekking en golfvoortplanting. In het bijzonder zijn de uitkomsten van de productieberekeningen, die nodig zijn voor het maken van probabilistische berekeningen (gegenereerd door modellen als D-Hydro en SWAN), onzeker door de aannames en uitgangspunten die ten grondslag liggen aan bijvoorbeeld gebiedsschematisaties, modellering van fysische processen en invoerparameters van de modellen. Vooral de uitkomsten van extreme gebeurtenissen bevatten extra onzekerheid, omdat dergelijke gebeurtenissen in de meetseries niet of nauwelijks voorkomen, en modellen daarom op deze gebeurtenissen moeilijk af te regelen zijn.

Statistische onzekerheden zijn onzekerheden die gerelateerd zijn aan de statistische betrouwbaarheid van de schatting/keuze van de kansverdelingen die de basisstochasten moeten beschrijven, inclusief de verdelingsparameters. Dit type onzekerheid is het gevolg van een beperkt aantal gegevens of metingen.

Sinds WBI2017 wordt bij de bepaling van de hydraulische belastingen niet alleen rekening gehouden met onzekerheden die het gevolg zijn van de natuurlijke variabiliteit (inherente onzekerheid), maar ook kennisonzekerheid expliciet meegenomen in de probabilistische berekeningen. Deze bijlage gaat in op de modellering van de statistische onzekerheid binnen Hydra-Ring en Hydra-NL.

²⁶ Deze paragraaf is grotendeels overgenomen uit hoofdstuk 5 van het WBI2017-rapport over de statistiek en statistische onzekerheid van basisstochasten (Chbab, 2017).

B.2 Afleiding en modellering van statistische onzekerheid

Betrouwbaarheidsintervallen vormen veelal de basis voor de modellering van de statistische onzekerheid. Een gangbare methode om deze af te leiden, is door middel van bootstrapping, waarbij telkens nieuwe samples worden getrokken uit de eerder afgeleide kansverdeling ('moederverdeling') om daar vervolgens weer verdelingen aan te fitten. Op basis hiervan kan per terugkeertijd een 95%-betrouwbaarheidsinterval voor de betreffende basisstochast worden bepaald. In dit rapport is bij de beschrijving van de statistiek van de verschillende basisstochasten telkens aangegeven op welke manier de gehanteerde statistische onzekerheid is afgeleid en/of verwezen naar achterliggende rapporten waarin dat is beschreven.

Bij de modellering van de statistische onzekerheid in het probabilistisch model wordt deze in feite als extra stochast toegevoegd.²⁷ De volgende notatie wordt gehanteerd:

- X = basisstochast exclusief statistische onzekerheid
- Y = stochast die de onzekerheid representeert
- V = basisstochast inclusief statistische onzekerheid

In Hydra-Ring zijn vier modellen beschikbaar om de onzekerheid te beschrijven:

Model 1: additief

$$V = X + Y \quad (\text{B-1})$$

Model 2: multiplicatief

$$V = X \cdot Y \quad (\text{B-2})$$

Model 3: begrensd additief

$$V = \max \{0, X + Y\} \quad (\text{B-3})$$

Model 4: begrensd multiplicatief

$$V = \max \{0, X \cdot Y\} \quad (\text{B-4})$$

Voor Y zijn in Hydra-Ring enkele analytische kansverdelingen beschikbaar, o.m. de normale en de (vershoven) lognormale verdeling. Een beschouwde kansverdeling wordt gekarakteriseerd door enkele verdelingsparameters. Voor bijvoorbeeld de normale verdeling zijn dat het gemiddelde μ en de standaarddeviatie σ . Afhankelijk van de context, kunnen zulke parameters wel of niet afhangen van een beschouwde realisatie $X=x$. De keuze van het model voor de statistische onzekerheid wordt gerelateerd aan de betreffende basisstochast en de aard van de onzekerheid. Voor windsnelheid wordt bijvoorbeeld een multiplicatief begrensd model gebruikt, omdat de windsnelheid altijd positief is. Voor afvoer, meerpeil en zeewaterstand wordt een additief model gebruikt. De afvoer moet ook $\geq 0 \text{ m}^3/\text{s}$ zijn, maar omdat dit niveau in de praktijk nooit wordt bereikt, is toch gekozen voor een additief model (Chbab, 2017).

²⁷ In Hydra-Ring wordt de statistische onzekerheid meegenomen als een aparte stochast. In Hydra-NL wordt echter gerekend met uitgeïntegreerde onzekerheid (zie paragraaf B.3).

Basisstochast	Onzekerheidsmodel	Type verdeling
Afvoer	Additief	Normale verdeling
Meerpeil	Additief	Verschoven lognormale verdeling
Zeewaterstand	Additief	Normale verdeling
Windsnelheid	Multiplicatief begrensd	Normale verdeling

Tabel B-2: Overzicht modellering van statistische onzekerheid per type basisstochast.

B.3 Uitintegreren van statistisch onzekerheid

In Hydra-Ring wordt de statistische onzekerheid meegenomen als een aparte stochast. De invoer voor het probabilistisch model bestaat dan uit de kansverdeling van de basisstochast X zonder statistische onzekerheid, de kansverdeling van de statistische onzekerheid Y gegeven X (de parameters van de kansverdeling mogen immers afhangen van de realisatie $X=x$), en het type onzekerheidsmodel.

In Hydra-NL wordt de statistische onzekerheid niet als aparte stochast beschouwd, maar wordt de statistische onzekerheid meegenomen door uit te gaan van de kansverdeling van de basisstochast V inclusief statistische onzekerheid. Deze verdeling kan worden afgeleid op basis van X , Y en het type onzekerheidsmodel.

Voor bijvoorbeeld het additieve model geldt voor de overschrijdskans van V :

$$\begin{aligned}
 P(V > v) &= P(X + Y > v) \\
 &= \int P(x + Y > v | X = x) f(x) dx \\
 &= \int P(Y > v - x | X = x) f(x) dx \\
 &= \int [1 - F_{Y|X=x}(v - x)] f(x) dx
 \end{aligned} \tag{B-5}$$

Waarbij in het laatste lid $F_{Y|X=x}$ de cumulatieve verdelingsfunctie weergeeft van de statistische onzekerheid Y gegeven $X=x$.

Vanwege de integraal in formule (B-5) wordt in de praktijk vaak gesproken van het uitintegreren van de statistische onzekerheid. Hierboven is alleen de formule gegeven voor het additieve model. Analoot kunnen echter formules worden afgeleid voor het multiplicatieve model en de begrensde versies van het additieve en multiplicatieve model. Zie (Geerse, 2016a) voor de precieze formules hiervan.

In Oosterlo (2026) worden enkele aanvullende uitgangspunten besproken, die zijn toegepast bij de praktische uitwerking van de formules voor het uitintegreren, waaronder de afspraak dat, indien in de GRADE-toelevering de laatste sigma kleiner is dan de een-na-laatste sigma, de laatste sigma gelijkgesteld wordt aan de een-na-laatste sigma, om eventuele problemen bij het extrapoleren te voorkomen.

B.4 Parameters verschoven lognormale verdeling

Voor afvoer, zeewaterstand en windsnelheid wordt voor de kansverdeling van de statistische onzekerheid uitgegaan van een normale verdeling. Deze wordt gekarakteriseerd door het gemiddelde μ en de standaarddeviatie σ , die beide mogen afhangen van de realisatie van X , de basisstochast zonder statistische onzekerheid. Alleen voor het meerpeil wordt uitgegaan van een ander type kansverdeling, namelijk de verschoven lognormale verdeling, die hieronder nader wordt toegelicht.

Aangezien voor het meerpeil wordt uitgegaan van het additieve model geldt daar:

$$\begin{aligned} V &= X + Y \\ &= X + W + \varepsilon \text{ met } W \sim \ln N(\mu, \sigma) \end{aligned} \quad (\text{B-6})$$

W is een lognormaal verdeelde stochast met parameters μ en σ , wat wil zeggen dat $\ln(W)$ normaal verdeeld is met gemiddelde μ en standaarddeviatie σ . De statistische onzekerheid Y wordt beschreven met deze stochast W plus een verschuiving ε .

Voor het gemiddelde en de variantie van de lognormale stochast W geldt:

$$\begin{aligned} \mu_W &= e^{\mu + \sigma^2/2} \\ \sigma_W^2 &= (e^{\sigma^2} - 1)e^{2\mu + \sigma^2} \end{aligned} \quad (\text{B-7})$$

In de tabellen met onzekerheidsparameters voor het meerpeil in hoofdstuk 5 is telkens gegeven het gemiddelde van de statistische onzekerheid Y (μ_Y), de standaarddeviatie van de statistische onzekerheid Y (σ_Y) en de verschuiving ε . Het gemiddelde en de standaarddeviatie van de verdeling W volgen daaruit middels:

$$\begin{aligned} \mu_W &= \mu_Y - \varepsilon \\ \sigma_W^2 &= \sigma_Y^2 \end{aligned} \quad (\text{B-8})$$

In de tabellen in hoofdstuk 5 geldt altijd dat de gemiddelde statistische onzekerheid gelijk is aan nul, oftewel $\mu_Y = 0$. Daaruit volgt dan meteen dat voor het gemiddelde van de niet-verschoven lognormale verdeling W geldt $\mu_W = -\varepsilon$. Dit gemiddelde moet altijd groter dan nul zijn, zoals ook blijkt uit formule (B-7). Daarom moet $\varepsilon < 0$ zijn.

Voor toepassingen kan het nodig zijn om bij gegeven μ_W en σ_W de parameters μ en σ van de corresponderende normale verdeling voor $\ln(W)$ te berekenen. Zoals aangegeven in Geerse (2016a) geldt hiervoor:

$$\begin{aligned} \mu &= \ln(\mu_W) - \frac{1}{2} \ln\left(1 + \frac{\sigma_W^2}{\mu_W^2}\right) \\ \sigma^2 &= \ln\left(1 + \frac{\sigma_W^2}{\mu_W^2}\right) \end{aligned} \quad (\text{B-9})$$

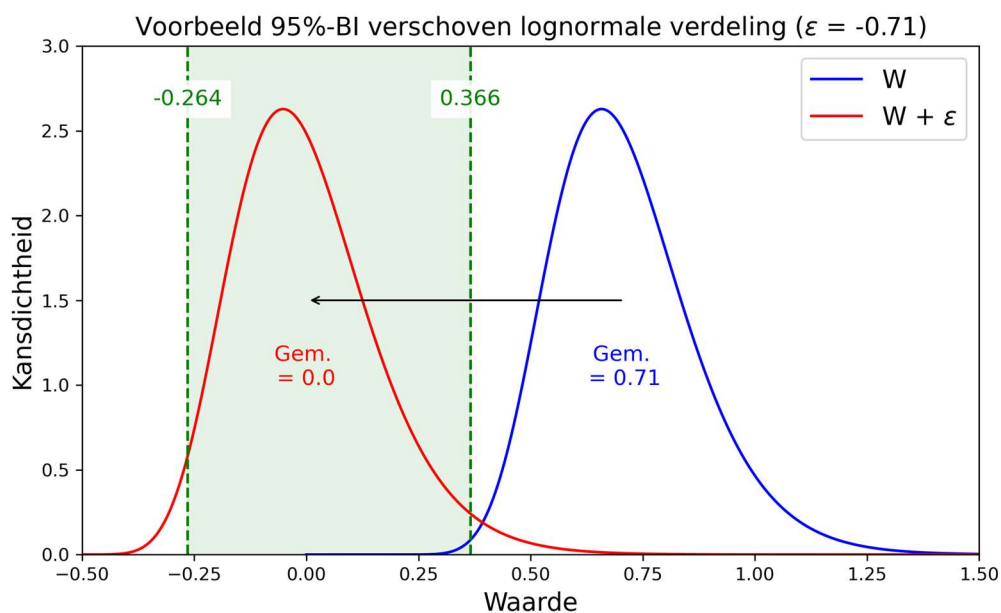
Kortom, met behulp van het opgegeven gemiddelde en standaarddeviatie van de statistische onzekerheid Y, inclusief de bijbehorende verschuiving ε , kunnen μ_W en σ_W van de niet-verschoven lognormale verdeling worden berekend aan de hand van formule (B-8), waarna de parameters μ en σ van de corresponderende normale verdeling voor $\ln(W)$ volgen uit formule (B-9). Deze waarden zijn bruikbaar voor het uitintegreren van de statistische onzekerheid bij dit type verdeling, zoals nader toegelicht in Geerse (2016a). Met behulp hiervan kan bijvoorbeeld ook het 95%-betrouwbaarheidsinterval voor W worden berekend, wat na verschuiving met ε ook het 95%-betrouwbaarheidsinterval voor de statistische onzekerheid $Y = W + \varepsilon$ geeft. Dit principe wordt hieronder verduidelijkt aan de hand van een concreet voorbeeld.

Voorbeeld

We beschouwen de onzekerheid bij het T=1.000 jaar-meerpeil op het Volkerak-Zoommeer, dat gelijk is aan NAP+0,76 m (zie paragraaf 5.6). In Tabel 5-20 is aangegeven dat bij dit meerpeil voor het gemiddelde en de standaarddeviatie van de statistische onzekerheid geldt: $\mu_Y = 0$ m en $\sigma_Y = 0,1617$ m, en dat $\varepsilon = -0,71$ m. Figuur B-2 geeft de kansverdeling van zowel de niet-verschoven verdeling W als de verschoven lognormale verdeling $Y = W + \varepsilon$, die statistische onzekerheid beschrijft.

Merk op dat de verschuiving ervoor zorgt, dat de onzekerheid Y ook negatieve waarden aan kan nemen, terwijl de lognormaal verdeelde stochast W altijd >0 is.

Het 95%-betrouwbaarheidsinterval van Y is gelijk aan $[-0,264; 0,366]$, aangegeven met de groene band in de figuur. In tegenstelling tot de situatie bij een normaal verdeelde statistische onzekerheid Y is het 95%-betrouwbaarheidsinterval niet symmetrisch rond het gemiddelde. Het bijbehorende 95%-betrouwbaarheidsinterval voor het $T=1.000$ jaar meerpeil op het Volkerak-Zoommeer vinden we ten slotte door het berekende interval op te tellen bij het meerpeil zonder statistische onzekerheid ($NAP+0,76$ m). Dat geeft als resultaat het interval $[0,496; 1,126]$. In Figuur 5-14 is te zien dat de onzekerheidsband inderdaad tussen deze grenzen ligt.



Figuur B-2: Voorbeeld originele (W) en verschoven ($Y=W+\varepsilon$) lognormale kansverdeling.

De verschoven lognormale verdeling $Y=W+\varepsilon$ kan ook negatieve waarden aannemen, maar wel altijd $>\varepsilon$, aangezien de lognormaal verdeelde stochast W altijd >0 is. Als gevolg daarvan is V , het meerpeil inclusief statistische onzekerheid, altijd groter dan $X+\varepsilon$ (met X het meerpeil exclusief statistische onzekerheid). In Tabel 5-20 is te zien dat ε dusdanig is dat $X+\varepsilon$ altijd gelijk is aan $NAP+0,05$ m, het minimale meerpeil op het Volkerak-Zoommeer (Tabel A-1). Alleen bij eerste regel in de tabel wordt hier iets van afgeweken, omdat $\varepsilon < 0$ moet zijn, zoals uitgelegd onder formule (B-8). Ditzelfde principe is ook terug te zien in de tabellen met onzekerheidsparameters voor de overige meerpeilstochasten in hoofdstuk 5. De verschuiving ε is zo dat het meerpeil inclusief statistische onzekerheid altijd boven het minimale meerpeil ligt.

C. Afleiding statistiek piekafvoer Olst

C.1 Inleiding

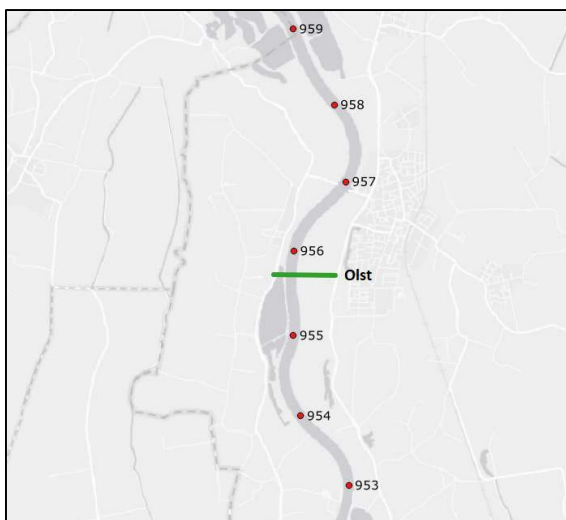
De statistiek van de piekafvoer van de IJssel bij Olst is gebaseerd op de statistiek van de Rijn bij Lobith zoals afgeleid met GRADE 3.0 (zie paragraaf 4.2) en de relatie tussen de afvoer bij Lobith en de afvoer bij Olst die volgt uit de berekeningen die voor BOI2023 zijn uitgevoerd met het D-HYDRO model voor de Rijntakken (Van Lente et al., 2023). De details van deze afleiding zijn beschreven in deze bijlage.

De gevolgde methode is reeds beschreven in Duits (2023a), maar hier opnieuw toegepast op basis van de definitieve afvoerstatistiek voor Lobith (en bijbehorende onzekerheid) zoals beschreven in paragraaf 4.2. Daarbij is – net als bij de overige afvoerstochasten – gekozen om de afvoerstatistiek inclusief statistische onzekerheid te presenteren op hetzelfde rooster van terugkeertijden/overschrijdingskansen als de afvoerstatistiek exclusief statistische onzekerheid. Vandaar dat de resulterende afvoerstatistiek iets afwijkt van de invoerbestanden in bijlage B van Duits (2023a). Voor de volledigheid wordt de gevolgde methode hieronder opnieuw beschreven.

C.2 Koppeling afvoer Olst aan afvoer Lobith

Voor het vertalen van de afvoer bij Lobith naar de afvoer bij Olst is gebruik gemaakt van de BOI2023-berekeningen die zijn uitgevoerd met het D-HYDRO-model voor de Rijntakken (Van Lente et al., 2023). Met dit model zijn 12 dynamische afvoergolven doorgerekend en bij elke afvoergolf volgt zowel een piekwaarde van de afvoergolf bij Lobith als bij Olst. Daarnaast zijn drie frequent voorkomende afvoeren als permanenties doorgerekend, die ook zowel een afvoer bij Lobith als bij Olst geven.

De locatie Olst waar de afvoer gewenst is, betreft de bovenrand van het IJssel-Vechtdeltamodel dat gebruikt is in de WAQUA-berekeningen voor BOI2023 (Stijnen et al., 2018b). Deze bovenrand ligt bij rivierkilometer 955,8 en is met een groene lijn weergegeven in Figuur C-1. Bij de berekeningen met het D-HYDRO-model voor de Rijntakken zijn niet precies op deze doorsnede afvoeren uitgevoerd, maar wel op rivierkilometer 956,0. De afvoer op die locatie is aangehouden als afvoer bij Olst.



