

Leidraad voor het maken van overstromingssimulaties

Update 2024



Leidraad voor het maken van overstromingssimulaties

Update 2024

Auteur(s)

Kymo Slager
Stephan Rikkert

Leidraad voor het maken van overstromingssimulaties

Update 2024

Opdrachtgever	-
Contactpersoon	
Referenties	
Trefwoorden	

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	16-09-2024
Projectnummer	11210368-001
Document ID	11210368-001-ZWS-0002
Pagina's	79
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Kymo Slager	
	Stephan Rikkert	

Samenvatting

Deze richtlijn ondersteunt modellers van overstromingen in Nederland. Het doel van de richtlijn is om het modelleringsproces efficiënter te maken en om de consistentie, reproduceerbaarheid en bruikbaarheid van overstromingssimulaties gemaakt door verschillende modellers te verbeteren. Het rapport richt zich op overstromingen vanuit het primaire watersysteem (grote rivieren, grote meren en de zee) zowel in niet-beschermde gebieden als in gebieden die worden beschermd door waterkeringen. Daarnaast behandelt het rapport overstromingen vanuit het regionale watersysteem. Hieronder vallen overstromingen door dijkdoorbraken langs regionale wateren (zoals kleinere rivieren, kanalen en kleinere meren) en overstromingen van onbeschermde gebied langs regionale wateren.

Overstromingssimulaties worden gebruikt voor risicoanalyses, analyse van het effect van maatregelen, voor gevarenkaarten en in crisisbeheer. In Nederland worden ze opgeslagen in de Landelijke Database Overstromingssimulaties (LDO) en gepresenteerd aan het publiek op de website genaamd “overstroom ik” (<http://www.overstroomik.nl/>), Klimaat-effectatlas ([Overstromingsdiepte - Klimaat-effectatlas](#)), Landelijk Informatiesysteem Water en Overstromingen (LIWO: <https://basisinformatie-overstromingen.nl/>) en de Atlas Leefomgeving (<https://www.atlasleefomgeving.nl/>). Een selectie van de beschikbare overstromingssimulaties wordt gerapporteerd aan de EU voor de Richtlijn Overstromingen.

Deze richtlijn is gebaseerd op eerdere richtlijnen (De Bruijn en Slager, 2018). Een update hiervan was nodig, voornamelijk vanwege nieuwe kennis en inzichten, beleidsontwikkelingen en om meer aandacht te geven aan het regionale watersysteem.

De richtlijn suggereert voor welke omstandigheden overstromingssimulaties moeten worden gemaakt en waar informatie over randvoorwaarden te vinden is. Het bespreekt welk type input nodig is en waar dit te vinden is. Verder geeft het standaardkeuzes voor cruciale keuzes/aannames zoals die over het moment van doorbreken, bresgroei, falen van secundaire dijken, wegen en spoorwegen, en ruimtelijke schaal. Het stelt voor welke informatie moet worden gerapporteerd om reproductie van de simulatie en begrip van de resultaten mogelijk te maken en hoe uitkomsten kunnen worden gecontroleerd.

Ervaringen met eerdere richtlijnen zijn gebruikt om deze richtlijn te schrijven. Het team dat het handboek heeft geschreven, was betrokken bij de uitwerking en het gebruik van de overstromingssimulaties. Het team dat deze richtlijn ontwikkelde, bestond uit mensen van Deltares, Rijkswaterstaat, de provincie Zuid-Holland, HKV en het Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier (HHNK). Rijkswaterstaat initieerde en financierde het project.

Summary

This guidance document supports modelers of inundations in the Netherlands. It aims to make the modelling process more efficient and to increase consistency, reproducibility and usability of flood inundation simulations made by different modelers. The report focuses on inundations from the main waterways (large rivers, large lakes and from the sea) both in unprotected areas and in areas protected by flood defenses. The report also considers inundations along regional waterways such as smaller rivers, canals, and smaller lakes, either due to breaches in the embankments or of areas that are not protected by embankments.

Flood simulations are used for risk analyses, analysis of the effect of measures, for hazard maps and in crisis management. In the Netherlands they are stored in the National Database of Flood simulations (LDO) and presented to the public on the website called “do I get flooded” (<http://www.overstroomik.nl/>), National Information System for Water and Floods (LIWO in short: <https://basisinformatie-overstromingen.nl/>) and the Atlas Living Environment (<https://www.atlasleefomgeving.nl/>). A selection of the available flood simulations is reported to the EU for the Floods Directive.

This guideline is based on previous guidelines (De Bruijn and Slager, 2018). An update was necessary primarily due to new knowledge and insights, policy developments, and to place greater emphasis on the regional water system.

The guideline suggests for which circumstances flood simulations should be made and where to find information on boundary conditions. It discusses what type of input is needed and where this can be found. Furthermore, it gives default choices for crucial choices/assumptions such as those on the moment of breaching, breach growth, failure of secondary embankments, roads and railroads, and spatial scale. It proposes what information should be reported to enable reproduction of the simulation and understanding of the results and how outcomes can be checked.

Experiences with earlier guidelines have been used to write this guideline. The team writing the manual was involved in the elaboration and use of the flood simulations. The team who developed this guidance consisted of people from Deltares, Rijkswaterstaat, the province of South Holland, HKV and the regional Water Authority Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier (HHNK). Rijkswaterstaat initiated and funded the project.

Inhoud

	Samenvatting	4
	Summary	5
1	Inleiding	8
1.1	Aanleiding en context	8
1.2	Doel van het rapport	8
1.3	Scope	9
1.4	Leeswijzer	9
2	Gebruik van overstromingsmodellen in Nederland	10
2.1	Voorbeelden van gebruik	10
2.2	Momenteel beschikbare software voor overstromingsmodellering	14
3	De belangrijkste factoren die van invloed zijn op de overstroming	21
3.1	Overstromingen vanuit het hoofdwatersysteem ten gevolge van dijkdoorbraken	21
3.2	Buitendijkse overstromingen langs het hoofdwatersysteem	23
3.3	Overstromingen als gevolg van doorbraak van regionale keringen	24
3.4	Overstromingen in onbeschermd gebied langs regionale wateren	24
3.5	Overstromingen door intense neerslag	24
4	Keuze van de te berekenen overstromingsscenario's	25
4.1	Hoofdwatersysteem	25
4.2	Buitendijks gebied langs het primaire systeem	29
4.3	Regionaal watersysteem (beschermd)	29
4.4	Regionaal watersysteem (onbeschermd)	30
5	Aanpak bij het maken van een schematisatie	31
5.1	Aanpak voor het maken van een schematisatie	31
5.2	Randvoorwaarden per deelgebied (hoofdwatersysteem)	33
5.2.1	Bovenrivieren	35
5.2.2	(door primaire waterkeringen) Beschermd gebied Maasvallei	38
5.2.3	Kustgebieden	38
5.2.4	Meren	41
5.2.5	Benedenrivieren	43
5.2.6	Buitendijkse gebieden	44
5.3	Overstromingen vanuit het regionale watersysteem	44
5.3.1	Overstromingen als gevolg van doorbraken in regionale waterkeringen	44
5.3.2	Overstromingen van onbeschermd gebied vanuit het regionale watersysteem	44
5.4	Schematiseren van hoogte, ruwheid en waterlopen	44

5.4.1	Keuze voor celgrootte en tijdstapgrootte	46
5.4.2	Het maken van het hoogtemodel	47
5.4.3	Ruwheid	48
5.4.4	Waterlopen in het overstroomde gebied	49
5.4.5	Sturing van kunstwerken in buitenwater en overstroomd gebied	49
5.5	Bresgroei	50
5.6	Standzekerheid potentieel kerende lijnelementen	52
5.7	Varianten	53
5.8	Checken modeluitkomsten	53
6	Rapportage en visualisatie van overstromingsberekeningen	55
6.1	Rapportage	55
6.2	Visualisatie	55
7	Referenties	57
8	Verklarende woordenlijst	60
A	Wanneer nieuwe sommen?	62
B	Gevraagde gegevens en controles van overstromingssimulaties voor de ROR	63
B.1	Gevraagde gegevens	63
B.2	Controles	67
C	Afvoerstatistiek Rijn en Maas	69
C.1	Afvoergolfvormen en herhalingstijden uit Grade 3.0: Maas	69
C.2	Afvoergolfvormen en herhalingstijden uit Grade 3.0: Rijn	70
D	Korte test voor HHNK: het vinden van randvoorwaarden voor enkele locaties	72
D.1	Inleiding	72
D.2	Het beheersgebied van het HHNK en het bestaande model	72
D.3	Het modelleren van extreme condities	73
D.4	Randvoorwaarden voor de twee kustlocaties	74
D.5	Vanuit meren	76

1 Inleiding

1.1 Aanleiding en context

Overstromingsmodellen worden gebruikt om een beeld te schetsen van de mogelijke gevolgen van overstromingen vanuit de zee, rivieren, meren, regionale en lokale watersystemen. In Nederland zijn er de afgelopen decennia vele duizenden overstromingssimulaties gemaakt. Deze worden met een bepaalde regelmaat geactualiseerd.

In 2018 is een groene versie van een landelijke leidraad voor maken van overstromingssimulaties uitgebracht (De Bruijn en Slager, 2018). Samen met experts op het gebied van risicoanalyse en overstromingsmodelleringen is de leidraad opgesteld, ook weer gebaseerd op eerdere bronnen zoals 'Leidraad overstromingsberekeningen voor VNK2' door (Kok & van der Doef, 2008) en het handboek 'Kwaliteitsborging overstromingsmodellen' (Vermeulen & Leenders, 2010).

Voor veel organisaties (bijv. overheden als RWS, provincies, waterschappen, veiligheidsregio's, maar ook verzekeraars, banken en het algemene publiek) en landelijke projecten en diensten die in landelijke kaartbeelden voorzien (bijv. Europese Richtlijn overstromingsrisico's, Landelijk Informatiesysteem Water en Overstromingen en Klimaat-effectatlas) is het belangrijk dat verschillende overstromingssimulaties op hoofdlijnen op een zoveel mogelijk uniforme manier gemaakt worden en de uitkomsten te vergelijken zijn. Een leidraad kan daaraan bijdragen. Voor modelleers is het handig om procedures, voorbeelden en modelsuggesties aangedragen te krijgen bij het maken van het model.

Deze leidraad wordt met regelmaat geüpdatet om nieuwe inzichten te verwerken; bijvoorbeeld vanwege nieuwe inzichten en keuzes met betrekking tot de te gebruiken randvoorwaarden voor simulaties, het beschikbaar komen van nieuwe softwarepakketten en uitfaseren van oude pakketten en vanwege regelmatige updates van belangrijke invoergegevens, zoals hoogtemodellen en landgebruiks-informatie.

1.2 Doel van het rapport

Deze leidraad voor het maken van overstromingssimulaties geeft handvatten voor het kiezen van berekeningen, het maken van schematisaties, het uitvoeren van kwaliteitscontroles en het documenteren van overstromingsberekeningen en de bijbehorende meta-informatie. Het document geeft handreikingen, maar is geen dwingend voorschrift.

Deze leidraad richt zich met name op modelleers en ondersteunt bij vragen als:

- Welke berekeningen kan ik het beste doen en waar moet ik opletten bij keuze voor de berekeningen?
- Welke informatie heb ik nodig en waar haal ik die vandaan?
- Hoe schematiseer ik mijn gebied, wat zijn de belangrijkste keuzes en wat zijn gangbare aannames?
- Welke resultaten en meta-informatie sla ik op?
- Hoe blijf ik consistent met het nieuwe beleid en de nieuwe inzichten en keuzes gebruikt in WBI?
- Hoe ben ik consistent met het beleid en de inzichten voor het regionale watersysteem?
- Hoe kan ik komen tot een hanteerbaar en beheersbaar aantal overstromingssimulaties die antwoorden op vragen in het overstromingsrisicobeheer kunnen ondersteunen?

De leidraad zou idealiter dus:

- *Praktisch* toepasbaar moeten zijn en het eenvoudiger moeten maken om data te vinden, keuzes te maken en berekeningen uit te voeren.
- Leiden tot meer *consistentie* tussen verschillende overstromingsberekeningen, zowel qua aannames en datagebruik als tussen de gekozen randvoorwaarden.
- Leiden tot meer *complete* rapportages van overstromingssimulatie resultaten en de gebruikte uitgangspunten.
- De *reproduceerbaarheid* van overstromingssimulaties vergroten.
- Het aantal overstromingssimulaties op termijn *hanteerbaar* houden, zodat de data op lange termijn beter bruikbaar blijft.

1.3 Scope

De leidraad richt zich op berekeningen van binnen- en buitendijkse overstromingen vanuit het primaire watersysteem, en geeft ook aanbevelingen voor het modelleren van overstromingen als gevolg van dijkdoorbraken vanuit de regionale watersystemen.

Berekeningen van wateroverlast als gevolg van intense neerslag ('piekbuien') vallen buiten de scope van dit rapport, maar zullen verderop in het rapport wel kort worden besproken. Daarnaast is er een handreiking voor gemeentelijke stresstesten die wordt aanbevolen (Klimaatadaptatie Nederland, 2024). De werkwijzen zijn wel op hoofdlijnen in deze leidraad opgenomen. Voor overstromingen van onbeschermde gebieden langs het regionale watersysteem is een standaard werkwijze beschreven door Velner & Spijker (2011) van de STOWA.

1.4 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 en 3 geven overzicht en achtergrondinformatie: Hoofdstuk 2 beschrijft het huidige gebruik van overstromingssimulaties en de verschillende typen overstromingsmodellen welke in gebruik en ontwikkeling zijn. Hoofdstuk 3 beschrijft de belangrijkste factoren die het overstromingspatroon bepalen. Voor deze factoren dienen keuzes gemaakt en gerapporteerd te worden.

In hoofdstuk 4, 5 en 6 worden aanbevelingen gedaan voor keuzes met betrekking tot die factoren en voor rapportage van de keuzes en modelresultaten. Deze hoofdstukken dragen bij aan consistentie tussen berekeningen en helpen modelleers bij het vinden van informatie en het bepalen van een aanpak voor de schematisatie en de te maken berekeningen. In hoofdstuk 4 wordt besproken welke berekeningen nodig zijn om een volledige set te krijgen welke toepasbaar is voor verschillende doelen. In hoofdstuk 5 wordt besproken hoe een schematisatie gemaakt kan worden voor het doen van de berekeningen en in hoofdstuk 6 hoe de resultaten gevisualiseerd en gerapporteerd kunnen worden om berekeningsresultaten bruikbaar en reproduceerbaar te maken.

2 Gebruik van overstromingsmodellen in Nederland

2.1 Voorbeelden van gebruik

Overstromingssimulaties worden veel gebruikt voor vraagstukken gerelateerd aan waterveiligheid, rampenbeheersing en ruimtelijke adaptatie voor binnen- en buitendijkse gebieden. Ter illustratie van het gebruik van overstromingssimulaties worden enkele recente en lopende projecten genoemd waarin overstromingssimulaties een belangrijke rol spelen of gespeeld hebben:

VNK2 (2009-2015):

In dit project zijn overstromingsrisico's per dijkkringgebied in kaart gebracht. Voor dit doel is een representatieve set van overstromingssimulaties gemaakt passend bij de toenmalige normen van de keringen. Het doel van het project was het in beeld brengen van de huidige risico's en het effect van het aanpakken van zwakke plekken in de keringen op overstromingsrisico's (Vergouwe, 2015).

Richtlijn overstromingsrisico's (ROR) en risicokaart.nl:

Deze Europese Richtlijn (2007/60/EC "on the assessment and management of flood risks") (afgekort in Nederland als ROR) vraagt om het in beeld brengen van het overstromde gebied en de waterdiepte in gebieden met een significant overstromingsrisico. In het kader van de ROR zijn in Nederland kaarten gemaakt op basis van waterstanden met drie verschillende overschrijdingskansen: grote kans (~orde 1/10 per jaar), middelgrote kans (~orde 1/100 per jaar) en kleine kans (~orde 1/1.000 per jaar of kleiner). Daarnaast is een kaart beschikbaar bij buitengewone omstandigheden (~orde 1/10.000 per jaar of kleiner).

Voor de overstromingen vanuit het hoofdwatersysteem werden hoofdzakelijk overstromingssimulaties bij maatgevende omstandigheden gebruikt, die ontwikkeld waren voor het VNK2 project. Deze scenario's worden nu langzaam vervangen door nieuwere simulaties. Voor overstromingen vanuit de regionale systemen en voor de buitendijkse gebieden worden waterdieptegegevens aangeleverd door de waterschappen, provincies en RWS. Naast de door de EU verplichte kaarten worden er voor verschillende gebruikersgroepen ook een aantal 'gewenste' kaarten onderhouden, zoals: minimale aankomsttijdenkaart, bronnen van overstroming en potentieel getroffen kwetsbare objecten, zoals IED installaties, instellingen (ziekenhuizen, scholen, tehuizen), rijksmonumenten en overheidsgebouwen (risicokaart.nl). De verplichte kaarten zijn voor het publiek toegankelijk via risicokaart.nl, die doorverwijst naar de Atlas Leefomgeving: <https://www.atlasleefomgeving.nl/kaarten>.

Deltaprogramma Veiligheid/normering primaire waterkeringen:

Voor het Deltaprogramma diende de economisch optimale overstromingskans, het lokaal individueel risico (kans van een individu om te overlijden door overstroming als hij zich permanent zou bevinden op een bepaalde locatie) en het groepsrisico (kans op grote aantallen slachtoffers door een event) bepaald te worden als indicatoren voor respectievelijk de drie criteria economische efficiëntie, gelijkheid/eerlijkheid ('equity') en maatschappelijke ontwrichting welke een rol speelden in de discussie over de nieuwe normen voor de waterkeringen.

Voor alle drie de indicatoren is vooral gebruik gemaakt van de set van overstromingssimulaties die gemaakt was in het kader van het VNK2 project (in opdracht van Deltaprogramma Veiligheid aangevuld met nieuwe simulaties voor de voormalige C-keringen).

Voor het bepalen van de economisch optimale overstromingskans was 'slechts' één getal voor de impact van een doorbraak nodig (en een ruimtelijke beeld), voor het groepsrisico was het totaal aantal slachtoffers horend bij een doorbraak van belang. Voor het bepalen van het lokaal individueel risico (het 'LIR') is de buurt met de hoogste mortaliteitswaarde ten gevolge van overstromingen maatgevend (Min. I&M, 2014). Hiervoor was een ruimtelijk beeld van de overstroming nodig.

Deltaprogramma Ruimtelijke Adaptatie

Het Deltaprogramma Ruimtelijke Adaptatie heeft als doel Nederland in 2050 klimaatbestendig en waterrobuust in te richten om de risico's van wateroverlast, hitte, droogte en overstromingen te beperken. Het programma benadrukt samenwerking tussen gemeenten, waterschappen, provincies en het Rijk, evenals private partijen. Door het uitvoeren van stresstesten en risicodialogen worden kwetsbaarheden (hittestress, wateroverlast, droogte en overstromingen) in kaart gebracht (in de Klimateffectatlas) en strategieën ontwikkeld. Deze strategieën worden vertaald naar uitvoeringsagenda's met concrete maatregelen. Het programma omvat ook regelmatige monitoring, kennisdeling en beleidsaanpassing om de effectiviteit te waarborgen en aan te passen aan nieuwe klimaatontwikkelingen. Het zichtjaar voor ruimtelijke adaptatie is 2050, waarbij – wat betreft overstromingen - tevens een doorkijk wordt gemaakt richting 2100.

Projecten gericht op monitoring waterveiligheid in Nederland:

Het Deltaprogramma, RWS en PBL zijn actief bij het opstellen van monitoring en evaluaties van het deltaprogramma en de uitvoering ervan. In dat kader worden ook vragen gesteld over de actuele waterveiligheid na uitvoering van de eerste (versterkings)maatregelen en op basis van nieuwe inzichten. Ook wordt het effect van veranderingen, zoals klimaatverandering, bodemdaling en economische groei, op overstromingsrisico's bekeken. Om dergelijke vragen te kunnen beantwoorden zijn overstromingssimulaties nodig, passend bij de nieuwe situatie en gebaseerd op de nieuwste inzichten. Als voorbeeld van zo'n project, kan gedacht worden aan de waterveiligheidsmonitor: het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat rapporteert jaarlijks het effect van dijkversterkingsmaatregelen die worden uitgevoerd door het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP) op de waterveiligheid van Nederland. Hierin wordt uitgegaan van een set overstromingsbeelden, en ligt de focus op de verandering van de overstromingskansen (als gevolg van dijkversterkingen).

Projecten gerelateerd aan regionale wateren:

Op regionaal niveau worden overstromingssimulaties met name gebruikt voor waterveiligheidsvraagstukken zoals de normering van regionale keringen en regionale waterlopen (NBW toetsing), lokale maatregelen en crisismanagement.

Er zijn richtlijnen gemaakt voor het bepalen van de norm van keringen langs regionale rivieren (STOWA, 2008), voor boezemkaden (IPO, 1999) en compartimenteringskeringen (STOWA, 2007). De richtlijnen beschrijven in detail welke stappen worden genomen voor het bepalen van de norm van de betreffende kering. Een state-of-the-art methode voor het bepalen van het overstromingsrisico van boezemkaden is in 2015 uitgevoerd (STOWA, 2015).

Ook voor het Ontwikkelingsprogramma Regionale Keringen (ORK) is het van groot belang geschikte overstromingssimulaties te gebruiken: Voortbordurend op de bestaande structuur van het ORK agendeert de “Visie op de regionale waterkeringen 2016” een set van op kennis- en beleidsontwikkeling gerichte vragen. Deze vragen wil men beantwoorden middels onderzoek en kennisontwikkeling. Het gaat ook om beleidsmatige vragen, bijvoorbeeld over het toepassen van een overstromingskansbenadering waarbij slachtoffer risico en/of economische optimalisaties aan bod zouden kunnen komen. Tussen 2019 en 2023 heeft het ORK verbetermogelijkheden van de huidige veiligheidsbenadering laten uitwerken via verschillende studies (STOWA, 2024).

Database

In de Landelijke Database Overstromingen (LDO), in beheer bij het Interprovinciaal Overleg (IPO), worden alle overstromingssimulaties beheerd en beschikbaar gemaakt. Voorbeelden van informatiesystemen/applicaties die van deze database aftappen zijn:

- 1 het Landelijk Informatiesysteem Water en Overstromingen (LIWO) maakt overstromingssimulaties en afgeleide (faalkans)informatie beschikbaar en hanteerbaar voor crisisbeheersing. In de voorbereiding en ten tijde van een overstroming kan basisinformatie worden bekeken en een specifiek dreigingsbeeld worden samengesteld met relevante informatie voor bijvoorbeeld veiligheidsregio's, waterschappen en Rijkswaterstaat. LIWO is voornamelijk gericht op waterprofessionals;
- 2 de Klimaateffectatlas (KEA) stelt gegevens uit LIWO met uitgebreide toelichting beschikbaar ten behoeve van klimaatadaptatie, maar richt zich op een bredere groep professionals;
- 3 Overstroomik.nl is bedoeld om het waterbewustzijn te bevorderen. Burgers kunnen zien wat de maximale waterdiepte ter plaatse van hun woning is bij een overstroming;
- 4 Risicokaart.nl (via Atlas van de Leefomgeving) voor het tonen van omgevingsrisico's en het medium gebruikt in het kader van de Europese Richtlijn Overstromingsrisico's (EU-ROR).

In de toekomst zullen het LDO en LIWO worden verenigd in de Landelijke Voorziening Overstromingsinformatie (LVO). Het doel van de LVO is om alle overstromingsinformatie in Nederland te centraliseren en te bundelen in één gezamenlijk beheersysteem. Dit moet de versnippering van informatie over verschillende organisaties en beheerders, zoals waterschappen, provincies, Rijkswaterstaat en het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, tegengaan. Door één loket te creëren voor overstromingsinformatie (in plaats van de huidige diverse voorzieningen zoals LIWO en LDO), wordt er meer duidelijkheid en uniformiteit geboden. Dit maakt het mogelijk om bij incidenten of crises sneller en eenduidiger te handelen.

Vertaling doelen naar eisen aan berekeningen

Projecten en gebruikers kunnen verschillende eisen stellen aan de kwaliteit, de uitvoerparameters en schaal van overstromingsberekeningen (zie tabel 2.1):

- Voor het bepalen van het *economisch risico* is vaak een schadebedrag horend bij een dijkdoorbraak voldoende. Bij grootschalige overstromingen kan dit schadegetal meestal redelijk goed bepaald worden op basis van simulaties met wat grovere resolutie (100m bijvoorbeeld). Het tijdsverloop van de waterdiepte in het gebied is voor deze vraag niet relevant. De kaart met de maximale waterdiepte is de meest belangrijke uitvoer. Vaak wordt deze gebruikt als invoer voor het schade- en slachtoffermodel SSM2023 (Slager & Wagenaar, 2017) en vertaald naar 1 schadegetal of naar een schadegrid.

- Voor het bepalen van *mortaliteit*, bijvoorbeeld voor de indicator 'basisveiligheid' (LIR), is inzicht in stijgsnelheid van belang. De hoge mortaliteitswaardes worden bepaald door de stijgsnelheid van het water over de eerste 1,5m waterdiepte. Hoge stijgsnelheden treden vaak lokaal op. De resolutie van berekeningen dient klein genoeg te zijn om obstakels en lokale onregelmatigheden goed te kunnen weergeven.
- Voor *crisismanagement* is ook de aankomsttijd van belang. Vaak wordt een filmpje gebruikt. Daarnaast is voor crisismanagement is een relatief kleine resolutie vaak cruciaal om goede inschattingen te kunnen maken van lokale waterdieptes en stroom- en stijgsnelheden (verwachte aantal slachtoffers neemt toe met toenemende stroom- en stijgsnelheid). Er dient echter wel rekening te worden gehouden met de grote onzekerheid in de modeluitkomsten, denk hierbij aan de breslocatie, het startmoment van de bres en hoe de bresgroei zich ontwikkeld.

Over het algemeen geldt dat een parameters zo goed als mogelijk worden ingeschat. Dit wordt nog belangrijker wanneer een hoger detailniveau wordt gevraagd. Denk hierbij aan parameters als bresgroei, moment van breken, en met name van de ligging en standzekerheid van secundaire/regionale keringen, spoordijken en andere elementen die het water (enige tijd) kunnen keren.

Tabel 2.1 Overzicht van een aantal verschillende typen projecten waarin overstromingssimulaties van groot belang zijn.

Vraagtype	Rol van overstromingssimulaties	Eisen aan de uitkomsten van overstromingssimulaties
Gevarenkaarten voor de ROR en risicokaart.nl	Waterdieptekaarten op basis van hoogwaterstanden met overschrijdingskans 1/10, 1/100, 1/1.000, 1/10.000 en eventueel kleiner voor inzicht in overstroombare gebieden en een indicatie van de maximale waterdiepte (als 'klimaatscenario')	<ul style="list-style-type: none"> • Parameter: maximale waterdiepte, kans van optreden • Kaarten en duidelijke visualisatie. • Tijdsverloop minder relevant. • Modelresolutie en modeltype passend bij de vraag (ruimtelijke schaal) uit de ruimtelijke ordening of van burger. • Simulatie passend bij actuele en/of normsituatie.
Klimaatadaptatie	Idem aan gevaarokaarten voor de ROR en risicokaart.nl. Overstromingskanskaarten t.b.v. ruimtelijk afwegingskader klimaatadaptief gebouwde omgeving	<ul style="list-style-type: none"> • Parameters: maximale waterdiepte, kans van optreden, duur. • Uitwerking van verschillende scenario's voor bepalen risico en afweging maatregelen • Gevraagd om steeds meer detail • Aandacht voor lange termijn overstromingsrisico's, zichtjaar 2050 en 2100+
Crisis management	Bepalen veilige gebieden, droge verdiepingen, en beschikbare tijd om weg te komen.	<ul style="list-style-type: none"> • Parameters: Aankomsttijd, Waterdiepteverloop in de tijd, einddiepte. • Simulatie passend bij dreigingsbeeld (koude en warme fase).
Risico-informatie (bv. MKBA van maatregelen, of voor normering boezemkades)	Input voor het berekenen van economisch optimale overstromingskans, groepsrisico en lokaal individueel risico	<ul style="list-style-type: none"> • Geschikt om indicatie te geven van schade, aantal getroffen en slachtoffers • Lokale mortaliteit goed berekend (dus goed gedocumenteerde aannames over ligging en standzekerheid obstakels belangrijk (zie hoofdstuk 5) • Simulaties passend bij te onderzoeken normen/maatregelen

2.2 Momenteel beschikbare software voor overstromingsmodellering

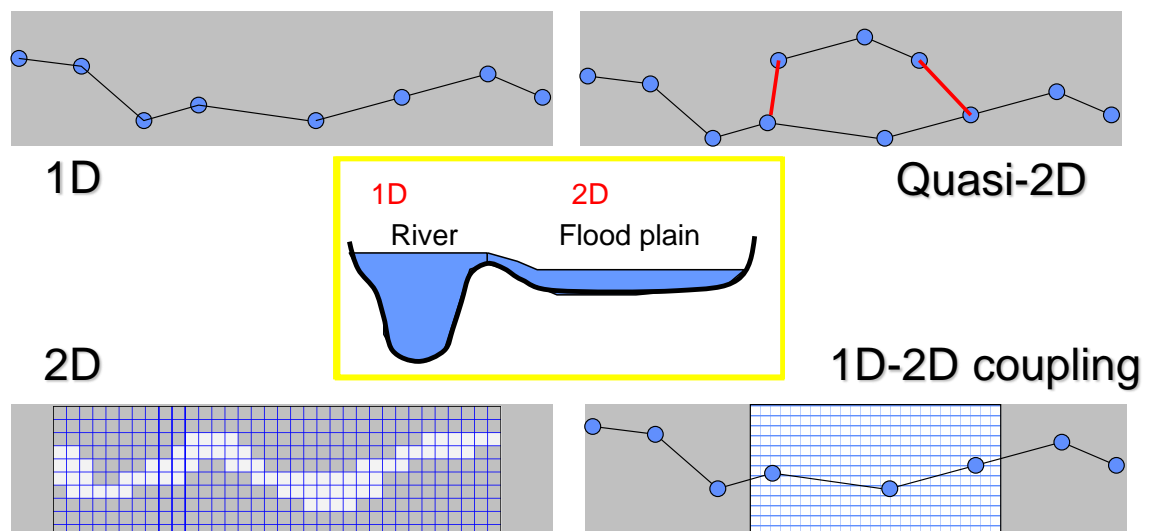
Overstromingen kunnen gesimuleerd worden met verschillende typen hydraulische modellen zoals 1D, 2D en 1D2D modellen (zie Figuur 2.1). Voor het modelleren zijn verschillende softwarepakketten op de markt en gangbaar in Nederland.

De meeste bestaande simulaties zijn gemaakt met behulp van D-Hydro, SOBEK1D2D, Delft-FLS of met 3Di. Dit zijn twee dimensionale of gekoppelde 1 en 2 dimensionale modellen. Verder is voor een aantal kleine gebieden beschermd door primaire keringen en voor veel overstromingen uit regionale waterlopen de zogenaamde bakjesmethode, ofwel een 0-Dimensionale (0D) model gebruikt. Voor buitendijkse gebieden werd verder het WAQUA model toegepast. WAQUA is ondertussen opgevolgd door de D-Hydro Suite.

Voor toekomstige simulaties zijn op dit moment D-Hydro, 3Di, DFlow-Flexible Mesh (DFlow-FM) en de Tygron Water Module beschikbaar. Het oude pakket Delft-FLS wordt niet of nauwelijks meer gebruikt, omdat dit pakket (al jaren) niet meer ondersteund wordt.

Dit hoofdstuk geeft een beknopt overzicht van typen modellen en beschrijft het type vragen en gebieden dat bij deze methodes past. Een overzicht is gegeven in tabel 2.2. Een benchmark van modellen op theoretische casussen gericht op overstromingen door hevige regenval is gedaan door STOWA (Henckens en Engel, 2017). Ook is een praktijkcase voor Kockengen met meerdere modellen berekend. De resultaten daarvan werden sterk bepaald door de regenhoeveelheid en topografie. Alle modellen gaven goede resultaten voor die case. Een praktijkcase-benchmark voor overstromingen als gevolg van een dijkdoorbraak is nog niet beschikbaar.

Voor het simuleren van overstromingen wordt van het gebied een representatieve schematisatie gemaakt. Voor het maken van 2D schematisaties kan ruimtelijke informatie vaak direct gebruikt worden, terwijl modelleers bij het maken van bakjesmodellen en 1D schematisaties meer keuzes moeten maken over hoe deze ruimtelijke informatie om te zetten naar een 1D dimensie. Aangezien modellen en computers steeds sneller worden en eisen aan de nauwkeurigheid en visualisatie steeds hoger komen te liggen, wordt tegenwoordig vaker gekozen voor het gebruik van 2D of 1D2D schematisaties en minder vaak voor 1D schematisaties of bakjesmodellen. De verschillende modeltypen en hun voor- en nadelen worden in dit hoofdstuk besproken.



Figuur 2.1 Schematische weergave van 1D, quasi 2D, 2d, 1D2D en 2D modellen.

0D – Bakjesmethodes

In het verleden werden waterdieptes ten gevolge van overstromingen vaak bepaald met bakjesmethodes en ook nu gebeurt dat nog af en toe. In deze methode wordt het bedreigde gebied voorgesteld als bak waarin een bepaald volume water stroomt. Er wordt vervolgens verondersteld dat het wateroppervlak in het overstroomd gebied horizontaal staat en zodoende kan de waterdiepte bepaald worden door de bodemhoogte van de waterstand af te trekken (Figuur 2.2). Een vergelijkbare methode is dat een bepaalde buitenwaterstand wordt doorgetrokken over een gebied. Dan wordt er dus geen rekening gehouden met het instroomvolume. Deze methode geeft inzicht in de eindwaterstand en niet in het overstromingsverloop, de stijgsnelheid of stroomsnelheid. Dit kan voldoende zijn voor een inschatting voor economische schade en slachtoffers. Maar wanneer ook aankomsttijden worden beschouwd bij het bepalen van slachtoffers, is ook het overstromingsverloop van belang. In bijvoorbeeld het project VNK1 is deze aanpak gebruikt. Deze aanpak werkt alleen voor kleine vlakke gebieden zonder compartimenteringsdijken welke zich als bakje gedragen. Het werkt niet voor hellende gebieden. Aangezien in hellende gebieden het water bij een doorbraak door het hogere deel naar het lagere deel zal stromen, en in beide schade zal veroorzaken zal deze aanpak waarin alleen de eindwaterstand beschouwd wordt een sterke onderschatting geven van het getroffen gebied. De eindwaterdiepte is in dergelijke gebieden immers anders dan de maximale waterdiepte die optreedt tijdens de overstroming. Het bovenstroomse gebied zal, zelfs als deze na korte tijd droogvalt toch schade ondervinden van de overstroming. Dit speelt met name in hellende overstroombare gebieden in het bovenrivierengebied (zoals de Betuwe). In VNK1 werd hier overigens voor gecorrigeerd.

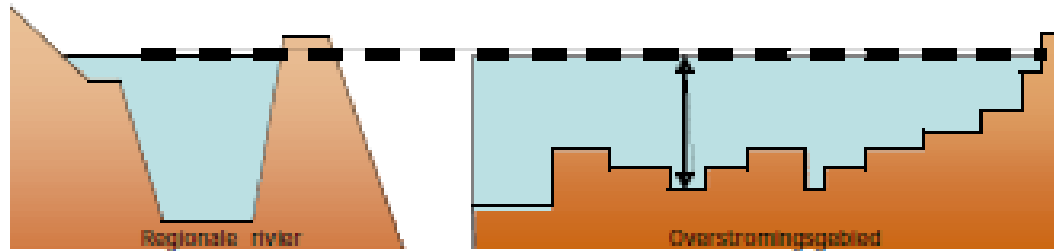


Figuur 2.2 Vertaling van debiet door een bres naar waterstand in een bedreigd gebied en van waterstand naar waterdiepte (uit Slager & Van der Doef, 2014).

De bakjesmethode werkt redelijk in gebieden beschermd door een dijk die zich als bakje gedragen. Dit zijn kleine homogene gebieden omringd door een dijk die helemaal onderlopen bij een dijkdoorbraak. Voorbeelden van dergelijke gebieden zijn Pernis, Alem en Heerwaarden. Echter een goede inschatting van de stijgsnelheid ontbreekt dan. De methode wordt ook veel gebruikt voor het simuleren van overstromingen vanuit regionale boezemwatersystemen. Zo zijn in het verleden veel simulaties gebruikt voor de ROR van overstromingen vanuit regionale watersystemen in west-Nederland gebaseerd op de bakjesmethode. Dit is aangegeven in de LDO (Landelijke Database Overstromingsscenario's). Indien de bedreigde gebieden klein zijn ten opzichte van de hoeveelheid water in de waterloop levert dit geen problemen op.

1D modellen

1D modellen worden in Nederland voornamelijk gebruikt om waterdieptes en stroomsnelheden in de rivieren en kanalen te modelleren. Ze lossen de St. Venant vergelijkingen op de rivier-as op. Waterstanden op de rivier-as kunnen geëxtrapoléerd worden en toegekend aan de gehele rivierbedding, of zelfs de hele riviervallei (e.g. in Limburg of bij beken). Ook worden soms waterstanden van kanalen en boezems berekend met 1D modellen en geëxtrapoléerd naar polders en andere aanliggende gebieden om waterdieptes te bepalen. Deze waterdieptes worden dan berekend als de buitenwaterstand (waterstand in de rivier/het kanaal) minus de bodemhoogte van het bedreigde gebied (Figuur 2.3).



Figuur 2.3 Voorbeeld van bepaling waterdiepte als waterstand in het buitenwater minus de bodemhoogte (uit Slager & Van der Doef, 2014).

De 1D modellen hebben als voordeel dat ze vaak snel rekenen en voor de rivier meestal goede waterstanden geven. Een nadeel is dat de resultaten minder betrouwbaar zijn in bochten, bij vernauwingen of plotselinge verbredingen, splitsingen of op andere plaatsen waar stroming in andere richtingen dan de dominante stroomrichting belangrijk is. De modellen geven geen inzicht in stroom- en stijgsnelheden in de overstroomde gebieden. Ze zijn niet bruikbaar wanneer de potentieel overstroomde gebieden groot zijn ten opzichte van de waterloop, dus bijvoorbeeld voor het modelleren van overstromingen van grotere door dijken omringde gebieden grenzend aan een rivier.

Voor het maken van 1D modellen wordt in Nederland vaak D-Hydro gebruikt. Er zijn echter heel veel pakketten voor het simuleren van overstromingen. Andere bekende zijn bv. 3Di, Hec-RAS, TufLOW, Mike11, en ISIS. Voor de meeste 1D pakketten dient een licentie gekocht te worden. Hec-Ras is gratis en voor Sobek3 hoeft alleen eenmalig een beperkt bedrag voor ondersteuning betaald te worden.

Quasi-2D modellen

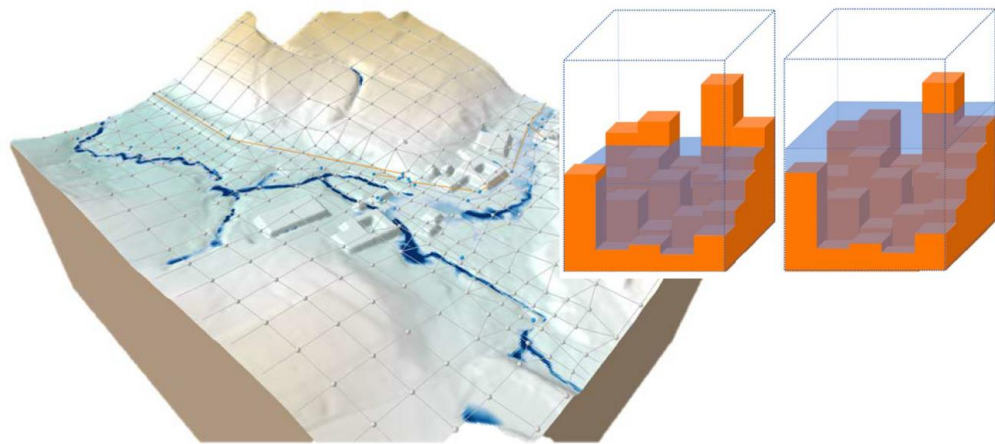
Quasi 2D modellen worden gebruikt om stroming door uiterwaarden of overstroomde gebieden beter mee te nemen dan in 1D modellen. Ze worden daartoe geschematiseerd als aparte takken die op meerdere plekken verbonden zijn met de hoofdrieviertak. Deze methode wordt toegepast wanneer grote gebieden gemodelleerd moeten worden, stroming buiten de hoofdrievier belangrijk is, de rekentijd niet te groot mag zijn, of er geen goede hoogte-informatie beschikbaar is zodat 2D modellen lastig te maken zijn. Een nadeel is dat de modelleur vooraf de locaties moet bepalen waar water de rivier verlaat en waar het weer terugstroomt de rivier in. Het overstromingspatroon moet dus bekend zijn. Deze methode is toegepast in het Grade model waarmee rivierafvoerstatistiek voor de Rijn te Lobith wordt bepaald. Overstromingen in het grensgebied waarbij water vanuit de Niederrhein/Bovenrijn naar de IJssel kan stromen worden daarmee gemodelleerd (Hegnauer et al., 2016). Quasi-2D modellen kunnen gemaakt worden met alle 1D modelpakketten.

2D modellen

Het voordeel van 2D modellen is dat deze nauwkeuriger zijn dan 1D of bakjesmodellen, zeker wanneer de invoerdata goed is en de celgrootte klein. Een nadeel van 2D modellen, is de langere rekentijd ten opzichte van de rekentijd van 1D modellen. De celgrootte bepaalt de nauwkeurigheid en de rekensnelheid. Voor het modelleren van kleine gebieden, bijvoorbeeld in steden, wordt vaak een celgrootte van ongeveer 5m gebruikt, en soms zelfs nog kleiner. Zeker voor grotere gebieden zorgt zo'n resolutie al gauw voor lange rekentijden, en wordt er regelmatig, zeker voor homogene gebieden, een grotere celgrootte gehanteerd. De rivier wordt dan niet in 2D mee gemodelleerd. Voor het modelleren van rivieren zelf zouden kleinere cellen noodzakelijk zijn.

De meest gebruikte 2D modellen in Nederland met rechte roosters zijn Delft-FLS en Sobek-2D modellen. Er zijn ook curve-lineaire modellen, zoals WAQUA. WAQUA rekent op een rooster van cellen die de stroomlijnen van een rivier volgen en is bedoeld voor het modelleren van rivieren. De cellen zijn smal en langgerekt op de rivier-as en worden groter naarmate de stroming minder belangrijk is. In de uiterwaarden zijn de cellen het grootst. Tegenwoordig is WAQUA opgevolgd door de D-Hydro suite.

Er zijn ook innovaties gedaan die het mogelijk maken om in homogene gebieden met grovere cellen sneller te rekenen en bij obstakels of andere gebieden meer gedetailleerd te rekenen. Zo maakt het modelpakket 3Di gebruik van een subgridmethode: het onderliggende hoogtegrid is fijn. Bij de berekening worden grotere cellen gebruikt om de rekentijd te verkleinen. Daar waar noodzakelijk worden verfijningen in het rekenrooster toegepast. De presentatie van waterdieptes wordt gedaan op basis van de kleine celgrootte van het AHN. (Schuurmans en Van Leeuwen, 2017). De modelleur dient eventuele obstakels en lijnelementen goed te beschouwen door in het rooster rekening te houden met de ligging ervan, of door deze apart te definiëren in zogenaamde 'obstacles-lijnen'. Vanzelfsprekend moet evengoed bij andere type dynamische berekeningen rekening gehouden worden met obstakels en lijnelementen. Zie Figuur 2.4 voor een schematische weergave van deze subgridmethode. Figuur 2.5 geeft een voorbeeld van een berekeningsresultaat weer.



Figuur 2.4 Een hoge resolutie Hoogtemodel onder een 3Di model: De waterdiepte wordt berekend voor ieder subgrid, terwijl waterstanden berekend worden per quadtree cell (Schuurmans en Van Leeuwen, 2016).



Figuur 2.5 Voorbeeld van de uitkomst van een 3Di berekening.

DFlow-FM kan met ongestructureerde roosters rekenen, zoals te zien in Figuur 2.6. In DFlow-FM worden meestal roosters bestaande uit driehoeken gebruikt en kan het rooster zo aangepast worden dat de hoogste nauwkeurigheid verkregen wordt in de meest interessante gebieden. Door de mogelijkheid van het vergroten van cellen in homogene gebieden en het verkleinen bij obstakels, kunnen pakketten zoals DFlow-FM de rekentijd verkleinen, zonder nauwkeurigheid te verliezen (<https://download.deltares.nl/en/download/delft3d-fm/>).

Een ander model is de Tygron Water Module, onderdeel van het Tygron Platform. De Tygron Water Module is een implementatie van 2D-grid ondiep water model, gebaseerd op de 2D St. Venant vergelijkingen.

Zowel 3Di, DFlow-FM en Tygron besteden meer aandacht aan nieuwe visualisatietechnieken zoals mooiere animaties, 3D visualisaties en weergave op achtergronden van Google Earth. In Figuur 2.7 is een voorbeeld te zien van zo'n moderne visualisatie. De technieken zijn bovendien nog continu in ontwikkeling. Het DFlow-FM pakket is gratis. Bij 3Di betaalt de klant voor rekentijd door middel van een abonnement. Ook bij Tygron betaal je om berekeningen te doen op de Tygron Engine (de centrale rekencloud van Tygron).



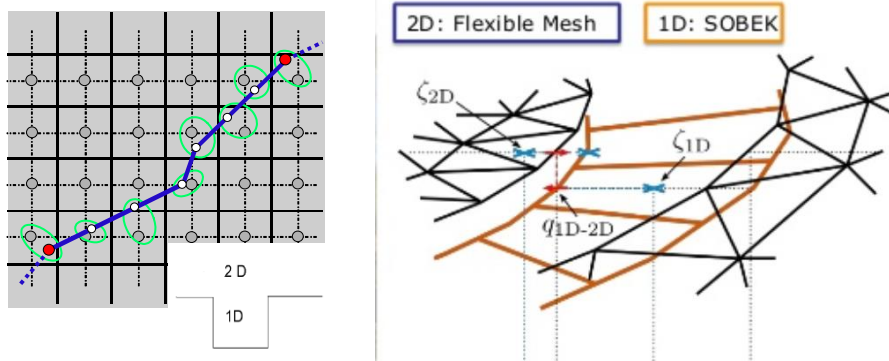
Figuur 2.6 Voorbeeld van een DFlow-FM rooster.



Figuur 2.7 Voorbeeld van 3D-visualisatie.

1D2D modellen

1D2D modellen combineren de voordelen van 1D en 2D modellen: ze zijn nauwkeurig ten opzichte van 1D-modellen en snel ten opzichte van 2D-modellen, maar de celgrootte van de bedreigde gebieden kan groter zijn, omdat de rivier of waterloop in 1D geschematiseerd is (en daar dus geen kleine celgrootte voor vereist is). De modellen ogen realistischer dan 1D modellen waardoor de resultaten ook beter te interpreteren zijn. Vaak worden rivieren, maar ook kleinere waterlopen zoals regionale waterlopen en onderdoorgangen van obstakels als snelwegen geschematiseerd als 1D takjes die over het 2D grid heen liggen. Sobek 1D2D van Deltares is een veelvuldig toegepast overstromingsmodellerpakket in Nederland, maar ook met DFlow-FM en 3Di kunnen 1D2D modellen gemaakt worden.



Figuur 2.8 Voorbeeld van de koppeling van rekenpunten op een 1D tak en een 2D grid (Sobek1D2D) links, en een 1D2D schematisatie van Sobek-FM rechts.

Samenvatting:

Voor overstromingen van grotere gebieden zijn 1D2D of 2D modellen noodzakelijk. Bresgroei dient goed geschematiseerd te worden en lijnelementen (zoals verhoogde (spoor)wegen) en onderdoorgangen dienen meegenomen en vastgelegd te kunnen worden. Ook het correct meenemen van kleinere waterlopen is vaak belangrijk omdat deze het water snel verspreiden en geleiden naar nog droge gebieden. Op dit moment zijn er meerdere pakketten beschikbaar hiervoor (zoals Sobek-1D2D en 3Di en Dflow-FM). Voor kleine gebieden waar slachtoffers niet van belang zijn, volstaat soms een bakjesmethode. Voor het modelleren van buitendijkse gebieden kunnen 1D modellen (Sobek), 2D curve linear modellen (WAQUA), of andere 2D modellen gebruikt worden. Voor de grote rivieren zijn officiële modelschematisaties beschikbaar (zie de IPLO website:

<https://iplo.nl/thema/water/applicaties-modellen/modelschematisaties/rivieren/>).

Tabel 2.2 Indicatief overzicht van modeltypen en hun mogelijkheden (+ is geschikt, +++ is zeer geschikt, - is minder geschikt).

Model type	Snelheid	nauwkeurigheid		Geschikt voor bepalen:	
		waterlopen	diepte /stijgsnelheid bedreigd gebied	Schade	Slachtoffers en LIR
Bakje	+++	nvt	--	**	-
1D	++	+	--	***	-
quasi-2D	++	+	-	***	-
2D	-	- (tenzij cellen zeer klein zijn)	++	Ja*	Ja*
1D2D	+	+	++	Ja	Ja

* Begin 2024 is SSM2023 alleen geschikt voor invoer in rasterformaat. Uitvoer in onregelmatige grids (zoals 3Di en DFlow-FM uitvoer) kan nu dus nog niet direct ingevoerd worden. Er bestaan converters om uitvoer om te zetten in rasteruitvoer voor presentatie en verdere bewerkingen zoals schadeberekeningen.

** Als het gebied zich goed als bakje laat schematiseren, dan kan de schade goed berekend worden met bakjesmodel. Dit geldt voor gebieden die zeer klein zijn ten opzichte van het binnenstromende volume water.

*** Als het gebied zich gedraagt als een rivier (of voor quasi 2D modellen: als rivier met meestromende uiterwaarden) en goed gekalibreerd is, kan de schade betrouwbaar bepaald worden met deze modellen.

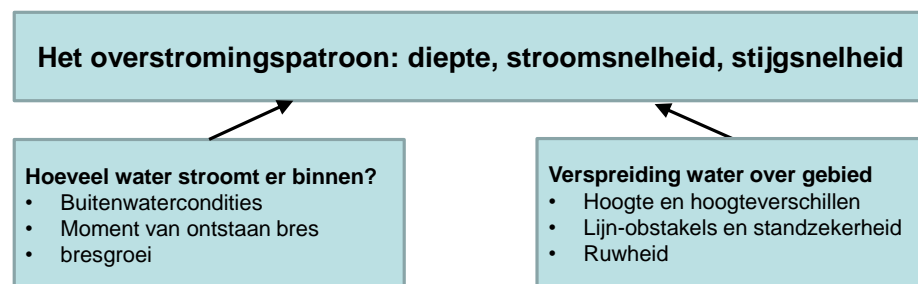
3 De belangrijkste factoren die van invloed zijn op de overstroming

De gevolgen van een overstroming zijn niet altijd en overal gelijk: vaak zijn er meerdere overstromingsscenario's denkbaar en zijn de gevolgen per scenario en per doorbraaklocatie anders. Voor het kiezen van een goede berekening, of set van berekeningen, het maken van keuzes en het vastleggen van keuzes is het belangrijk om inzicht te hebben in de belangrijkste factoren die het verloop van een overstroming bepalen.