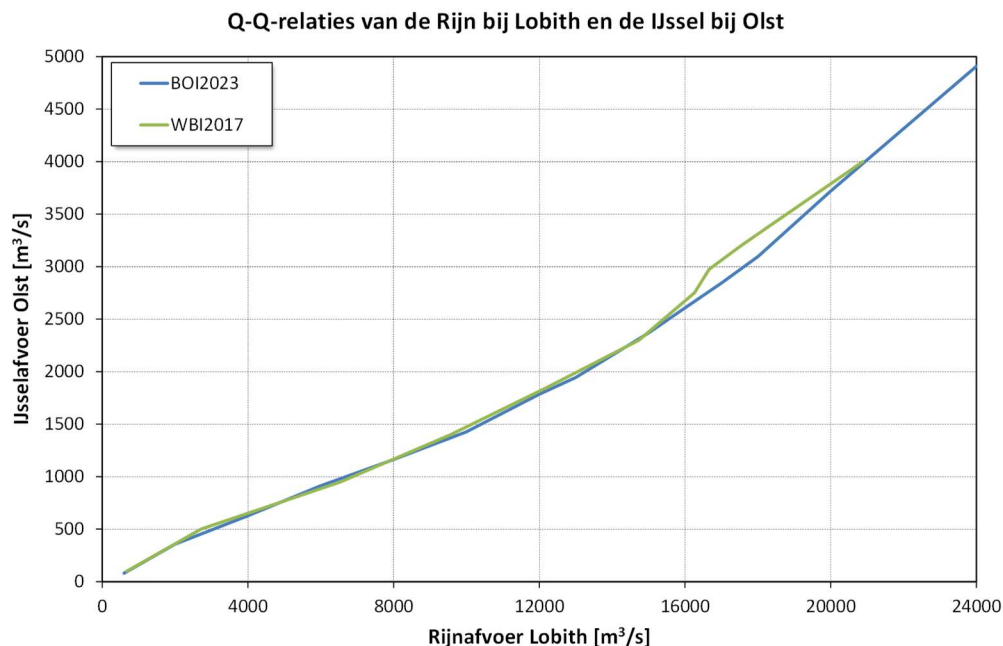
Figuur C-1: Kilometerraaien Rijntakkenmodel en bovenrand IJVD-model (Duits, 2023a).

Tabel C-1 bevat voor de uitgevoerde berekeningen met het D-HYDRO-model voor de Rijntakken de afvoer bij Olst op de hierboven beschreven locatie en bijbehorende afvoer bij locatie Lobith, die zich bevindt op rivierkilometer 862,2 op de Bovenrijn. De afvoeren in Tabel C-1 zijn gekarakteriseerd met labels, die overeenkomen met de labels van de D-HYDRO-berekeningen. De afvoer bij Lobith is niet precies gelijk aan het label, maar wel ongeveer. In de tabel is bovendien aangegeven of in de D-HYDRO-berekening gerekend is met een afvoergolf of een permanente afvoer.

Label Rijnsom [m ³ /s]	Type D-HYDRO-som	Afvoer Lobith [m ³ /s]	Afvoer Olst [m ³ /s]
600	Permanentie	600	81
2.000	Permanentie	1.999	357
4.000	Permanentie	3.998	628
6.000	Afvoergolf	5.993	912
8.000	Afvoergolf	7.969	1.159
10.000	Afvoergolf	9.992	1.426
12.000	Afvoergolf	11.994	1.785
13.000	Afvoergolf	12.997	1.939
14.000	Afvoergolf	13.997	2.156
15.000	Afvoergolf	14.997	2.368
16.000	Afvoergolf	15.990	2.605
17.000	Afvoergolf	16.999	2.844
18.000	Afvoergolf	18.003	3.097
20.000	Afvoergolf	19.999	3.719
24.000	Afvoergolf	23.996	4.908

Tabel C-1: Koppeling afvoer Olst en Lobith (Q-Q-relatie) in D-Hydro berekeningen Rijntakken.

Figuur C-2 bevat bovenstaande koppeling tussen Olst en Lobith. De figuur laat zien dat deze koppeling beperkt verschilt met de relaties uit WBI2017 (Chbab, 2017).



Figuur C-2: Relatie tussen de Rijn bij Lobith en de IJssel bij Olst op basis van de D-HYDRO berekeningen met het Rijntakkenmodel voor BOI2023 (zichtjaar 2035), en ter vergelijking de koppeling uit WBI2017, afkomstig uit Tabel 3.2 van Chbab (2017).

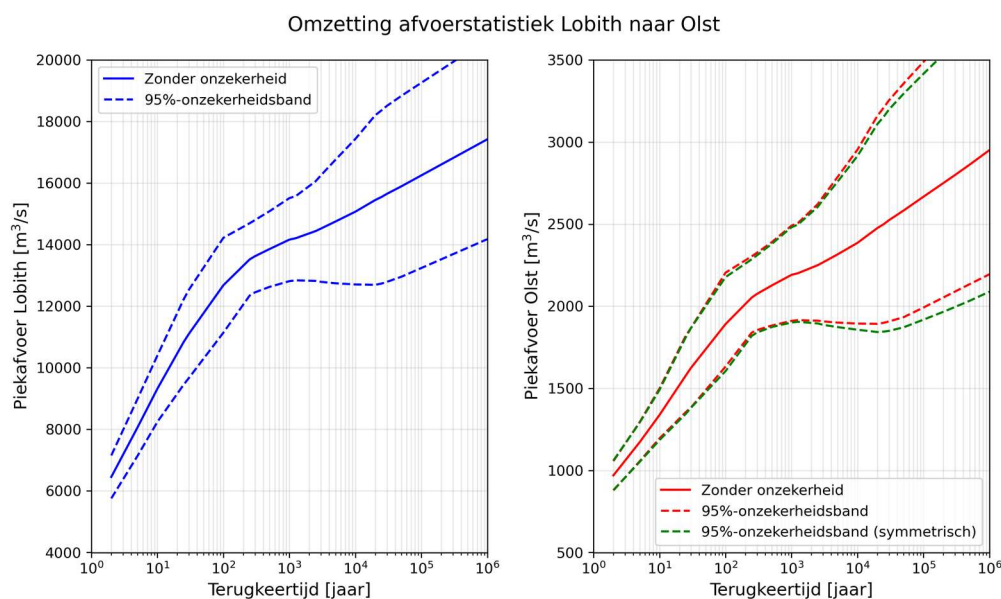
Alleen voor de afvoeren tussen 16.000 m³/s en 20.000 m³/s is een duidelijk verschil zichtbaar tussen de Q-Q-relatie van BOI2023 en WBI2017, zoals te zien in Figuur C-

1. Dit verschil wordt veroorzaakt door andere instellingen in het D-HYDRO-model van de Rijntakken van BOI2023 enerzijds en het WAQUA-model van het WBI2017 anderzijds. Voor het D-HYDRO-model van BOI2023 is de stand van de regelwerken van de splitsingspunten afgeregeld op 16.000 m³/s zonder lateralen met een stationaire afvoer. Voor de overige afvoeren is de stand van de regelwerken ongewijzigd (Van Lente et al., 2023). Dit verschilt met de keuzes in WBI2017, waar de stand van de regelwerken per afvoer gekozen is (Agtersloot en Paarlberg, 2016).

C.3 Omzetting afvoerstatistiek Lobith naar Olst

Voor het bepalen van de afvoerstatistiek bij Olst met behulp van de Q-Q-relatie uit paragraaf C.2, is gebruik gemaakt van de statistiek van de piekafvoer van de Rijn bij Lobith zonder onzekerheid en de bijbehorende statistische onzekerheid (σ) zoals gegeven in Tabel 4-2 voor piekafvoeren met een terugkeertijd van 2 jaar of hoger. Zoals uitgelegd in paragraaf 4.2, is deze afvoerstatistiek afgeleid met GRADE 3.0.

Per terugkeertijd zijn zowel de Rijnaflower zonder statistische onzekerheid als het 95%-betrouwbaarheidsinterval (op basis van een normale verdeling met gemiddelde 0 m³/s en standaarddeviatie σ afhankelijk van de Rijnaflower bij Lobith) vertaald van Lobith naar Olst met behulp van de Q-Q-relatie uit paragraaf C.2. Figuur C-3 geeft links de originele waarden voor Lobith en rechts de met behulp van de Q-Q-relatie getransformeerde waarden voor Olst (rode lijnen in rechterdeel van Figuur C-3).



Figuur C-3: Weergave van de omzetting van de afvoerstatistiek van Lobith naar Olst.

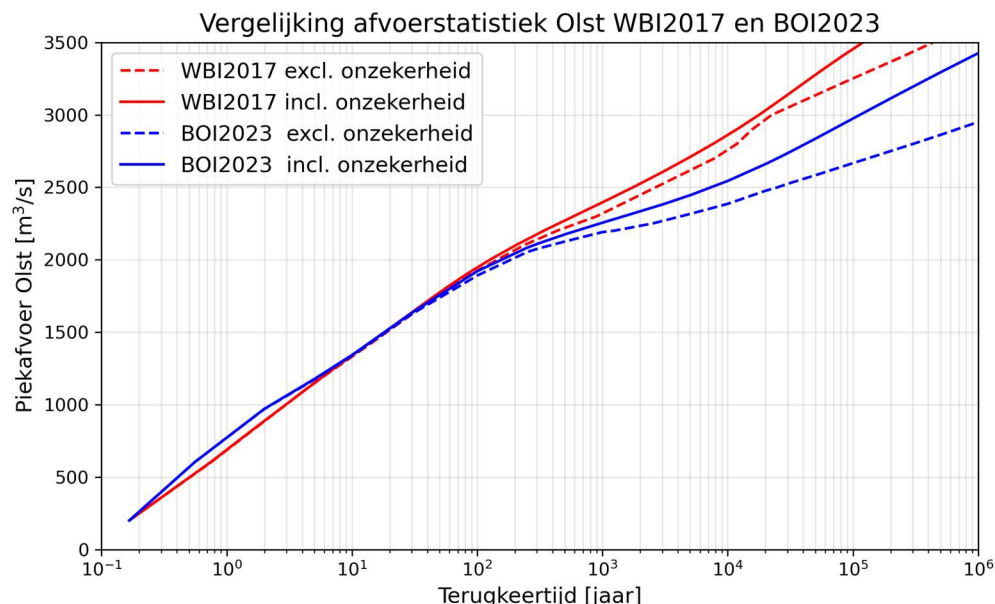
Na het toepassen van de pragmatische methode zoals hierboven beschreven is het resulterende 95%-betrouwbaarheidsinterval voor Olst niet meer symmetrisch rond de verwachtingswaarde. Om een normale verdeling te gebruiken is dit wel nodig en daarom is het 95%-betrouwbaarheidsinterval voor Olst iets verschoven (de groene lijnen in het rechterdeel van Figuur C-3). Het betreft een bijstelling die ook in WBI2017 heeft plaats gevonden. De bijstelling is zodanig uitgevoerd dat de grootte van het 95%-betrouwbaarheidsinterval niet wijzigt; het wordt slechts verschoven. Uit het resulterende 95%-betrouwbaarheidsinterval is vervolgens de standaarddeviatie bij Olst bepaald.

Tabel 4-8 geeft de resulterende statistiek van de piekafvoer bij Olst voor BOI2023 voor het zichtjaar 2035. Voor terugkeertijden van 2 jaar of hoger zijn de afvoeren zonder onzekerheid en de standaarddeviatie (σ) van de statistische onzekerheid afgeleid zoals hierboven beschreven. De statistiek voor kleinere terugkeertijden ($T < 2$ jaar) is alleen nodig voor Hydra-NL en overgenomen uit WBI2017 (Geerse, 2016a). Deze waarden zijn nog gebaseerd op gegevens uit de HR2006. De uitgeïntegreerde statistiek in Tabel 4-8, dat wil zeggen de piekafvoeren inclusief onzekerheid, zijn afgeleid zoals beschreven in bijlage B (paragraaf B.2).

C.4 Vergelijking met WBI2017

Figuur C-4 geeft een vergelijking van de statistiek van de piekafvoer bij Olst met en zonder statistische onzekerheid met de afvoerstatistiek uit WBI2017, zoals ook opgenomen in paragraaf 4.4 (Figuur 4-10). Voor terugkeertijden onder de 100 jaar is de statistiek vergelijkbaar. Voor hogere terugkeertijden jaar zijn de afvoeren voor BOI2023 duidelijk lager vergeleken met WBI2017, hetgeen een rechtstreeks gevolg is van het feit dat bij Lobith voor de hogere terugkeertijden in BOI2023 ook lagere afvoeren volgen dan in het WBI2017 (zie paragraaf 4.2).

In de overschrijdingsfrequentielijnen van Olst van het WBI2017 is een slag zichtbaar bij een terugkeertijd van ca. 10.000 jaar. Deze slag is niet langer aanwezig in de frequentielijnen van BOI2023. Dit komt door de wijziging in de Q-Q-relatie tussen de Rijn bij Lobith en de IJssel bij Olst, zoals zichtbaar in Figuur C-2 bij Rijnaafvoeren 16.000 m³/s tot 20.000 m³/s.



Figuur C-4: Vergelijking statistiek piekafvoer IJssel bij Olst WBI2017 en BOI2023.

D. Afleiding statistiek IJsselmeer en Markermeer met DEZY

D.1 Inleiding

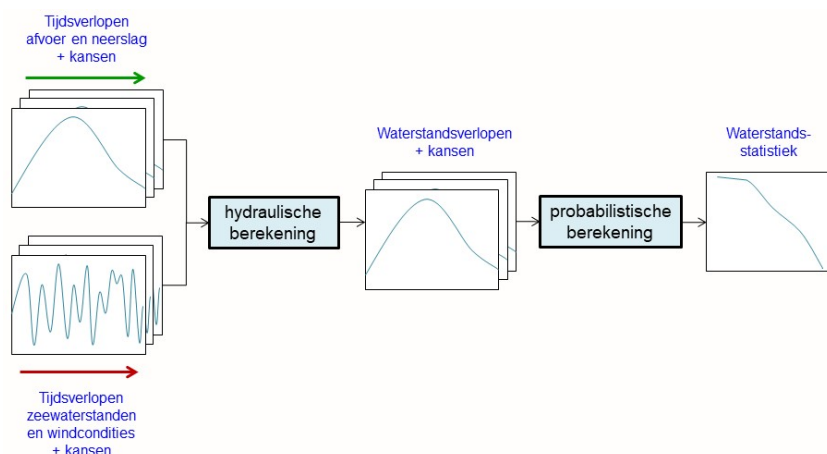
Voor BOI2023 is gekozen om de statistiek voor IJsselmeer en Markermeer af te leiden met behulp van het model DEZY (Kuijper en Geerse, 2025), zodanig dat deze consistent is met de vergroting van de afvoercapaciteit bij de Afsluitdijk (aanleg van extra spuisluizen en twee gemalen). Deze bijlage beschrijft deze afleiding.

Eerst volgt een korte beschrijving van het model DEZY. Vervolgens beschrijven we de (instellingen van de) uitgevoerde berekening en het resultaat daarvan. Tenslotte is aangegeven hoe de DEZY-uitvoer is omgezet naar benodigde invoerbestanden.

D.2 Beschrijving model DEZY

DEZY is een probabilistisch model voor het bepalen van statistiek van (ruimtelijk gemiddelde) waterstanden voor peilgestuurde systemen. Het model DEZY rekent voor verschillende merensystemen, elk met geheel eigen karakteristieken voor de aanvoer door neerslag-/rivierafvoer en de afvoermogelijkheden door spuisluizen en gemalen. Hoewel er grote verschillen zijn tussen de afzonderlijke merensystemen, is de rekenmethode voor al deze systemen in essentie gelijk. Er wordt een groot aantal synthetische tijdreeksen geconstrueerd van (o.a.) de neerslag-/rivierafvoer en zeewaterstanden, elk met een bijbehorende kans van optreden. Voor elk van deze tijdreeksen bepaalt het model het bijbehorende waterstandsverloop met 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 waterstandstatistiek te bepalen.

De modellering voor het IJsselmeergebied is beschreven in Kuijper en Geerse (2025). Hierin worden als stochasten beschouwd: de afvoer van de IJssel (Olst), de Vecht (Dalfsen) en de Eem (Amersfoort), de neerslag, de buitenwaterstanden bij Den Oever, Kornwerderzand en IJmuiden en de windcondities (richting en snelheid). Om de waterstandstatistiek te bepalen (per reservoir) wordt een groot aantal synthetische tijdreeksen doorgerekend van enerzijds de afvoer en neerslag en anderzijds de windcondities en de zeewaterstanden. Het algemene rekenschema is weergegeven in Figuur D-1. Zie voor meer details het genoemde rapport.



Figuur D-1: Schematische weergave bepaling waterstandstatistiek in DEZY.

D.3 Berekening voor zichtjaar 2035

De berekening van de meerpeilstatistiek voor IJssel- en Markermeer is uitgevoerd met DEZY versie 5.2. In de meeste gevallen is uitgegaan van de standaard-instellingen van het model, zoals beschreven in Kuijper en Geerse (2025). Hiermee is het model afgeregeld op zichtjaar 2015. Het zichtjaar voor BOI2023 is echter 2035. De statistiek van afvoer, neerslag en zeewaterstand is daarop aangepast. Ook zijn de parameters voor spui en gemaal bij de Afsluitdijk aangepast, rekening houdend met de vergroting van de waterafvoer (aanleg van extra spuisluizen en twee gemalen). Dit wordt gedetailleerd beschreven in de volgende subparagrafen.

D.3.1. Zeewaterstanden

Voor (het tijdsverloop van) de zeewaterstanden en de wind is binnen DEZY een kansverdeling geconstrueerd op basis van meetreeksen met uurwaarden over de periode 1981 t/m 2010, zie voor details paragraaf 3.6 van Kuijper en Geerse (2025). Om te compenseren voor zeespiegelstijging over de meetperiode zijn de zeewaterstanden daarbij gehomogeniseerd naar het referentiejaar, uitgaande van een gemiddelde zeespiegelstijging van 20 cm per eeuw (0,2 cm per jaar). Daarnaast kan worden gerekend met een extra zeespiegelstijging om het effect van klimaatverandering te verdisconteren vanaf het referentiejaar tot het gewenste zichtjaar. Voor BOI2023 is uitgegaan van het KNMI'23 Mn-klimaatsscenario: matige CO₂-uitstoot (SSP2-4.5), vernattend. Voor de zeespiegelstijging is het 83-percentiel uit dit scenario gehanteerd. Door Rijkswaterstaat is aangegeven dat dit voor zichtjaar 2035 neerkomt op 5 cm zeespiegelstijging t.o.v. het referentiejaar 2011 (zie Tabel 11-8 in paragraaf 11.3). In de DEZY-berekening voor BOI2023 is daarom als referentie 2011 gehanteerd, en een extra zeespiegelstijging van 5 cm gehanteerd voor de periode 2011-2035.

D.3.2. Afvoerstatistiek

De overschrijdingskansen van de piekafvoer van de IJssel (Olst) en de Vecht (Dalfsen), die invoer vormen voor het model DEZY, zijn overgenomen uit de invoerbestanden voor Hydra-NL voor BOI2023, zoals beschreven in hoofdstuk 4. Dit betreft de afvoerstatistiek exclusief statistische onzekerheid (om dubbeltelling te voorkomen). Voor de Eem is geen afvoerstatistiek beschikbaar vanuit BOI2023. Daarom is uitgegaan van de standaard afvoerstatistiek in DEZY versie 5.2, verhoogd met een factor om de toename in 2035 t.o.v. 2015 te verdisconteren. Hiervoor is dezelfde factor gehanteerd als voor de neerslag, zoals hieronder beschreven.

D.3.3. Neerslag

Om de toename van de neerslag tussen 2015 en 2035 te verdisconteren is uitgegaan van gegevens uit ISWP: Integrale Studie Waterveiligheid en Peilbeheer IJsselmeergebied (Remmelzwaal et al., 2019). Voor de neerslagtoename is daarbij uitgegaan van de cijfers in Tabel D-1, die zijn overgenomen uit Kuijper (2016).

Zichtjaar	Toename 30-daagse neerslag winter
1995	0%
2015	3%
2075	14%
2125	19%
2175	20%

Tabel D-1: Klimaatontwikkeling t.a.v. neerslag, zoals gehanteerd binnen ISWP.

Door lineaire interpolatie volgt uit de cijfers in Tabel D-1 voor zichtjaar 2035 een toename van 6,7% t.o.v. 1995. De standaard neerslagstatistiek in DEZY versie 5.2 geldt echter voor 2015. De factor waarmee de neerslag in 2035 toeneemt t.o.v. 2015 is gelijk aan $(1+6,7\%) / (1+3\%) = 1,036$. Met andere woorden: in 2035 is de neerslag naar verwachting met 3,6% toegenomen t.o.v. 2015.

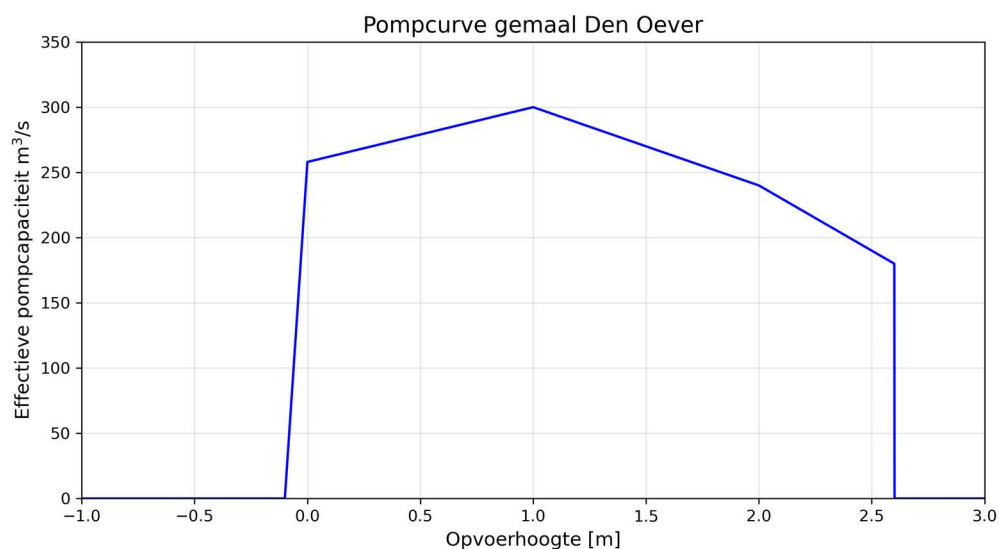
Om een berekening te maken voor zichtjaar 2035 is de standaard neerslagstatistiek uit DEZY versie 5.2 daarom verhoogd met 3,6% (een factor 1,036). Zoals eerder al aangegeven is dezelfde factor ook toegepast op de afvoerstatistiek voor de Eem.

D.3.4. Afvoermogelijkheden Afsluitdijk

Voor gegevens over de (aangepaste) afvoermogelijkheden bij de Afsluitdijk is op aangegeven van Rijkswaterstaat aangesloten bij de laatste inzichten uit de recente studie omtrent de afvoercapaciteit op de Afsluitdijk (Kuijper en Vermeulen, 2025).

Voor de spuisluizen op de Afsluitdijk wordt gebruikgemaakt van een standaard overlaatformule, met daarbij onderscheid in situaties met een volkomen en een onvolkomen overlaat. De bestaande spuismiddelen (BSM) bestaan uit 15 spuisluizers bij Den Oever (Stevensluizen) en 10 spuisluizers bij Kornwerderzand (Lorentzsluizen), met dimensies zoals beschreven in de systeemdokumentatie van DEZY (Kuijper en Geerse, 2025). De nieuwe spuismiddelen (NSM), die momenteel worden gebouwd bij Den Oever, kennen andere dimensies maar zijn ten behoeve van de DEZY-berekeningen omgerekend naar het equivalente aantal spuisluizers op basis van de BSM. Hierbij geldt, dat de NSM gezamenlijk ca. 75% van de huidige spuiscapaciteit bij Den Oever betreffen, hetgeen omgerekend neerkomt op afgerond 11 spuisluizers bij Den Oever met de dimensies van de BSM.

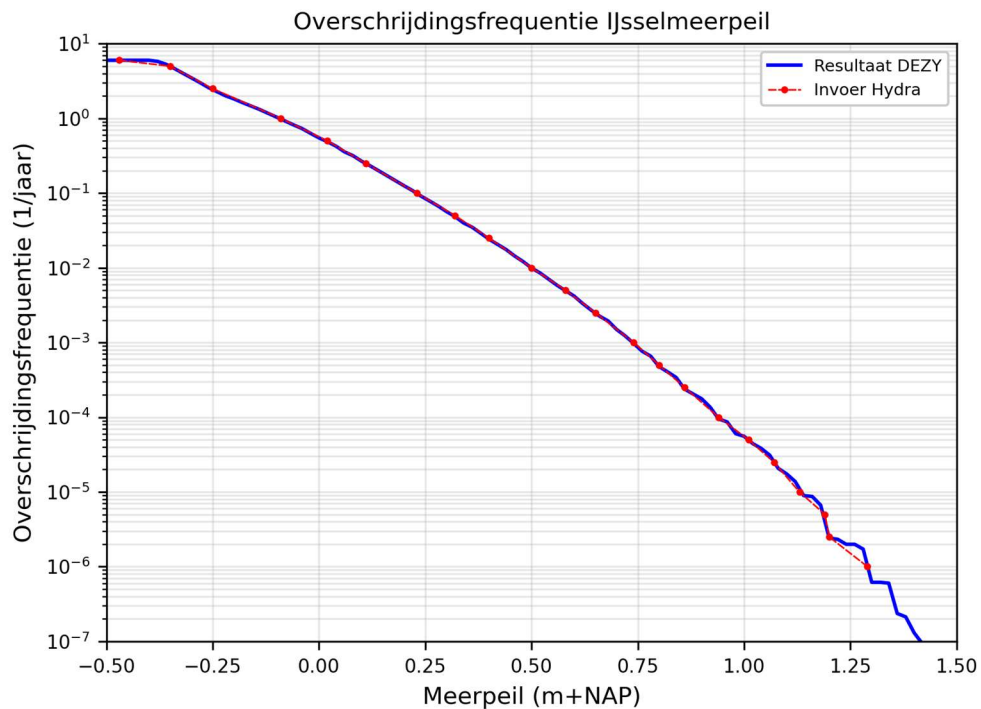
Verder is rekening gehouden met de aanleg van twee gemalen bij Den Oever met een totale maximale pompcapaciteit van 300 m³/s. De bijbehorende pompcurve, die het verband geeft tussen opvoerhoogte en effectieve pompcapaciteit, is gegeven in Figuur D-2. Het aanslagpeil is gelijk genomen aan het streefpeil (NAP-0,40 m).



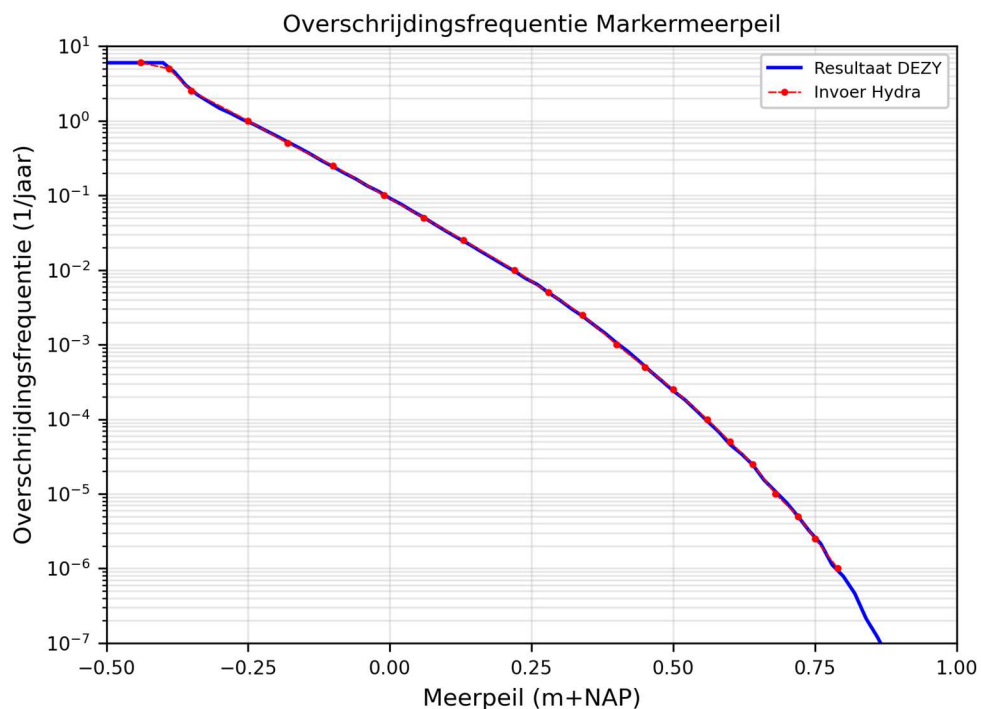
Figuur D-2: Pompcurve gemaal Den Oever voor DEZY-berekening met zichtjaar 2035.

D.4 Resulterende meerpeilstatistiek

Figuur D-3 en Figuur D-4 geven de berekende overschrijdingsfrequenties voor het IJssel- en Markermeer. De blauwe lijn in de figuren betreft de ruwe DEZY-uitvoer, de rode punten de waarden die DEZY wegschrijft als invoer t.b.v. Hydra-NL. Dit wordt nader toegelicht in de tekst onder deze figuren.



Figuur D-3: Berekende overschrijdingsfrequentie piekwaterstand IJsselmeer (DEZY-uitvoer).



Figuur D-4: Berekende overschrijdingsfrequentie piekwaterstand Markermeer (DEZY-uitvoer).

D.4.1. Overschrijdingskansen

DEZY genereert zelf invoerbestanden voor Hydra-NL op basis van de berekende meerpeilstatistiek. Dit staat beschreven in bijlage F van de systeemdokumentatie (Kuijper en Geerse, 2025). Figuur D-5 toont de door DEZY gegenereerde invoerbestanden met overschrijdingskansen van de piekwaterstanden voor het IJssel- en Markermeer voor BOI2023. Dit betreft de rode punten op de frequentielijnen zoals getoond in Figuur D-3 en Figuur D-44, die liggen op een vast rooster van kansen. De gegeven overschrijdingskansen in Figuur D-5 gelden voor een basisduur van 30 dagen.

* Overschrijdingskansen piekwaarde IJsselmeer		* Overschrijdingskansen piekwaarde Markermeer	
* Dit bestand is gegenereerd door het model DEZY		* Dit bestand is gegenereerd door het model DEZY	
* Piekwaarde	Overschrijdingskans	* Piekwaarde	Overschrijdingskans
[m+NAP]	[-]	[m+NAP]	[-]
-0.47	1.000E+00	-0.44	1.000E+00
-0.35	8.333E-01	-0.39	8.333E-01
-0.25	4.167E-01	-0.35	4.167E-01
-0.09	1.667E-01	-0.25	1.667E-01
0.02	8.333E-02	-0.18	8.333E-02
0.11	4.167E-02	-0.10	4.167E-02
0.23	1.667E-02	-0.01	1.667E-02
0.32	8.333E-03	0.06	8.333E-03
0.40	4.167E-03	0.13	4.167E-03
0.50	1.667E-03	0.22	1.667E-03
0.58	8.333E-04	0.28	8.333E-04
0.65	4.167E-04	0.34	4.167E-04
0.74	1.667E-04	0.40	1.667E-04
0.80	8.333E-05	0.45	8.333E-05
0.86	4.167E-05	0.50	4.167E-05
0.94	1.667E-05	0.56	1.667E-05
1.01	8.333E-06	0.60	8.333E-06
1.07	4.167E-06	0.64	4.167E-06
1.13	1.667E-06	0.68	1.667E-06
1.19	8.333E-07	0.72	8.333E-07
1.20	4.167E-07	0.75	4.167E-07
1.29	1.667E-07	0.79	1.667E-07

Figuur D-5: Invoerbestanden DEZY met overschrijdingskansen IJssel- en Markermeer.

De meerpeilen en bijbehorende overschrijdingskansen uit de door DEZY gegenereerde invoerbestanden (Figuur D-5) zijn in principe rechtstreeks overgenomen in de definitieve invoer voor de probabilistische modellen Hydra-Ring en Hydra-NL, zoals weergegeven in paragraaf 5.2 en paragraaf 5.3, met twee verschillen:

- In de eerste plaats is de laagste piekwaarde voor zowel het IJsselmeer als het Markermeer vervangen door het streefpeil (NAP-0,40 m). Deze laagste waarde, in bijlage F van de systeemdokumentatie (Kuijper en Geerse, 2025) aangeduid als het referentieniveau, is namelijk enigszins kunstmatig tot stand gekomen bij het genereren van het invoerbestand door DEZY en daardoor lastig uitlegbaar. De keuze voor het streefpeil als minimale waarde is veel voor de hand liggender en sluit aan bij de statistiek volgens WBI2017.
- In de twee plaats is te zien in Figuur D-3 dat de frequentielijn voor het IJsselmeer in het extreme bereik geen glad verloop heeft, door numerieke onnauwkeurigheid. Dit wordt grotendeels verholpen door de keuze van de overschrijdingskansen en bijbehorende meerpeilen in het door DEZY gegenereerde invoerbestand (de lijn door de rode punten is al vloeiender), maar voor de definitieve meerpeilstatistiek zoals beschreven in Tabel 5-1 (pagina 31) zijn de waarden bij T=100.000 jaar (ov. kans 1,667e-06) en T=400.000 jaar (ov. kans 4,167e-06) nog iets verhoogd om wel een glad verloop te krijgen.

D.4.2. Topduren

Naast overschrijdingskansen van de piekmeerpeilen zijn ook zogeheten topduren nodig, dat wil zeggen het verband tussen het piekmeerpeil en de topduur van het trapezium waarmee het tijdsverloop van het meerpeil wordt gemodelleerd.

Figuur D-6 toont de door DEZY gegenereerde invoerbestanden met topduren van de piekwaterstanden voor het IJssel- en Markermeer. Hierin zijn ook de bijbehorende insnoeringsfactoren van de geknikte meerpeiltrapezia weergegeven (die in Hydra-NL door de gebruiker apart zouden moeten worden ingevoerd in de Testmodus).

<pre> * * Topduren van meerpeilgolven van het IJsselmeer * * Bijbehorende insnoeringsfactoren meerpeiltrapezia: * av = 70% * ah = 114% * * Dit bestand is gegenereerd door het model DEZY * * Piekwaarde Topduur * [m+NAP] [uur] * -0.47 720 * -0.34 4 * -0.23 5 * -0.11 5 * 0.01 6 * 0.12 6 * 0.23 7 * 0.34 8 * 0.46 9 * 0.61 10 * 1.12 10 * 1.56 10 </pre>		<pre> * * Topduren van meerpeilgolven van het Markermeer * * Bijbehorende insnoeringsfactoren meerpeiltrapezia: * av = 70% * ah = 125% * * Dit bestand is gegenereerd door het model DEZY * * Piekwaarde Topduur * [m+NAP] [uur] * -0.44 720 * -0.38 5 * -0.32 8 * -0.24 13 * -0.15 20 * -0.06 25 * 0.03 28 * 0.11 30 * 0.19 33 * 0.36 33 * 0.71 34 * 0.93 34 </pre>	
--	--	--	--

Figuur D-6: Invoerbestanden DEZY met topduren IJssel- en Markermeer.

Hoewel de topduren door DEZY worden gegenereerd, is het precieze verloop daarvan als functie van het piekmeerpeil lastig uitlegbaar en geeft dit een zekere mate van schijnnaauwkeurigheid. Daarom is gekozen om, net als in WBI2017, de topduur als functie van het piekmeerpeil grover te schematiseren (zie onder). Ook is voor het meerpeilverloop uitgegaan van ongeknikte meerpeiltrapezia.

Voor de topduren is uitgegaan van de waarde voor de hogere meerpeilpieken, afgerond op veelvouden van 12 uur. Voor het IJsselmeer komt dat neer op 12 uur en voor het Markermeer op 36 uur. Gekozen is om bij streefpeil (NAP-0,40 m) uit te gaan van 720 uur (basisduur van 30 dagen), bij 5 cm daarboven van de waarde 12 of 36 uur en daarboven constant. Tabel D-2 geeft het resultaat van deze werkwijze.

Piekmeerpeil [m+NAP]	Topduur IJsselmeer [uur]	Topduur Markermeer [uur]
-0,40	720	720
-0,35	12	36
1,80	12	36

Tabel D-2: Vereenvoudigde topduren IJssel- en Markermeer.

Bovenstaande vereenvoudigingen ten aanzien van het meerpeilverloop en de topduren zijn te rechtvaardigen, aangezien de hydraulische belastingen voor wat betreft waterstanden en golfoverslag heel ongevoelig zijn voor deze keuzes.

Tenslotte merken we nog op, dat Hydra-Ring in het rekenschema FBC in plaats van deze topduren de zogeheten duurlijnen gebruikt. Deze zijn afgeleid o.b.v. de beschreven overschrijdingskansen en topduren, zie hoofdstuk 5 (en bijlage A).

E. Tabellen zeewaterstandstatistiek - zichtjaar 2035

E.1 Statistiek exclusief onzekerheid

De aan de getabelleerde terugkeerwaarden gefitte voorwaardelijke Weibull-verdelingen zijn van de vorm (De Valk en Van den Brink, 2025):

$$\mu(x) = \mu_0 e^{-(x/\sigma)^{1/p}} \quad (\text{E-1})$$

waarin $\mu(x)$ de overschrijdingsfrequentie is van de waarde x (in 1/jaar), μ_0 een constante ("reffreq" in 1/jaar), σ een schaalparameter ("scale" in m), en p een vormparameter ("shape"). Deze parameters hebben op zichzelf geen duidelijke betekenis (ze zijn niet simpel te relateren aan de geschatte GW staarten), maar de gefitte verdelingen geven een goede benadering van de geschatte staarten over terugkeertijden van 1 jaar tot 10 miljoen jaar en zijn eenvoudig toe te passen. Overschrijdingsfrequenties $\mu(x)$ worden gedeeld door 365,25 om te vertalen naar een 12 uursperiode.

Alle hieronder genoemde tabellen gelden voor zichtjaar 2035.²⁸

E.1.1. 12 sectoren

Hansweert	Omni	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360
shape	0,88	0,59	0,60	0,70	0,44	0,35	0,39	0,52	0,44	0,85	0,79	0,78	0,92
scale	0,35	0,66	0,54	0,33	0,95	1,34	1,21	0,87	1,31	0,33	0,50	0,53	0,28
reffreq	7,47 E+06	5,34 E+05	1,96 E+07	1,20 E+10	5,83 E+05	2,14 E+04	6,82 E+04	2,37 E+05	5,86 E+03	1,89 E+07	3,10 E+05	8,54 E+04	1,42 E+06
RV 1 yr	3,89	3,01	2,95	2,93	2,93	2,98	3,07	3,22	3,42	3,65	3,69	3,54	3,20
RV 10 yr	4,38	3,30	3,18	3,13	3,15	3,20	3,31	3,52	3,79	4,08	4,21	4,09	3,68
RV 100 yr	4,87	3,59	3,41	3,33	3,34	3,40	3,52	3,80	4,12	4,49	4,71	4,62	4,15
RV 1.000 yr	5,35	3,85	3,63	3,52	3,52	3,57	3,71	4,06	4,42	4,91	5,20	5,13	4,62
RV 10.000 yr	5,82	4,11	3,84	3,70	3,69	3,74	3,88	4,31	4,70	5,31	5,68	5,63	5,08
RV 1e+05 yr	6,28	4,35	4,04	3,89	3,85	3,89	4,05	4,54	4,96	5,71	6,15	6,12	5,54
RV 1e+06 yr	6,74	4,59	4,23	4,06	4,00	4,03	4,20	4,76	5,20	6,11	6,60	6,59	6,00
RV 1e+07 yr	7,20	4,81	4,42	4,24	4,15	4,16	4,35	4,98	5,43	6,50	7,05	7,06	6,45

Vlissingen	Omni	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360
shape	0,87	0,60	0,59	0,66	0,44	0,35	0,36	0,53	0,47	0,92	0,79	0,78	0,95
scale	0,30	0,57	0,52	0,36	0,84	1,20	1,17	0,73	1,03	0,22	0,44	0,46	0,21
reffreq	9,88 E+06	5,97 E+05	5,67 E+06	8,21 E+08	4,51 E+05	1,80 E+04	3,29 E+04	5,85 E+05	2,02 E+04	1,31 E+08	3,92 E+05	1,14 E+05	4,45 E+06
RV 1 yr	3,42	2,68	2,63	2,62	2,63	2,66	2,74	2,86	3,02	3,22	3,25	3,13	2,86
RV 10 yr	3,85	2,95	2,85	2,81	2,83	2,86	2,94	3,11	3,33	3,58	3,69	3,60	3,26
RV 100 yr	4,26	3,21	3,06	3,00	3,01	3,04	3,12	3,35	3,61	3,94	4,13	4,06	3,67
RV 1.000 yr	4,68	3,45	3,27	3,18	3,18	3,20	3,29	3,57	3,87	4,29	4,55	4,5	4,07
RV 10.000 yr	5,08	3,68	3,46	3,35	3,33	3,35	3,44	3,78	4,11	4,64	4,96	4,93	4,47
RV 1e+05 yr	5,48	3,91	3,64	3,52	3,48	3,49	3,58	3,98	4,34	4,99	5,36	5,34	4,87
RV 1e+06 yr	5,88	4,12	3,82	3,68	3,63	3,61	3,71	4,17	4,55	5,34	5,76	5,75	5,27
RV 1e+07 yr	6,27	4,33	4,00	3,84	3,76	3,73	3,84	4,35	4,75	5,69	6,14	6,15	5,67

²⁸ De terugkeerwaarden voor de waterstand in BOI2023 gelden voor zichtjaar 2035. De schattingen hebben betrekking op het jaar 2019 (zie paragraaf 6.2), en zijn in de tabellen voor BOI vertaald naar zichtjaar 2035 uitgaande van een zeespiegelstijging van 3 mm/jaar op alle stations (Keizer et al., 2023) resulterend in een uniforme verhoging van de zeewaterstand met 0,05 m van 2019 tot 2035 (De Valk en Van den Brink, 2025).