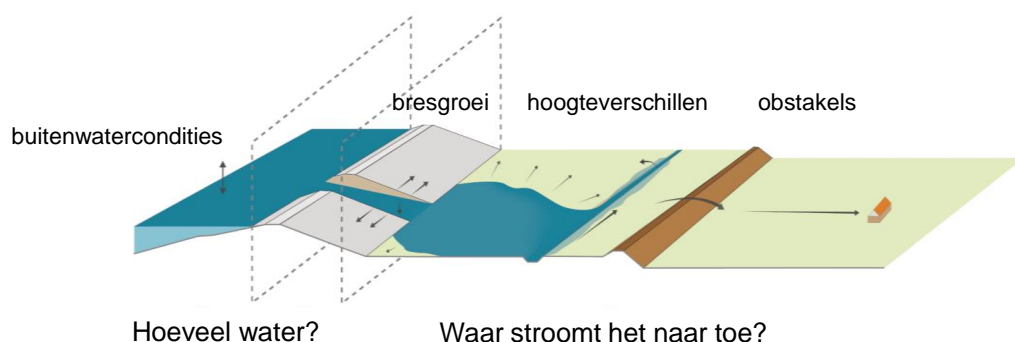
Dit hoofdstuk beschrijft deze factoren op hoofdlijnen. In hoofdstukken 4 en 5 wordt vervolgens besproken welke keuzes voor de betreffende factoren gemaakt kunnen worden: in hoofdstuk 4 voor het kiezen van de juiste set van overstromingsscenario's en in hoofdstuk 5 voor het maken van een schematisatie voor het doorrekenen van een overstromingsscenario.

3.1 Overstromingen vanuit het hoofwatersysteem ten gevolge van dijkdoorbraken

Het verloop van binnendijkse overstromingen als gevolg van dijkdoorbraken wordt vooral bepaald door de hoeveelheid water die naar binnen stroomt en ook van de breslocatie en de gebiedseigenschappen. De hoeveelheid water die naar binnen stroomt, hangt af van de buitenwatercondities op het moment van doorbraak en daarna en de bres eigenschappen en de eigenschappen van het bedreigde gebied, zoals bv. de aanwezigheid van lijnelementen (Asselman et al., 2010; Asselman et al., 2009) (zie Figuur 3.1 en 3.2).



Figuur 3.1 Factoren die het overstromingsverloop bepalen.



Figuur 3.2 Schematische weergave van factoren (gebaseerd op een Figuur van Klingen, 2016).

Buitenwatercondities

De hoogte en duur van de hoge waterstanden kan grote invloed hebben op de omvang van een overstroming. Zeker bij grote bedijkte gebieden die niet geheel overstromen, zoals Zuid-Holland, het gebied ten westen van de Utrechtse Heuvelrug, Betuwe en Groningen-Friesland is de hoeveelheid water die naar binnen stroomt bepalend voor de grootte van het overstromd gebied en de waterdiepte daarin. Het overstromingsverloop van gebieden die klein zijn in verhouding tot de hoeveelheid water die naar binnen kan stromen is niet of veel minder afhankelijk van de precieze instroom: deze gebieden zullen immers helemaal vollopen. Voorbeelden van dergelijke gebieden zijn kleine bedijkte gebieden zoals bijvoorbeeld Pernis, Alem, en Wieringen, of kleine polders langs de grotere boezemwatersystemen.

Het verloop van de buitenwaterstand in de tijd bepaalt hoeveel water er beschikbaar is om door de bres naar binnen te stromen. De duur en hoogte van de piek, de golfvorm van rivierafvoergolven, de stormduur, en het samenvallen van storm en getij bepalen samen het verloop van het hoogwater in de tijd. De duur van een hoogwater op de rivieren is in het algemeen veel groter dan aan de kust: rivierhoogwaters kunnen wel twee weken aanhouden terwijl stormen na twee dagen voorbij zijn. Voor grotere gebieden kunnen keuzes voor de vorm van de afvoergolf op de rivieren, of het samenvallen van het getij en storm bepalend zijn voor de uitkomsten van de overstromingssimulaties. In hoofdstuk 5 is uitgewerkt hoe buitenwatercondities veelal worden afgeleid.

Breseeigenschappen en modellering bressen

De *locatie* en het *aantal bressen*, het *moment van breken* en de *grootte* van de bres bepalen samen hoeveel water door de bres naar binnen kan stromen en daarmee ook de ernst van de overstroming. Voor elke overstromingssimulatie worden een of meer doorbraaklocaties gekozen. Voor het kiezen van de locatie kan het van belang zijn te kijken naar regionale waterlopen, de ligging van kunstwerken, compartimenteringsdijken en landgebruik. Indien de gevolgen sterk afhangen van de locatie van doorbraak zou het segment gesplitst kunnen worden in twee of meer segmenten, waarvoor meerdere doorbraakscenario's worden doorgerekend.

Het moment van breken is cruciaal voor het overstromingsverloop: indien de bres breekt voordat de top van de waterstand optreedt, zal de overstroming ernstiger zijn dan indien deze op of na het bereiken van de hoogste waterstand optreedt.

De bresgroei en eindgrootte van de bres bepalen de snelheid van instroom in het bedreigde gebied. Voor bedijkte gebieden in het bovenrivierengebied kan de bresbreedte oplopen tot enkele honderden meters. Voor bedijkte gebieden aan de kust zijn de bresbreedtes vaak veel kleiner. Bij de stormvloed van 1953 was de gemiddelde breedte 70m in Goeree Overflakkee (Kok & Van der Doef, 2008).

Bresgroei is niet alleen een belangrijke, maar ook een van de meest onzekere factoren in de overstromingssimulatie. Modelleurs zijn vaak genoodzaakt aannames te doen. Er wordt daarom geadviseerd om gevoeligheidsanalyses uit te voeren om inzicht te krijgen in het effect van de aannames op de uitkomsten. Het verder vergroten van kennis omtrent bresgroei vraagt fundamenteel onderzoek. Hoofdstuk 5 in dit document geeft de meest gangbare keuzes en aanbevelingen voor mogelijke keuzes voor verschillende typen overstromingsmodellen en voor het omgaan met bijvoorbeeld hoge voorlanden, ontgrondingskuilen, en benadrukt het belang van het vastleggen van gemaakte keuzes met betrekking tot bresgroei.



Figuur 3.3 Een foto van een dijkdoorbraak in 1953.

Eigenschappen van het bedreigde gebied

De hoogte van het gebied en de hoogteverschillen binnen het gebied, de ligging van obstakels en de standzekerheid daarvan, de aanwezigheid van regionale waterlopen en de ruwheid van het gebied bepalen hoe het water zich over het bedreigde gebied verdeelt. In hellende gebieden zal het water uit de hogere gebieden wegstromen naar de lagere gebieden. Net bovenstrooms van obstakels zoals kanalen, verhoogde snelwegen of oude keringen zullen grotere waterdieptes gevonden worden dan benedenstrooms daarvan. Voor het modelleren van de verspreiding van de overstroming zal de modelleur keuzes moeten maken over de standzekerheid van de keringen en het wel of niet opnemen van de keringen die niet standzeker zijn. Hiervoor zijn inschattingen van de waterbeheerders cruciaal. De keuzes worden bepaald door het doel van de schematisatie: voor bijvoorbeeld crisismanagement kan het verloop van overstroming in de tijd heel belangrijk zijn en daarom zullen daar obstakels en keringen goed geschematiseerd dienen te worden. Voor een grove analyse van het overstromingsrisico is dat niet altijd nodig. Het is van belang te beseffen dat standzekerheid van sommige objecten onzeker is en dat keuzes omtrent standzekerheid door de modelleur gerapporteerd dienen te worden om de modellering reproduceerbaar te maken. Het maken van een schematisatie voor het bedreigde gebied en de keuzes daarbij is verder uitgewerkt in hoofdstuk 5.

3.2 Buitendijkse overstromingen langs het hoofdwatersysteem

De ernst en het verloop van buitendijkse overstromingen is voornamelijk afhankelijk van de afvoergolfvorm van de rivieren en/of het stormverloop en de stormopzet op zee en in de estuaria. Lokale keringen, obstakels of civiele kunstwerken in het buitendijkse gebied en de standzekerheid daarvan kunnen het overstromingsverloop mede bepalen. Bij het modelleren wordt meestal uitgegaan van volledige standzekerheid van eventuele obstakels (de objecten kunnen alleen overstromen) en het sluiten van coupures volgens bestaande procedures. De gekozen afvoergolven en stormverlopen zijn dan het meest belangrijk om vast te leggen.

3.3 Overstromingen als gevolg van doorbraak van regionale keringen

Bij het simuleren van overstromingen als gevolg van doorbraken van regionale keringen langs rivieren of boezemsystemen zijn grofweg dezelfde aspecten van belang als bij primaire keringen, maar ligt de nadruk meestal op het goed bepalen van buitenwatercondities¹, en is het precies modelleren van de bresgroei minder belangrijk. Dit omdat de polders of bedreigde gebieden vaak beperkt van omvang zijn, ook ten opzichte van het watervolume dat beschikbaar is. Indien de instroom beperkt is ten opzichte van de grootte van het gebied dat overstroomd kan worden, dan is de bresgroeisnelheid meer van belang.

In regionale systemen worden de buitenwatercondities soms sterk beïnvloed door *sturingsmogelijkheden* in het watersysteem. Met stuwen en andere kunstwerken kunnen watersystemen gecompartmenteerd worden en kan voorkomen worden dat een groot watersysteem in zijn geheel bijdraagt aan de overstroming. Doorgaans zijn de sturingsmogelijkheden bij regionale rivieren in hellende gebieden in Hoog-Nederland beperkter dan in de boezemsystemen. In boezemsystemen is kennis over de sturingsmogelijkheden en keuzes over het al dan niet meenemen van sturingsmogelijkheden dan ook cruciaal.

3.4 Overstromingen in onbeschermd gebied langs regionale wateren

Bij het simuleren van overstromingen en wateroverlast van onbeschermd gebied langs regionale watersystemen, zoals beken, rivieren en boezemsystemen (boezemlanden) is de mate van detail in de modelschematisatie voor oppervlakkige afvoer belangrijk. Daarnaast is het van belang hoe kunstwerken als stuwen, sluisen en pompen functioneren (incl. falen) en hoeveel water (nog) in de onverharde bodem geborgen kan worden. Ook is het belangrijk om de interactie met het hoofdwatersysteem en het stedelijk watersysteem goed te beschrijven. Voor het bepalen van inundaties op maaiveld wordt naast GIS-analyses (vertaling van waterstanden in het watersysteem naar waterdieptes op land), steeds vaker hydrodynamische 2D modellen gebruikt. Hierbij is het belangrijk voor het resultaat dat er met voldoende hoge ruimtelijke resolutie wordt gewerkt; bij voorkeur 5x5 m, zonder dat de onzekerheden, voornamelijk in de berekende waterhoogte, uit het oog raken.

3.5 Overstromingen door intense neerslag

Overstromingen door intense neerslag worden beïnvloed door diverse factoren, denk hierbij niet alleen aan neerslagsommen, -duren en -patronen, maar ook over de modellering van het afwateringssysteem. Klimaatverandering leidt tot veranderingen in neerslagpatronen, met meer extreme regenbuien in de zomer en hevigere hagel- en onweersbuien. Om de kwetsbaarheid voor wateroverlast te beoordelen, is het belangrijk om te begrijpen hoe neerslagkarakteristieken veranderen, waar regenwater zich kan verzamelen, en waar de kans op grondwateroverlast groter is. Een goede modelschematisatie van het afwateringssysteem in bebouwd gebied en daarbuiten is cruciaal, als wel de aansluiting van dit systeem op regionale watersystemen. Vanuit het Deltaprogramma Ruimtelijke adaptatie is afgesproken elke 6 jaar stresstesten uit te voeren, waarbij gedetailleerde simulaties helpen bij het in kaart brengen van deze factoren. Deze simulaties moeten nauwkeurig worden uitgevoerd en gevalideerd, waarbij lokale omstandigheden en de interactie tussen riolering en oppervlaktewater worden meegenomen. Meer informatie en specifieke instructies zijn te vinden op de website <https://klimaatadaptatienederland.nl/kennisdossiers/wateroverlast/> en in de handreiking voor gemeentelijke stresstesten (Klimaatadaptatie Nederland, 2024).

¹ Met buitenwater wordt hier bedoeld: waterlopen waar vanuit de overstroming plaatsvindt na doorbraak door een kering.

4 Keuze van de te berekenen overstromingsscenario's

4.1 Hoofdwatersysteem

De keuze van de te modelleren overstromingsscenario's hangt nauw samen met het doel van de overstromingsmodellering. Overstromingsmodellering wordt veelal gedaan voor (zie hoofdstuk 2):

- Ruimtelijke adaptatie (water en bodem sturend, etc.)
- Ondersteuning van crisismanagement;
- Waterbewustzijn
- Risicoanalyse van gebieden beschermd door dijktrajecten of gebieden langs regionale waterlopen bijvoorbeeld om maatregelen te prioriteren, risicovolle plekken te identificeren of om effecten van maatregelen te bepalen, of voor normering;
- Het krijgen van informatie over overstromingsgevaar voor de Richtlijn Overstromingsrisico's, voor het publiek of voor ruimtelijke ordening.

Het overstromingsrisico van een gebied wordt bepaald door de kans op overstroming en de gevolgen van een overstroming. Vaak zijn er per gebied meerdere overstromingsscenario's denkbaar. Zo kan in het Land van Maas en Waal een overstroming vanuit de Waal plaats vinden en vanuit de Maas. Deze overstromingen zijn dermate verschillend dat ze als aparte scenario's moeten worden beschouwd. Bij VNK2, maar ook in andere projecten, zijn daarom dijkkringgebieden opgedeeld in ringdelen op een zodanige manier dat een doorbraak bij elke willekeurig locatie binnen een ringdeel bij benadering dezelfde overstroming en schade oplevert. Tegenwoordig spreken we niet meer van dijkringen, maar dijktrajecten. Het overstromingsrisico van een gebied (een dijktraject, of dijktrajectdeel) wordt dan bepaald als de som van de producten van de kansen op doorbraak van de dijktrajectdelen en hun gevolgen (zie vergelijking 1 en Figuur 4.1).



Figuur 4.1 Schematische weergave van de berekening van het overstromingsrisico van een dijktraject op basis van de analyse van dijktrajectdelen. Bron: VNK2 atlas (Vergouwe, 2015).

² Dit gaat uit van onafhankelijkheid tussen locaties en geeft dus een bovengrens.

Voor crisismanagement is ook het gebruik van verschillende scenario's van belang. Voor potentiële doorbraaklocaties zijn berekeningen met overstromingen bij realistische omstandigheden noodzakelijk. Voor locaties die zowel door stormen als hoogwater op de rivier bedreigd worden zijn simulaties van beide noodzakelijk indien de gevolgen verschillen. Naast de standaardscenario's, kunnen ook afwijkende varianten interessant zijn. Hierbij kan gedacht worden aan variaties in stormduur, het type afvoergolf, standzekerheid van achterliggende keringen en het al dan niet sluiten van de stormvloedkering (SVK). Voor crisismanagement is immers een representatieve set nodig van mogelijke gebeurtenissen.

Voor de Richtlijn Overstromingsrisico's en publicatie op risicokaart.nl wordt er gestreefd naar een zo compleet en eenduidig mogelijk beeld van mogelijke overstromingen uit het primaire en regionale systeem. In ruimtelijke adaptatie wordt vaak gebruik gemaakt van dezelfde overstromingssimulaties als voor risicoanalyse. De maximale waterdiepte is de meest relevante overstromingskarakteristiek voor ruimtelijke adaptatie.

Het kiezen van de breslocatie en het aantal bressen

Voor het bepalen van overstromingsrisico's of overstromingsgevaar van bedijkte gebieden wordt het effect van een dijkdoorbraak gesimuleerd. Daarvoor wordt eerst bepaald voor welke breslocatie(s) simulaties gemaakt worden en vervolgens bij welke omstandigheden deze bressen ontstaan. Dit is zeer onzeker en daarom dient de modelleur keuzes te maken en deze vast te leggen. Om een representatief en voldoende onderscheidend beeld van mogelijke effecten van dijkdoorbraken in een gebied te krijgen, zijn de richtlijnen uit VNK2 nuttig (zie Kok en Van der Doef, 2008). Deze richtlijnen bevelen aan om minstens 1 breslocatie per dijktraject te nemen, en meerdere wanneer binnen de dijktraject de gevolgen van een doorbraak significant verschillen per potentiële doorbraaklocatie. Als de doorbraaklocatie binnen een dijksegment nauwelijks verschillende overstromingen laat zien, wordt aangeraden om slechts één locatie te kiezen. Dit voorkomt onnodig veel doorbraaklocaties. Deze methode kan ook toegepast worden voor andere gebieden of dijksegmenten zoals normtrajecten of regionale kades. Maak een nieuwe berekening voor een extra breslocatie wanneer de gevolgen van beide breslocaties verschillen. Dit is meestal zo bij:

- 1 een aansluitende compartimenteringsdijk
- 2 een lijnvormige verhoging die als compartimenterende dijk kan functioneren
- 3 overgang van zeebedreiging naar meerbedreiging bijvoorbeeld bij stormvloedkeringen, of een andere grote verandering van dreiging;
- 4 bij riviersplitsingen
- 5 veranderingen in landgebruik (e.g. overgang stad/platteland)

Voor iedere breslocatie worden vervolgens 1 of meer simulaties van doorbraken gedaan zoals hieronder beschreven.

Standaard wordt gekozen voor 1 breslocatie per simulatie. De kans op gebeurtenissen met meer dan 1 breslocatie in een dijksegment of gebied is immers zeer klein. Voor grote gebieden zoals de Betuwe of Groningen-Friesland kan het effect van meerdere bressen interessant zijn en kan overwogen worden om eventueel ook scenario's met meerdere bressen door te rekenen.

Keuze van de scenario's per breslocatie

Voor de keuze van de door te rekenen scenario's en de daarbij te gebruiken randvoorwaarden per breslocatie gelden de volgende overwegingen:

- Kies de scenario's, uitgangspunten en randvoorwaarden zodanig dat ze zoveel mogelijk consistent zijn met de normering en actuele sterkte van de waterkeringen (de veiligheidsbeoordeling en de databases voor hydraulische belastingen);
- Zorg voor consistentie tussen verschillende locaties in gelijke gebieden (dat wil zeggen: binnen het rivierengebied);
- Zorg voor een set simulaties die de vragen van verschillende projecten en doelen (zoals risicoanalyse en crisismanagement) afdekt.

Deze overwegingen worden hieronder toegelicht. Vervolgens wordt een aanbeveling voor de te berekenen scenario's gegeven.

Consistentie met normering en WBI/OI

Sinds januari 2017 is er een nieuwe normering van kracht waarin geen toetspeilen met overschrijdingskansen van buitenwatercondities zijn opgenomen, maar faalkanseisen van normtrajecten. Dit is gedaan om alle faalmechanismen op gelijkwaardige wijze te kunnen beoordelen. Er zijn acht nieuwe normklassen gedefinieerd met faalkansen van 1:100 tot 1:100.000 per jaar³. Er is dus niet vastgelegd welke buitenwatercondities de keringen moeten kunnen keren en er is dus ook geen eenduidig toetspeil meer. In WBI worden nog wel diverse semi-probabilistische toetsen uitgevoerd waarin de waterstand gelijk wordt gekozen aan de waterstand met een overschrijdingsfrequentie die getalsmatig gelijk is aan de nieuwe norm⁴.

De oude leidraad, gemaakt voor het VNK2 schreef voor om een range van overstromingsscenario's door te rekenen. Die range was gekoppeld aan de waterveiligheidsnormen van vóór 2017 waarin dijken verondersteld werden om een ontwerpwaterstand (toetspeil) en golfhoogte met een bepaalde kans van overschrijding te kunnen keren. In VNK2 zijn voor alle dijkkringgebiedsdelen berekeningen gemaakt van doorbraken bij toetspeil en bij omstandigheden met een 10 keer grotere en kleinere overschrijdingskans. Voor sommige dijkkringgebiedsdelen zijn ook overstromingssimulaties gedaan voor een 100 keer kleinere overschrijdingskans. Daar er nu geen eenduidig toetspeil meer gedefinieerd is, kan deze aanpak niet meer precies gevolgd worden.

Consistentie tussen gebieden

Om te zorgen dat scenario's onderling vergelijkbaar en ook verenigbaar zijn, is het belangrijk om uit te gaan van een set buitenwaterstanden die is gekoppeld aan een vaste set vergelijkbare terugkeertijden, die onafhankelijk is van de veiligheidsnorm.

Afdekken van verschillende doelen

Wanneer een model gemaakt wordt en simulaties gedaan worden, is het nuttig een set scenario's te simuleren zodat de simulaties gebruikt kunnen worden voor verschillende doeleinden. Dit betekent concreet bijvoorbeeld dat:

- Naast simulaties bij normcondities, ook falen bij lagere waterstanden beschouwd moet worden, zoals waterstanden die beter corresponderen met de actuele faalkansen;
- in het overgangsgebied zowel doorbraken geïnitieerd bij combinaties van hoge rivierafvoeren en storm gesimuleerd dienen te worden.

³ Bij Borsele is de norm zelfs 1/1.000.000 per jaar.

⁴ Met norm wordt hier de ondergrens bedoeld, en niet de signaleringswaarde.

Aanbeveling

We raden aan om, als nieuwe overstromingssimulaties gemaakt worden⁵, in ieder geval standaard doorbraken bij de 1/100, 1/1.000 en 1/10.000 waterstanden te modelleren en alleen indien die simulaties sterk verschillende resultaten opleveren, ook doorbraken bij tussenliggende omstandigheden te modelleren (1/300, 1/3.000 en 1/30.000). Indien de norm strenger dan 1/10.000 is, kunnen meer extreme omstandigheden (1/100.000) modelleren ook gemodelleerd worden. Daarnaast zijn extremere omstandigheden (zoals de 1/100.000) interessant als klimaatscenario.

Voor alle scenario's en modeltypen zijn op de randen afvoer- en/of waterstandsverlopen in de tijd noodzakelijk. Vooral het waterstandsverloop in de periode na het ontstaan van de bres is belangrijk voor het overstromingsverloop.

Tabel 4.1 geeft een overzicht voor de uit te voeren verzameling simulaties per gebied of per dijksegment. De vertaling van deze scenario's naar randvoorwaarden en de daarvoor benodigde informatie wordt besproken in hoofdstuk 5.

Tabel 4.1 Overzicht van de te bekijken scenario's voor de verschillende deelgebieden van het hoofdwatersysteem.

Door te rekenen condities	Bovenrivieren gebied	Benedenrivieren gebied	Kust & estuaria	Meren
1/10, 1/100, 1/1000, 1/10.000	Altijd	Altijd voor dominante belastingcombinatie	Altijd	Altijd
1/10, 1/300, 1/3000., 1/30.000, 1/100.000	Eventueel	Eventueel	Eventueel	Eventueel
1/1.000.000	-	-	Eventueel	-
Andere belastingcombinatie	-	Altijd: Alternatieve belastingcombinatie*	-	-
Gevoeligheidsanalyse	Denk aan: <ul style="list-style-type: none">- Golfvorm (voor afvoergolf),- Bresgroei en bresmoment- Standzekerheid secundaire keringen- SVK open/dicht incl. verlaat sluiten- Ingreep beheerder/Ingreep beheerder/noodmaatregel		Denk aan: <ul style="list-style-type: none">- Bresgroei en bresmoment- Standzekerheid secundaire keringen- SVK open/dicht incl. verlaat sluiten- Ingreep beheerder/crisismanagement	

* Dominante belastingcombinatie = de combinatie die het meest bijdraagt aan de waterstand horend bij de opgegeven overschrijdingskans. Dit volgt uit Hydra-NL en is een combinatie van rivierafvoeren, zeewaterstanden/meerpeilen, en het al of niet falen van de Maeslantkering /Ramspolkering. In het overgangsgedebied en benedenrivierengebied kunnen hoogwaters veroorzaakt worden door zowel stormopzet, hoge afvoeren en combinaties daarvan en speelt het al dan niet sluiten van de Maeslantkering en Ramspolkering een rol. Voor crisisbeheersing dient zowel het dominante scenario (e.g. met extreme stormopzet, normale rivierafvoer en falende Maeslantkering) als een belangrijk alternatief scenario (e.g. stormopzet, hoge afvoer en gesloten kering) doorgerekend te worden. Dit omdat overstromingen vooral veroorzaakt door storm een ander verloop zullen hebben dan die veroorzaakt door hoge rivierafvoer.

⁵ Deze leidraad zegt niet dat overall nieuwe simulaties nodig zijn, maar probeert modelleers te ondersteunen als besloten is om nieuwe simulaties te gaan doen. Overwegingen om al dan niet nieuwe simulaties uit te voeren zijn (zie bijlage A): veranderingen in het gebied sinds de laatste simulaties, het ontbreken van simulaties voor actuele overstromingskansen of voor de nieuwe normen, wens tot betere visualisatie of tot gebruik nieuwe software.

4.2 Buitendijks gebied langs het primaire systeem

Om buitendijks overstromingsrisico's te bepalen wordt geadviseerd voor tenminste vier herhalingstijden overstromingsscenario's te maken: hoogwaterstanden die respectievelijk eens in de 10, 100, 1.000 en 10.000 jaar worden overschreden. Optioneel is eens in de 100.000 jaar (als 'klimaat'-scenario).

Vervolgens kunnen met behulp van een GIS bewerking waterdieptes worden bepaald als het verschil tussen de waterstand en de bodemhoogte. Daarna dient gekeken te worden of alle als overstromd beschouwde locaties ook inderdaad kunnen overstromen door te analyseren of ze via overstromde locaties in verbinding staan met de rivier of het waterlichaam van waaruit de overstroming plaats vindt. De werking en hoogte van barrières zoals lokale dijken of zomerkades dient daarbij beschouwd te worden. Zie voor details met betrekking tot het verkrijgen van gegevens ook hoofdstuk 5.