OS11	Omni	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360
shape	0,96	0,59	0,53	0,56	0,56	0,58	0,65	0,63	0,58	0,99	0,86	0,89	1,16
scale	0,24	0,59	0,61	0,53	0,54	0,48	0,38	0,48	0,67	0,18	0,35	0,32	0,11
reffreq	6,92 E+05	7,21 E+03	1,71 E+04	6,91 E+04	4,34 E+04	2,76 E+05	1,15 E+06	9,84 E+04	8,51 E+03	2,95 E+06	4,38 E+04	3,16 E+04	2,22 E+06
RV 1 yr	2,90	2,13	2,06	2,03	2,03	2,08	2,14	2,24	2,40	2,64	2,71	2,62	2,35
RV 10 yr	3,38	2,44	2,31	2,26	2,26	2,29	2,37	2,51	2,73	3,04	3,20	3,13	2,79
RV 100 yr	3,85	2,72	2,54	2,46	2,48	2,49	2,58	2,77	3,04	3,44	3,69	3,64	3,23
RV 1.000 yr	4,32	2,99	2,75	2,66	2,68	2,68	2,78	3,01	3,33	3,85	4,17	4,13	3,68
RV 10.000 yr	4,79	3,24	2,94	2,84	2,87	2,86	2,98	3,24	3,60	4,25	4,63	4,62	4,14
RV 1e+05 yr	5,25	3,47	3,13	3,02	3,05	3,03	3,17	3,47	3,85	4,65	5,09	5,11	4,60
RV 1e+06 yr	5,72	3,70	3,31	3,18	3,22	3,20	3,35	3,68	4,10	5,05	5,54	5,59	5,08
RV 1e+07 yr	6,18	3,91	3,48	3,34	3,39	3,36	3,53	3,89	4,33	5,45	5,99	6,06	5,55

Hoek van Holland	Omni	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360
shape	0,92	0,74	0,76	0,84	0,66	0,64	0,62	0,50	0,57	0,71	0,87	0,86	0,87
scale	0,31	0,36	0,26	0,19	0,34	0,36	0,40	0,70	0,70	0,59	0,37	0,40	0,34
reffreq	2,44 E+04	1,48 E+03	1,71 E+04	1,13 E+05	8,49 E+03	8,82 E+03	8,33 E+03	5,45 E+02	5,28 E+02	8,32 E+03	4,31 E+03	1,39 E+03	8,40 E+02
RV 1 yr	2,57	1,55	1,49	1,44	1,44	1,48	1,58	1,76	1,99	2,25	2,37	2,20	1,82
RV 10 yr	3,10	1,90	1,75	1,68	1,67	1,71	1,82	2,06	2,38	2,77	2,92	2,79	2,35
RV 100 yr	3,63	2,23	2,00	1,91	1,89	1,93	2,05	2,32	2,73	3,25	3,46	3,36	2,87
RV 1.000 yr	4,14	2,54	2,23	2,13	2,09	2,13	2,25	2,55	3,04	3,71	3,99	3,91	3,37
RV 10.000 yr	4,66	2,84	2,46	2,35	2,28	2,33	2,45	2,77	3,34	4,14	4,51	4,45	3,86
RV 1e+05 yr	5,16	3,13	2,69	2,56	2,47	2,51	2,64	2,97	3,61	4,55	5,01	4,98	4,35
RV 1e+06 yr	5,67	3,41	2,91	2,78	2,65	2,69	2,82	3,15	3,87	4,95	5,51	5,51	4,82
RV 1e+07 yr	6,17	3,68	3,12	2,98	2,82	2,86	2,99	3,33	4,12	5,34	6,01	6,02	5,29

IJmuiden	Omni	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360
shape	0,87	0,90	0,93	0,88	0,85	0,80	0,90	0,73	0,72	0,82	0,82	0,85	0,99
scale	0,37	0,21	0,15	0,17	0,18	0,22	0,17	0,37	0,46	0,41	0,46	0,41	0,23
reffreq	5,51 E+03	1,92 E+03	1,32 E+04	9,95 E+03	9,18 E+03	7,51 E+03	2,08 E+04	1,50 E+03	9,89 E+02	1,54 E+03	9,37 E+02	7,12 E+02	1,24 E+03
RV 1 yr	2,42	1,31	1,21	1,18	1,20	1,26	1,37	1,59	1,84	2,12	2,19	2,03	1,63
RV 10 yr	2,97	1,66	1,48	1,43	1,46	1,51	1,65	1,94	2,26	2,66	2,78	2,63	2,14
RV 100 yr	3,51	2,00	1,75	1,68	1,70	1,76	1,93	2,27	2,66	3,17	3,34	3,20	2,66
RV 1.000 yr	4,04	2,34	2,02	1,93	1,94	1,99	2,20	2,58	3,04	3,66	3,88	3,76	3,17
RV 10.000 yr	4,55	2,67	2,28	2,17	2,17	2,22	2,47	2,87	3,39	4,14	4,40	4,30	3,69
RV 1e+05 yr	5,06	3,00	2,54	2,40	2,40	2,44	2,74	3,16	3,74	4,61	4,91	4,83	4,20
RV 1e+06 yr	5,55	3,33	2,79	2,64	2,63	2,66	3,00	3,44	4,07	5,07	5,40	5,35	4,71
RV 1e+07 yr	6,05	3,65	3,05	2,87	2,85	2,87	3,27	3,71	4,39	5,52	5,89	5,86	5,22

Den Helder	Omni	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360
shape	0,82	0,82	0,84	0,82	0,81	0,80	0,78	0,70	0,68	0,74	0,76	0,79	0,85
scale	0,44	0,28	0,21	0,20	0,21	0,22	0,28	0,42	0,54	0,52	0,55	0,52	0,38
reffreq	9,31 E+02	5,11 E+01	1,15 E+02	1,49 E+02	1,50 E+02	1,75 E+02	1,94 E+02	1,59 E+02	1,28 E+02	2,63 E+02	1,42 E+02	7,56 E+01	4,34 E+01
RV 1 yr	2,14	0,86	0,78	0,76	0,77	0,84	1,01	1,31	1,56	1,87	1,87	1,66	1,18
RV 10 yr	2,71	1,25	1,09	1,03	1,05	1,13	1,34	1,70	2,03	2,42	2,51	2,32	1,77
RV 100 yr	3,26	1,61	1,38	1,29	1,31	1,40	1,65	2,06	2,46	2,93	3,09	2,93	2,32
RV 1.000 yr	3,79	1,96	1,66	1,54	1,56	1,66	1,95	2,39	2,85	3,41	3,64	3,51	2,86
RV 10.000 yr	4,31	2,30	1,93	1,79	1,80	1,91	2,23	2,71	3,21	3,86	4,17	4,06	3,38
RV 1e+05 yr	4,81	2,62	2,20	2,02	2,03	2,16	2,50	3,00	3,56	4,30	4,68	4,59	3,88
RV 1e+06 yr	5,30	2,94	2,46	2,25	2,25	2,39	2,77	3,29	3,89	4,72	5,17	5,11	4,37
RV 1e+07 yr	5,78	3,25	2,71	2,47	2,47	2,62	3,03	3,57	4,21	5,13	5,64	5,62	4,86

Den Oever	Omni	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360
shape	0,77	0,78	0,82	0,79	0,77	0,76	0,68	0,58	0,70	0,71	0,73	0,74	0,83
scale	0,60	0,38	0,27	0,25	0,26	0,28	0,40	0,65	0,58	0,67	0,72	0,69	0,48
reffreq	7,61 E+02	3,08 E+01	8,72 E+01	1,20 E+02	1,32 E+02	1,77 E+02	1,24 E+02	7,28 E+01	2,07 E+02	2,49 E+02	1,48 E+02	7,15 E+01	4,71 E+01
RV 1 yr	2,58	1,00	0,90	0,88	0,90	0,98	1,17	1,52	1,86	2,26	2,30	2,04	1,47
RV 10 yr	3,26	1,49	1,26	1,20	1,21	1,30	1,53	1,95	2,40	2,90	3,03	2,81	2,16
RV 100 yr	3,89	1,95	1,60	1,49	1,50	1,60	1,85	2,31	2,88	3,49	3,70	3,52	2,81
RV 1.000 yr	4,49	2,37	1,93	1,78	1,78	1,88	2,15	2,64	3,34	4,04	4,32	4,18	3,44
RV 10.000 yr	5,07	2,78	2,24	2,05	2,04	2,14	2,43	2,95	3,77	4,56	4,91	4,80	4,04
RV 1e+05 yr	5,63	3,17	2,55	2,31	2,29	2,40	2,69	3,23	4,18	5,05	5,48	5,40	4,62
RV 1e+06 yr	6,18	3,54	2,84	2,57	2,54	2,65	2,94	3,49	4,57	5,53	6,02	5,97	5,19
RV 1e+07 yr	6,71	3,91	3,13	2,82	2,78	2,89	3,19	3,74	4,95	5,99	6,55	6,53	5,74

West Terschelling	Omni	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360
shape	0,80	0,78	0,75	0,72	0,74	0,69	0,68	0,57	0,72	0,71	0,75	0,78	0,89
scale	0,47	0,32	0,29	0,30	0,29	0,34	0,38	0,63	0,50	0,60	0,59	0,55	0,34
reffreq	2,34 E+03	2,68 E+02	3,86 E+02	3,35 E+02	2,85 E+02	2,62 E+02	3,75 E+02	1,39 E+02	4,83 E+02	4,49 E+02	3,48 E+02	1,77 E+02	1,98 E+02
RV 1 yr	2,46	1,20	1,09	1,04	1,03	1,10	1,28	1,57	1,87	2,19	2,21	1,97	1,49
RV 10 yr	3,03	1,57	1,39	1,32	1,32	1,39	1,60	1,95	2,34	2,75	2,83	2,62	2,05
RV 100 yr	3,58	1,91	1,68	1,58	1,60	1,66	1,89	2,28	2,79	3,27	3,41	3,23	2,60
RV 1.000 yr	4,11	2,24	1,94	1,82	1,85	1,91	2,16	2,58	3,20	3,76	3,96	3,80	3,12
RV 10.000 yr	4,62	2,55	2,20	2,05	2,10	2,15	2,42	2,85	3,60	4,22	4,48	4,36	3,64
RV 1e+05 yr	5,12	2,86	2,44	2,27	2,33	2,38	2,66	3,11	3,98	4,67	4,99	4,89	4,15
RV 1e+06 yr	5,60	3,15	2,68	2,49	2,56	2,59	2,89	3,35	4,34	5,09	5,47	5,40	4,65
RV 1e+07 yr	6,08	3,44	2,91	2,69	2,78	2,80	3,12	3,57	4,70	5,51	5,94	5,91	5,14

Harlingen	Omni	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360
shape	0,61	0,63	0,65	0,64	0,64	0,63	0,53	0,48	0,62	0,58	0,57	0,59	0,66
scale	1,01	0,63	0,49	0,45	0,46	0,49	0,68	0,94	0,82	1,03	1,14	1,10	0,80
reffreq	2,55 E+02	8,54 E+00	1,13 E+01	1,27 E+01	1,21 E+01	1,59 E+01	1,81 E+01	2,32 E+01	8,72 E+01	1,11 E+02	5,89 E+01	2,54 E+01	1,32 E+01
RV 1 yr	2,84	1,02	0,87	0,82	0,83	0,93	1,20	1,63	2,07	2,53	2,54	2,20	1,50
RV 10 yr	3,50	1,62	1,34	1,24	1,26	1,36	1,64	2,12	2,67	3,19	3,29	3,02	2,29
RV 100 yr	4,10	2,11	1,73	1,59	1,62	1,72	2,00	2,52	3,20	3,76	3,93	3,70	2,96
RV 1.000 yr	4,64	2,54	2,08	1,90	1,94	2,04	2,30	2,85	3,68	4,27	4,50	4,31	3,57
RV 10.000 yr	5,14	2,93	2,40	2,18	2,23	2,34	2,57	3,15	4,13	4,75	5,01	4,86	4,12
RV 1e+05 yr	5,61	3,30	2,69	2,44	2,50	2,61	2,82	3,42	4,54	5,19	5,50	5,38	4,64
RV 1e+06 yr	6,06	3,64	2,97	2,69	2,76	2,87	3,06	3,67	4,94	5,60	5,95	5,86	5,13
RV 1e+07 yr	6,49	3,96	3,24	2,93	3,00	3,11	3,27	3,91	5,31	5,99	6,38	6,31	5,59

Lauwersoog	Omni	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360
shape	0,72	0,70	0,70	0,67	0,66	0,55	0,54	0,50	0,64	0,68	0,68	0,71	0,78
scale	0,68	0,47	0,39	0,40	0,41	0,57	0,64	0,85	0,73	0,73	0,82	0,75	0,52
reffreq	1,63 E+03	1,42 E+02	2,39 E+02	2,12 E+02	1,82 E+02	6,53 E+01	9,51 E+01	8,13 E+01	2,72 E+02	6,26 E+02	2,78 E+02	1,41 E+02	1,14 E+02
RV 1 yr	2,89	1,44	1,29	1,21	1,21	1,26	1,46	1,78	2,18	2,61	2,63	2,33	1,76
RV 10 yr	3,52	1,88	1,64	1,54	1,54	1,61	1,81	2,20	2,72	3,21	3,32	3,05	2,41
RV 100 yr	4,11	2,27	1,97	1,84	1,84	1,90	2,12	2,55	3,20	3,77	3,95	3,71	3,00
RV 1.000 yr	4,67	2,65	2,28	2,11	2,11	2,16	2,39	2,85	3,65	4,28	4,53	4,32	3,57
RV 10.000 yr	5,20	2,99	2,56	2,37	2,36	2,40	2,64	3,13	4,06	4,78	5,07	4,90	4,11
RV 1e+05 yr	5,71	3,33	2,84	2,61	2,61	2,62	2,87	3,39	4,45	5,24	5,59	5,45	4,63
RV 1e+06 yr	6,21	3,65	3,10	2,85	2,84	2,83	3,08	3,62	4,83	5,69	6,09	5,98	5,14
RV 1e+07 yr	6,69	3,95	3,35	3,07	3,06	3,02	3,29	3,84	5,18	6,13	6,57	6,49	5,64

Huibertgat	Omni	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360
shape	0,81	0,78	0,75	0,71	0,69	0,62	0,57	0,63	0,75	0,77	0,76	0,86	0,95
scale	0,47	0,31	0,28	0,30	0,33	0,40	0,53	0,53	0,48	0,53	0,58	0,41	0,27
reffreq	2,54 E+03	3,02 E+02	4,29 E+02	3,23 E+02	2,09 E+02	1,57 E+02	1,23 E+02	3,13 E+02	6,47 E+02	8,06 E+02	3,49 E+02	4,80 E+02	3,69 E+02
RV 1 yr	2,52	1,20	1,09	1,05	1,04	1,11	1,30	1,62	1,96	2,29	2,25	1,96	1,45
RV 10 yr	3,11	1,57	1,39	1,33	1,34	1,41	1,62	2,00	2,46	2,87	2,89	2,56	1,98
RV 100 yr	3,67	1,91	1,68	1,59	1,61	1,67	1,90	2,35	2,93	3,42	3,50	3,15	2,51
RV 1.000 yr	4,21	2,23	1,94	1,83	1,85	1,90	2,16	2,67	3,38	3,95	4,07	3,72	3,02
RV 10.000 yr	4,74	2,54	2,20	2,06	2,09	2,12	2,39	2,96	3,81	4,45	4,62	4,27	3,54
RV 1e+05 yr	5,25	2,84	2,44	2,28	2,31	2,33	2,61	3,24	4,22	4,94	5,15	4,81	4,04
RV 1e+06 yr	5,75	3,14	2,68	2,49	2,53	2,53	2,81	3,51	4,62	5,42	5,66	5,35	4,55
RV 1e+07 yr	6,25	3,42	2,91	2,69	2,74	2,72	3,00	3,77	5,01	5,88	6,16	5,87	5,05

Delfzijl	Omni	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360
shape	0,77	0,79	0,81	0,77	0,78	0,59	0,54	0,59	0,67	0,78	0,74	0,75	0,86
scale	0,73	0,48	0,34	0,36	0,34	0,59	0,74	0,78	0,80	0,67	0,82	0,81	0,51
reffreq	1,35 E+03	1,09 E+02	3,45 E+02	2,42 E+02	3,80 E+02	7,62 E+01	5,63 E+01	1,26 E+02	2,06 E+02	8,09 E+02	3,30 E+02	1,43 E+02	1,56 E+02
RV 1 yr	3,35	1,63	1,43	1,34	1,36	1,41	1,58	1,96	2,45	2,96	3,04	2,69	2,06
RV 10 yr	4,15	2,23	1,87	1,76	1,76	1,81	2,01	2,46	3,11	3,73	3,90	3,58	2,85
RV 100 yr	4,91	2,79	2,29	2,15	2,13	2,16	2,38	2,90	3,71	4,46	4,70	4,40	3,60
RV 1.000 yr	5,64	3,32	2,69	2,52	2,49	2,47	2,70	3,30	4,26	5,16	5,45	5,18	4,32
RV 10.000 yr	6,34	3,83	3,08	2,87	2,83	2,76	3,00	3,67	4,78	5,83	6,17	5,91	5,03
RV 1e+05 yr	7,02	4,32	3,45	3,21	3,16	3,03	3,27	4,01	5,27	6,49	6,86	6,62	5,72
RV 1e+06 yr	7,68	4,79	3,82	3,54	3,49	3,29	3,52	4,34	5,74	7,12	7,53	7,30	6,40
RV 1e+07 yr	8,32	5,26	4,18	3,86	3,80	3,53	3,76	4,64	6,19	7,74	8,17	7,96	7,06

E.1.2. 16 sectoren

Hoek van Holland	22.5	45	67.5	90	112.5	135	157.5	180	202.5	225	247.5	270	292.5	315	337.5	360
shape	0,71	0,70	0,83	0,78	0,64	0,66	0,63	0,65	0,58	0,48	0,56	0,61	0,60	0,86	0,77	0,68
scale	0,40	0,33	0,20	0,22	0,36	0,34	0,37	0,36	0,48	0,76	0,72	0,79	0,90	0,41	0,53	0,59
reffreq	8,26 E+02	5,41 E+03	4,21 E+04	3,15 E+04	4,52 E+03	6,85 E+03	5,68 E+03	1,19 E+04	4,13 E+03	4,98 E+02	4,54 E+02	2,11 E+02	8,42 E+01	1,40 E+03	2,78 E+02	1,12 E+02
RV 1 yr	1,55	1,49	1,43	1,41	1,40	1,42	1,46	1,54	1,65	1,82	2,00	2,19	2,22	2,24	2,00	1,70
RV 10 yr	1,91	1,76	1,68	1,65	1,63	1,66	1,70	1,78	1,90	2,12	2,40	2,71	2,86	2,84	2,61	2,23
RV 100 yr	2,24	2,01	1,93	1,88	1,85	1,88	1,92	1,99	2,13	2,38	2,75	3,18	3,41	3,43	3,17	2,70
RV 1.000 yr	2,56	2,25	2,16	2,10	2,05	2,09	2,12	2,20	2,34	2,61	3,06	3,61	3,91	3,99	3,70	3,14
RV 10.000 yr	2,86	2,48	2,40	2,31	2,24	2,28	2,31	2,40	2,54	2,83	3,36	4,01	4,38	4,54	4,22	3,56
RV 1e+05 yr	3,15	2,70	2,63	2,53	2,43	2,47	2,50	2,58	2,72	3,02	3,63	4,38	4,81	5,08	4,71	3,95
RV 1e+06 yr	3,43	2,91	2,85	2,73	2,60	2,65	2,67	2,76	2,90	3,21	3,89	4,74	5,22	5,62	5,19	4,32
RV 1e+07 yr	3,70	3,12	3,07	2,93	2,77	2,83	2,84	2,94	3,08	3,38	4,14	5,07	5,60	6,14	5,66	4,68

OS11	22.5	45	67.5	90	112.5	135	157.5	180	202.5	225	247.5	270	292.5	315	337.5	360
shape	0,56	0,51	0,56	0,49	0,54	0,56	0,39	0,48	0,59	0,60	0,56	0,62	0,78	0,84	0,97	0,79
scale	0,65	0,68	0,54	0,67	0,58	0,54	0,97	0,73	0,53	0,55	0,71	0,71	0,46	0,40	0,24	0,38
reffreq	3,23 E+03	7,07 E+03	3,13 E+04	9,20 E+03	1,92 E+04	3,91 E+04	9,22 E+02	7,94 E+03	5,23 E+04	4,17 E+04	5,57 E+03	3,07 E+03	1,19 E+04	1,35 E+04	6,80 E+04	1,19 E+04
RV 1 yr	2,12	2,06	2,01	1,99	1,99	2,01	2,03	2,09	2,15	2,27	2,40	2,56	2,63	2,64	2,49	2,26
RV 10 yr	2,44	2,32	2,25	2,23	2,23	2,25	2,28	2,33	2,40	2,55	2,74	2,99	3,13	3,17	2,99	2,69
RV 100 yr	2,73	2,55	2,47	2,43	2,44	2,47	2,48	2,55	2,64	2,82	3,06	3,38	3,60	3,68	3,48	3,10
RV 1.000 yr	3,00	2,77	2,68	2,63	2,65	2,67	2,67	2,75	2,86	3,06	3,34	3,75	4,06	4,18	3,97	3,50
RV 10.000 yr	3,25	2,96	2,88	2,81	2,84	2,86	2,83	2,93	3,08	3,30	3,62	4,10	4,50	4,66	4,47	3,89
RV 1e+05 yr	3,49	3,15	3,06	2,97	3,02	3,05	2,98	3,10	3,28	3,52	3,87	4,43	4,93	5,14	4,96	4,26
RV 1e+06 yr	3,72	3,33	3,24	3,13	3,19	3,22	3,12	3,26	3,47	3,74	4,12	4,75	5,35	5,61	5,44	4,63
RV 1e+07 yr	3,93	3,50	3,41	3,28	3,35	3,39	3,25	3,42	3,66	3,95	4,35	5,05	5,77	6,08	5,93	4,99

E.2

Statistische onzekerheid

Hansweert	1 yr	10 yr	100 yr	1000 yr	10000 yr	1e+05 yr	1e+06 yr	1e+07 yr
RV	3,89	4,38	4,87	5,35	5,82	6,28	6,74	7,20
SD	0,018	0,037	0,069	0,110	0,160	0,216	0,277	0,343

Vlissingen	1 yr	10 yr	100 yr	1000 yr	10000 yr	1e+05 yr	1e+06 yr	1e+07 yr
RV	3,42	3,85	4,26	4,68	5,08	5,48	5,88	6,27
SD	0,017	0,035	0,063	0,099	0,142	0,190	0,244	0,301

OS11	1 yr	10 yr	100 yr	1000 yr	10000 yr	1e+05 yr	1e+06 yr	1e+07 yr
RV	2,90	3,38	3,85	4,32	4,79	5,25	5,72	6,18
SD	0,021	0,045	0,078	0,121	0,173	0,231	0,296	0,367

Hoek van Holland	1 yr	10 yr	100 yr	1000 yr	10000 yr	1e+05 yr	1e+06 yr	1e+07 yr
RV	2,57	3,10	3,63	4,14	4,66	5,16	5,67	6,17
SD	0,024	0,050	0,086	0,133	0,188	0,251	0,320	0,394

IJmuiden	1 yr	10 yr	100 yr	1000 yr	10000 yr	1e+05 yr	1e+06 yr	1e+07 yr
RV	2,42	2,97	3,51	4,04	4,55	5,06	5,55	6,05
SD	0,021	0,043	0,078	0,124	0,178	0,238	0,304	0,375

Den Helder	1 yr	10 yr	100 yr	1000 yr	10000 yr	1e+05 yr	1e+06 yr	1e+07 yr
RV	2,14	2,71	3,26	3,79	4,31	4,81	5,30	5,78
SD	0,030	0,056	0,094	0,143	0,199	0,262	0,330	0,403

Den Oever	1 yr	10 yr	100 yr	1000 yr	10000 yr	1e+05 yr	1e+06 yr	1e+07 yr
RV	2,58	3,26	3,89	4,49	5,07	5,63	6,18	6,71
SD	0,035	0,065	0,108	0,162	0,224	0,292	0,366	0,444

West Terschelling	1 yr	10 yr	100 yr	1000 yr	10000 yr	1e+05 yr	1e+06 yr	1e+07 yr
RV	2,46	3,03	3,58	4,11	4,62	5,12	5,60	6,08
SD	0,037	0,073	0,120	0,176	0,241	0,313	0,390	0,474

Harlingen	1 yr	10 yr	100 yr	1000 yr	10000 yr	1e+05 yr	1e+06 yr	1e+07 yr
RV	2,84	3,50	4,10	4,64	5,14	5,61	6,06	6,49
SD	0,044	0,081	0,126	0,177	0,233	0,292	0,354	0,417

Lauwersoog	1 yr	10 yr	100 yr	1000 yr	10000 yr	1e+05 yr	1e+06 yr	1e+07 yr
RV	2,89	3,52	4,11	4,67	5,20	5,71	6,21	6,69
SD	0,041	0,079	0,127	0,185	0,250	0,320	0,396	0,476

Huibertgat	1 yr	10 yr	100 yr	1000 yr	10000 yr	1e+05 yr	1e+06 yr	1e+07 yr
RV	2,52	3,11	3,67	4,21	4,74	5,25	5,75	6,25
SD	0,038	0,075	0,123	0,181	0,248	0,323	0,403	0,490

Delfzijl	1 yr	10 yr	100 yr	1000 yr	10000 yr	1e+05 yr	1e+06 yr	1e+07 yr
RV	3,35	4,15	4,91	5,64	6,34	7,02	7,68	8,32
SD	0,038	0,066	0,111	0,169	0,238	0,314	0,398	0,487

Texel Noordzee	1 yr	10 yr	100 yr	1000 yr	10000 yr	1e+05 yr	1e+06 yr	1e+07 yr
RV	2,15	2,67	3,16	3,64	4,11	4,56	5,01	5,44
SD	0,056	0,0908	0,133	0,183	0,238	0,299	0,365	0,435

F. Tabellen windstatistiek

F.1 Statistiek exclusief onzekerheid

De aan de getabelleerde terugkeerwaarden gefitte voorwaardelijke Weibull-verdelingen zijn van de vorm (De Valk en Van den Brink, 2025):

$$\mu(x) = \mu_0 e^{-(x/\sigma)^{1/p}} \quad (\text{F-1})$$

waarin $\mu(x)$ de overschrijdingsfrequentie is van de waarde x (in 1/jaar), μ_0 een constante ("reffreq" in 1/jaar), σ een schaalparameter ("scale" in m/s), en p een vormparameter ("shape"). Deze parameters hebben op zichzelf geen duidelijke betekenis (ze zijn niet simpel te relateren aan de geschatte GW staarten), maar de gefitte verdelingen geven een goede benadering van de geschatte staarten over terugkeertijden van 1 jaar tot 10 miljoen jaar en zijn eenvoudig toe te passen. Overschrijdingsfrequenties $\mu(x)$ worden gedeeld door 365,25 om te vertalen naar een 12 uursperiode.

F.1.1. 12 sectoren

Vlissingen (Noordzee)	Omni	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360
shape	0,49	0,52	0,52	0,43	0,54	0,47	0,44	0,48	0,47	0,48	0,45	0,48	0,52
scale	9,32	7,45	7,19	9,47	6,67	8,77	10,12	9,71	10,21	9,81	10,50	9,55	8,01
reffreq	420,9	26,1	66,0	15,6	32,8	10,8	29,6	94,4	65,1	48,2	20,9	20,3	22,7
RV 10 yr	26,6	18,1	18,9	19,0	17,1	18,2	21,9	24,5	24,7	23,7	22,4	21,2	19,2
RV 100 yr	30,0	21,7	22,2	22,3	20,5	22,0	25,5	28,1	28,5	27,6	26,3	25,1	23,1
RV 1.000 yr	33,0	24,8	25,0	25,1	23,4	25,2	28,5	31,3	31,8	31,0	29,7	28,5	26,4
RV 10.000 yr	35,8	27,5	27,6	27,5	26,1	28,0	31,2	34,2	34,7	34,1	32,6	31,4	29,4
RV 1e+05 yr	38,4	30,1	29,9	29,7	28,5	30,5	33,6	36,8	37,4	36,8	35,2	34,1	32,2
RV 1e+06 yr	40,8	32,4	32,1	31,7	30,8	32,8	35,8	39,3	39,9	39,4	37,7	36,6	34,7
RV 1e+07 yr	43,0	34,6	34,2	33,5	32,9	35,0	37,8	41,6	42,3	41,8	39,9	38,9	37,1

Gebruikt voor afleiding *Vlakte van de Raan* (KNMI station), zie paragraaf 7.3.2.

Hoek van Holland	Omni	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360
shape	0,49	0,52	0,46	0,42	0,50	0,43	0,43	0,51	0,47	0,45	0,44	0,50	0,52
scale	9,52	7,02	8,35	9,57	7,25	9,46	10,29	8,73	10,09	10,98	10,85	8,76	7,51
reffreq	369,3	29,6	24,7	15,8	26,1	8,3	33,5	166,3	67,1	33,7	20,8	26,7	27,4
RV 10 yr	26,6	17,3	18,4	19,0	17,2	18,0	21,8	24,3	24,5	24,3	22,7	20,8	18,5
RV 100 yr	30,0	20,7	21,7	22,2	20,5	21,6	25,1	27,8	28,3	28,3	26,7	24,7	22,1
RV 1.000 yr	33,1	23,6	24,4	24,9	23,3	24,6	27,9	31,0	31,6	31,7	29,9	28,1	25,3
RV 10.000 yr	35,8	26,2	26,9	27,3	25,9	27,1	30,4	33,9	34,5	34,7	32,8	31,1	28,1
RV 1e+05 yr	38,4	28,6	29,1	29,4	28,2	29,4	32,6	36,6	37,2	37,4	35,4	33,9	30,7
RV 1e+06 yr	40,8	30,8	31,1	31,3	30,3	31,4	34,7	39,1	39,7	39,9	37,8	36,4	33,1
RV 1e+07 yr	43,1	32,9	33,0	33,1	32,3	33,3	36,6	41,5	42,1	42,2	40,0	38,8	35,3

IJmuiden	Omni	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360
shape	0,50	0,52	0,44	0,38	0,44	0,41	0,41	0,52	0,48	0,46	0,44	0,51	0,51
scale	9,21	7,12	9,16	10,96	9,02	10,08	10,85	8,25	9,97	10,97	10,88	8,52	7,68
reffreq	421,6	28,3	15,7	11,3	14,3	8,0	27,2	222,4	61,5	38,6	19,4	32,3	27,3
RV 10 yr	26,6	17,5	18,7	19,9	18,4	18,5	21,9	24,0	24,2	24,8	22,8	20,7	18,6
RV 100 yr	30,1	20,9	22,1	23,2	21,8	22,1	25,2	27,5	28,0	28,8	26,7	24,5	22,2
RV 1.000 yr	33,2	23,9	25,0	25,8	24,6	24,9	28,0	30,6	31,3	32,3	30,1	27,8	25,3
RV 10.000 yr	36,0	26,5	27,4	28,1	27,1	27,4	30,4	33,5	34,2	35,3	33,0	30,8	28,1
RV 1e+05 yr	38,6	28,9	29,7	30,1	29,3	29,5	32,6	36,1	36,9	38,1	35,7	33,5	30,7
RV 1e+06 yr	41,1	31,2	31,7	32,0	31,3	31,5	34,6	38,6	39,4	40,6	38,1	36,0	33,1
RV 1e+07 yr	43,4	33,3	33,6	33,6	33,2	33,3	36,4	41,0	41,7	43,0	40,3	38,4	35,3

Den Helder	Omni	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360
shape	0.48	0.49	0.42	0.35	0.37	0.38	0.37	0.49	0.44	0.43	0.43	0.46	0.47
scale	9.61	8.00	9.89	12.11	11.46	11.24	12.14	8.92	10.88	11.71	11.22	9.67	8.88
reffreq	362.1	13.9	8.5	9.4	6.9	6.3	16.1	149.5	39.4	27.1	16.7	21.2	13.9
RV 10 yr	26.5	17.4	18.6	20.6	19.4	19.4	22.1	23.7	24.0	24.7	22.7	21.1	18.9
RV 100 yr	29.8	21.0	22.1	23.7	22.8	22.9	25.3	27.1	27.7	28.7	26.7	24.9	22.6
RV 1.000 yr	32.8	24.0	25.1	26.3	25.4	25.7	28.0	30.1	30.9	32.1	30.0	28.1	25.7
RV 10.000 yr	35.6	26.7	27.6	28.4	27.7	28.2	30.3	32.8	33.7	35.0	32.8	31.0	28.5
RV 1e+05 yr	38.1	29.1	29.8	30.3	29.7	30.3	32.3	35.3	36.2	37.7	35.4	33.5	31.0
RV 1e+06 yr	40.4	31.4	31.8	32.0	31.4	32.2	34.1	37.6	38.5	40.2	37.8	35.9	33.3
RV 1e+07 yr	42.6	33.4	33.7	33.5	33.0	33.9	35.8	39.8	40.7	42.4	40.0	38.1	35.4

West Terschelling	Omni	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360
shape	0,45	0,46	0,40	0,32	0,34	0,35	0,33	0,47	0,42	0,42	0,42	0,44	0,45
scale	10,49	8,92	10,52	13,21	12,38	12,24	13,51	9,67	11,72	11,75	11,82	10,31	9,59
reffreq	260,5	7,3	6,2	5,8	4,9	4,1	8,7	98,6	29,9	28,0	12,4	15,6	8,8
RV 10 yr	26,4	17,3	18,5	20,8	19,7	19,3	22,2	23,8	24,3	24,2	22,9	21,1	18,7
RV 100 yr	29,6	21,1	22,1	24,0	23,2	22,8	25,5	27,2	28,0	27,9	27,0	24,9	22,5
RV 1.000 yr	32,5	24,2	25,0	26,6	25,8	25,6	28,1	30,2	31,1	31,1	30,3	28,1	25,7
RV 10.000 yr	35,0	26,8	27,5	28,7	28,1	27,8	30,3	32,9	33,8	33,8	33,3	30,9	28,4
RV 1e+05 yr	37,4	29,2	29,6	30,5	30,0	29,8	32,2	35,3	36,3	36,3	35,9	33,4	30,8
RV 1e+06 yr	39,6	31,4	31,6	32,1	31,7	31,6	33,9	37,6	38,5	38,5	38,2	35,7	33,0
RV 1e+07 yr	41,6	33,4	33,4	33,6	33,3	33,1	35,4	39,7	40,6	40,6	40,4	37,8	35,1

Huibertgat	Omni	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360
shape	0,47	0,47	0,41	0,33	0,35	0,43	0,39	0,49	0,45	0,43	0,46	0,47	0,48
scale	9,74	8,56	10,10	12,93	12,04	9,35	11,25	9,10	10,47	11,69	10,26	9,32	8,63
reffreq	361,8	10,0	10,2	8,2	7,6	14,4	18,9	115,9	56,9	26,4	27,7	28,3	13,8
RV 10 yr	26,3	17,7	19,0	21,0	20,2	18,7	21,5	23,5	24,1	24,3	22,6	21,1	18,5
RV 100 yr	29,5	21,4	22,4	24,2	23,4	22,0	24,7	27,0	27,8	28,2	26,4	24,8	22,2
RV 1.000 yr	32,4	24,5	25,2	26,6	26,0	24,8	27,4	30,0	30,9	31,4	29,6	28,0	25,4
RV 10.000 yr	35,1	27,3	27,7	28,7	28,2	27,2	29,8	32,8	33,7	34,3	32,5	30,8	28,1
RV 1e+05 yr	37,5	29,7	29,8	30,5	30,1	29,4	31,9	35,3	36,2	36,8	35,1	33,3	30,6
RV 1e+06 yr	39,8	32,0	31,8	32,1	31,8	31,4	33,8	37,6	38,5	39,2	37,5	35,7	32,9
RV 1e+07 yr	41,9	34,1	33,6	33,5	33,4	33,2	35,5	39,8	40,7	41,3	39,7	37,8	35,0

Delfzijl	Omni	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360
shape	0,50	0,50	0,44	0,34	0,37	0,44	0,43	0,51	0,48	0,45	0,48	0,50	0,50
scale	9,04	8,03	9,02	12,09	11,07	8,47	9,57	8,46	9,97	10,72	9,41	8,43	7,82
reffreq	465,8	15,2	22,7	13,3	13,0	27,1	34,9	128,7	67,0	43,9	42,0	46,3	20,0
RV 10 yr	26,2	17,9	19,1	20,9	20,0	18,2	20,6	23,1	24,3	24,2	22,5	20,7	18,1
RV 100 yr	29,5	21,6	22,4	23,8	23,1	21,2	23,8	26,6	28,1	27,9	26,3	24,3	21,7
RV 1.000 yr	32,5	24,7	25,1	26,2	25,7	23,7	26,5	29,7	31,4	31,1	29,6	27,4	24,8
RV 10.000 yr	35,2	27,5	27,5	28,3	27,8	26,0	28,9	32,6	34,3	34,0	32,5	30,1	27,6
RV 1e+05 yr	37,8	30,0	29,7	30,0	29,8	28,0	31,1	35,2	37,0	36,6	35,2	32,7	30,1
RV 1e+06 yr	40,1	32,3	31,7	31,7	31,5	29,9	33,0	37,6	39,5	39,0	37,7	35,0	32,4
RV 1e+07 yr	42,4	34,4	33,5	33,1	33,1	31,6	34,9	39,9	41,8	41,2	40,0	37,2	34,6

F.1.2. 16 sectoren

Vlissingen (Noordzee)	22.5	45	67.5	90	112.5	135	157.5	180	202.5	225	247.5	270	292.5	315	337.5	360
shape	0,52	0,52	0,40	0,43	0,54	0,54	0,47	0,40	0,42	0,46	0,48	0,48	0,45	0,46	0,50	0,51
scale	7,26	7,49	10,28	9,60	6,70	6,36	9,05	11,23	11,13	10,52	9,83	9,83	10,69	10,10	8,84	8,10
reffreq	2,18 E+01	2,15 E+01	9,43 E+00	1,18 E+01	2,79 E+01	2,6 E+01	9,39 E+00	1,21 E+01	3,08 E+01	5,84 E+01	4,56 E+01	3,62 E+01	1,58 E+01	1,63 E+01	1,72 E+01	1,65 E+01
RV 10 yr	17,5	17,9	18,8	18,7	16,9	16,2	18,3	21,1	23,3	24,8	23,6	23,2	22,1	21,4	20,0	18,6
RV 100 yr	21,1	21,5	22,2	22,1	20,3	19,5	22,2	24,7	26,9	28,6	27,6	27,2	26,1	25,4	24,0	22,5
RV 1.000 yr	24,2	24,6	24,9	24,9	23,3	22,5	25,4	27,7	30,0	31,8	31,0	30,7	29,5	28,7	27,5	25,8
RV 10.000 yr	27,0	27,4	27,3	27,4	26,0	25,1	28,2	30,2	32,6	34,8	34,1	33,8	32,5	31,7	30,5	28,8
RV 1e+05 yr	29,6	30,0	29,3	29,5	28,5	27,5	30,7	32,5	35,0	37,4	36,8	36,6	35,2	34,3	33,3	31,5
RV 1e+06 yr	31,9	32,4	31,2	31,5	30,7	29,8	33,0	34,5	37,2	39,9	39,4	39,2	37,6	36,8	35,9	34,0
RV 1e+07 yr	34,1	34,6	32,9	33,3	32,9	31,9	35,1	36,4	39,2	42,2	41,8	41,6	39,9	39,0	38,3	36,3

Gebruikt voor afleiding Vlissingen (KNMI station) , zie paragraaf 7.3.2.