Aangezien buitendijkse (en binnendijkse) gebieden langs de kust vooral bedreigd worden door windgolven en seiches in combinatie met stormopzet is het daar vaak beter om de invloed van die windgolven mee te nemen. Dit kan met de gangbare overstromingsmodellen niet. Indien toch een overstromingssimulatie gewenst is, kunnen overslaggebieden bepaald worden met een golfmodel en deze kunnen vervolgens als randvoorwaarde opgelegd worden op een overstromingsmodel. Ook kunnen complexere modellen zoals Delft3D hiervoor gebruikt worden. Langs voornamelijk zachte kusten, zoals in duingebieden, kunnen hoogwaters schade veroorzaken zoals duinafslag. Dit valt buiten de scope van deze leidraad.

Voor het bepalen van overstromingsschade-en slachtoffers als gevolg van overstromingen van buitendijkse gebieden wordt aanbevolen om de buitendijkse module in SSM2023 te gebruiken.

4.3 Regionaal watersysteem (beschermd)

Overstromingsscenario's van doorbraken van keringen langs het regionale watersysteem worden hoofdzakelijk gemaakt voor regionale normeringsstudies en calamiteitenbeheersing. Ook aan de EU worden in het kader van de ROR resultaten van overstromingssimulaties vanuit het regionale systeem gerapporteerd. Voor de ROR zijn simulaties bij maatgevende⁶ omstandigheden gemaakt. Bij sterk gereguleerde watersystemen zijn verschillen in overstromingsverloop tussen scenario's met verschillende overschrijdingskansen van buitenwatercondities vaak beperkt, simpelweg omdat de variatie in buitenwatercondities beperkt is tot maximaal enkele decimeters.

Voor regionale keringen zoals zomerkades en voorlandkeringen, boezemkaden, dijken langs regionale rivieren en kanaaldijken wordt ten behoeve van landelijke uniformiteit geadviseerd om tenminste simulaties te maken voor waterstanden met een overschrijdingskans van 1/10, 1/100 en 1/1.000 per jaar tenzij deze niet substantieel van elkaar afwijken.

Net als bij simulaties voor normering van primaire waterkeringen wordt aangeraden de 'beoogde' keringen in segmenten onder te verdelen op basis van gebiedskenmerken. Per segment wordt vervolgens een breslocatie gekozen.

⁶ Maatgevend: die hydraulische condities waarop de kering ontworpen is

Voor het bepalen van overstromingsschade- en slachtoffers als gevolg van doorbraken in regionale keringen wordt aanbevolen om de regionale module in SSM2023 of de Waterschadeschatter te gebruiken.⁷

4.4 Regionaal watersysteem (onbeschermd)

Scenario's van overstromingen en wateroverlast van onbeschermd gebied langs regionale watersystemen, zoals beken, rivieren en boezemsystemen (boezemlanden) worden hoofdzakelijk gemaakt voor wateroverlaststudies.

Ook hier wordt vanuit de ROR geadviseerd om tenminste simulaties te maken voor waterstanden met een overschrijdingskans van 1/10, 1/100 en 1/1.000 per jaar tenzij deze niet substantieel van elkaar afwijken, al zijn kleinere overschrijdingskansen, zoals 1/1.000 per jaar voor de wateroverlaststudies niet altijd verplicht. Mogelijk worden kleinere overschrijdingskansen in de toekomst wel voorgeschreven. In de Richtlijn wordt ook gesproken over de mogelijkheid van het uitvoeren van simulaties bij een 1/30 en 1/300 waterstand, maar dit is geen verplichting.

Voor het bepalen van overstromingsschade- en slachtoffers als gevolg van doorbraken in regionale keringen wordt wederom aanbevolen om de regionale module in SSM2023 of de waterschadeschatter te gebruiken.

⁷ Er is een vergelijking gemaakt tussen SSM2023 en de Waterschadeschatter (Hoes, 2024). Er is een voorstel in de maak over een afwegingskader, wanneer welk schademodel te gebruiken. Meer informatie zal binnenkort beschikbaar komen op de IPLO pagina.

5 Aanpak bij het maken van een schematisatie

5.1 Aanpak voor het maken van een schematisatie

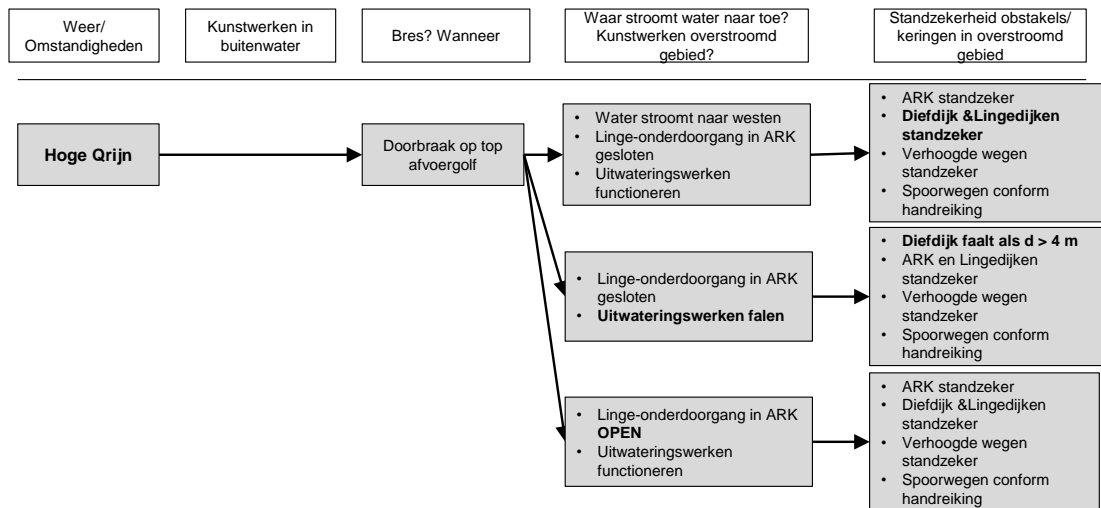
Bij het maken van een schematisatie worden de volgende stappen doorlopen (gebaseerd op Vermeulen & Leenders, 2010 en Van Waveren et al., 1999):

- 1 Bepaal het doel van het project en vertaal dit in eisen aan het model :
 - a Welke informatie moet de simulatie opleveren? Maximale waterdieptes en stijgsnelheden voor bijvoorbeeld de ROR, of een schadeberekening of ook een tijdsverloop voor bijvoorbeeld crisismanagement?
 - b Bepaal de aanpak en kies het modeltype.
- 2 Bepaal de door te rekenen overstromingsscenario's met behulp van een gebeurtenissenboom (zie verderop in deze paragraaf en Figuur 5.1 en 5.2).
- 3 Verzamel de benodigde informatie (zie paragraaf 5.2, 5.3 en 5.4)
- 4 Stel de schematisatie op (zie paragraaf 5.4).
- 5 Bereken de scenario's, controleer de uitkomsten en interpreteer deze (zie paragraaf 5.8)
- 6 Tenslotte worden de uitkomsten en de gegevens omtrent het modelleerproces, de metadata, keuzes en kwaliteitscontroles opgeslagen (zie hoofdstuk 6).

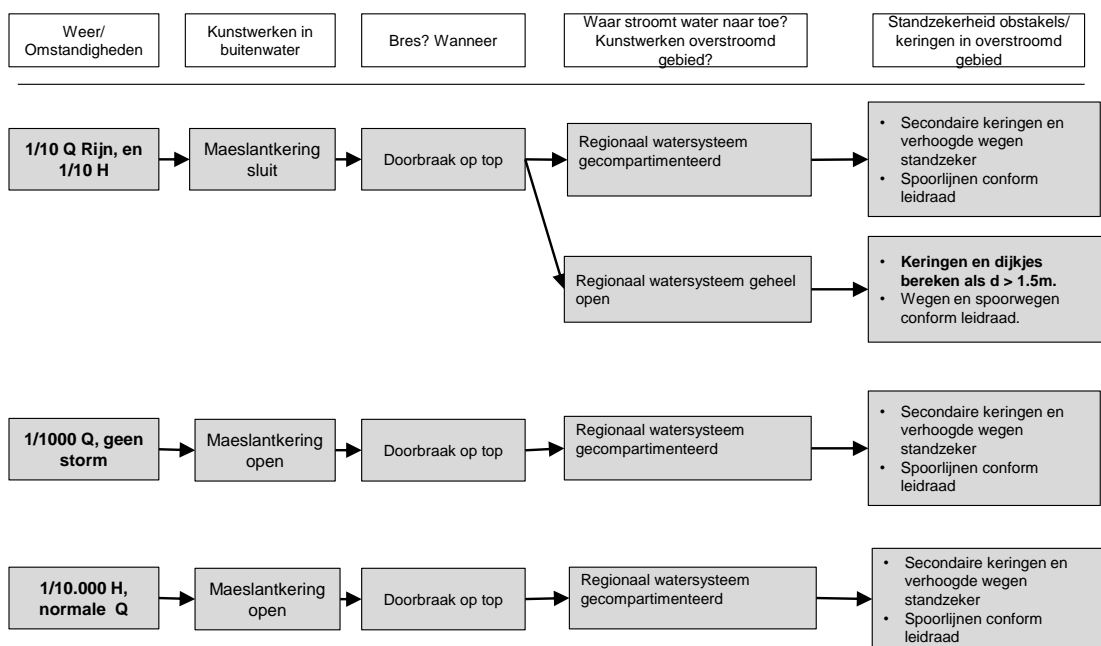
Om een goede en consistente aanpak te krijgen is het nuttig een gebeurtenissenboom te maken voor het te onderzoeken gebied. Hierin wordt geanalyseerd welke mogelijke gebeurtenissen kunnen leiden tot overstromingen en welke overstromingskarakteristieken daarbij verwacht worden. Voor ieder pad in de boom kunnen aannames of keuzes gemaakt worden. Bij zo'n boom worden de volgende vragen beantwoord:

- 1 Bij welke omstandigheden of welk weertype ontstaat hoogwater? (zie hiervoor Hoofdstuk 4)
 - a Is er storm? Windrichting?
 - b Is er een hoge rivierafvoer?
 - c Meerpeil?
- 2 Hoe gedragen de relevante kunstwerken in het buitenwater (het water vanuit waar de overstroming plaats vindt) zich? Denk hierbij bijvoorbeeld aan de Maeslantkering en Ramspolkering en kunstwerken in regionale systemen van waaruit overstromingen plaatsvinden (paragraaf 5.4).
- 3 Ontstaat er een bres? Waardoor en wanneer? Standaard is om een bres te laten ontstaan op de top van het hoogwater, maar hier kan van afgeweken worden (paragraaf 5.5).
- 4 Waar stroomt het water naar toe en wat is het effect van compartimenteringskeringen of obstakels? Blijven deze staan? (paragraaf 5.6)

Standaardkeuzes voor deze vragen staan beschreven in de volgende paragrafen. Figuur 5.1 en Figuur 5.2 geven twee (fictieve maar illustratieve) voorbeelden voor een dergelijke gebeurtenissenboom voor respectievelijk het dijksegment nabij Bemmelen in de Betuwe en een dijksegment op het eiland Dordrecht. In beide gevallen gaat het om een primaire waterkering.



Figuur 5.1 Voorbeeld van een stroomschema voor de Betuwe, dijksegment bij Bemmel.



Figuur 5.2 Illustratief voorbeeld van een stroomschema voor een dijksegment aan de Kildijk van het eiland van Dordrecht voor 3 relevante gebeurtenissen: zowel hoge afvoer (QRijn) als stormopzet (zeewaterstand H bij Hoek van Holland hoog), alleen extreem hoge afvoer en alleen storm (1/10000 H).

In de volgende paragrafen worden een aantal elementen van de schematisering in meer detail beschreven:

- 1 De keuze van randvoorwaarden (paragraaf 5.2);
- 2 De schematisatie van het gebied en het verzamelen van gegevens daarvoor: hoogte en ruwheden (paragraaf 5.4);
- 3 Bresgroei (paragraaf 5.5);
- 4 Het meenemen van secundaire keringen en standzekerheid (paragraaf 5.6);
- 5 De keuze voor verschillende varianten voor gevoeligheidsanalyse (paragraaf 5.7)
- 6 Het checken van de schematisatie en resultaten (paragraaf 5.8).

De rapportage van de scenario's en de uitkomsten wordt beschreven in hoofdstuk 6.

5.2 Randvoorwaarden per deelgebied (hoofdwatersysteem)

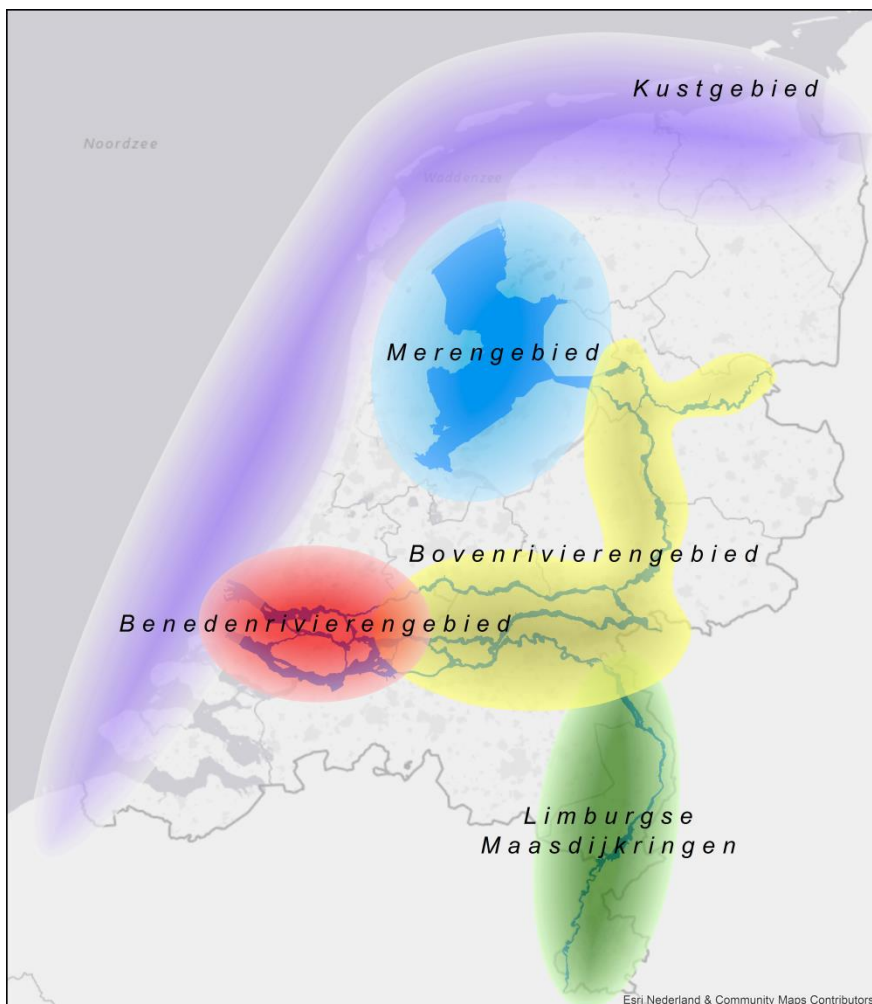
In hoofdstuk 4 is aangegeven voor welke situaties overstromingssimulaties gemaakt kunnen worden om een representatief en compleet beeld te krijgen van het overstromingsgevaar in een door een dijktraject(deel) beschermd gebied of een gebied langs een regionaal watersysteem of buitendijks.

Een combinatie van parameters bepaalt samen de hydraulische randvoorwaarden van de overstromingen. Afhankelijk van het gebied kunnen van belang zijn: de rivierafvoer, het meerpeil, de windkracht en windrichting. Omdat niet alleen de piek, maar ook het verloop van belang is dienen randvoorwaarden tijdsafhankelijk te zijn.

Om het verloop van de waterstand goed in beeld te krijgen is het noodzakelijk dat de door te rekenen periode lang genoeg is de stroming van water in het overstromd gebied naar de lagere delen goed in beeld te krijgen. Deze stroming in het overstromde gebied kan doorgaan, zelfs als de bres is gedicht of drooggevallen. Berekeningen dienen daarom te starten ruim voor de doorbraak plaatsvindt en bij voorkeur door te lopen totdat het overstromde gebied en de waterdiepte een evenwichtssituatie bereikt.

De wijze van opleggen van de randvoorwaarden en modelleren van de buitenwateren van waaruit de overstroming plaatsvindt, is per deelgebied verschillend en wordt daarom per deelgebied (zie Figuur 5.3) besproken. De 'deelgebieden' zijn:

- 1 Bovenrivierengebied (Rijntakken, Vecht en bedijkte Maas en bijzondere takken: oude IJssel en Eem);
- 2 (door primaire waterkeringen) Beschermd gebied Maasvallei. NB: Limburg en Noord-Brabant;
- 3 Kustgebied;
- 4 Merengebied;
- 5 Benedenrivierengebied (Rijnmondgebied en IJssel en Vecht delta);
- 6 Buitendijkse gebieden;



Figuur 5.3 Ligging en begrenzing van de deelgebieden welke in dit hoofdstuk besproken worden (het regionale systeem en de buitendijkse gebieden zijn niet aangegeven).

Voor het modelleren van overstromingen vanuit het hoofdwatersysteem is het aan te bevelen randvoorwaarden te gebruiken welke zo veel mogelijk consistent zijn met het (Wettelijk) Beoordelings- en Ontwerp Instrumentarium (BOI). In deze instrumentaria zijn de nieuwste inzichten en schematisaties al zo goed mogelijk meegenomen. In het WBI project (Wettelijk Beoordelings Instrumentarium) zijn afvoer- en waterstandsverlopen in de tijd op verschillende locaties afgeleid (Chbab & De Waal, 2016) en toegankelijk gemaakt via een 'waterstandsverlopen tool' (Geerse en Waterman, 2014). Hydra-NL, waarin de piekwaterstanden met een bepaalde overschrijdingsfrequentie worden bepaald en de waterstandsverlopendoel zijn beschikbaar via de IPLO website. Voor het simuleren van overstromingen wordt momenteel aangeraden om de waterstanden te gebruiken welke bepaald zijn zonder rekening te houden met onzekerheden. Deze kunnen berekend worden met Hydra-NL, verkrijgbaar via de IPLO website.⁸

⁸ WBI rekent standaard MET onzekerheden. Hier rekenen we zonder onzekerheden omdat bij overstromingssimulaties ook onzekerheden in andere aspecten (bresgroei, moment van breken, ruwheid et.) niet expliciet worden vermeld. Er wordt hiervoor op korte termijn een speciale WBI versie ter beschikking gesteld via helpdesk water.

5.2.1 Bovenrivieren

Het bovenriviereengebied is het gebied waar hoge afvoeren dominant zijn voor hydraulische omstandigheden en de invloed van de zee verwaarloosbaar is. Vaak is de invloed van wind en bochtwerking er ook klein. Geografisch behoort het gebied ten oosten van de lijn Hagestein, Tiel en Lith tot dit gebied en een deel van de Vecht (zie Figuur 5.4).



Figuur 5.4 Indicatie van het bovenriviereengebied.

Locatie van de randvoorwaarden

Om de invloed van het rivierhoogwater op de overstroming te simuleren wordt meestal het bedreigde gebied en (een gedeelte van) de rivier geschematiseerd. Als randvoorwaarde wordt dan op de rivier een afvoergolf $Q(t)$ bovenstrooms en een Q/h relatie benedenstrooms opgegeven, als volgt:

- 1 Indien de rivier in 1D wordt geschematiseerd en het bedreigde gebied in een 2D model, wordt vaak het gehele bovenriviereengebied in het 1D-model opgenomen. In dat geval is het aan te bevelen om het laatste officiële 1D model met de standaardafvoergolven bij Lobith/Lith of Dalfsen te gebruiken en standaard Q/h relaties op de benedenranden op te leggen. Zie bijlage C voor deze afvoergolven en zie de IPLO website (<https://iplo.nl/thema/water/applicaties-modellen/modelschematisaties/rivieren>) voor de meest recente officiële modelschematisatie.
- 2 Indien een gedeelte van de rivier wordt meegenomen, dan kunnen aan de bovenrand daarvan afvoertijdsverlopen en aan de benedenrand Q/h relaties gegeven worden. De te gebruiken afvoergolf kan bepaald worden op basis van de standaardafvoergolf en de afvoerdeling (2/3 van de afvoer te Lobith over de Waal, 1/3 Pannerdens Kanaal, 1/9 over de IJssel en 2/9 over de Nederrijn/Lek), of en dat heeft de voorkeur: door de afvoergolf te Lobith te simuleren met een standaardmodel en de afvoergolf ter plaatse van de modelrand te exporteren.

- 3 Soms wordt enkel het bedreigde gebied geschematiseerd. Dan wordt als rand een H(t) relatie opgegeven. Deze afvoertijdsverlopen zijn af te leiden voor iedere locatie met behulp van de waterstandsverlopendool en Hydra-NL. Deze zijn verkrijgbaar via de IPLO website (<https://iplo.nl/thema/water/applicaties-modellen/waterveiligheidsmodellen/waterstandsverlopen-tool/>). Voor een voorbeeld zie bijlage C. Een H(t) relatie kan alleen worden toegepast bij zeer kleine bedijkte gebieden, waar de maximale instroom van water de bedijkte gebied in vele malen kleiner is dan de afvoer op de rivier.

Het meeschematiseren van een gedeelte van de rivier heeft de voorkeur, omdat daardoor de invloed van de overstroming op de rivierwaterstand kan worden meegenomen.

Indien een doorbraak plaatsvindt in de buurt van de splitsingspunten kan dit aanzuigende werking hebben waardoor er meer water naar de riviertak met de bres zal stromen. Dit kan goed gerepresenteerd worden door de hele rivier mee te schematiseren.

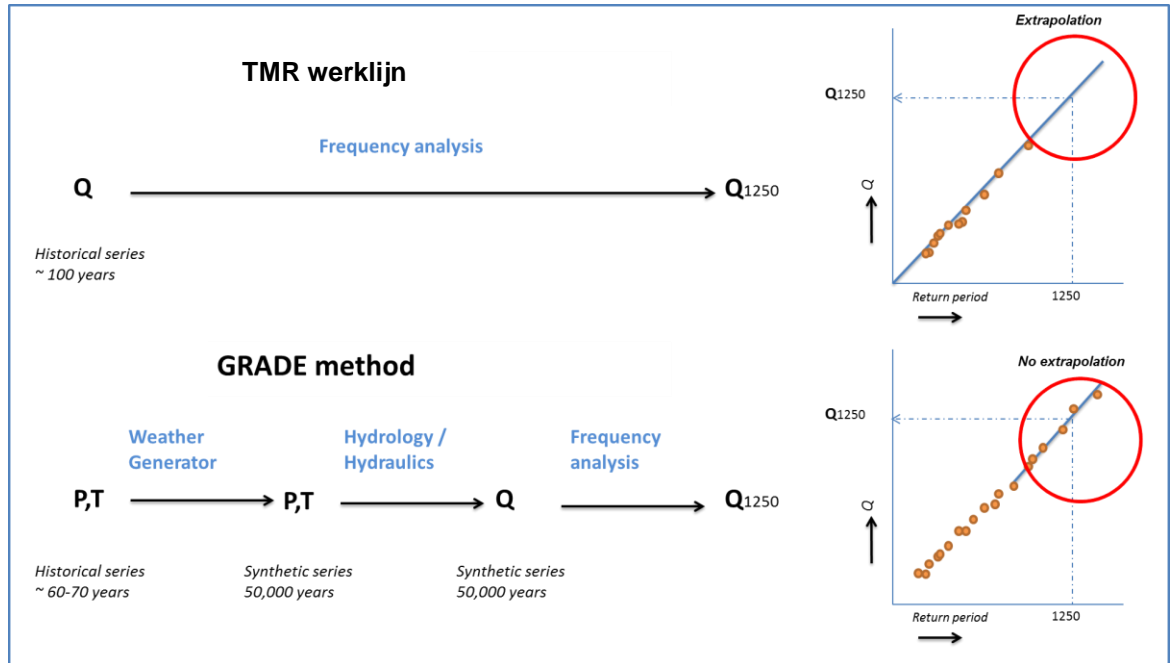
Achtergrond van de randvoorwaarden

Voor de bovenrand dient een afvoerpiek en golfvorm gekozen te worden conform de nieuwe WBI randvoorwaarden⁹. Deze WBI randvoorwaarden zijn bepaald met de GRADE aanpak waarin langjarige series met weer zijn gegenereerd en de bijbehorende langjarige series afvoeren bij de Nederlandse grens zijn bepaald (Hegnauer et al., 2014). Deze WBI randvoorwaarden wijken af van de randvoorwaarden gebruikt in het VNK2 project. In VNK2 is de werklijn van de Thermometerrandvoorwaarden (TMR) gebruikt voor het bepalen van de piek horend bij een bepaalde overschrijdingskans in combinatie met een afvoergolfvorm met een overschrijdingskans van 50% gegenereerd door de afvoergolfvormgenerator. De TMR werklijnen en golfvorm zijn gebaseerd op statistische analyses van gemeten afvoeren te Lobith (Rijn), Dalfsen (Vecht) en Borgharen (Maas) (RWS, 2006).

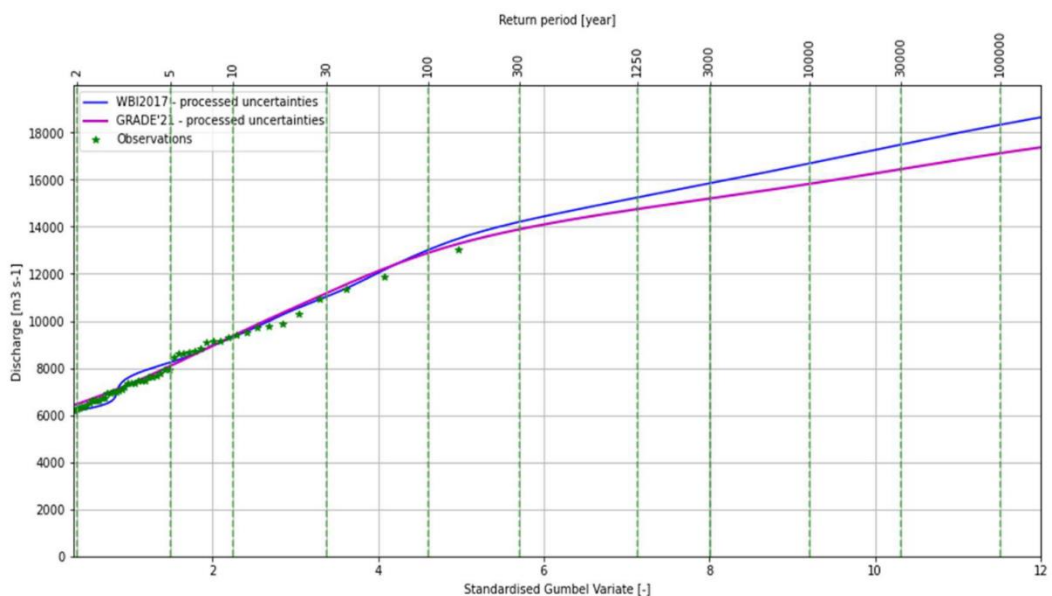
De GRADE werklijn voor de Rijn vlakt meer af in het extreme domein dan de werklijn welke voorheen (bij VNK2) werkt gebruikt. Dit betekent dat bij een zelfde overschrijdingskans volgens de GRADE werklijn een lagere afvoer hoort dan in het VNK2 project gebruikt is. De afvoergolfvormen zijn ook anders: De GRADE golven zijn steiler (Hegnauer et al., 2014). De kans op grote afvoeren in de GRADE aanpak is kleiner, doordat in de GRADE aanpak statistisch gegenereerde weerbeelden gemodelleerd worden met hydrologische en hydraulische modellen waarin ook het gedrag van de rivier bovenstrooms van Nederland is gerepresenteerd. De GRADE aanpak houdt dus rekening met het afvlakkende effect van overstromingen in Duitsland. De GRADE schematisatie beschreven in Prinsen et al. (2015) is gebruikt voor het bepalen van de statistiek voor WBI. Een nieuwere versie 3.0 is in 2023 uitgekomen voor de Rijn (Hegnauer et al., 2023). Deze versie is gebaseerd op een schematisatie met doorbraken in Duitsland en noodmaatregelen, en houdt daarnaast ook expliciet rekening met onzekerheden in golfcondities en waterstanden. Ter illustratie: de 1/1.250 per jaar afvoer te Lobith volgens deze aanpak (met onzekerheden) is 14.700 m³/s (tegen 16.000 m³/s in VNK2). Ook voor de Maas (Hegnauer et al., 2022) en de Vecht (Geertsema et al., 2023) zijn nieuwe versies uitgekomen.

⁹ Tenzij deze niet passen bij het beoogde doel (e.g. omdat een historische situatie of een VNK2 simulatie wordt gereproduceerd).

Een afvoer van 16.000 m³/s, de maatgevende afvoer tot 1 januari 2017 aan welke een overschrijdingskans van 1/1.250 per jaar werd gekoppeld, heeft in de nieuwe GRADE methode een overschrijdingskans van orde grootte 1/10.000 tot 1/20.000 per jaar als rekening wordt gehouden met onzekerheden (Hegnauer *et al.*, 2023). Voor de Vecht is in WBI een maximum afvoer van 800 m³/s aangenomen. Doordat de nieuwe golfvormen steiler zijn zal bij een zelfde piekafvoer minder water beschikbaar zijn voor overstroming en zal de overstroming zeker in wat grotere gebieden, minder ernstig zijn bij gebruik van de nieuwe golfvormen.

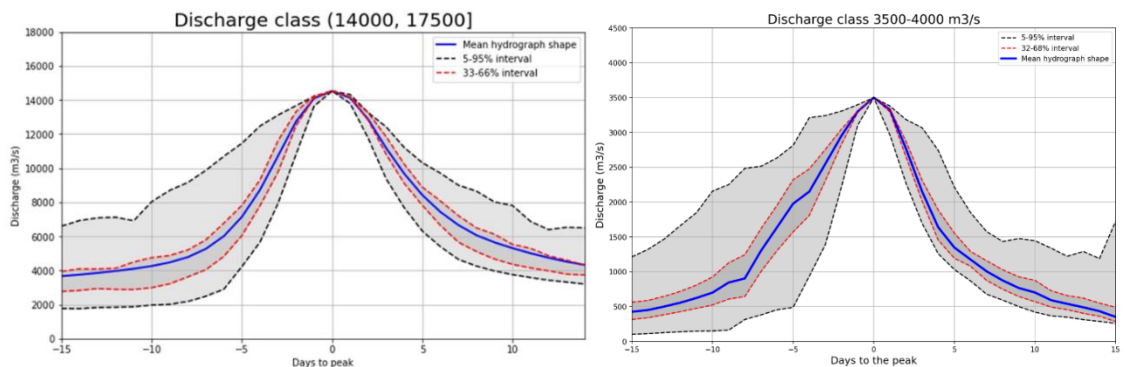


Figuur 5.5 Schematische weergave van de methode welke ten grondslag lag aan HR2006 en WT12011("TMR werklijn") en de nieuwe methode gebruikt in GRADE en in WBI2017 (Bron: Hegnauer *et al.*, 2016).



Figuur 5.6 Vergelijking van de afvoerstatistiek voor de Rijn bij Lobith (inclusief verwerkte onzekerheden) voor GRADE 2.0 en GRADE 3.0. De werklijn volgens GRADE vlakt af voor afvoeren boven ongeveer 12000 m³/s te Lobith (bron: Figuur 5.9, Hegnauer *et al.*, 2023).

In WBI zijn afvoergolfvormen voor ieder afvoerniveau gegeneerd door uit de GRADE resultaten alle afvoergolven met een vergelijkbaar piekniveau te selecteren en de duur van de verschillende afvoerniveaus te bepalen. Vervolgens is de duur die in 50% van de gevallen wordt overschreden bepaald en een afvoergolfvorm met een overschrijdingskans van 50% gegeneerd. Ook voor de Maas zijn GRADE uitkomsten gebruikt (Chbab *et al.*, 2017) (zie ook bijlage C).



Figuur 5.7 Links: GRADE 3.0 afvoergolfvorm voor de Rijn bij Lobith voor de situatie met overstromingen in Duitsland en een “afvoer-klasse” tussen 14.000 en 17.500 m³/s (bron: Figuur 5.13 in Hegnauer *et al.*, 2023). Rechts: GRADE 3.0 afvoergolfvorm voor de Maas bij Borgharen met overstromingen bovenstrooms van Borgharen bij een “afvoer-klasse” tussen 3.500 en 4.000 m³/s (bron: Figuur 4.9 in Hegnauer *et al.*, 2022).

In de hydrodynamische berekeningen uitgevoerd in het kader van het WBI project zijn de riviermodellen voor de Rijntakken gekalibreerd om de afvoerverdeling kloppend te krijgen voor een afvoer van 16.000 m³/s te Lobith. Voor hogere of lagere afvoeren is de afvoerverdeling niet aangepast aan de beleidsmatig gewenste afvoerverdeling. Bij gebruik van de WBI waterstandsverlopen voor overstromingsberekeningen langs de Nederrijn/Lek kunnen dus bij afvoeren boven de 16.000 m³/s te Lobith waterstanden optreden die hoger zijn dan die horend bij een 16.000 m³/s golf te Lobith (ofwel: de Nederrijn/Lek wordt in het WBI niet ontzien).

5.2.2 (door primaire waterkeringen) Beschermd gebied Maasvallei

Voor de door primaire waterkeringen beschermde gebieden in de Maasvallei kan het waterstandsverloop in de tijd als rand opgegeven worden. Dit is te vinden in de waterstandsverlooptool op de IPLO website (<https://iplo.nl/thema/water/applicaties-modellen/waterveiligheidsmodellen/waterstandsverlopen-tool/>). De overstroming van een enkel bedijkt gebied zal geen groot effect op de rivierwaterstand hebben. Indien er meerdere bedijkt gebieden overstroomd is het aan te raden om de rivier mee te modelleren en de afvoer bij Borgharen op de bovenrand en een Q/h relatie op de benedenrand op te leggen.

5.2.3 Kustgebieden

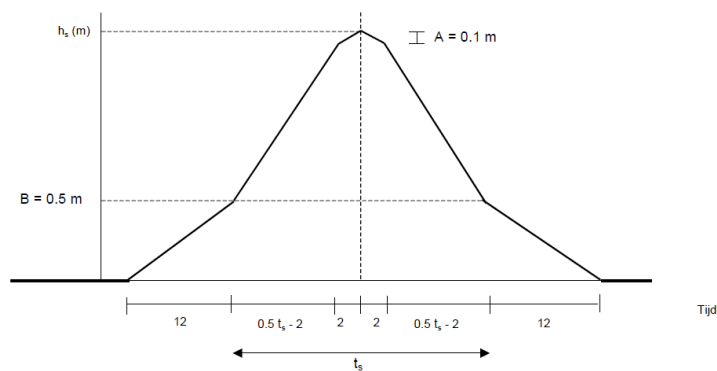
Geografisch gezien zijn de kustgebieden de gebieden langs de Westerschelde, de Zeeuwse kust, de kust van Noord- en Zuid-Holland en de Wadden. Ook de Oosterschelde wordt hier beschreven. Stormopzet in combinatie met getij bepalen hier de buitenwatercondities. Om overstromingen te simuleren zijn naast de stormopzethoogte keuzes nodig met betrekking tot de stormduur en het samenvallen van de stormopzet en het getij. De waterstanden op de Oosterschelde zijn afhankelijk van getij en stormopzet, maar worden beperkt door sluiting van de stormvloedkering Oosterschelde.

Bij het maken van overstromingssimulaties dienen standaard de keuzes gemaakt in WBI m.b.t. stormduur, stormopzet en het samenvallen van stormopzet en getij overgenomen te worden om consistentie te creëren¹⁰. Dit zijn (Chbab en de Waal, 2016, tabel 10.4):

- Zeeuwse en Hollandse kust: trapeziumvormige opzet met basisduur van 44 uur en topduur van 2 uur. Faseverschil is hier 2,5 uur.
- Hoek van Holland: trapeziumvormige opzet met een duur van 30 uur op een half meter niveau en flanken van 12 uur naar nul meter niveau. Faseverschil is hier -4,5 uur (zie Figuur 5.8)¹¹.
- Waddenzee: trapeziumvormige opzet met basisduur van 45 uur en topduur van 2 uur. Faseverschil is hier 5,5 uur.

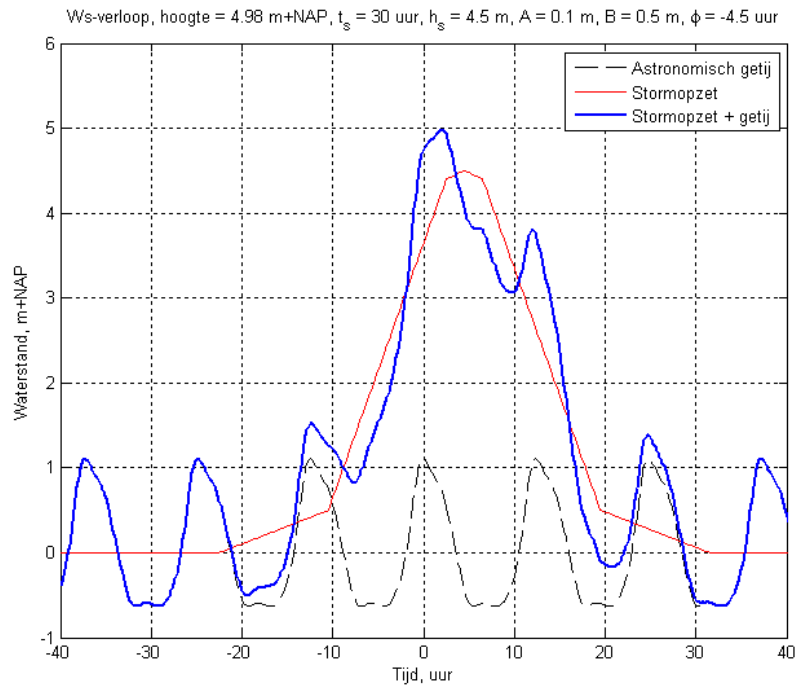
Het gemiddelde getij en de vorm van de het getij verloopt langs de Nederlandse kust. Voor Vlissingen, Roompot buiten, IJmuiden, Den Helder, Harlingen en Lauwersoog is het gemiddelde getij bepaald (Chbab en de Waal, 2016).

Op basis van interpolatie is voor de tussenliggende locaties het verloop van het getij bepaald. Om tot een waterstandsverloop te komen zijn het getij en de stormopzet samengevoegd en is zoals geïllustreerd in Figuur 5.8 en Figuur 5.9.

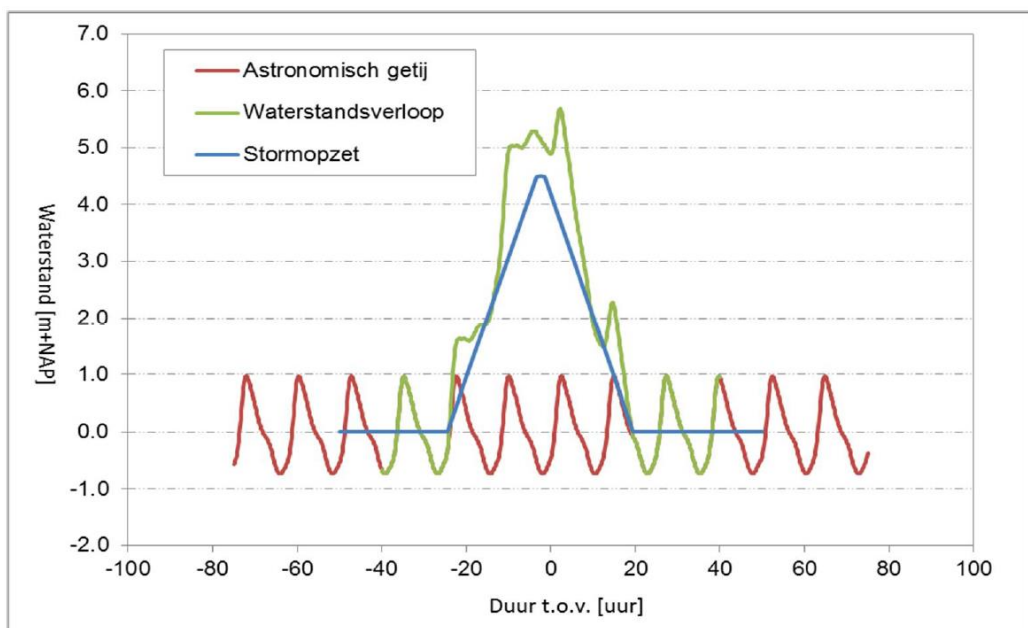


¹⁰ Tenzij het doel van de simulatie vraagt om afwijkende aannames en/of er een gevoeligheidsanalyse gedaan wordt. In de rapportage dient deze afwijking dan duidelijk beschreven te worden.

¹¹ De aanpak bij Hoek van Holland wijkt af van de rest van de Hollandse Kust. In Hoek van Holland is in WBI gekozen om een oudere methode te handhaven, omdat de randvoorwaardes bepaald met die methode ook gebruikt zijn voor het afleiden van de randvoorwaarden in het benedenrivierengebied met behulp van WAQUA. Op deze manier is Hoek van Holland consistent met het benedenrivierengebied (zie Chbab en de Waal, 2016)



Figuur 5.8 Waterstandsverloop voor station Hoek van Holland bestaande uit een stormopzetduur van 30 uur en faseverschil van 4,5 uur en flanken van 12 uur (bron: Figuur 2.3 en 2.4 van Geerse en Waterman, 2014).



Figuur 5.9 Waterstandsverloop voor station IJmuiden bestaande uit een stormopzetverloop van 44 uur in de basis en top duur van 2 uur, astronomisch getij en faseverschil van 2,5uur (bron: Figuur 10.11 van Chbab & de Waal, 2016).

Locatie van de randvoorwaarden

Bij kustsimulaties worden doorgaans randvoorwaarden in de vorm van een waterstandsverloop op de modelrand opgelegd en wordt alleen het bedreigde gebied gemodelleerd. De overstroming heeft immers geen effect op de zeewaterstand. Voor de Westerschelde wordt soms gekozen om in plaats van randvoorwaarden op de kust, randvoorwaarden te leggen op de Westerscheldemonding en de waterbeweging in de Westerschelde mee te modelleren. De modelleur kan hierin een keuze maken.

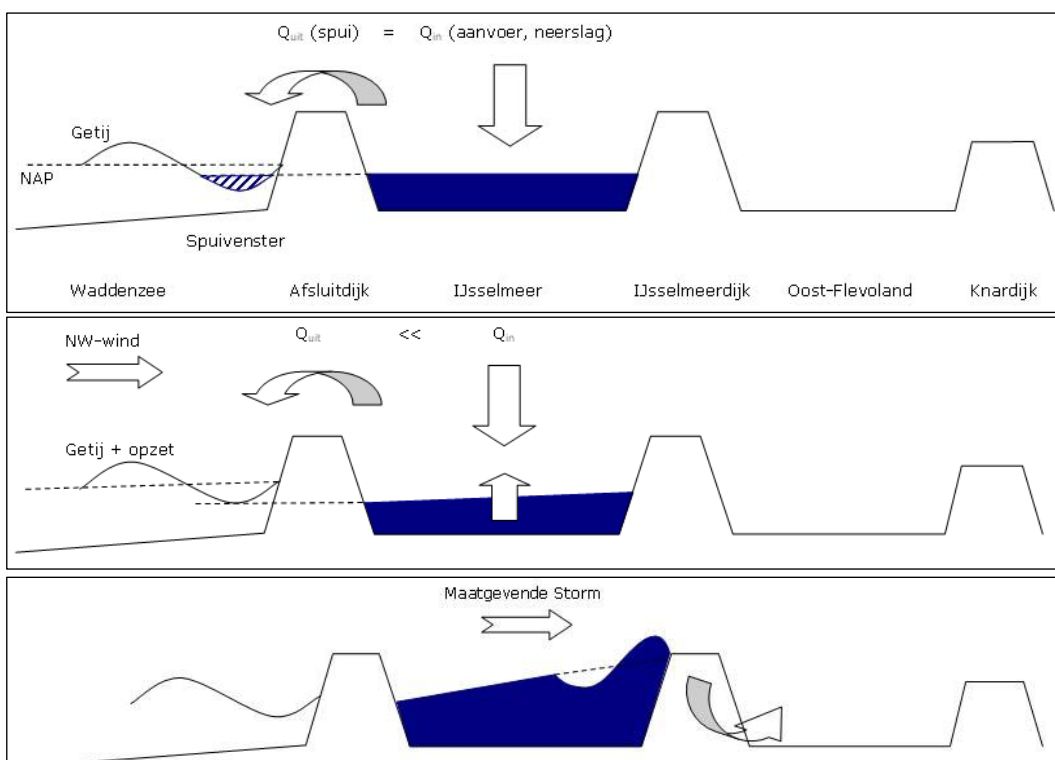
Waar is de informatie te vinden

De waterstanden horend bij verschillende overschrijdingsfrequenties en de tijdsverlopen gebruikt voor WBI zijn verkrijgbaar vanuit respectievelijk Hydra-NL en de Waterstandsverlooptool welke beschikbaar zijn gesteld via de IPLO website (<https://iplo.nl/thema/water/applicaties-modellen/waterveiligheidsmodellen/hydra-nl/> en <https://iplo.nl/thema/water/applicaties-modellen/waterveiligheidsmodellen/waterstandsverloopen-tool/>). Een voorbeeld voor enkele locaties in Noord-Holland is gegeven in bijlage D.

5.2.4 Meren

Het merengebied bestaat geografisch gezien uit het IJsselmeergebied inclusief de randmeren (Ketelmeer, Vossemeer) en het Markermeer (Gooimeer en IJmeer). Het meerpeil wordt vooral bepaald door het spuivolume van de meren naar de Waddenzee en de aanvoer vanuit de IJssel, uit het regionale systemen en door neerslag.

Wanneer door storm het spuien bemoeilijkt wordt door hoge waterstanden op zee en/of als de wateraanvoer naar het IJsselmeer vanuit rivieren en/of polderbemaling zo groot is dat de spuicapaciteit ontoereikend is, kan het gemiddeld waterpeil op het IJsselmeer stijgen en keringen bedreigen (zie Figuur 5.10). Ook kan door storm het water scheef gaan staan en daardoor met name de keringen aan de oostzijde van het meer bedreigen (zie Figuur 5.10). Dijken langs de grote meren worden dus belast door hoge meerpeilen en windopzet. De windopzet wordt bepaald door de windkracht en de windrichting. Afhankelijk van de locatie is of het meerpeil, of de stormopzet dominant voor de kans op doorbraak.



Figuur 5.10 Schematische weergave van het IJsselmeer en Flevoland (boven: dagelijkse situatie, midden: stijging van het meerpeil door beperkte spuimogelijkheden en grote aanvoer, onder: lokale stijging door scheefstand van het meerpeil door extreme storm).(uit: VNK, 2012).

De stormopzet bepaalt het begin van het overstromingsverloop, maar niet de eindsituatie. Het meerpeil, of liever gezegd, het volume water in het meer bepaalt de eindwaterdiepte¹². Het meer en het overstroomde gebied gedragen zich na een doorbraak immers als een soort communicerende vaten. Als we er van uitgaan dat er geen water vanuit het overstroomde gebied meer aangevoerd wordt naar het meer, dan is de eindsituatie alleen afhankelijk van het meerpeil. Bij het modelleren van doorbraken vanuit het meer dient de volumebalans kloppend te zijn. Aangezien de eindsituatie van polders zonder compartimentering, zoals de Noordoostpolder volledig afhankelijk is van het initiële meerpeil in het IJsselmeer (tenzij er grote instroom is vanuit de IJssel of afvoer richting de Waddenzee) kan deze eenvoudig bepaald worden.

Het initiële peil is de waterstand voordat de storm optrad (vaak rond -0.35m + NAP). De lokale waterstand door storm varieert van locatie tot locatie en kan meters hoger liggen. De eindwaterstand in zowel het meer als de polder zijn te bepalen met een bakjesbenadering. Er geldt:

$$m_{\text{eind}} = (m_{\text{start}} * A_{\text{meer}} + h_{\text{polder}} * A_{\text{polder}}) / (A_{\text{meer}} + A_{\text{polder}})$$

met:

m_{start}	=	initieel meerpeil [m+NAP]
m_{eind}	=	meerpeil in de evenwichtssituatie [m+NAP]
A_{meer}	=	oppervlakte beschouwde meer [ha]
A_{polder}	=	oppervlakte beschouwde polder (compartiment) [ha]
h_{polder}	=	gemiddelde bodemligging beschouwde polder [m+NAP]

Hierbij zijn de volgende gegevens relevant:

➤	Oppervlakte IJsselmeer:	119.300 ha
➤	Gemiddelde bodemligging IJsselmeer:	NAP -4,5 m
➤	Oppervlakte Noordoostpolder:	45.700 ha
➤	Gemiddelde bodemligging Noordoostpolder:	NAP -3,7 m

Wanneer er slechts interesse is in de maximale schade, is het verloop van de overstroming niet relevant. Echter, indien slachtoffers, of mortaliteit bepaald dient te worden, of wanneer evacuatie en/of vluchtmogelijkheden in beeld gebracht dienen te worden dan is het overstromingsverloop **wel** belangrijk. Deze is afhankelijk van het aantal doorbraken, de doorbraaklocatie, en ook de buitenwatercondities. In dat geval dient een dynamische modelsimulatie te worden uitgevoerd en kan niet worden volstaan met deze vereenvoudigde aanpak.

Waar zijn de randvoorwaarden te vinden:

Randvoorwaarden voor het meer zelf kunnen gevonden worden via helpdesk water. Piekwaterstanden en meerpeilen met een bepaalde overschrijdingsfrequentie kunnen berekend worden met Hydra-NL, te downloaden via de website van IPLO (<https://iplo.nl/thema/water/applicaties-modellen/waterveiligheidsmodellen/hydra-nl/>). Het tijdsverloop kan gehaald worden uit de waterstandsverlooptool welke ook te downloaden is via de IPLO website (<https://iplo.nl/thema/water/applicaties-modellen/waterveiligheidsmodellen/waterstandsverloopen-tool/>). Zie bijlage D voor een voorbeeld voor locaties in Noord-Holland.

Nogmaals, het correct modelleren van het volume water in het IJsselmeer en de afname daarvan door de overstroming is cruciaal.

¹² Alleen het volume dat zich bevindt boven maaiveldshoogte van het overstroomde gebied draagt bij.

5.2.5 Benedenrivieren

In het benedenrivierengebied ligt:

- Het noordelijk deltabekken (Rijnmond-Drechtsteden);
- IJssel-Vechtdelta (staat niet apart aangegeven in Figuur 5.3).

Noordelijk deltabekken

Het noordelijk deltabekken beslaat geografisch gezien het gebied gelegen tussen de lijn Hagestein-Tiel-Lith en de Maasmond. Hier zijn zowel de invloed van de zee als van de rivieren merkbaar. Ook het functioneren van de stormvloedkeringen, met name van de Maeslantkering en de Hartelkering zijn van invloed.

Bij het maken van overstromingsberekeningen wordt meestal de rivier mee gemodelleerd. Bovenstrooms wordt een afvoerloop in de tijd opgelegd bij Hagestein, Tiel en Lith. Benedenstrooms wordt een waterstandsverloop bij Hoek van Holland en het Haringvliet opgelegd. De Maeslantkering wordt al naar gelang het scenario verondersteld te functioneren of niet.

Voor het bepalen van het overstromingsrisico is het belangrijk om zowel berekeningen te doen met hoge rivierafvoeren als berekeningen met stormen en combinaties van beide. Het verloop van de overstroming is namelijk sterk verschillend: rivierhoogwaters duren meestal veel langer.