F.2 Statistische onzekerheid

Vlissingen (Noordzee)	10 yr	100 yr	1000 yr	10000 yr	1e+05 yr	1e+06 yr	1e+07 yr
RV	26,6	30,0	33,0	35,8	38,4	40,8	43,0
SD (rel)	0,0233	0,0267	0,0315	0,0369	0,0422	0,0473	0,0523

Hoek van Holland	10 yr	100 yr	1000 yr	10000 yr	1e+05 yr	1e+06 yr	1e+07 yr
RV	26,6	30,0	33,1	35,8	38,4	40,8	43,1
SD (rel)	0,0294	0,0330	0,0378	0,0433	0,0490	0,0542	0,0594

IJmuiden	10 yr	100 yr	1000 yr	10000 yr	1e+05 yr	1e+06 yr	1e+07 yr
RV	26,6	30,1	33,2	36,0	38,6	41,1	43,4
SD (rel)	0,0289	0,0321	0,0373	0,0436	0,0500	0,0562	0,0622

Den Helder	10 yr	100 yr	1000 yr	10000 yr	1e+05 yr	1e+06 yr	1e+07 yr
RV	26,5	29,8	32,8	35,6	38,1	40,4	42,6
SD (rel)	0,0299	0,0307	0,0329	0,0360	0,0396	0,0431	0,0467

West Terschelling	10 yr	100 yr	1000 yr	10000 yr	1e+05 yr	1e+06 yr	1e+07 yr
RV	26,4	29,6	32,5	35,0	37,4	39,6	41,6
SD (rel)	0,0269	0,0292	0,0326	0,0371	0,0414	0,0460	0,0502

Huibertgat	10 yr	100 yr	1000 yr	10000 yr	1e+05 yr	1e+06 yr	1e+07 yr
RV	26,3	29,5	32,4	35,1	37,5	39,8	41,9
SD (rel)	0,0289	0,0300	0,0330	0,0365	0,0405	0,0447	0,0487

Delfzijl	10 yr	100 yr	1000 yr	10000 yr	1e+05 yr	1e+06 yr	1e+07 yr
RV	26,2	29,5	32,5	35,2	37,8	40,1	42,4
SD (rel)	0,0289	0,0292	0,0314	0,0344	0,0376	0,0411	0,0446

G. Actualisatie parameters Volkermodel²⁹

G.1 Beschrijving Volkermodel

In het belastingmodel van de Benedenrivieren wordt sinds de HR2006 gebruik gemaakt van het zogeheten Volkermodel (Volker, 1987) om de correlatie te beschrijven tussen zeewaterstand en windsnelheid. In het Volkermodel geldt voor de conditionele kansverdeling voor de windsnelheid u gegeven de zeewaterstand m en de windrichting r de volgende formule:

$$F_d(u|m,r) = \begin{cases} \frac{1}{1-d} \exp \left[-\exp \left(\frac{-K_r(u) + \frac{\rho_r[m - A_r]}{B_r}}{M_r} \right) \right], & u \leq u_d(m,r) \\ 1, & u > u_d(m,r) \end{cases} \quad (G-1)$$

De conditionele kansverdeling $F_d(u|m,r)$ wordt ook wel aangeduid als een gemodificeerde Gumbelverdeling. De term gemodificeerd slaat op de afkapping van het hoogste deel van de kansverdeling, waarvoor een afknottingspercentage $d=2\%$ wordt gebruikt (Volker, 1987). Toepassing van deze afknotting blijkt noodzakelijk om goede resultaten te krijgen (Geerse et al., 2002). Het deel in de formule achter de term $1/(1-d)$ is de ongemodificeerde Gumbelverdeling.

De kansdichtheid $F_d(u|m,r)$ bestaat in feite uit twee delen: een deel dat volledig afhankelijk is van de zeewaterstand, met parameters p_r , A_r , B_r , M_r , en een deel dat onafhankelijk is van de zeewaterstand – de functie $K_r(u)$, ook wel de transformatietabel van de windsnelheid genoemd.

De parameter p_r is een belangrijke parameter, die in benadering omgekeerd evenredig blijkt te zijn met de spreiding van de conditionele (marginale) kansdichtheid van de windsnelheid $g(u|m,r)$, die uit differentiatie van $F_d(u|m,r)$ volgt. In Volker (1987) is de parameter p_r bepaald met behulp van de maximum likelihood op 30 simultane waarnemingen van windsnelheid en zeewaterstand.

De parameters A_r en B_r waren in het originele Volkermodel de parameters van de exponentiële verdeling van de zeewaterstand bij richting r . In Geerse et al. (2002) is voor iedere richting r een exponentiële verdeling met parameters A_r en B_r gefit aan de vigerende zeewaterstandstatistiek. De parameter M_r is een schaalparameter die wiskundig gezien overbodig is, want men kan ook de waarden van A_r/M_r en B_r/M_r schatten ofwel M_r gelijk aan 1 kiezen, zie Geerse et al. (2002). Echter, M_r is in het verleden voor sommige richtingen ongelijk aan 1 gekozen. Als M_r wel gelijk aan 1 wordt gekozen voor alle richtingen, dan zullen de waarden van $K_r(u)$ en p_r ook moeten worden aangepast.

De functie $K_r(u)$ wordt zo gekozen dat de conditionele kansverdeling van de windsnelheid samen met de marginale statistiek van de zeewaterstand tot de juiste, opgegeven marginale statistiek van de windsnelheid leidt.

²⁹ De bijlage is deels overgenomen uit paragraaf 3.2 en bijlage B1 van Caspers et al. (2026), waarin dezelfde actualisatie van de parameters in het Volkermodel is uitgevoerd gebaseerd op basis van de voorlopige nieuwe zeewaterstandstatistiek, die sindsdien nog een kleine wijziging heeft ondergaan.

Formule (G-2) geeft aan hoe de onderschrijdingskans van de windsnelheid gegeven de windrichting bepaald kan worden uit formule (G-1) in combinatie met de zeewaterstandstatistiek:

$$F(u|r) = \int F_d(u|m,r)g(m|r)dm \quad (G-2)$$

In deze formule is $F(u|r)$ de onderschrijdingskans van de windsnelheid bij gegeven windrichting. De term $g(m|r)$ is de kansdichtheid van de zeewaterstand bij gegeven windrichting. Deze volgt via (numerieke) differentiatie uit de onderschrijdingskans van de zeewaterstand bij gegeven windrichting.

De functie $K_r(u)$ wordt dus zo gekozen dat $F(u|r)$ overeenkomt met de opgegeven marginale kansverdeling voor de windsnelheid. In Hydra-NL wordt de functiewaarde $K_r(u)$ numeriek berekend. Ten behoeve van Hydra-Ring is een kwadratische benaderingsfunctie gefit aan de functie $K_r(u)$. De parameters a_r , b_r en c_r van deze kwadratische fit zijn invoer voor Hydra-Ring, zie ook paragraaf G.3.

G.2 Actualisatie parameters zeewaterstandstatistiek

Het Volkermodel is gespecificeerd in formule (G-1). Aanpassing van de windstatistiek en/of de zeewaterstandstatistiek vraagt om actualisatie van de modelparameters. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen parameters die betrekking hebben op de marginale statistiek van de zeewaterstand (A_r , B_r , ρ_r en M_r) en parameters van de kwadratische fit aan $K_r(u)$, de transformatietabel van de windsnelheid (a_r , b_r en c_r), die nodig zijn voor Hydra-Ring. De functie $K_r(u)$ moet zoals gezegd zó zijn dat uit de marginale zeewaterstandstatistiek en de conditionele kansdichtheid van de windsnelheid de juiste marginale windstatistiek volgt.

Tabel G-1 geeft zowel de oude parameters (WBI2017) als de geactualiseerde waarden voor BOI2023 o.b.v. de nieuwe zeewaterstandstatistiek, zoals beschreven in hoofdstuk 6. De parameterwaarden voor WBI2017 zijn overgenomen uit Geerse et al. (2002). Onder de tabel geven we een nadere toelichting op de wijzigingen.

Wind- richting	Oud (WBI2017)				Nieuw (BOI2023)			
	A_r	B_r	ρ_r	M_r	A_r	B_r	ρ_r	M_r
22,5°	0,000	1,000	0,000	1,00	0,000	1,000	0,000	1,00
45,0°	0,000	1,000	0,000	1,00	0,000	1,000	0,000	1,00
67,5°	0,000	1,000	0,000	1,00	0,000	1,000	0,000	1,00
90,0°	0,000	1,000	0,000	1,00	0,000	1,000	0,000	1,00
112,5°	0,000	1,000	0,000	1,00	0,000	1,000	0,000	1,00
135,0°	0,000	1,000	0,000	1,00	0,000	1,000	0,000	1,00
157,5°	0,000	1,000	0,000	1,00	0,000	1,000	0,000	1,00
180,0°	0,000	1,000	0,000	1,00	0,000	1,000	0,000	1,00
202,5°	0,000	1,000	0,000	1,00	0,000	1,000	0,000	1,00
225,0°	1,227	0,122	0,506	1,00	1,523	0,102	0,506	1,00
247,5°	1,230	0,169	0,605	1,00	1,619	0,138	0,605	1,00
270,0°	1,224	0,228	0,477	0,67	1,695	0,186	0,477	0,67
292,5°	1,195	0,262	0,613	0,67	1,694	0,220	0,613	0,67
315,0°	0,887	0,326	0,768	0,67	1,516	0,247	0,768	0,67
337,5°	0,904	0,292	0,677	0,67	1,368	0,235	0,677	0,67
360,0°	0,873	0,236	0,356	0,67	1,225	0,195	0,356	0,67

Tabel G-1: Oude en nieuwe parameters Volkermodel m.b.t. zeewaterstandstatistiek (gearceerd = aangepast).

Bij Tabel G-1 merken we het volgende op:

1. Voor de oostelijke windrichtingsectoren (NNO t/m ZZW) worden in de probabilistische modellen voor de Benedenrivieren geen stormvloeden beschouwd. Er wordt alleen met springtij gerekend, waarbij de Europoortkering ook nooit zal sluiten. De parameters A_r , B_r , p_r en M_r zijn voor alle oostelijke windrichtingen dusdanig dat dit deel in formule (G-1) voor $F_d(u|m,r)$ wegvalt. M.a.w.: er wordt geen rekening gehouden met de correlatie tussen windsnelheid en zeewaterstand. Bij de actualisatie verandert er daarom niks in de parameterwaarden voor de oostelijke richtingen.
2. Zoals aangegeven in paragraaf G.1, is p_r de parameter die feitelijk de mate van correlatie bepaalt. Deze is in benadering omgekeerd evenredig met de spreiding van de conditionele (marginale) kansdichtheid van de windsnelheid $g(u|m,r)$. Deze parameter heeft dus niet alleen betrekking op de marginale statistiek voor de zeewaterstand. Voor WBI2017 is deze parameter echter niet aangepast t.o.v. de waarden zoals beschreven in Geerse et al. (2002), met als argument dat de zeewaterstandstatistiek ongewijzigd bleef, hoewel destijds wel op nieuwe windstatistiek voor Schiphol is overgestapt. Voor de huidige actualisatie geldt dat er op nieuwe zeewaterstandsstatistiek wordt overgestapt, en dat de windstatistiek voor Schiphol (voorlopig) ongewijzigd blijft (zie hoofdstuk 7). Dit maakt het uitdagend om de parameter p_r af te leiden, aangezien de marginale statistieken op twee verschillende datareeksen zijn gebaseerd. Simultane data, welke bij de marginale statistieken aansluit waarvoor de correlatie tussen de zeewaterstand bij Hoek van Holland en de windsnelheid bij Schiphol wordt bepaald, is dan ook niet beschikbaar. Vanwege deze inconsistentie is voor nu gekozen om de parameter p_r ongewijzigd te laten t.o.v. WBI2017. De gevoeligheid hiervan is onderzocht en beschreven in Caspers et al. (2026).
3. De parameter M_r is eigenlijk een redundante parameter, zoals reeds opgemerkt in paragraaf G.1. In overleg met RWS is voor nu gekozen om de parameter M_r gelijk te houden aan WBI2017, met het advies om deze overal op 1 te zetten mocht in de toekomst de correlatie opnieuw worden afgeleid (en dus de parameter p_r worden aangepast), zie Caspers et al. (2026).
4. De parameters A_r en B_r waren in het originele Volkermodel de parameters van de exponentiële verdeling van de zeewaterstand conditioneel op de windrichting. In Geerse et al. (2002) is voor iedere richting r een exponentiële verdeling met parameters A_r en B_r gefit aan de toen vigerende zeewaterstandstatistiek. Dezelfde werkwijze is gevolgd om A_r en B_r af te leiden voor de nieuwe zeewaterstandstatistiek. Hierbij is uitgegaan van de statistiek voor Hoek van Holland en gebruik gemaakt van de conditionele overschrijdingskansen van de zeewaterstand voor een 12-uursperiode en de momentane kansen op de windrichting, zoals beschreven in respectievelijk hoofdstuk 6 en 7.

Conform de werkwijze in Geerse et al. (2002), zijn de parameters A_r en B_r zo gekozen dat ze (na omrekening van de 12-uursperiode naar het winterhalfjaar) het 100 en 1.000 jaar kwantiel van de zeewaterstandstatistiek exact reproduceren. Hieronder geven we de daaruit volgende formules voor de parameters A_r en B_r van de gefitte exponentiële verdeling.

Het verband tussen $P(M > m|r)$, de conditionele overschrijdingskansen van zeewaterstand m gegeven windrichting r voor een 12-uursperiode, en $\Psi(m,r)$, de

overschrijdingsfrequentie van zeewaterstand m in een winterhalfjaar in combinatie met windrichting r , is als volgt:

$$P(M > m|r) = \frac{\Psi(m, r)}{NP(r)} \quad (\text{G-3})$$

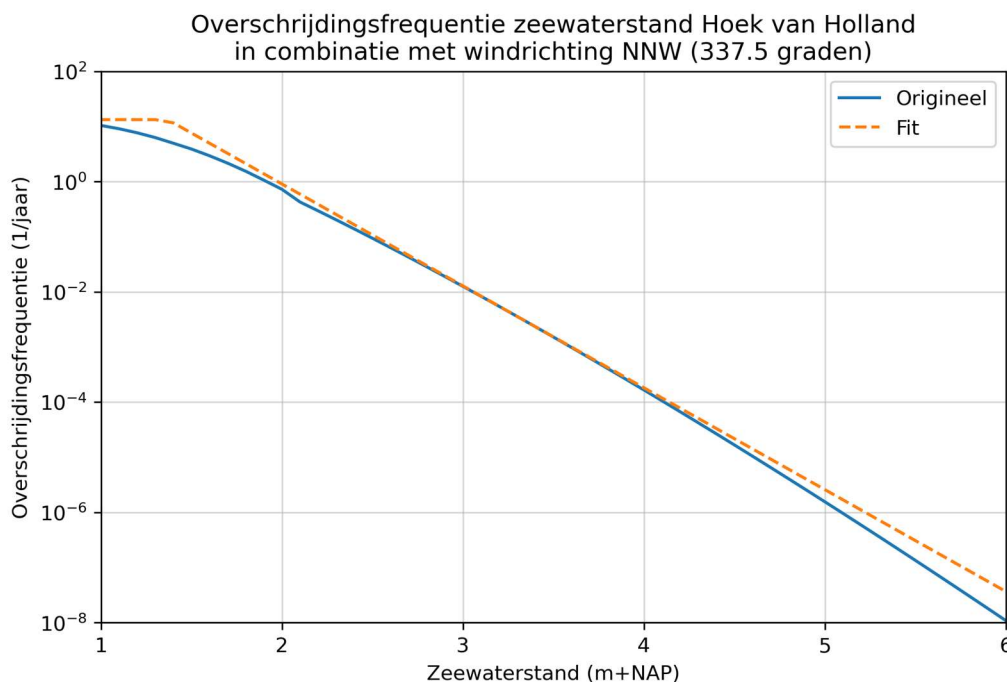
Met $N = 360$ het aantal 12-uursperioden in een winterhalfjaar en $P(r)$ de kans op de windrichting.

Definiëren we nu m_{100} en m_{1000} als het 100 en 1.000 jaar kwantiel van de zeewaterstand (bij windrichting r), ofwel $\Psi(m_{100}, r) = 1/100$ en $\Psi(m_{1000}, r) = 1/1.000$ per (winterhalf)jaar, dan kan aangetoond worden, dat voor parameters A_r en B_r moet gelden:

$$A_r = (1 + c) \cdot m_{100} - c \cdot m_{1000} \text{ met } c = 2 + \log_{10}[NP(r)] \quad (\text{G-4})$$

$$B_r = \frac{m_{1000} - m_{100}}{\ln(10)}$$

Figuur G-1 geeft bij wijze van voorbeeld de overschrijdingsfrequentie van de zeewaterstand in combinatie met windrichting NNW, op basis van zowel de originele conditionele overschrijdingskansen als de gefitte exponentiële verdeling met de parameters A_r en B_r volgens bovenstaande formule. In de figuur is goed te zien dat met deze parameterkeuze de zeewaterstanden met overschrijdingsfrequentie $1/100$ en $1/1.000$ per (winterhalf)jaar exact gereproduceerd worden. Hierbij merken we op dat in Geerse et al. (2002) wordt gesteld dat de benadering van de conditionele overschrijdingskansen met de exponentiële fit niet heel nauwkeurig hoeft te zijn.



Figuur G-1: Originele en gefitte overschrijdingsfrequentie van zeewaterstand in combinatie met de windrichting NNW voor Hoek van Holland (voor bepaling parameters A_r en B_r Volkermodel).

G.3 Transformatietabel windsnelheid

De vorige paragraaf beschrijft de actualisatie van de parameters A_r , B_r , ρ_r en M_r in formule (G-1) voor $F_d(u|m,r)$, de onderschrijdskans van de windsnelheid gegeven de zeewaterstand en de windrichting. Zoals uitgelegd in paragraaf G.1, kan door middel van integratie uit $F_d(u|m,r)$ en de conditionele kansdichtheid van de zeewaterstand de kansverdeling $F(u|r)$ bepaald worden, dat wil zeggen: de conditionele onderschrijdskans van de windsnelheid gegeven de windrichting. De functie $K_r(u)$ in het Volkermodel, de zogeheten transformatietabel van de windsnelheid, moet zodanig zijn dat deze – bij gegeven A_r , B_r , ρ_r en M_r – door genoemde integratie de juiste marginale kansverdeling voor de windsnelheid oplevert.