De bepalende belastingcombinatie horend bij het ontwerp punt of bij de normcondities is te vinden in Hydra-NL welke verkrijgbaar is via de IPLO website (<https://iplo.nl/thema/water/applicaties-modellen/waterveiligheidsmodellen/hydra-nl/>). Op de bovenranden van de rivierschematisatie worden vervolgens afvoergolven gezet passend bij de bepalende belastingcombinaties en op de benedenrand bij Hoek van Holland en het Haringvliet kustwaterstandsverlopen. Ook de Maeslantkering dient meegemodelleerd te worden zoals ook in de modellering voor VNK2 gedaan is (Piek, 2007; 2009).

De waterstandsverlopen uit het WBI zijn in het benedenrivierengebied niet direct toepasbaar omdat ze geen getij beschouwen.

Vecht en IJsseldelta

Dit gebied omvat de delta van de IJssel en Vecht. Hier is de waterstand afhankelijk van de afvoer van de IJssel en Vecht (en vanuit het regionaal systeem), van de windkracht en windrichting op het IJsselmeer, het IJsselmeerpeil, en het al dan niet sluiten van de Ramspolkering. Overstromingen in dit gebied worden gesimuleerd door een gedeelte van de rivier mee te simuleren en waterstandsranden op te leggen bij het IJsselmeer, en afvoerlopen in de tijd op de Vecht en de IJssel en ook de Ramspolkering mee te nemen. Het is van belang meerdere belastingcombinaties te bekijken, aangezien de waterstandsduur sterk kan verschillen tussen windgedreven en afvoergedreven gebeurtenissen en deze duur bepalend is voor het verloop van de overstroming.

5.2.6 Buitendijkse gebieden

Voor het bepalen van waterdieptes in buitendijks gebied, moeten hydraulische condities worden bepaald voor vier herhalingstijden: 1/10 per jaar, 1/100 per jaar, 1/1.000 per jaar en 1/10.000 per jaar (zie hoofdstuk 4). Hiervoor worden op de randen van het watersysteem afvoertijdverlopen en/of waterstandstijdverlopen gelegd en de lokale waterstanden gemodelleerd. Voor het modelleren van rivieren wordt bij Lobith/Lith een standaardafvoergolf uit GRADE opgelegd en benedenstrooms een waterstandsverloop. Voor de kustgebieden kunnen H(t) randen gebruikt worden. In het benedenrivierengebied kunnen piekwaterstanden gebruikt worden met bepaalde overschrijdingsfrequenties (bijv. uit Hydra-NL, verkrijgbaar via de IPLO website).

Op de meren kunnen ook waterstanden gebruikt worden uit Hydra-NL (zie bijlage D voor een voorbeeld). De dynamiek (het verloop in de tijd van de waterstand) is hier minder belangrijk dan binnendijks.

In buitendijkse gebieden worden soms berekeningen gedaan om overstromingen en wateroverlast door overslag en overloop te simuleren (bijvoorbeeld in buitendijks gelegen havens met kades). Voor dergelijke gebieden is ook golfhoogte en golfoverslag van belang. Windgedreven golven kunnen niet met overstromingsmodellen gesimuleerd worden. Daarom is het aan te raden voor dergelijke analyses het overloopdebiet $Q(t)$ te bepalen met een golfoverslagmodel en vervolgens als $Q_{rand(t)}$ op het buitendijks gebied te zetten.

5.3 Overstromingen vanuit het regionale watersysteem

5.3.1 Overstromingen als gevolg van doorbraken in regionale waterkeringen

Voor doorbraken van regionale keringen langs rivieren kan het waterstandsverloop een belangrijke rol spelen. Het verloop kan worden bepaald aan de hand van 'expert judgement', met behulp van ontwerpbuizen als invoer van een hydrologisch model of op basis van een afvoergolf-generator. Dit is uitgebreid beschreven door STOWA (2008).

Bij de grotere polders (bijvoorbeeld de Schermer, Beemster, Purmer, Heerhugowaard) is het belangrijk om de toestroom van water vanuit de boezem goed te modelleren en de sturingsopties mee te nemen. Een grote polder lijkt niet op een badkuip, verschillende breslocaties kunnen een heel verschillend overstromingsverloop geven. Hier is een dynamische som dus op zijn plaats. Bij de kleine polders is een bakjesaanpak vaak wel mogelijk, zeker als slachtoffers niet relevant zijn.

5.3.2 Overstromingen van onbeschermd gebied vanuit het regionale watersysteem

Voor overstromingen van onbeschermd gebied vanuit het regionale watersysteem kunnen hydraulische randvoorwaarden worden bepaald op basis van een hydrologisch/hydrodynamisch model. De standaardwerkwijze is toegelicht in STOWA (2011). In dit document wordt ook aangegeven dat een 100% GIS-matige aanpak, een stationaire aanpak, en expert judgement aanpak niet voldoen.

5.4 Schematiseren van hoogte, ruwheid en waterlopen

Voor het simuleren van overstromingen wordt het bedreigde gebied geschematiseerd. Hiervoor is een keuze voor een type model en modelpakket en resolutie nodig en dient data verzameld te worden. Hoofdstuk 2 en paragraaf 5.1 geven hier informatie over.

Voor het simuleren van overstromingen is de volgende data nodig:

- Van het bedreigde gebied:
 - Hoogtegegevens;
 - Landgebruiksgegevens (te vertalen in ruwheden);
 - Informatie over de ligging, hoogte en standzekerheid van obstakels en onderdoorgangen daarin;
 - Locatie, dimensies en sturingsgegevens van watergangen binnen het bedreigde gebied.
- Van het water van waaruit de overstroming plaats vindt:
 - is het het bovenrivierengebied, benedenrivierengebied, IJsselmeer of een regionale waterloop:
 - modelschematisatie van het buitenwatersysteem (of data om die te maken: profielen, ruwheden)
- Informatie over relevantie kunstwerken (keringen, sluisen, stuwen, etc.) die het buitenwaterstandsverloop beïnvloeden of het overstromingspatroon binnendijks.

Tabel 5.1 geeft mogelijke informatiebronnen hiervoor aan.

Tabel 5.1 Overzicht van benodigde data en mogelijke databronnen.

Benodigde data	Databron	Locatie
Hoogtegegevens	De meest actuele versie van het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN)	Het PDOK (publieke dienstverlening op de kaart) voor ruwe producten (https://www.pdok.nl/), ESRI voor een direct dicht geïnterpoleerd product (vloerhoogte huizen i.p.v. dakhoogte)
Landgebruikgegevens	LGN	WUR (https://www.wur.nl/nl/onderzoek-resultaten/onderzoeksinstituten/ambiental-research/faciliteiten-tools/kaarten-en-gis-bestanden/landelijk-grondgebruik-nederland/wat-is-lgn.htm)
Locatie van dijken	Beheerder	Waterveiligheidsportaal.nl voor de primaire waterkeringen
Gegevens van regionale waterlopen (ligging, afmetingen)	Bij de betreffende waterschappen	-
Gegevens van kunstwerken in waterlopen (ligging, sturing, relevantie bij hoogwater/ Overstromingsverloop)	Bij de betreffende waterschappen	-
Ligging en hoogte van potentieel kerende lijnvormige elementen (wegen, spoorwegen, secundaire keringen)	NBW-Wegen en NBW spoorwegen, afgeleid van Top10.nl, waterschap	https://www.pdok.nl/introductie-/article/basisregistratie-topografie-brt-topnl

Wanneer de data verzameld is, zijn de volgende stappen aan te bevelen:

- 1 Check consistentie tussen bijvoorbeeld het hoogtemodel, landgebruik en wegenkaarten: klopt de locatie van een weg op een dijk, met de ligging van de dijk in het hoogtemodel, liggen er geen huizen in waterlopen etc.
- 2 Maken schematisatiebouwstenen (ruwheidsgrid, hoogtemodel, waterloppennetwerk, bresgroeschematisatie).

- 3 Controleer deze:
 - Zijn watergangen verbonden (check: leg een hoge initiële waterstand op in 1 watergang en controleer of alle watergangen nat worden)
 - Liggen de rivieren en kanalen tussen de dijken en niet aan de verkeerde kant (in het binnendijkse gebied) (check waterlekage in een situatie zonder overstroming)
 - Zijn er geen zwevende 1D takjes die geen doorstroom hebben vanwege verkeerde of inconsistente hoogtegegevens?

Van ieder model dient de gebruikte data vastgelegd te worden. Bewaar in ieder geval:

- De resulterende hoogte en ruwheidsgrids, referenties naar de bronbestanden, de gedane bewerkingen en conversietabellen (bv. van landgebruik naar ruwheid);
- Tijdstapgrootte, celgrootte, rekenperiode;
- Versienummer van de schematisatie.

In de volgende secties wordt een aantal belangrijke keuzes en stappen toegelicht.

5.4.1 Keuze voor celgrootte en tijdstapgrootte

Afhankelijk van het doel van het model en het gebied dient ook een resolutie of celgrootte gekozen te worden. Hoe groter de cellen hoe minder nauwkeurig, maar hoe korter de rekentijd. De maximaal gangbare grootte in Nederland van vierkante rastercellen is 100 bij 100m. Celgroottes van 50m en 25m worden ook gebruikt voor overstromingssimulaties op regelmatige grids. De nieuwe ontwikkelingen met flexibele roosters en subgrid in respectievelijk DFlow-FM en 3Di, zorgen vaak voor meer gedetailleerde resultaten. In 3Di kan met grote cellen gerekend worden indien het gebied homogeen is. Dit bespaart rekentijd. Zo kan er met kleinere cellen worden gerekend nabij de keringen, en groter waar mogelijk. De resulterende waterdieptes worden via de subgridmethode berekend en gepresenteerd op 5m schaal. In DFlow-FM kunnen kleinere cellen gebruikt worden op locaties die sterk inhomogeen zijn, of op locaties die van groot belang zijn.

Buitendijks wordt vaak grof gerekend, bijvoorbeeld per sobekvak, of WAQUA gridcel. Vervolgens worden de waterstanden geconverteerd naar waterdieptes op 5 bij 5m grids met behulp van gedetailleerde hoogteinformatie. Dit omdat daar de meeste waardevolle objecten bewust op de hogere delen zijn geplaatst. Dit wordt op een 5m grid nog goed gerepresenteerd.

De keuze voor celgrootte kan beïnvloed worden door gebruik van de uitvoer in andere pakketten. Veel overstromingssimulaties worden gebruikt als invoer voor schade- en slachtofferberekeningen. Het standaard schade- en slachtoffermodel (SSM2023) kan momenteel gridgroottes aan van 5, 25, 50 en 100m. Op dit moment vereist SSM2023 als invoer regelmatige waterdieptegrids. Voor buitendijkse overstromingen wordt een celgrootte van 5m geaccepteerd net als voor kleinschalige overstromingen. Voor grootschalige overstromingen is het aan te raden zo dicht mogelijk bij de in de overstromingsmodellering gebruikte resolutie te blijven. Celgroottes kleiner dan 5m werken dus niet met SSM2023. Daarnaast worden resultaten door toegenomen bestandsgroottes lastiger te verwerken. Het wordt daarom afgeraden celgroottes kleiner dan 5m naar het LDO te uploaden, ook al is er met een kleinere resolutie gerekend.

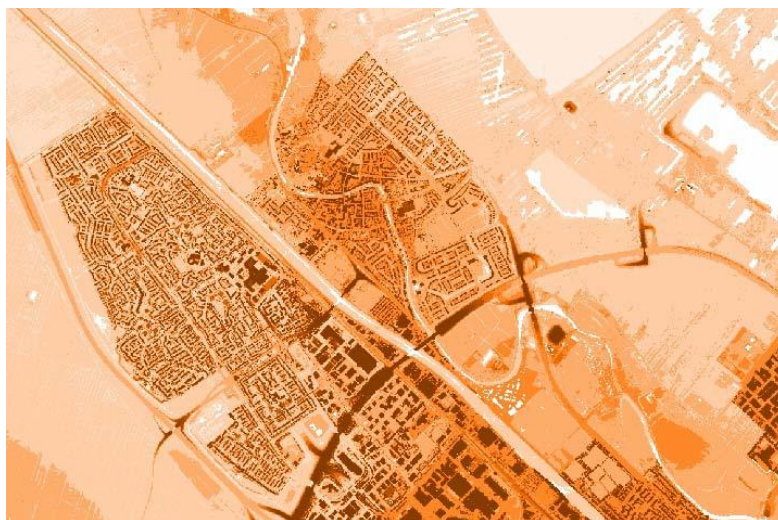
Een kleine tijdstap vraagt meer rekentijd, maar voorkomt oscillaties of onnauwkeurige resultaten. De meeste modellen zijn stabiel en zullen ook resultaten geven bij grotere tijdstappen. Een gangbare tijdstap is ongeveer 1 minuut.

5.4.2 Het maken van het hoogtemodel

Voor het maken van een hoogtemodel worden de volgende stappen doorlopen:

- 1 Verzamel de juiste en meest actuele AHN kaarten.
- 2 Check of er maaiveldhoogtes aanwezig zijn ter plaatse van gebouwen. Zo niet, interpoleer dan waardes uit omliggende cellen om de gebouwen uit de hoogtedata te verwijderen.
- 3 Controleer ontbrekende data en vul die eventueel.
- 4 Converteer eventueel naar de juiste resolutie indien het gewenste modeltype dat vereist door de mediane waarde te nemen (e.g. uit 25 cellen indien van 5 bij 5m naar 25m cellen overgegaan wordt).
- 5 Brand obstakels en andere verhoogde lijnelementen welke standzeker worden verondersteld, in het hoogtemodel. De hoogte van deze lijnelementen kan uit het AHN worden gehaald door een gedetailleerd AHN te nemen en daar de cellen uit te selecteren welke liggen ter plaatse van obstakels (met een shape van de obstakels). Vervolgens converteer je die geselecteerde cellen naar de juiste resolutie (bijv. 25m) door te kiezen voor de maximale waarde.
- 6 Indien 3Di en of DFlow-FM gekozen worden, blijven stap 1-3 cruciaal. De conversie naar een grotere resolutie is dan niet altijd nodig.

Voor de hoogte van het bedreigde gebied kan gebruik gemaakt worden van het algemeen hoogtebestand Nederland. Oudere schematisaties zijn vaak gebaseerd op verouderde versies van het AHN. In de recentere versies van het AHN (vanaf versie 3) worden inmiddels standaard al filters toegepast om foutieve maaiveldswaarnemingen te corrigeren (e.g. dak van huizen, boomtoppen, vrachtwagens op snelwegen etc.). Het is daarom aan te raden een recente AHN-versie te gebruiken indien deze beschikbaar is. Met een visuele controle is snel te zien of de data gefilterd is op objecten (zie Figuur 5.11).



Figuur 5.11 Voorbeeld van een hoogtemodel waarin de daken van gebouwen als hoogte meegenomen zijn. De gebouwen liggen allemaal zeer hoog boven maaiveld. Dit is incorrect. Dit is een gebied in het noordwesten van de stad Utrecht. De hoogteligging varieert volgens deze kaart van minder dan NAP -2 m (lichtbruin) tot meer dan NAP +10 m (donkerbruin).

De ligging van verhoogde elementen zoals dijken, snelwegen en spoorwegen kan uit gedetailleerde hoogtegrijs gehaald worden door daar kaarten met de locatie van deze elementen overheen te leggen (clip met shapes van bijvoorbeeld topografische kaarten zoals die uit basisregistratie topografie en basisregistratie grootschalige topografie, digitaal topografisch bestand Rijkswaterstaat (<https://maps.rijkswaterstaat.nl/dataregister/srv/dut/catalog.search#/home>)).

Indien gewerkt wordt met grovere resoluties, bv. met 25 of 50m grids is het gebruikelijk om te aggregeren door van hoogtegrijs met fijnere resoluties (e.g. 5m AHN grids) de mediane waarde te nemen. Echter, voor obstakels dient de maximale waarde te worden gekozen om er zeker van te zijn dat het obstakel als obstakel meegenomen wordt.

5.4.3 Ruwheid

Een ruwheidsgrid wordt gemaakt door landgebruikskaarten te vertalen met conversietabellen. Een voorbeeld voor vertaling van LGN naar Nikuradse is gegeven in tabel 5.2.

Tabel 5.2 Vertaling van landgebruiksklasse naar een ruwheidswaarde voor LGN4.

VALUE	Landgebruik (LGN4)	Ruwheidswaarde (winter) Nikuradse
1	Grasland	0.25
2	Mais	0.40
3	Aardappelen	0.40
4	Bieten	0.40
5	Granen	0.40
6	Overige Landbouwgewassen	0.40
8	Glastuinbouw	5.0
9	Boomgaard	5.0
10	Bollen	0.40
11	Loofbos	5.0
12	Naaldbos	5.0
16	Zoet Water	0.10
17	Zout Water	0.10
18	Stedelijk bebouwd gebied	10.0
19	Bebouwing in buitengebied	10.0
20	Loofbos in bebouwd gebied	5.0
21	Naaldbos in bebouwd gebied	5.0
22	Bos met dichte bebouwing	10.0
23	Gras in bebouwd gebied	0.40
24	Kale grond in bebouwd gebied	0.40
25	Hoofdwegen en spoorwegen	1.0
26	Bebouwing in agrarisch gebied	10.0
30	Kwelders	1.0

VALUE	Landgebruik (LGN4)	Ruwheidswaarde (winter) Nikuradse
31	Open zand in kustgebied	1.0
32	Open duinvegetatie	1.0
33	Gesloten duinvegetatie	1.0
34	Duinheide	1.0
35	Open stuifzand	1.0
36	Heide	1.0
37	Matig vergraste heide	1.0
38	Sterk vergraste heide	1.0
39	Hoogveen	1.0
40	Bos in hoogveengebied	5.0
41	Overige moerasvegetatie	1.0
42	Rietvegetatie	1.0
43	Bos in moerasgebied	5.0
44	Veenweidegebied	0.25
45	Overig open begroeid natuurgebied	1.0
46	Kale grond in natuurgebied.	0.40

5.4.4 Waterlopen in het overstromde gebied

Waterlopen in het met overstromingen bedreigde gebied kunnen ervoor zorgen dat water zich snel verspreid over een groter gebied. Het is daarom aan te raden deze als 1D takje, of met fijne resolutie mee te nemen bij het maken van overstromingssimulaties, zeker indien de aankomsttijd van belang is. Gegevens over de ligging en dimensies van regionale waterlopen is beschikbaar bij de waterschappen.

5.4.5 Sturing van kunstwerken in buitenwater en overstromd gebied

De sturing van kunstwerken kan ook van invloed zijn op het overstromingsverloop. Als dat zo is, dan is aan te raden om voor de kunstwerken expliciet aan te geven hoe deze beheerd worden in het door te rekenen scenario, zodat deze reproduceerbaar is. Voorbeelden van rapportage zijn:

- sturing watersysteem volgens normale procedures (e.g. optrekken stuwen);
- sturing kunstwerken als gevolg van overstroming: behoudens sluiten A2 coupures geen bijzondere maatregelen. A2 gesloten op tijd/ waterstand X, details: x en y;
- compartimentering van het watersysteem na x uur.

Daar sturingsmogelijkheden in regionale watersystemen (bv. het compartimenteren van het watersysteem), zeker in laag Nederland, groot zijn, is het zeer belangrijk deze ook mee te nemen en goed te rapporteren. Het wordt aanbevolen een simulatie te doen zonder compartimentering van het watersysteem, een met werking volgens de procedures en calamiteitenplannen en nog een met de meest waarschijnlijke compartimentering. Zo kan voor een bepaald gebied gekeken worden wat er gebeurd bij een doorbraak als:

- 1 de gehele boezem zou leeglopen door de ontstane bres

- 2 officiële maatregelen en beheersacties zoals het dichtzetten van stuwen uitgevoerd wordt
- 3 extra ad-hoc calamiteitenacties uitgevoerd worden, zoals het afsluiten van een watergang met puin om verdere uitstroom door de bres te voorkomen.

5.5 Bresgroei

De locatie van een bres en bresgroei is zeer onzeker. Voor primaire en regionale waterkeringen worden scenario's doorgaans doorgerekend met een enkele bres. Bij extreme omstandigheden in grotere waterlopen kan het effect van meerdere bressen bepaald worden. Voor het moment van het ontstaan van een bres kunnen in de meeste modellen twee opties gekozen worden:

- Op een bepaald tijdstip (bijv. het tijdstip waarop de waterstand maximaal is);
- Bij een bepaalde rivierwaterstand (bv. de ontwerpwaterstand).

Wij raden aan hier om sommen te maken voor een bres op de top van de waterstand, conform de aanpak in VNK2. Deze keuze is gemaakt vanwege zijn eenduidigheid en de grote onzekerheid over het moment van doorbreken. In een gevoeligheidsanalyse kan dit gevarieerd worden.

Bresgroei kan op verschillende wijzen gemodelleerd worden, afhankelijk van de gekozen modelcode (Sobek/D-Hydro/3Di of ander model). Zo kan de bres gerepresenteerd worden door een stuw waarvan de breedte en hoogte als functie van de tijd wordt opgegeven. Het is ook mogelijk om bresgroei met een model te simuleren. Onzekerheden over bresgroei worden dan grotendeels verlegd van de bresgroei zelf naar de erosiebestendigheid van de dijk. Bresgroei wordt veelal gemodelleerd door middel van de formule van Verheij-Van der Knaap (2002). Deze formule wordt ook aanbevolen in de Quickscan Lijnvormige Kerende Elementen, uitgevoerd door Van Berchum (2021). Het voordeel van het modelleren van bresgroei door middel van de formule van Verheij-Van der Knaap is dat de relatie tussen bresgroei en het waterstandverschil over de dijk goed wordt meegenomen.

Met name bij de kust levert dit betere bresgroeischattingen op dan de exponentiele groei die vaak opgegeven wordt, aangezien daar door de getijden bressen niet volgens die formule groeien. De standaard optie voor modelleers zou dan ook het modelleren met Verheij-van der Knaap moeten zijn. Afwijkingen hiervan dienen goed gedocumenteerd te worden.



Figuur 5.12 Een bres in Zeeland ten tijde van de watersnoodramp in 1953.

Voor bresgroei in dijken kunnen default worden aangenomen:

- Verlaging van de kruin tot aan maaiveld binnen 10 minuten met een breedte van 10m.
- Vervolgens: breedtegroei volgens Verheij-van der Knaap (2002) (zie voor standaard parameters Figuur 5.13).
- Voor de minimale waarde tot waar de bres in de diepte groeit wordt uitgegaan van de maaiveldshoogte achter de bres, tenzij er voor de bres een hoger voorland ligt. Zo'n voorland wordt alleen meegenomen indien dit breder is dan 50m gemeten loodrecht op de waterkering¹³. Ontgrondingskuilen die ter plekke van de bres kunnen ontstaan, dragen meestal niet bij aan de stroming, aangezien daar neren ontstaan. Deze worden daarom niet meegenomen.

We stellen voor om standaard een scenario door te rekenen waarbij de bres niet gedicht wordt. Indien er protocollen of plannen zijn waarin activiteiten zijn vastgelegd om bres na een bepaalde tijd te dichten, dan is het aan te bevelen ook een variant door te rekenen waarin de bres gedicht wordt. In werkelijkheid is de duur van het dichten van een bres sterk afhankelijk van het aantal bressen in het scenario, de omvang van de bressen en het type bres/overstroming (Regionale watersysteem, rivierafvoer, meren of zee). Indien de buitenwaterstand zakt onder het bresniveau zal ook de instroom stoppen. Ook nadat een bres gedicht is of de instroom is gestopt kan het reeds binnengestroomde water zich nog verplaatsen naar lager gelegen delen. De simulatie dient dan dus nog door te gaan totdat overal de maximum waterdiepte is bereikt.

Het is aan te raden in een onzekerheidsanalyse het effect van de bresbreedte mee te nemen. In VNK2 is vaak een doorbraak berekend voor zowel een zand- als kleidijk. Dit kan opgevat worden als een gevoeligheidsanalyse voor de invloed van de bresbreedte. Verheij (2003) geeft daarbij, met enige voorzichtigheid, aan dat maximale bresbreedtes op basis van beschikbare gegevens voor zanddijken orde grootte 300m zijn (met een bandbreedte van circa 100m) en voor kleidijken orde grootte 75m (met een bandbreedte van circa 50m). Dit wordt onderbouwd door Özer et al. (2020), die in meer dan 400 dijkdoorbraken wereldwijd bresbreedtes vindt groter dan 200m, en in geen geval bresbreedtes groter dan 500m (data uit de International Levee Performance Database). De bresbreedtes berekend in Van Berchum (2021) met het BRAM-model lijken ver boven die range te vallen. Van Berchum (2021) concludeert dan ook dat vooralsnog het best uit kan worden gegaan van de bestaande Verheij-Van der Knaap formulering.

Verheij-van der Knaap (Verheij, 2003):

$$B(t) = B_0 + F_1 \frac{g^{0,5} H^{1,5}}{u_c} \log \left(1 + \frac{F_2 g}{u_c} t \right)$$

Waarin:

$$H = h_{buiten} - h_{binnen}$$

¹³ Indien de bres breder is dan het voorland (gemeten langs de dijk) dan wordt de hoogte van het voorland niet meer meegenomen.

In D-Hydro worden de onderstaande parameters ingegeven:

Formule Verheij-van de Knaap (2002) en default parameters:

- initiële bresbreedte: 10m (default in D-Hydro), range 1 – 100 m,
- Initiële kruinhoogte: dijkhoogte,
- diepte bres (Z_{\min}): gelijk aan hoogste van voorland of maaiveld achter bres
- kritieke stroomsnelheid (u_c): ~0.5 m/s (klei) of ~0.2 m/s (zand),
- $F_1 = 1,3$ ((default in D-Hydro), range 0,5 tot 5
- $F_2 = 0,04$ (default in D-Hydro), range 0,01 tot 1
- C_e : 1, bres groeit in 10 minuten tot Z_{\min} ,
- Tijdstip ontstaan bres: of bij waterstandspiek

Figuur 5.13 Voorbeeld voor Verheij van der Knaap parameters voor dijken.

Voor duinen zijn deze parameters en deze aanpak niet correct, maar worden ze wel toegepast. Aangezien zandduinen eenvoudiger eroderen dan zanddijken worden voor duinen als standaard parameters aangehouden: Initiële bresbreedte: 50m, $F_1 = 0,5$ en $u_c = 0.1$ m/s (Melisie, 2006, p. 61).