Hydra-NL berekent zelf de waarde van $K_r(u)$ op het rooster dat gebruikt wordt voor de numerieke integratie. Voor Hydra-Ring is het echter nodig om een functiebeschrijving te hebben van $K_r(u)$. Voor WBI2017 is een tweedegraads polynoom gefit aan de functie $K_r(u)$. De parameters a_r , b_r en c_r van de kwadratische functie $a_ru^2+b_ru+c_r$ vormen invoerparameters voor Hydra-Ring. Om die coëfficiënten af te leiden voor de nieuwe statistiek van het KNMI, is de transformatietabel opnieuw berekend, uitgaande van de nieuwe zeewaterstandstatistiek en de parameters A_r , B_r , ρ_r en M_r zoals in paragraaf G.2, en vervolgens een tweedegraads polynoom gefit met behulp van de kleinste kwadratenmethode. Hierbij is uitgegaan van de zeewaterstandstatistiek voor Hoek van Holland en gebruik gemaakt van de conditionele overschrijdskansen van de zeewaterstand voor een 12-uursperiode.

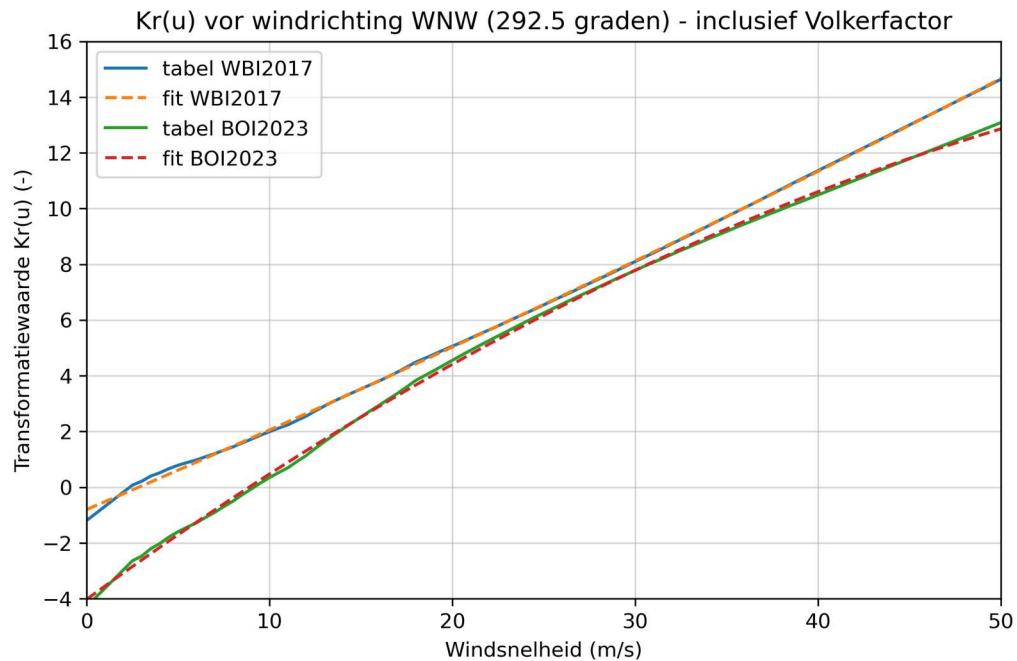
In de probabilistische modellen wordt gebruik gemaakt van windstatistiek voor Schiphol exclusief en inclusief de zogeheten Volkerfactor (zie paragraaf 7.2.3). Deze windstatistiek is ongewijzigd ten opzichte van WBI2017. Voor het afleiden van de parameters a_r , b_r en c_r is uitgegaan van de windstatistiek exclusief statistische onzekerheid. Dit omdat Hydra-Ring wind- en zeewaterstandsstatistiek exclusief statistische onzekerheid hanteert en deze als aparte stochast beschouwd. Tabel G-2 geeft het resultaat van de fit voor de varianten excl./incl. Volkerfactor. Hierin is voor de volledigheid per windrichting ook de afknottingsparameter d opgenomen.

Wind- richting	Exclusief Volkerfactor				Inclusief Volkerfactor			
	a_r	b_r	c_r	d	a_r	b_r	c_r	d
22,5°	0,000360	0,5845	-2,9585	0	0,000360	0,5845	-2,9585	0
45,0°	0,001985	0,6128	-3,4321	0	0,001985	0,6128	-3,4321	0
67,5°	0,001010	0,6598	-3,7750	0	0,001010	0,6598	-3,7750	0
90,0°	0,000751	0,7219	-3,6661	0	0,000751	0,7219	-3,6661	0
112,5°	0,000345	0,7837	-3,5601	0	0,000345	0,7837	-3,5601	0
135,0°	0,002521	0,7542	-3,7323	0	0,002521	0,7542	-3,7323	0
157,5°	0,000568	0,6923	-3,8043	0	0,000568	0,6923	-3,8043	0
180,0°	0,002038	0,5846	-3,4719	0	0,002038	0,5846	-3,4719	0
202,5°	0,001185	0,4556	-3,0199	0	0,001185	0,4556	-3,0199	0
225,0°	-0,003091	0,5013	-4,7783	0,02	-0,003683	0,5365	-4,9597	0,02
247,5°	-0,002736	0,5115	-4,8137	0,02	-0,003035	0,5386	-4,9522	0,02
270,0°	-0,002714	0,4114	-3,8602	0,02	-0,003037	0,4362	-3,9864	0,02
292,5°	-0,002338	0,4437	-3,8425	0,02	-0,002804	0,4779	-4,0237	0,02
315,0°	-0,001266	0,4632	-3,4366	0,02	-0,001790	0,5009	-3,5519	0,02
337,5°	-0,001688	0,4489	-2,9820	0,02	-0,002303	0,4861	-3,0743	0,02
360,0°	-0,002411	0,3335	-1,6722	0,02	-0,002414	0,3418	-1,6376	0,02

Tabel G-2: Parameters kwadratische fit $K_r(u) = a_ru^2+b_ru+c_r$, exclusief en inclusief Volkerfactor.

Figuur G-2 geeft bij wijze van voorbeeld de functie $K_r(u)$ en de bijbehorende kwadratische fit voor Hoek van Holland met windrichting WNW, voor zowel de WBI2017-statistiek als de nieuwe situatie met zeewaterstandstatistiek conform De

Valk en Van den Brink (2025), zoals beschreven in hoofdstuk 6. De lijnen voor WBI2017 komen overeen met Figuur 4.4 in Chbab (2017). Hieruit kunnen we concluderen dat de fit voor $K_r(u)$ op een juiste manier is uitgevoerd



Figuur G-2: Originele transformatietabel Volkermodel en gefit tweedegraads polynoom bij windrichting WNW te Hoek van Holland voor zowel de WBI2017-statistiek als de nieuwe situatie met zeewaterstandstatistiek uit De Valk en Van den Brink (2025), zie hoofdstuk 6.

H. Duurlijnen afvoerstatistiek ontwerp (2075 en 2125)

Deze bijlage presenteert de informatie over de duurlijnen voor de Rijn bij Lobith, de Maas bij Borgharen en de Vecht bij Dalfsen op basis van de topduren zoals beschreven in hoofdstuk 4 en de overschrijdingskansen zonder onzekerheid in de zichtjaren 2075 en 2125 zoals beschreven in hoofdstuk 11. Bijlage A beschrijft de toegepaste methode. Na toepassing van de methode is de duurlijn vastgelegd op basis van een beperkt aantal knikpunten (conform de werkwijze voor 2035).

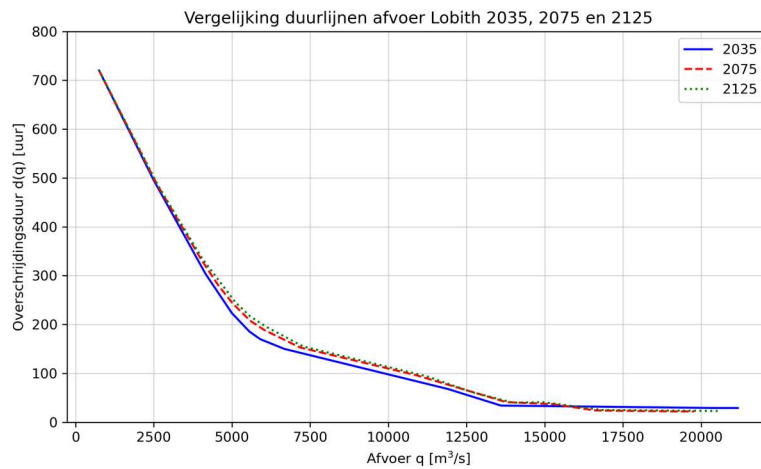
H.1 Rijn bij Lobith

Afvoer [m ³ /s]	Overschrijdingsduur per top [uur]
750	720
2.600	487
4.025	332
4.575	279
5.025	243
5.575	208
6.025	189
7.175	153
10.900	96
13.775	41
15.250	37
16.625	24
19.175	22
19.775	22

Tabel H-1: Overschrijdingsduur per top ("duurlijn") afvoer Rijn bij Lobith voor 2075.

Afvoer [m ³ /s]	Overschrijdingsduur per top [uur]
750	720
2.650	483
4.050	335
5.100	246
5.575	217
6.075	196
7.275	155
11.225	94
12.650	62
13.975	40
14.950	41
16.825	25
20.375	23
20.550	23

Tabel H-2: Overschrijdingsduur per top ("duurlijn") afvoer Rijn bij Lobith voor 2125.



Figuur H-1: Vergelijking duurlijnen afvoer Rijn bij Lobith 2035, 2075 en 2125.

H.2

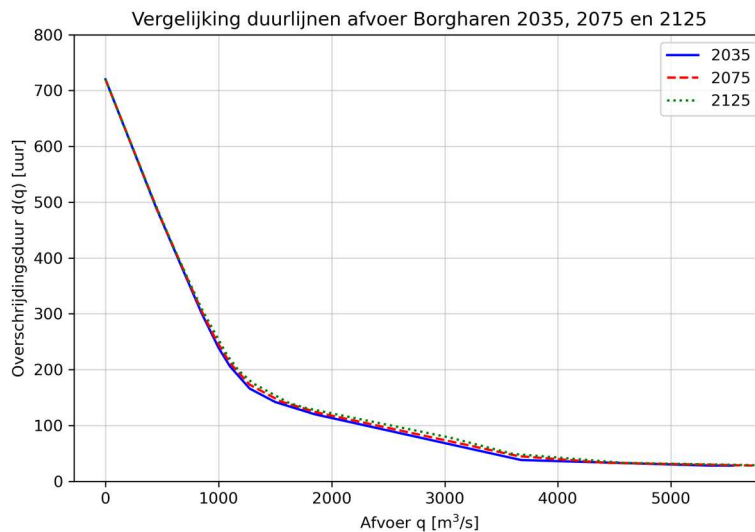
Maas bij Borgharen

Afvoer [m ³ /s]	Overschrijdingsduur per top [uur]
0	720
475	478
850	305
975	254
1.100	212
1.275	173
1.550	143
1.875	123
3.650	45
4.425	33
5.750	28
5.900	28

Tabel H-3: Overschrijdingsduur per top ("duurlijn") afvoer Maas bij Borgharen voor 2075.

Afvoer [m ³ /s]	Overschrijdingsduur per top [uur]
0	720
400	516
600	420
850	309
1.075	226
1.175	199
1.300	176
1.625	140
1.775	131
3.050	78
3.600	49
4.575	33
5.925	28
6.100	28

Tabel H-4: Overschrijdingsduur per top ("duurlijn") afvoer Maas bij Borgharen voor 2125.



Figuur H-2: Vergelijking duurlijnen afvoer Maas bij Borgharen 2035, 2075 en 2125.

H.3

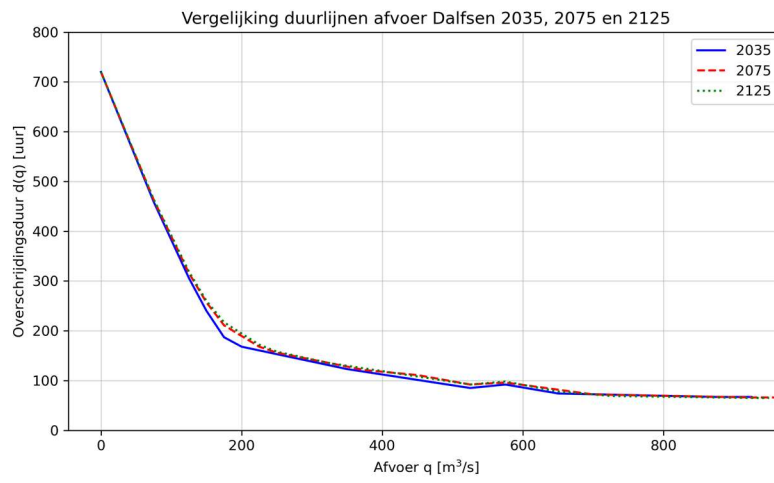
Vecht bij Dalfsen

Afvoer [m³/s]	Overschrijdingsduur per top [uur]
0	720
75	463
125	316
150	257
175	211
225	168
250	156
375	121
450	111
525	92
575	96
700	72
925	66
975	66

Tabel H-3: Overschrijdingsduur per top ("duurlijn") afvoer Maas bij Borgharen voor 2075.

Afvoer [m³/s]	Overschrijdingsduur per top [uur]
0	720
75	464
125	319
150	260
175	217
225	172
250	158
325	135
525	92
575	98
650	78
725	69
925	65
950	65

Tabel H-4: Overschrijdingsduur per top ("duurlijn") afvoer Maas bij Borgharen voor 2125.



Figuur H-2: Vergelijking duurlijnen afvoer Vecht bij Dalfsen 2035, 2075 en 2125.

I. Memo windstatistiek Oosterschelde en Westerschelde

MEMO

Aan: Robert Slomp, Marcel Bottema en Patrick Oosterlo
Van: Thomas Molendijk, Jochem Caspers en Vincent Vuik
Datum: 29 januari 2026
Projectnummer: 5612.10
Onderwerp: Toepassing windcorrectiefactoren voor Westerschelde en Oosterschelde

Inleiding

In De Valk en Van den Brink (2025) is nieuwe wind- en zeewaterstandstatistiek afgeleid voor de Nederlandse Kust. De statistiek is afgeleid voor een aantal locaties die op tientallen kilometers buiten de kust liggen. Deze locaties zijn zo gekozen dat voor de afleiding van de windstatistiek het land geen invloed heeft op de windschuifspanningen.

Voor het gebruik in BOI is echter ook windstatistiek nodig voor de Westerschelde en de Oosterschelde. De keuzes ten aanzien van de statistiek zijn mede afhankelijk van de gekozen windmodellering in de reeds uitgevoerde productiesommen. Dit leidt tot verschillende keuzes voor de Westerschelde en Oosterschelde. Het gegeven dat het WBI2017-windreferentiestation Vlissingen last heeft van forse stedelijke beschuttingseffecten bij wind uit een brede Noordelijke sector heeft ook invloed op de te maken keuzes.

Voor de Westerschelde is in de productiesommen een uniform windveld gehanteerd wat impliceert dat in WBI2017 onbedoeld de lokale beschuttingseffecten van Vlissingen doorwerken op de hele Westerschelde. Het zou beter zijn de windstatistiek op te hangen aan een minder beschutte maar wel representatieve locatie. De monding van de Westerschelde, met daarin de meetlocatie Vlake van de Raan, lijkt daarvoor het meest geschikt. Daarom beogen we voor de Westerschelde de nieuwe windstatistiek van De Valk en Van den Brink (2025) te vertalen naar de locatie Vlake van de Raan. Bij aflandige wind (uit oostelijke of zuidelijke richtingen) zal het daar naar verwachting iets minder hard waaien dan op de enkele tientallen kilometers uit de kust gelegen uitvoerlocaties van De Valk en Van den Brink (2025).

In de meer recent uitgevoerde productiesommen voor de Oosterschelde was men zich intussen bewust van de beschuttingseffecten van KNMI-Vlissingen en is via de bij die productiesommen gehanteerde windvelden reeds gecorrigeerd voor die beschuttingseffecten. Daarom beogen we voor de Oosterschelde de nieuwe windstatistiek van De Valk en Van den Brink (2025) te vertalen naar het

meetstation KNMI-Vlissingen *inclusief* de aan die locatie verbonden beschuttingseffecten.

Dit memo geeft een pragmatische aanpak om de windstatistiek op de Noordzee te vertalen naar de Oosterschelde en Westerschelde door het gebruik van correctiefactoren voor de windkwantiteiten uit de statistiek van De Valk en Van den Brink (2025).

Werkwijze

De werkwijze is gebaseerd op een pilotstudie voor golfberekeningen in de Oosterschelde (Gautier, 2018). In de studie is een ruimtelijk variërend windveld opgehangen aan de meetlocatie Vlissingen. De factoren relatief aan Vlissingen zijn bepaald aan de hand van metingen (boven 6 m/s, persoonlijke communicatie Caroline Gautier) en aan de hand van een combinatie tussen meetdata en HARMONIE. De uiteindelijk in de windvelden toegepaste factoren (Tabel D.2, uit Gautier (2018), hieronder weergegeven) zijn dus een mix van beschuttingseffecten bij Vlissingen in de meetdata en land/water-effecten in HARMONIE windvelden, en dan met afgeronde getallen door experts.

op basis van metingen	uit NOORD (0°N)	uit OOST (90°N)	uit ZUID (180°N)	uit WEST (270°N)
Oosterschelde	1.26	1.06	1.07	0.99
Tholen	0.98	0.79	0.95	0.83
Europlatform	1.21	1.06	1.12	0.93
Lichteiland Goeree	1.23	0.96	1.03	0.94
Vlakte van de Raan	1.24	1.02	1.05	1.00

Tabel D.1 Verhouding windsnelheid op genoemde locatie en te Vlissingen, gebaseerd op metingen 1981 - 2015

combinatie metingen en model	uit NOORD (0°N)	uit OOST (90°N)	uit ZUID (180°N)	uit WEST (270°N)
Oosterschelde	1.25	1.05	1	1
Tholen	1	0.95	0.9	0.95
Europlatform	1.25	1.1	1.1	1
Lichteiland Goeree	1.25	1.05	1	1
Vlakte van de Raan	1.25	1.05	1	1

Tabel D.2 Verhouding windsnelheid op genoemde locatie en te Vlissingen, gebaseerd op zowel metingen als HARMONIE modeluitkomsten

We nemen aan dat de windstatistiek afgeleid in De Valk en Van den Brink (2025) ongeveer overeenkomt met de locatie *Europlatform*. De vertaling van de windstatistiek op Noordzee naar de Westerschelde en Oosterschelde gaat dan via de directionele factoren uit Tabel D.2:

- Westerschelde: *Europlatform* naar *Vlakte van de Raan*
 - o Correctiefactoren Noord: 1.00, Oost: 0.95, Zuid: 0.91 en West: 1.00.
- Oosterschelde: *Europlatform* naar *Vlissingen*
 - o Correctiefactoren Noord: 0.80, Oost: 0.91, Zuid: 0.91 en West: 1.00.

De *Vlakte van de Raan* is gekozen als representatieve locatie voor de Westerschelde omdat deze locatie minder beschuttingseffecten heeft dan de locatie *Vlissingen*. Dit is voor de Westerschelde geschikt. *Vlissingen* is gekozen voor de Oosterschelde

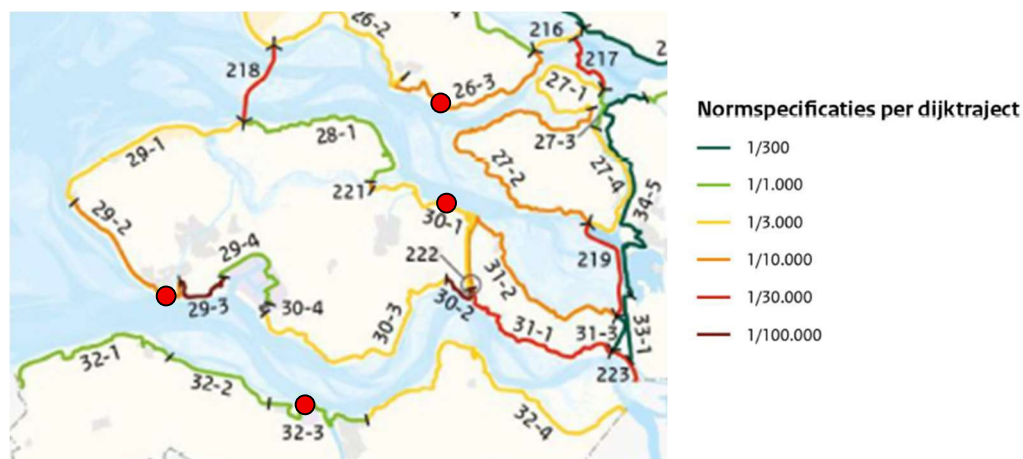
omdat de Oosterscheldeberekeningen het meetstation Vlissingen reeds als ankerpunt hebben gekozen, én het windveld van die berekeningen compenseert voor de lokale beschutting van dit meetstation. Daarom is dit voor de Oosterschelde geschikt.