Figuur 5.14 Cruciale sluiting van een bres, nog voor deze echt kon groeien (schip de Twee Gebroeders vaart in een bres in 1953 bij Nieuwerkerk aan de IJssel).

5.6 Standzekerheid potentieel kerende lijnelementen

De standzekerheid van potentieel kerende lijnelementen zoals secundaire keringen, boezemkades, verhoogde snelwegen en spoorlijnen, is bepalend voor het overstroomde gebied en de diepte in het overstroomde gebied. Deze standzekerheid is echter onzeker, waardoor aannames nodig zijn. Indien keringen mogelijk niet als standzeker worden beschouwd en het wenselijk is om doorbraken te simuleren dan zijn er vele extra aannames noodzakelijk zoals waar de dijk zal breken en bij welke omstandigheden (e.g. als de dijk overstroomt).

Wij stellen voor om de volgende aannames te hanteren:

- Spoorwegen zijn standzeker tot maximaal de onderkant van het ballastbed. De maximale waterdiepte die gekeerd kan worden is 1 meter. Als de waterstand groter is dan de hoogte waarop de grindlaag begint, of de waterdiepte groter dan 1 meter, dan kan de modelleur kiezen voor het ter plaatse laten bezwijken van het lichaam, of tot overlopen van het lijnelement. Meestal wordt het tweede gekozen. De eerste optie is aan te bevelen als het gebied achter de spoorweg het interessegebied is.
- Voor wegen wordt aangenomen dat deze standzeker zijn. Verhoogde wegen zijn vaak autosnelwegen welke breed en verdicht zijn (Knoeff, 2003).
- Standzekerheid van oude keringen, boezemkades en dijken langs regionale waterlopen dient te worden nagevraagd bij de waterbeheerder.
- Geluidswallen langs autowegen worden niet in het hoogtemodel opgenomen, tenzij dit aarden wallen betreft.
- Het is belangrijk openingen en onderdoorgangen zoals fietstunnels mee te nemen in de schematisatie. Voor kleinere openingen, zoals duikers moet worden afgeleid hoe groot hun bijdrage is aan de ontwikkeling van de overstroming.

Let op: Indien uit de resultaten blijkt dat lijnvormige obstakels een grote invloed hebben op de resulterende waterdieptes, dan is een gevoeligheidsanalyse aan te raden. Er kan dan een simulatie met een bres of zelfs zonder de betreffende kering gesimuleerd worden.

5.7 Varianten

Zoals ook in de vorige paragrafen uitgebreid is beschreven, moet de modelleur een aantal keuzes maken in de modelschematisatie, die een effect kunnen hebben op het uiteindelijke overstromingsbeeld. Denk hierbij aan:

- het wel of niet sluiten van een stormvloedkering (ook verlaat sluiten SVK)
- afwijkende stormduur of piekafvoer
- afwijkende breskarakteristieken:
 - afwijkend startmoment van de bres (juist voor of na de hoogwaterpiek)
 - afwijkende bresbreedte.
- afwijkend gedrag achterliggende lijnelementen, zoals verhoogde spoorlijnen, wegen en compartimenteringskeringen.
- Ingreep waterbeheerder (regionale kering)
- Klimaatscenario '2100'

Het kan zinvol zijn de gevoeligheid van uitgangspunten te onderzoeken, door meerdere simulaties uit te voeren, waarbij de aannames over deze uitgangspunten worden gevarieerd. Deze kunnen ook worden toegevoegd in de LDO. En in LIWO kunnen ze verwerkt worden als varianten, waarbij ze niet in de landelijke maximale waterdieptekaart verwerkt worden, maar wel als losse variant vindbaar zijn.

5.8 Checken modeluitkomsten

In de ROR is een procedure opgesteld om modeluitkomsten te controleren en de uitkomsten van controles vast te leggen (Slager & Van der Doef, 2014) en ook de provincies Zuid-Holland, Utrecht en Noord-Holland hebben in hun handboek kwaliteitsborging overstromingsmodellen stappen gegeven ter controle van modelsimulaties (Vermeulen & Leenders, 2010). Gebruikelijke controles zijn (zie voor de standaardlijst van de ROR bijlage B):

- Check logs en foutmeldingen.

- Reken model door met constante buitenwatercondities en initiële condities en check of verhang/waterstanden logisch zijn en er geen overstromingen optreden en controleer logs en foutmeldingen.
- Reken afvoergolf of waterstandsverloop door zonder doorbraken. Check logs en foutmeldingen en bekijk of de waterstanden niet oscilleren maar continu verloop laten zien.
- Reken overstroming door en bekijk het moment waarop de bres ontstaat, het bresdebiet, waterstanden bij bres, en bresbreedtes. Klopt dit met de verwachting? Klopt ook de waterbalans? Check logs en foutmeldingen.
- Simulatietijd:
 - Bekijk of het effect van initiële condities geen invloed heeft op de overstroming.
 - Controleer of aan het einde van de simulatieperiode de maximale waterdieptes en de maximale verspreiding van het water is opgetreden. Is dit niet het geval, verleng dan de simulatieperiode.
- Bekijk het overstromingspatroon. Komt het overeen met de verwachting? Check belangrijke dijken/kanalen en hun effect en heroverweeg de aannames gedaan omtrent standzekerheid. Check belangrijke plaatsen voor gevolgen, e.g. dorpen/steden, diepe delen of locaties met hoge stijgsnelheden.
- Controleer het gedrag van kunstwerken in het model.
- Controleer of water door onderdoorgangen stroomt
- Controleer of variaties in buitenwaterstand verwachte resultaten opleveren (i.e. grotere waterdieptes en/of overstroomd oppervlak bij hogere buitenwaterstand).
- (x,y)-coördinaat breslocatie (of gebiedslocatie zonder waterkering) aanwezig.

6 Rapportage en visualisatie van overstromingsberekeningen

6.1 Rapportage

Om overstromingssimulaties te kunnen gebruiken en reproduceren is het van belang dat zowel de uitkomsten, als de gebruikte data en aannames correct gerapporteerd worden. Deze rapportage wordt ook opgenomen in de Landelijke Databank Overstromingsinformatie (Slager & Van der Doef, 2014). In rapporten over de simulaties zal minimaal moeten staan:

- 1 Vastleggen van het proces van overstromingsmodelleren, nl:
 - a Doel, scope, uitgangspunten en aannames, beoogde toepassing, beperkingen.
 - b Modeltype en modelversie.
 - c Opbouw van het overstromingsmodel: werkzaamheden, keuzes, en data → reproduceerbaarheid.
 - d Het scenario (buitenwatercondities, bresgroei, gedrag keringen, standzekerheid regionale keringen etc.). Voeg de gebeurtenissenboom toe (zie hoofdstuk 5, paragraaf 5.1).
 - e De controles en checks die gedaan zijn.
 - f Versie nummer van de schematisatie
 - g (hiervoor zijn formulieren, zie bijlage B).
- 2 Resultaten:
 - a Overstroomd gebied: Maximale waterdiepte, maximale waterhoogte, maximale stroomsnelheid, waterstand, aankomsttijd van het water, stijgsnelheid over de eerste 1.5m water, *inc* file (indien aanwezig). In het kader van uniformiteit wordt geadviseerd om buitenwater/permanent water uit de resultaten te knippen.
 - b Instroom: Bresdebieten in de tijd, waterstanden bij de bres in de tijd, bresbreedte in de tijd.

Voor een uitgebreid overzicht van de rapportage eisen voor aanlevering landelijk gebruik, zie bijlage B. Wanneer simulaties aan de LDO worden toegeleverd, dient ook de rapportage bijgeleverd te worden.

6.2 Visualisatie

Voor het gebruik van overstromingssimulaties is visualisatie belangrijk. Resultaten kunnen gevisualiseerd worden in kaarten welke een beeld geven op een bepaalde tijdstap, bijvoorbeeld: waterdiepte 2 uur na doorbraak, 6 uur na doorbraak, of een dag na doorbraak, of in kaarten welke een beeld geven van de gehele overstroming: bijvoorbeeld de kaart met maximale waterdiepte bereikt op enig moment tijdens de overstroming. Deze laatste is vereist voor rapportage aan de ROR, voor schadeberekeningen etc. De kaarten horend bij een bepaald tijdstip geven samen een indruk van het proces en het tijdsverloop tijdens het event. Deze indruk kan ook verkregen worden uit een filmpje.

Voor het controleren van de overstroming zijn ook grafieken belangrijk. Zo is het goed om te kijken naar het verloop van de buitenwaterstand in de tijd, het bresdebiet en de waterstand op een aantal locaties in de tijd weer te geven.

Bij het visualiseren kunnen standaardkleuren uit de ROR-kaarten worden gebruikt (zie <https://www.atlasleefomgeving.nl/kaarten>). De kleurkeuze kan bepalend zijn voor de indruk die het overstromingspatroon op mensen geeft. Donkerblauw of rood gekleurde gebieden ogen veel gevaarlijker dan lichtblauw gekleurde gebieden.

Het is ook mogelijk om 3D beelden te laten zien om zo beter weer te geven hoe diep het in bebouwd gebied wordt. Deze 3D beelden zijn prachtig en inzicht vergrotend, maar kunnen wel de indruk wekken dat de nauwkeurigheid en voorspellende waarde van de simulatie zeer goed zijn, ook wanneer dat niet het geval is.

7 Referenties

- Asselman et al., N., Wesseliuss, C., Leenders, J., Groot Zwaaftink, M. (2010). Onzekerheden in overstromingsmodellering: *Hoe uiten onzekerheden in modelschematisatie en scenariokeuze zich in berekende overstromingskenmerken?* Deltares project 1200650, Delft.
- Asselman, N., Bates, P., Woodhead, S., Fewtrell, T., Soares-Fraza, S., Zech, Y., Velickovic, M., De Wit, A., Ter Maat, J., Verhoeven, G., Lhomme, J. (2009) Flood inundation modelling: model choice and proper application. Floodsite report T08-09-03.
- Chbab, H., Den Bieman, J., Groeneweg, J. (2017). Hydraulische belastingen Rijntakken en Maas. Project 1230087-003. Deltares, Delft.
- Chbab, H. & De Waal, H. (2016). Achtergrondrapport Hydraulische Belastingen Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium 2017. Project 1230087-008, Deltares, Delft.
- De Bruijn, K., Slager, K. (2018). Leidraad voor het maken van overstromingssimulaties. Project 11200537-007, Deltares, Delft.
- DFlow-FM (2017): <https://download.deltares.nl/en/download/delft3d-fm/>
- Geerse, C., en Waterman, R. (2014). *Waterstandsverlopen zoete en zoute wateren. Beschrijving en review gerapporteerde verlopen en uitbreiden van de tool 'Waterstandsverloop'*. HKV Lijn in Water, Rapport PR2803. Lelystad.
- Geertsema, T., Van den Brink, H., Ten Velden, C., Leander, R. (2023). Generator of Rainfall and Discharge Extremes (GRADE) voor de Vecht. Rapport 11208037-003-ZWS-0005. Deltares, Delft.
- Hegnauer, M. Beersma, J.J., Van den Boogaard, H.F.P., Buishand, T.A., Passchier, R.H. (2014) Generator of Rainfall and Discharge Extremes (GRADE) for the Rhine and Meuse basins – Final report of GRADE 2.0. Rapport 1209424-004. Deltares, Delft.
- Hegnauer, M., Beersma, J., Van den Brink, H. (2022). 2 of 61 Generator of Rainfall and Discharge Extremes for the Meuse. Final report of GRADE-Meuse version 3.0. Rapport 11205237-003-ZWS-0016. Deltares, Delft.
- Hegnauer, M., Beersma, J., Van den Brink, H., Leander, R. (2023). Generator of Rainfall and Discharge Extremes for the Rhine. Final report of GRADE-Rhine version 3.0. Rapport 11205237-003-ZWS-0016. Deltares, Delft.
- Henckens, G., en Engel, W. (2017). *Benchmark inundatiemodellen. Modelfunctionaliteit en testbank berekeningen*. STOWA rapport 2017-34, STOWA, Amersfoort.
- Hoes, O. (2024). Vergelijking Waterschadeschatter en de Schade en Slachtoffer Module. *Overeenkomsten, verschillen en aanbevelingen*. STOWA 2024-14. <https://www.stowa.nl/publicaties/vergelijking-waterschadeschatter-en-de-schade-en-slachtoffer-module-overeenkomsten-verschillen-en>.
- IPO (1999). Richtlijn ter bepaling van het veiligheidsniveau van boezemkaden.
- IPO (2004). Visie op regionale waterkeringen. pp. 56

- Klimaatadaptatie Nederland (2024). <https://klimaatadaptatienederland.nl/stresstest/bijsluiter/>. Website geraadpleegd op 26 maart 2024.
- Klingen, L. (2016). Overstromingsmodel van Nederland. Msc Thesis, TU Delft, Delft.
- Knoeff, J.G. (2003). Toetsen waterkerend vermogen (spoor)wegen en slaperdijken / Fase 5.1 Delft: DelftCluster.
- Kok & Van der Doef (2008) Leidraad overstromingsberekeningen voor VNK2. Versie 2.0 d.d. 1 september 2008.
- Kok, M. & Van der Doef (2006). Uitgangspunten voor overstromingsscenario's in VNK2.
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu (2014). Synthesedocument deelprogramma Veiligheid.
- Melisie, E.J. (2006). Risicocase dijkgebied 14 Zuid-Holland, berekening van het overstromingsrisico. Veiligheid in Kaart. Rapport DWW-2006-010. DWW, Delft.
- Özer, I. E., van Damme, M., & Jonkman, S. N. (2019). Towards an international levee performance database (ILPD) and its use for macro-scale analysis of levee breaches and failures. *Water*, 12(1), 119.
- Piek (2007). Hydraulische Randvoorwaarden Overstromingsscenario's VNK-II. Provinciale Risicokaart. Provincie Zuid-Holland.
- Piek, R. (2009). Veiligheid Nederland in Kaart. Gevolgenberekeningen Dijkgebied 14. PZH-2009, Den Haag.
- RWS, 2006. Hydraulische randvoorwaarden HR-2006.
- Schuurmans, W. & Van Leeuwen, E. (2017). 3Di: Hollands glorie in watermodellering. *Stromingen* (2017), Nummer 3.
- Slager, K. & Van der Doef, M. (2014). Handboek overstromingsrisico's op de kaart. Project 1209425. Deltares, Delft.
- Slager, K. & D. Wagenaar (2017). Standaardmethode 2017 Schade en slachtoffers als gevolg van overstromingen. Deltares-rapport 11200580-004, pp 27
- STOWA (2007). Richtlijn Normering Compartimenteringskeringen, Utrecht, pp. 45
- STOWA (2008). Richtlijn – Normering keringen langs regionale rivieren. ORK 2008-04, pp. 25
- STOWA (2011). Standaard werkwijze voor de toetsing van watersystemen aan de normen voor regionale wateroverlast. ISBN: 978.90.5773.534.9.
- STOWA (2015). Overstromingsrisico Regionale keringen, Rapport 2015-26, pp 21
- STOWA (2024). Verbetering veiligheidsbenadering: integrale bevindingen. Rapport 2024-18. ISBN 978.94.6479.049.8.
- Van Berchum, E. (2021). Quickscan lijnvormige kerende elementen. Referentie: D10029883:257.

- Van Waveren, R.H., Groot, S., Scholten, H, Van Geer, F.C., Wösten, J.H.M., Koeze, R.D., Noort, J.J., (1999). Vloeiend modelleren in het waterbeheer. Handboek Good Modelling Practice. STOWA rapport 99-05. Rijkswaterstaat-RIZA-rapport 99.036. ISBN: 90-5773-056-1.
- Velner, R.G.J., & Spijker, M.J. (2011). Standaard werkwijze voor de toetsing van watersystemen aan de normen voor regionale wateroverlast. Rapport 31, 2011. STOWA, Amersfoort.
- Verheij, H. (2003). Aanpassen van het bresgroeimodel binnen HIS-OM. Rapport WL|Delft Hydraulics Q3299.
- Vergouwe, R. (2015). de Veiligheid van Nederland in kaart. Eindrapportage VNK, projectbureau VNK. Te vinden op: https://www.helpdeskwater.nl/publish/pages/33875/eindrapport_vnk.pdf
- Vermeulen, C.J.M., & Leenders, J.K. (2010). Kwaliteitsborging overstromingsmodellen. Handboek Versie 1.0. HKV Lijn in water, Delft, Nederland.
- VNK, 2012. Overstromingsrisico Dijkkringgebied 8 Flevoland. VNK2 dijkkringgebiedrapport.

8 Verklarende woordenlijst

Buitendijks: Gebied dat buiten de primaire keringen ligt.

Dijksegment: Een gedeelte van een dijk.

Dijktraject: Deel van een primaire waterkering dat afzonderlijk genormeerd is.

Dijkvak: Een deel van een waterkering met min of meer gelijke sterkte, eigenschappen en belasting.

Hydraulische belastingcombinatie: De combinatie van belastingen welke leidt tot falen van de waterkering: bv. rivierafvoer, meerpeil, windsnelheid en windrichting.

Illustratiepunt: Het illustratiepunt is die combinatie van waarden van stochasten, waarbij de grootste kans optreedt dat de hydraulische belasting precies even groot is als de sterkte van een constructie of onderdeel daarvan (Kok & van der doef, 2008) Dit punt is bv. in VNK2 gebruikt om de juist overstromingsberekening bij het betreffende scenario te selecteren.

LDO: Landelijke Databank Overstromingsinformatie (zie hoofdstuk 2).

LIWO: Landelijk Informatiesysteem Water en Overstromingen (zie hoofdstuk 2).

LVO: Landelijke Voorziening Overstromingsinformatie

OI: Ontwerp Instrumentarium (OI) van waterkeringen. Instrumentarium om versterkingen aan keringen te ontwerpen rekening houdend met toekomstscenario's zoals die voor het klimaat.

Ontwerppeil: Ook ontwerp-waterstand of maatgevende hoogwaterstand (MHW) genoemd. Het is een waterstand, met een lage frequentie van voorkomen, waarop de waterkeringen zijn ontworpen. Het begrip MHW is onderdeel van de normering die in de afgelopen tientallen jaren in Nederland van kracht is geweest.

Overstroming: Het onderlopen van gebied dat normaal gesproken droog is.

Overstromingsscenario: Conditie waaronder de schematisatie wordt doorgerekend (gebaseerd op Vermeulen & Leenders, 2010)

Overstromingssimulatie: Berekening van een overstromingspatroon of overstromingsverloop horend bij een specifiek scenario (zie overstromingsberekening)

Overstromingsberekening: Berekening van een overstromingspatroon of overstromingsverloop horend bij een specifiek scenario (zie overstromingssimulatie)

Risico: De verwachte jaarlijkse overstromingsimpact (uitgedrukt in bijvoorbeeld de jaarlijkse verwachte schade (€/jaar), of het jaarlijks verwachte aantal slachtoffers (slachtoffers/jaar). Over het algemeen wordt gerekend met risico = kans x gevolg

ROR: Richtlijn Overstromingsrisico's. Richtlijn vanuit de EU die lidstaten vraagt kaarten te maken van overstromingsparameters in gebieden met een significant overstromingsrisico en plannen voor het omgaan met die overstromingsrisico's

Schematisatie: Weergave van de werkelijkheid in het model (Vermeulen & Leenders, 2010).

Toetspeil: Ook Maatgevend Hoogwater (MHW). Waterstand met een overschrijdingsfrequentie (gekoppeld aan de veiligheidsnorm) die tot 1 januari 2017 gebruikt wordt voor het beoordelen van de toestand van de waterkeringen.

Trajectdeel: Een deel van een dijktraject, voorheen VNK Ringdeel.

Voorland: wanneer buitendijks het maaiveld of het winterbed zo hoog ligt dat de waterdiepte de golfhoogte reduceert. Indien het voorland een breedte heeft (gemeten loodrecht op de waterkering) van 50m of meer, dan wordt aangenomen dat het laagste punt in de bres gelijk is aan de hoogte van het voorland (Kok & Van der Doef, 2008). Is het voorland smaller, dan wordt het binnendijkse maaiveld aangehouden. De afstand van 50 is een arbitraire keuze gemaakt door VNK.

Werklijn: Een werklijn geeft de relatie weer tussen de rivierafvoer en de overschrijdingsfrequentie van de rivierafvoer (Kok & Van der Doef, 2008).

WBI: Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium (WBI): het instrumentarium waarmee waterkeringen getoetst kunnen worden aan de normen. Er zijn instrumenten voor de globale toets welke eerst gedaan wordt voor alle keringen, en voor de meer geavanceerde detailtoetsen welke gedaan kunnen worden indien keringen volgens de globale toets niet voldoen.

A Wanneer nieuwe sommen?

Overwegingen voor de keuze om wel of niet nieuwe sommen te maken:

Er worden overstromingssimulaties gevraagd (er is aanleiding e.g. CBA, ROR, consistentie met andere gebieden) en:

- 1 Gebied is veranderd (woonwijken, obstakels);
- 2 Nieuwe wensen qua software (visualisatie, B&O, resolutie, of er zijn geen experts die de kwaliteit of achtergrond van de oude simulaties kennen of kunnen beoordelen);
- 3 Er worden sommen gevraagd bij andere omstandigheden (randvoorwaarden):
 - Bijvoorbeeld door nieuwe inzichten in de actuele overstromingskans, of met betrekking tot de golfvorm (smallere golfvorm /andere golfduur), etc.
 - Of doordat de normen voor een kering veranderd zijn (sommen bij meer extreme condities nodig)
 - Of het effect van de nieuwe afvoergolfvorm (veel steiler) wordt belangrijk gevonden.
- 4 De keuzes in de oude modelsimulaties zijn niet consistent met de leidraad of met nieuwe inzichten. Zo kan bresgroei, moment van breken, of standzekerheid van secundaire keringen anders gemodelleerd zijn dan nu default is.

Met name in grote door primaire keringen beschermde gebieden met grote potentiële gevolgen zoals de gebieden in het rivierengebied werden grote verschillen in schade gevonden bij verschillende doorbraaksimulaties op dezelfde locatie maar bij verschillende waterstanden. In bijvoorbeeld de gebieden beschermd door dijktraject 16, 48 en 53 verschillen de schades en slachtofferaantallen sterk bij verschillende buitenwaterstanden. Om een idee van de gevoeligheid te krijgen kan gekeken worden naar de resultaten van bestaande simulaties, zoals die gemaakt voor VNK2.

Voor de overstromingsscenario's in de Landelijke Databank Overstromingsinformatie (LDO) heeft HKV een [tool/viewer](#) ontwikkeld voor een inschatting van de actualiteit, betrouwbaarheid en compleetheid van overstromingsscenario's in de databank. Deze inschatting wordt gedaan op basis van verschillende indicatoren m.b.t. de scenario's, denk aan indicatoren met betrekking tot de scenario's, de breslocatie, het traject of gebied.

B Gevraagde gegevens en controles van overstromingssimulaties voor de ROR

B.1 Gevraagde gegevens

In deze bijlage is aangegeven welke gegevens er worden gevraagd voor de overstromingssimulaties en de controle hiervan. Het overzicht is gebaseerd op Slager & Van der Doef (2014), aangepast naar type overstroming, en aangevuld met enkele extra invoervelden.

Per relevant overstromingstype is aangegeven of het veld voor aanlevering verplicht (■), dringend gewenst (□) en/of niet van toepassing (-) is. De relevante overstromingstypen zijn:

- A. Overstroming vanuit primair water van niet door genormeerde waterkeringen beschermd gebied.
- B. Overstroming als gevolg van doorbraak in een primaire waterkering
- C. Overstroming als gevolg van doorbraak in een genormeerde regionale waterkering
- D. Overstroming vanuit regionaal water van niet door genormeerde waterkeringen beschermd gebied.