Resultaat

Het resultaat voor het toepassen van deze factoren is opgenomen in de volgende statistiekbestanden:

- Ovkanswind_Vlissingen_BOI2023_KNMI2025.txt
- Ovkanswind_Vlissingen_BOI2023_KNMI2025_metOnzHeid.txt
- Ovkanswind_Vlissingen_16sectoren_BOI2023_KNMI2025.txt
- Ovkanswind_Vlissingen_16sectoren_BOI2023_KNMI2025_metOnzHeid.txt
- Ovkanswind_MondingWesterschelde_BOI2023_KNMI2025.txt
- Ovkanswind_MondingWesterschelde_BOI2023_KNMI2025_metOnzHeid.txt

Voor dijktraject 29-2 en 32-3 (zie Figuur 1) is een berekening gemaakt van de impact van de toepassing van de windcorrectiefactoren voor de Westerschelde. Voor dijktraject 26-3 en 30-1 is een berekening gemaakt van de impact van de toepassing van de windcorrectiefactoren voor de Oosterschelde (o.b.v. 16 i.p.v. 12 windsectoren). Figuur 2 tot en met Figuur 5 geven een vergelijking tussen een frequentielijn voor de golfhoogte en het hydraulisch belastingniveau op basis van de ongecorrigeerde windstatistiek van het KNMI (geldend voor de Noordzee) en de gecorrigeerde windstatistiek (geldend voor de Westerschelde).

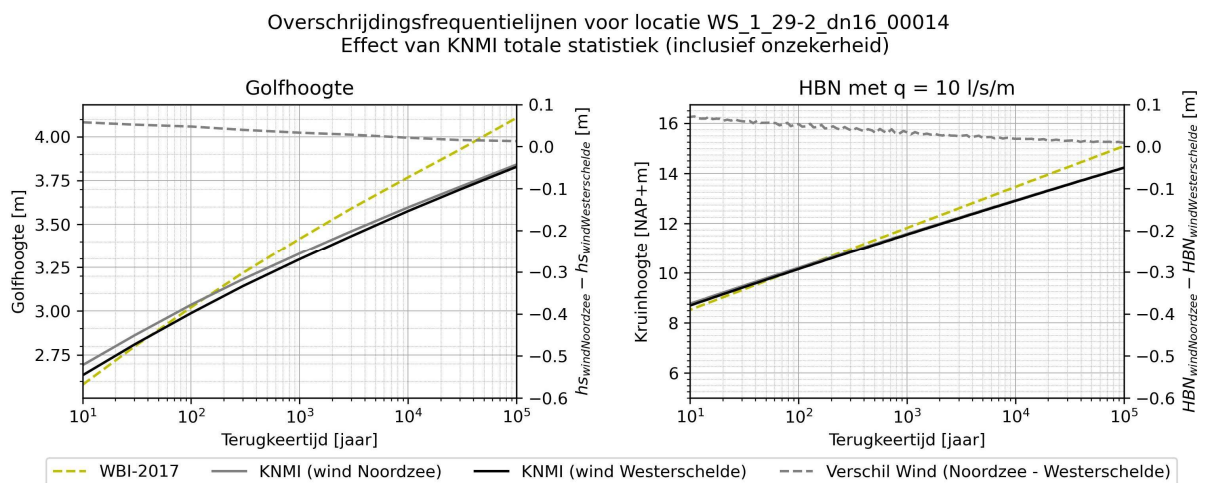


Figuur 1 Overzicht van de dijktrajecten van de Westerschelde en Oosterschelde

In de Westerschelde voor een dijklocatie nabij Vlissingen met dijkoriëntatie 180 graden t.o.v. Noord is de impact van de correctiefactoren maar enkele centimeters op het Hydraulische Belastingniveau (HBN). Voor een dijklocatie nabij Terneuzen met dijkoriëntatie 0 graden t.o.v. Noord is de impact van de correctiefactoren verwaarloosbaar. De factoren rondom Noord zijn dan ook nagenoeg 1. Voor de dijklocaties op de Oosterschelde is de impact van de correctiefactoren op het HBN veel groter. Het toepassen van de gecorrigeerde statistiek versus de statistiek op de

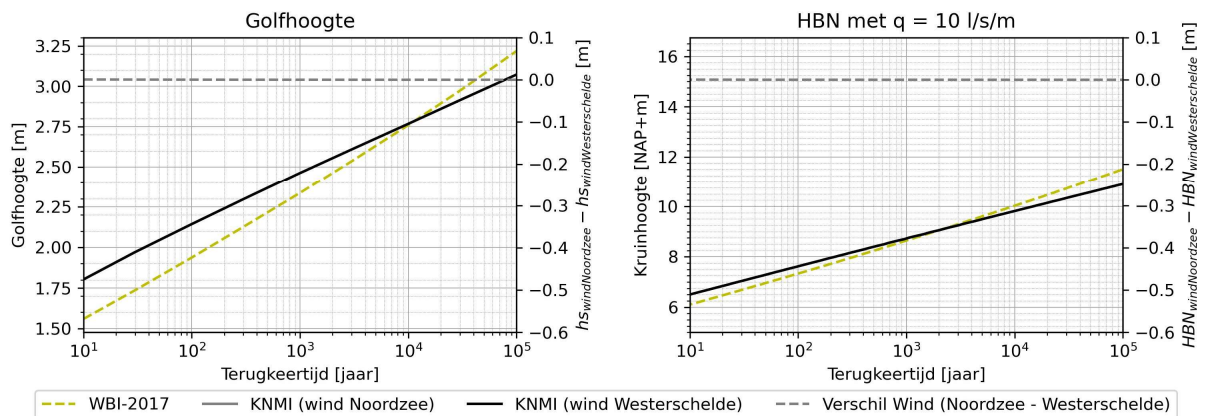
Noordzee is orde 30 tot 60 centimeter bij T10.000 jaar voor dijklocaties Zierikzee (200 graden t.o.v. Noord) en Wemeldinge (30 graden t.o.v. Noord).

Voor de Oosterschelde (Figuur 4 en Figuur 5) laten de resultaten zien dat bij relatief lage herhalingstijden, die binnen het meetbereik vallen, de vertaling van de nieuwe KNMI-offshorostatistiek naar de KNMI-meetlocatie Vlissingen ertoe leidt dat de resulterende golven en HBN-waarden goed overeenkomen met die uit WBI2017. Bij hoge herhalingstijden lijkt het verschil in golven en HBN-waarden vooral te worden veroorzaakt door een andere statistische extrapolatie in de nieuwe statistiek. De lagere extremen in de nieuwe statistiek zijn daarmee vooral toe te schrijven aan de toegepaste extrapolatiemethode: de omnidirectionele T10.000-Upot uit de KNMI-statistiek (De Valk en Van den Brink, 2025) ligt circa 5% lager dan de omnidirectionele T10.000-Upot die in WBI2017 voor Vlissingen is gebruikt (Caires, 2009). Daarbij wordt opgemerkt dat de omnidirectionele kwantielen bij Vlissingen nauwelijks zijn beïnvloed door beschutting, aangezien dit effect met name optreedt bij de iets minder extreme windrichtingen NW-N.



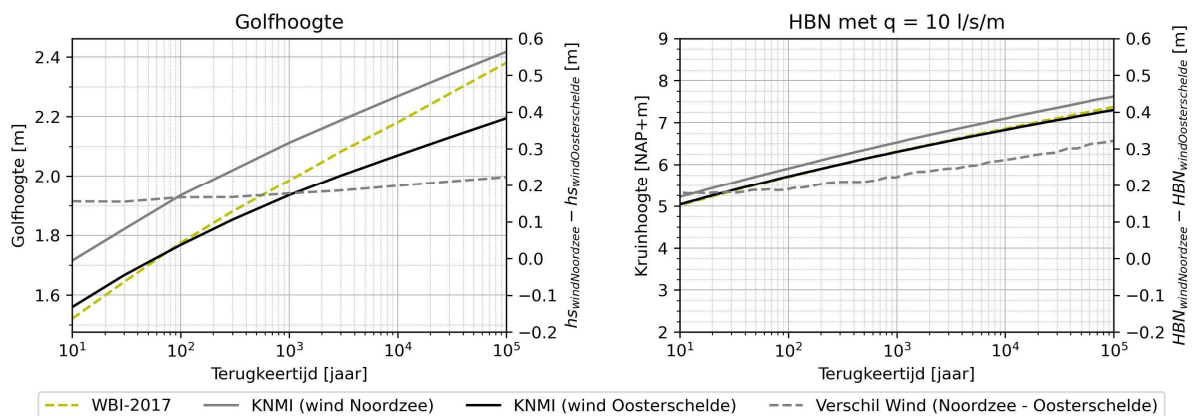
Figuur 2 Impactanalyse toepassing windcorrectiefactoren Westerschelde – uitvoerlocatie Vlissingen (dn 180°N)

Overschrijdingsfrequentielijnen voor locatie WS_1_32-3_dk_00027
Effect van KNMI totale statistiek (inclusief onzekerheid)



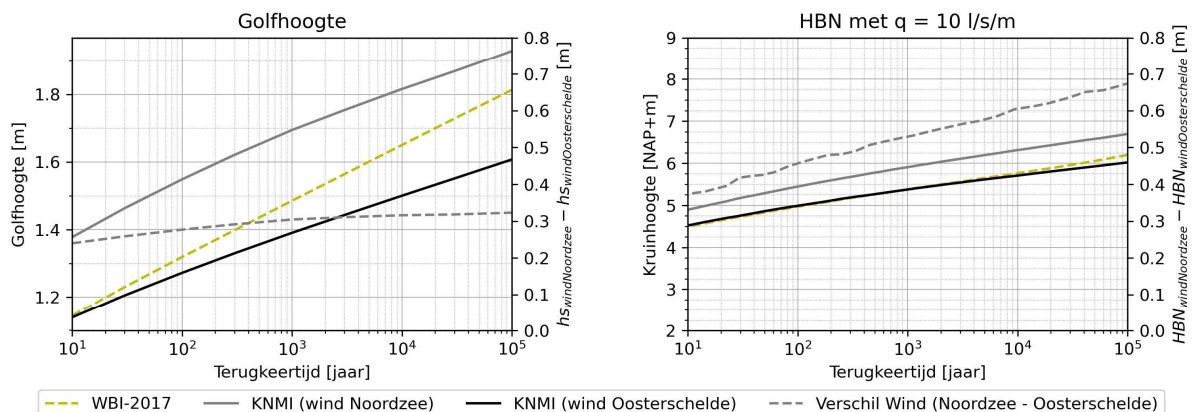
Figuur 3 Impactanalyse toepassing windcorrectiefactoren Westerschelde – uitvoerlocatie Terneuzen (dn 0°N)

Overschrijdingsfrequentielijnen voor locatie OS_1_26-3_dk00025
Effect van KNMI totale statistiek (inclusief onzekerheid)



Figuur 4 Impactanalyse toepassing windcorrectiefactoren Oosterschelde – uitvoerlocatie Zierikzee (dn 200°N)

Overschrijdingsfrequentielijnen voor locatie OS_1_30-1_dk00117
Effect van KNMI totale statistiek (inclusief onzekerheid)



Figuur 5 Impactanalyse toepassing windcorrectiefactoren Oosterschelde – uitvoerlocatie Wemeldinge (dn 30°N)

Validatie

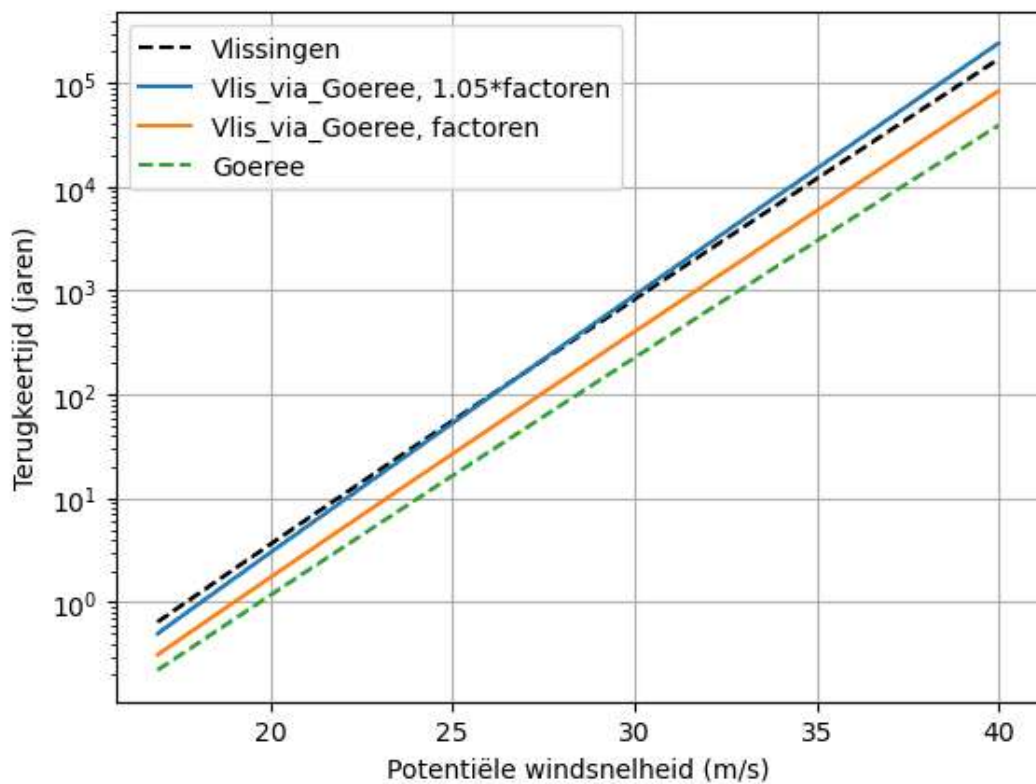
In Caires (2009) is de windstatistiek voor WBI-2017 afgeleid uit windmetingen. De windstatistiek is zowel directioneel als omnidirectioneel beschikbaar. Een exponentiële verdeling is gefit op data boven een threshold u . De exponentiële verdeling heeft de vorm:

$F(x) = 1 - \exp(-\frac{x-u}{\sigma})$, waarbij σ de vormparameter is. Noem u, λ_u de threshold en het aantal clusters per jaar boven de threshold, respectievelijk. In Tabel 3.1, Tabel 3.2, Tabel 3.3 in Caires (2009) worden deze parameters gegeven van elke relevante extreme-waarde verdeling, zowel directioneel als omnidirectioneel.

De parameters voor de omnidirectionele extreme-waarde verdeling zijn gefit op de data uit alle windrichtingen (dus zonder onderscheid te maken tussen windrichtingen). Men kan ook een omnidirectionele extreme-waarde verdeling berekenen door de directionele extreme-waarde verdelingen uit te middelen, op basis van directionele windkansen (kans dat de wind uit een bepaalde richting waait, voor iedere richting).

Met deze statistieken is een validatie van de correctiefactoren mogelijk omdat de statistiek uit Caires (2009) beschikbaar is op de Noordzee (L.E. Goeree) en op de Westerschelde (Vlissingen). De validatie is uitgevoerd door de correctiefactoren toe te passen op de directionele statistiek van L.E. Goeree en zo te vertalen naar Vlissingen. Vervolgens is deze vertaling vergeleken met de directionele statistiek die bij Vlissingen beschikbaar is. Deze vergelijking is omnidirectioneel. De omnidirectionele extreme-waarde verdelingen van Vlissingen en LE-Goeree zijn berekend door te middelen over de directionele extreme-waarde verdelingen op basis van windrichtingskansen (cf. Cbab en De Waal (2017)). De resulterende omnidirectionele verdelingen zijn vergeleken met de gegeven omnidirectionele extreme-waarde verdelingen, wederom afgeleid vanuit de directionele verdelingen³⁰. Dit resulteert in Figuur 6.

³⁰ Merk op dat de 'berekende' omnidirectionele terugkeertijden lang niet overal gelijk liggen met de gerapporteerde omnidirectionele terugkeertijden in Caires (2009). Dit heeft een aantal redenen: 1) De windrichtingskansen die zijn gebruikt zijn niet helemaal accuraat, 2) de cluster-correctie factor introduceert een fout in de directionele verdelingen, die doorwerken in de 'berekende' omnidirectionele verdeling, 3) het is niet per se zo dat de 'berekende' omnidirectionele verdeling vanuit de directionele verdelingen perfect de gegeven omnidirectionele verdeling volgt.



Figuur 6 De stippellijnen zijn de omnidirectionele terugkeertijden, berekend uit directionele terugkeertijden van de respectievelijke meetlocaties. De doorgetrokken lijnen zijn de omnidirectionele terugkeertijden voor Vlissingen berekend door een richtings-afhankelijke correctie op de terugkeertijden van Goeree. Voor de gele lijn zijn de correctiefactoren gebruikt zoals gegeven in Tabel D.2 (Gautier, 2018), in blauw zijn deze correctiefactoren met vijf procent verhoogd (lees hogere reductie van de wind).

Conclusie

Uit Figuur 6 blijkt dat de richtingsafhankelijke correctiefactoren uit Tabel D.2 (Gautier, 2018) een conservatieve correctie is; het beschuttingseffect van het land op de potentiële windsnelheid wordt blijkbaar onderschat. Een verhoging van de correctie met 5% (lees het aannemen van een sterkere mate van beschutting van de wind) sluit in dit specifieke geval beter aan op de directionele statistieken, maar het is niet zeker of deze bevinding te generaliseren is. Hierbij moet gezegd worden dat volgens Caires (2009) de metingen van LE-Goeree significante fouten bevatten, waardoor de extreme-waarde verdelingen bij deze locatie mogelijk aanzienlijk kan afwijken van de gegeven verdelingen. Er is echter geen ander station beschikbaar in Caires (2009) om een validatie op uit te voeren.

Omdat de set factoren uit Tabel D.2 (Gautier, 2018) al een ruwe inschatting is, en ook door experts is afgerond nemen we deze factoren 1-op-1 over zonder eventuele correcties. Daar is immers de locatie LE-Goeree, gegeven de mogelijke significante fouten, niet erg geschikt voor. Bij toepassing op de Westerschelde is de impact door het meenemen van beschuttingseffecten zeer beperkt en toepassing op de Oosterschelde is de impact wel significant. Het toepassen van deze correctiefactoren

zorgt er voor dat de beschuttingseffecten worden verwerkt in de opgestelde windstatistiek door het KNMI (De Valk en Van den Brink, 2025). Dit maakt het mogelijk om deze windstatistiek toe te passen op de Westerschelde en Oosterschelde.

Referenties

- [1] Gautier, C. Golfberekeningen Pilot Oosterschelde WBI2023 - 11200556-000 Deltares, 2018.
- [2] Caires, S. Extreme wind statistics for the Hydraulic Boundary Conditions for the Dutch primary water defences SBW-Belastingen: Phase 2 of subproject "Wind Modelling", 2009.
- [3] De Valk en Van den Brink. Een nieuwe statistische analyse van extreme zeewaterstand en wind op zee op basis van meetgegevens en modeldata – geconsolideerde documentatie. Versie 10 oktober 2025.
- [4] Chbab en de Waal (2017) Achtergrondrapport Hydraulische Belastingen – Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium 2017 [Deltares-rapport 1230087-008-HYE-0001]. Houcine Chbab en Hans de Waal. Deltares, 15 september 2017.