Attribuut	Attribuut-type	Beschrijving	Type A	Type B	Type C	Type D
Algemeen						
Scenario Identificatie	ID	Zelf te kiezen identificatie code van het scenario	■	■	■	■
Scenarionaam	Tekst	Een aanduiding die beschrijft met welk buitenwaterscenario de overstromingsinformatie is gegenereerd	■	■	■	■
Scenariotype	Tekst	Hier wordt aangegeven om welk type overstroming het gaat: A (primair onbeschermd), B (doorbraak primaire kering), C (doorbraak regionale kering) of D (regionaal onbeschermd)	■	■	■	■
TrajectID	Tekst/ID	Hier wordt aangegeven om welk dijktraject het gaat, alleen relevant voor type B scenario's.	□	■	□	□
Trajectdeel	Tekst/ID	Hier wordt aangegeven om welk deel van het traject het gaat. Alleen relevant voor type B scenario's.	□	■	□	□
Basisscenario	Tekst	Hier wordt aangegeven of het om een standaardscenario gaat of een variant. JA/NEE	■	■	■	■
Scenariodatum	DD/MM/JJJJ	Datum aanmaken scenario	■	■	■	■
Projectnaam	Tekst	Benaming project van scenario informatie	■	■	■	■

Attribuut	Attribuut-type	Beschrijving	Type A	Type B	Type C	Type D
Eigenaar overstromingsinformatie	Tekst / Selectie	Naam van rijkswaterstaat, provincie of waterschap Naam eigenaar kiezen uit lijst	■	■	■	■
Beschrijving scenario	Tekst	Extra informatie met betrekking tot scenario	■	■	■	■
Versie resultaat	Decimaal	Versienummer resultaat	□	□	□	□
Doel	Tekst	Beschrijving waarom dit scenario gemaakt is	■	■	■	■
Berekeningsmethode	Selectie	1 = waterstand gebied gelijk aan waterstand systeem; 2 = bakjesmodel; 3 = 2D model;	■	■	■	■
Motivatie keuze methode	Tekst	Beknopte motivatie voor het keuze van de berekeningsmethode	■	■	■	■
Houdbaarheid van scenario	Selectie	Termijn dat het scenario geldig is	□	□	□	□
Locatie						
y-coördinaten doorbraaklocatie	Decimaal	RD-coördinaat	-	■	■/-	-
x-coördinaten doorbraaklocatie	Decimaal	RD-coördinaat	-	■	■/-	-
Naam buitenwater	Tekst / Selectie	Lijst met buitenwateren	■	■	□	■
Naam waterkering	Tekst	Naam van genormeerde waterkeringen	-	□	□	-
Naam doorbraaklocatie	Tekst	Een aan het buitenwater en/of kering gerelateerde aanduiding voor de breslocatie	-	□	□/-	-
Gebiedsnaam	Tekst / Selectie	Naam van dijkkring, polder, stroomgebied uit domeinlijst gebiedsnamen	■	■	■	■
Bresinstellingen						
Materiaal kering	Tekst	Materiaal waaruit de kering is opgebouwd	-	□	□/-	-
Bresdiepte	Decimaal	Relatieve maat van de bresdiepte gemeten vanaf de kruinhoogte[m]	-	□	□/-	-
Duur bresgroei in verticale richting	Interval (DD:HH:MM)	Tijdsduur waarover de bres in verticale richting groeit	-	□	□/-	-
Initiële bresbreedte	Decimaal	Breedte van de bres bij start van dijkdoorbraak	-	□	□/-	-
Methode bresgroei	Selectie	1 = automatisch; 2 = vast	-	□	□/-	-
Startmoment bresgroei	Interval (DD:HH:MM)	De tijd in uren tussen start simulatie en de start van de bres	-	■	■/-	-
Maximale bresbreedte	Decimaal	Breedte van de bres in eindtoestand	-	□	□/-	-

Attribuut	Attribuut-type	Beschrijving	Type A	Type B	Type C	Type D
Uc parameter	Decimaal	Kritieke stroomsnelheid [m/s], waarbij bresgroei wordt gestart	-	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	-
F1 parameter	Decimaal	Waarde alfa [-]	-	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	-
F2 parameter	Decimaal	Waarde beta [-]	-	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	-
Ce	Decimaal	Afvoer coëfficiënt [-]	-	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	-
In. Crest	Decimaal	Initiële kruinhoogte (m +NAP)	-	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	-
Rivierknoop	Tekst	Rivierknoop waarop de bres aanhaakt	-	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	-
Boezemknoop	Tekst	Boezemknoop waarop de bres aanhaakt	-	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	-
Lowest crest	Decimaal	Hoogte tot waar de bres groeit (Zmin) [mNAP]	-	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	-
Gridhoogte	Decimaal	Gridhoogte tot waar de bres groeit [mNAP]	-	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	-
MaximaalBresdebit	Decimaal	Maximaal debiet dat door de bres het gebied instroomt	-	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	-
MaximaleInstroom	Decimaal	Totaal debiet dat door de bres gebied instroomt	-	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	-
Lengte dijktrajectdeel	Tekst	Lengte van het dijktrajectdeel waarvoor de overstromingsberekening representatief is	-	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	-
Buitenwater						
Buitenwatertype	Selectie	Kiezen type buitenwater uit domeinlijst	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Maximale buitenwaterstand	Decimaal	maatgevend peil (mNAP)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Stormvloedkering open**	Text	Lijst van kering(en) die in het scenario open worden verondersteld	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Stormvloedkering gesloten**	Text	Lijst van kering(en) die in het scenario gesloten worden verondersteld	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Compartimentering van de boezem**	Boolean	Kiezen tussen wel of geen compartimentering: True of False	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Eigenschappen getijde**	Tekst	Specifieke eigenschappen van gebruikt getij bij het scenario	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	-	<input type="checkbox"/>
Gemiddeld meerpeil**	Decimaal	Gemiddelde waterstand buitenwater	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Piekduur**	Interval (DD:HH:MM)	Tijdsduur van de stormpiek	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Stormduur**	Interval (DD:HH:MM)	Tijdsduur van de totale storm	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Debiet-randvoorwaardenlocatie	Text	Naam van de locatie(s) met een randvoorwaarde t.a.v. debiet	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Attribuut	Attribuut-type	Beschrijving	Type A	Type B	Type C	Type D
Debiet	Decimaal	Lijst met gebruikte debieten voor benoemde randvoorwaardelocatie(s)	<input type="checkbox"/> /-	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> /-	<input type="checkbox"/> /-
Waterstand-randvoorwaarden-locatie	Text	Naam van de locatie(s) met een randvoorwaarde t.a.v. waterstand	<input type="checkbox"/> /-	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> /-	<input type="checkbox"/> /-
Waterstand	Decimaal	Lijst met gebruikte waterstanden voor benoemde randvoorwaardelocatie(s)	<input type="checkbox"/> /-	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> /-	<input type="checkbox"/> /-
Overschrijdingsfrequentie	Tekst	Overschrijdingsfrequentie van de optredende buitenwaterstand	■	■	■	■
Model						
Datum modelschematisatie	Datum	Datum waarop het model gemaakt is	<input type="checkbox"/> /-	■	<input type="checkbox"/> /-	<input type="checkbox"/> /-
Variant beschrijving	Tekst	Beschrijving van specifieke schematisatie eigenschappen	<input type="checkbox"/> /-	■	<input type="checkbox"/> /-	<input type="checkbox"/> /-
Bodemhoogte model (bestand en jaartal)	Tekst	Bijv. AHN (2001)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ruwheid model (bestand en jaartal)	Tekst	Bijv. ecotopenkaart (2008)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Start berekening	Datum/Tijd	Tijdstip waarop berekening is gestart	<input type="checkbox"/> /-	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> /-	<input type="checkbox"/> /-
Einde berekening	Datum/Tijd	Tijdstip waarop berekening is beëindigd	<input type="checkbox"/> /-	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> /-	<input type="checkbox"/> /-
Rekenduur	Tijd	Tijdsduur van het doorrekenen scenario	<input type="checkbox"/> /-	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> /-	<input type="checkbox"/> /-
Start simulatie	Datum/Tijd	Datum en tijd van start gesimuleerde periode	<input type="checkbox"/> /-	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> /-	<input type="checkbox"/> /-
Einde simulatie	Datum/Tijd	Datum en tijd van eind gesimuleerde periode	<input type="checkbox"/> /-	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> /-	<input type="checkbox"/> /-
Duur	Tijd	Simulatieduur	■/-	■	■/-	■/-
Modelversie	Tekst		<input type="checkbox"/> /-	■	<input type="checkbox"/> /-	<input type="checkbox"/> /-
Modellersoftware	Tekst	Gebruikte software aanduiden Bijv. Sobek 2.11	<input type="checkbox"/> /-	■	<input type="checkbox"/> /-	<input type="checkbox"/> /-
Modelresolutie	Integer	Bijv. 25 of 100 m	■	■	■	■
Overige						
Regionale keringen (of hooggelegen lijnelementen) standzeker	Boolean	Kiezen of regionale keringen of hoge lijnelementen standzeker zijn. True of False	-	■	■/-	-
Overige opmerkingen	Tekst		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Attribuut	Attribuut-type	Beschrijving	Type A	Type B	Type C	Type D
Bestanden						
Maximale stroomsnelheid (asc of zip)***	Bestand	relatieve bestandslocatie in zip-bestand naar .asc bestand van maximale stroomsnelheid	■/-	■	■/-	■/-
Animatie waterdiepte (inc of zip)***	Bestand	relatieve bestandslocatie in zip-bestand naar fls_h bestand	■/-	■	■/-	■/-
Maximale waterdiepte (asc of zip)***	Bestand	relatieve bestandslocatie in zip-bestand naar .asc bestand van maximale waterdiepte	■	■	■	■
Maximale waterhoogte (asc of zip)***	Bestand	relatieve bestandslocatie in zip-bestand naar .asc bestand van maximale waterhoogte [m+NAP]	□	□	□	□
Rapportage (pdf)	Bestand	Rapport, memo, documentatie: - m.b.t. modelschematisatie - m.b.t. overstromingsberekening	□	□	□	□

* voor een enkel dijktraject zal vanwege de omvang de bakjesmethode worden gebruikt; voor deze dijktrajecten dient voor metagegevens aanlevering gekeken te worden naar het type 2 overstromingstype

** afhankelijk van buitenwatertype van het hoofdwatersysteem

*** referentie naar gezipd asc-bestand in zipfile (let op: zonder '\' aan het begin)

B.2 Controles

De volgende controles worden uitgevoerd (overgenomen uit Slager & Van der Doef, 2014):

1 Past het stromingspatroon bij de opgegeven metadata?

Om na te gaan of het stromingspatroon overeenstemt met de metadata worden de volgende punten onderzocht:

- Vindt de overstroming plaats in het in de metadata genoemde gebied?
- Start de overstroming bij de vermelde breslocatie?
- Komt het begin van de overstroming overeen met het opgegeven startmoment van bresgroei?
- Zijn er aanwijzingen waaruit blijkt dat er wel/geen sprake is van het bezwijken van regionale keringen? En is dit conform de opgegeven metadata?

2 Oogt het stromingspatroon realistisch en is het verklaarbaar?

Om deze vraag te beantwoorden wordt onder meer gekeken naar:

- De randen van het model: bereikt het water de modelrand en zo ja, zijn er maatregelen getroffen om te voorkomen dat het water hier stopt en de waterdieptes gestaag toenemen?
- Het begin van overstroomingen: zijn er locaties die vroegtijdig (voor het ontstaan van de bres) overstroomd? Indien ja, dan kan dit in SOBEK duiden op "lekkage" uit het 1D model door foutief geplaatste rekenpunten.
- Stroomt er water door tunnels en aquaducten die duidelijk op de topografische kaart te zien zijn?

- Is de duur van de simulatieperiode voldoende lang? Indien de situatie aan het einde van de modelrun niet of nauwelijks meer verandert is de simulatieperiode voldoende lang geweest. Indien sprake is van grote veranderingen aan het einde van de run moet de simulatie opnieuw worden gedraaid om een beter beeld te krijgen van het maximaal overstroombaar gebied.

3 Zijn de stromingspatronen van verschillende scenario's met dezelfde breslocatie consistent?

Hierbij worden o.a. de volgende subvragen beantwoord:

- Resulteert een hogere hydraulische belasting in een groter overstroomd oppervlak en/of grotere waterdieptes?
- Resulteert een bredere bres in een groter overstroomd oppervlak en/of grotere waterdieptes?
- Zijn verschillen in resultaten van de verschillende scenario's te verklaren op basis van de geleverde metadata?

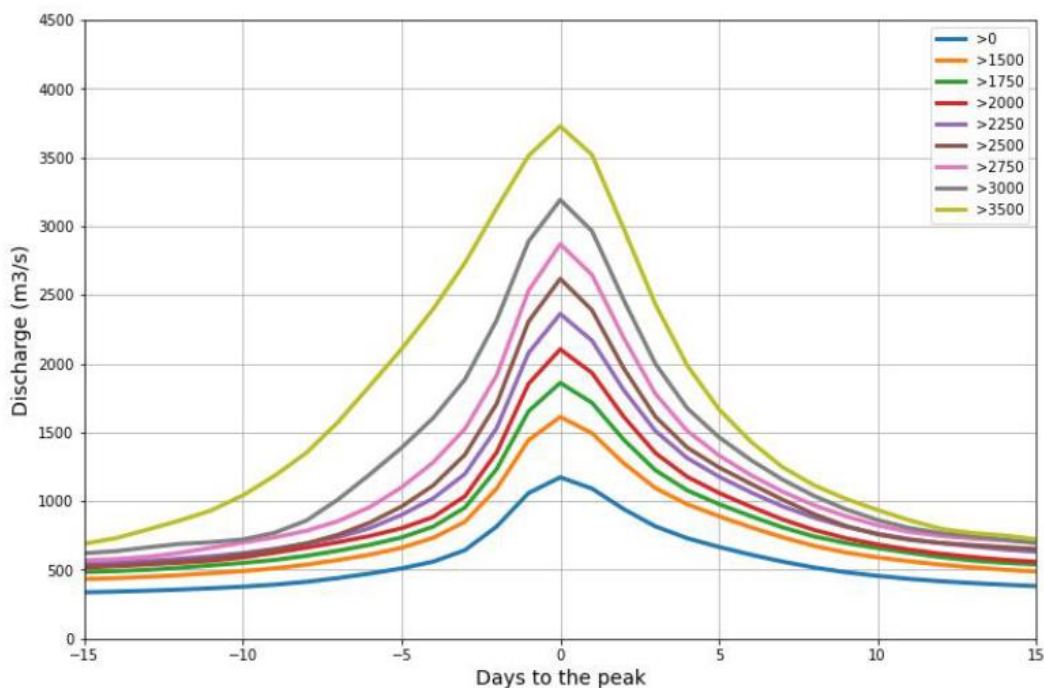
4 Zijn de stromingspatronen van gelijke scenario's bij verschillende breslocaties consistent en zijn eventuele verschillen verklaarbaar?

De volgende punten worden bekeken:

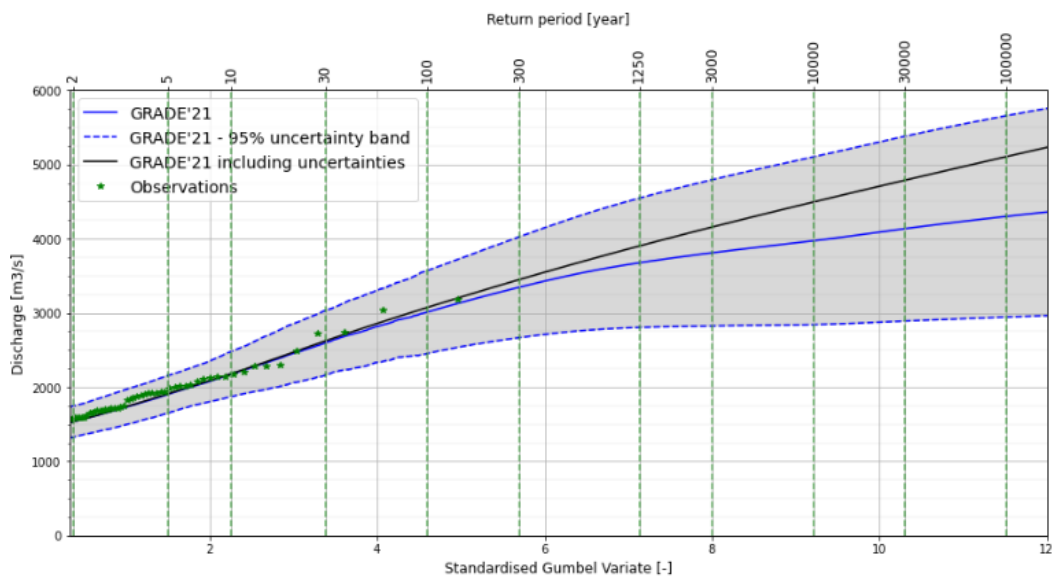
- Resulteert, bij een doorbraak in een hellende door primaire keringen beschermd gebied in het rivierengebied, een verder bovenstrooms gelegen breslocatie in hogere waterstanden binnendijs? Zo niet, is dat te verklaren?
- Resulteert een doorbraak vanuit een buitenwater met een lagere hydraulische belasting en/of een geringer beschikbaar watervolume in geringere waterdieptes?

C Afvoerstatistiek Rijn en Maas

C.1 Afvoergolfvormen en herhalingsstijden uit Grade 3.0: Maas



Figuur C.1.1 Afvoergolfvorm voor verschillende afvoercategorieën voor de Maas te Borgharen (bron: Figuur 4.10 uit Hegnauer et al., 2022).

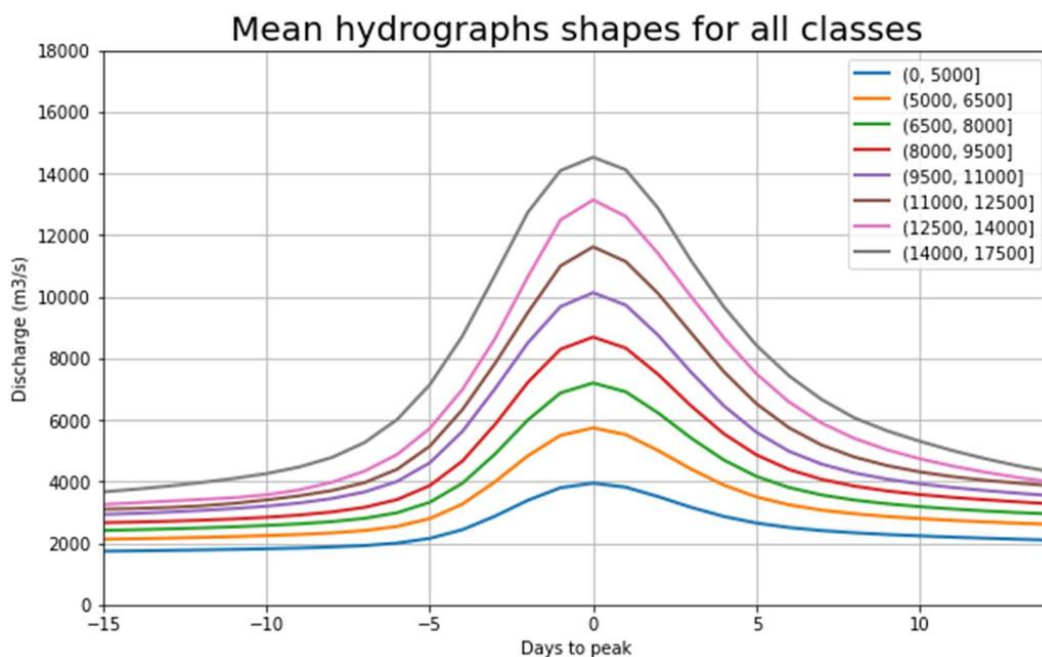


Figuur C.1.2 Werklijn van de Maas bij Borgharen op basis van GRADE 3.0 (bron: Figuur 4.4 uit Hegnauer et al., 2022).

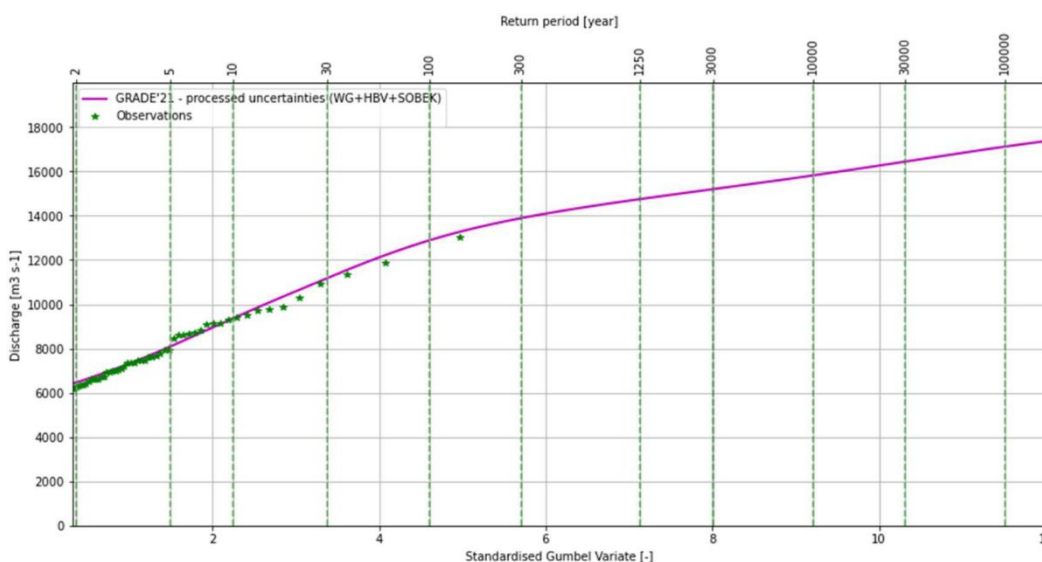
Tabel C.1.1 Extreme afvoeren voor de Maas bij Borgharen berekend met GRADE 3.0 voor enkele relevante herhalingstijden, zowel zonder als met onzekerheden (bron: tabel 4.2 uit Hegnauer et al., 2022).

Herhalingstijd [jaar]	Afvoer zonder onzekerheden [m3/s]	Afvoer met onzekerheden [m3/s]
300	3350	3450
1000	3640	3830
3000	3810	4160
10000	3970	4490
30000	4140	4790

C.2 Afvoergolfvormen en herhalingstijden uit Grade 3.0: Rijn



Figuur C.2.1 Afvoergolfvorm voor verschillende afvoercategorieën voor de Rijn te Lobith (bron: Figuur 5.14 uit Hegnauer et al., 2023).



Figuur C.2.2 Werklijn van de Rijn te Lobith op basis van GRADE 3.0 (bron: Figuur 5.10 in Hegnauer et al., 2023).

Tabel C.2.1. Extreme afvoeren voor de Maas bij Borgharen berekend met GRADE 3.0 voor enkele relevante herhalingstijden, zowel zonder als met onzekerheden (bron: tabel 4.2 uit Hegnauer et al., 2022).

Herhalingstijd [jaar]	Afvoer zonder onzekerheden [m3/s]	Afvoer met onzekerheden [m3/s]
300	13611	13957
1000	14140	14590
3000	14520	15140
10000	15060	15760
30000	15560	16390

D Korte test voor HHNK: het vinden van randvoorwaarden voor enkele locaties

D.1 Inleiding

In de leidraad overstromingssimulaties worden aanbevelingen gedaan voor de te maken overstromingssimulaties en voor schematisaties. In deze verkenning worden de daar gegeven aanbevelingen met betrekking tot het vinden van de juiste randvoorwaarden getest en eventueel verbeterd.

Benadering:

We doen deze verkenning door voor twee gebieden binnen het beheersgebied van HHNK waarvoor een bestaand model aanwezig is de randvoorwaarden te verzamelen welke nodig zouden zijn voor het maken van overstromingssimulaties conform de suggesties van de leidraad.

Aanpak:

- 1 We bekijken en beschrijven in enkele zinnen het bestaande model en de keuze voor twee gebieden.
- 2 We beschrijven het meest logische type randvoorwaarden voor deze gebieden
- 3 We bepalen de randvoorwaarden en beschrijven de daarbij gebruikte informatie en modellen en geven aan waar deze te vinden zijn.
- 4 We doen suggesties voor het geven van toegang of informatie vanuit IPLO.

D.2 Het beheersgebied van het HHNK en het bestaande model

Het beheersgebied

Het beheersgebied van HHNK omvat Noord-Holland, ten noorden van het Noordzeekanaal, en Texel. Dit gebied wordt bedreigd door overstroming vanuit de Noordzee, Waddenzee en het Markermeer/IJsselmeer. Aan de westkant zijn lange trajecten met zeer brede duinen gelegen welke een zeer goede bescherming tegen overstroming bieden. Locaties waarvoor het interessant kan zijn om overstromingssimulaties te maken zijn de Hondsbossche Zeewering, de noordzijde en twee locaties aan het Markermeer (zie Figuur D.2.1).



Figuur D.2.1 Locaties waarvoor randvoorwaarden bepaald zijn in deze testcase.

Het model

Er zijn verschillende modelversies beschikbaar van Noord-Holland. De meeste zijn gemaakt in versie 1 van 3Di. Momenteel wordt binnen 3Di echter gewerkt met versie 2 waarin meer cruciale functionaliteiten zijn opgenomen. Zo was er in versie 1 van 3Di geen handige bresgroeimogelijkheid aanwezig. Voor het beheersgebied van HHNK is een versie 2 model beschikbaar, maar die bevat nog niet alle regionale waterlopen. Wel zijn kades en binnendijken meegenomen door lijnen aan te geven waarop het grid verfijnd dient te worden. Het model is ontwikkeld voor boezemdoorbraken. In deze 3Di versie kun je bresgroei simuleren door middel van de Verheij-van der Knaap formule welke gezet kan worden op een 1D takje naar een 2D grid. We richten ons hier op het versie2 model omdat dit model beter aansluit bij toekomstige modellen in HHNK en de rest van Nederland.

Het subgrid, het fijnste niveau van de hoogte informatie, heeft een schaal van 5 bij 5m en is gebaseerd op het AHN van 5m. Het model rekt met cellen van maximaal 320m grootte. Ter plaatse van verhoogde lijnelementen wordt verfijnd naar 80m en bij enkele meertjes zelfs tot 40m.

D.3 Het modelleren van extreme condities

Voor kustgebieden en meren wordt geadviseerd berekeningen te doen bij buitenwaterstandscondities met een overschrijdingskans van 1/100, 1/1.000, 1/10.000 en 1/100.000 per jaar. En eventueel tussenliggende overschrijdingskansen, indien de verschillen in overstromingsverloop significant zijn.

In dit hoofdstuk worden de randvoorwaarden bepaald voor respectievelijk de kust en de merenlocaties. Voor deze locaties wordt het type randvoorwaarde ($H(t)$, $Q(t)$, etc. vastgesteld, de hoogte van de piek van de waterstand, en de vorm.

D.4 Randvoorwaarden voor de twee kustlocaties

Voor kusten is het mogelijk een waterstandsrand op te leggen met het waterstandsverloop in de tijd. Er wordt dan aangenomen dat het waterstandsverloop op zee niet beïnvloedt wordt door de overstroming.

De waterstandspiek voor de gevraagde overschrijdingsfrequenties is verkregen vanuit Hydra-NL. Het verloop is gehaald uit de waterstandsverlooptool. Zowel Hydra-NL als de waterstandsverlooptool zijn verkrijgbaar via de IPLO website (<https://iplo.nl/thema/water/applicaties-modellen/waterveiligheidsmodellen/hydra-nl/> en <https://iplo.nl/thema/water/applicaties-modellen/waterveiligheidsmodellen/waterstandsverloopen-tool/>).

Tabel D.4.1 Normen en referentiekansen voor de gekozen breslocaties langs de kust.

Locatie	Naam	Normtraject	Norm faalkans (ondergrens)	VNK referentiekans
1	Hondsbosche zeewering	13_2	1/3.000	1/10.000
2	Helderse zweewering	13_4	1/1.000	1/2.000

In het WBI wordt rekening gehouden met onzekerheden in de belasting (waterstanden in dit geval). Onzekerheden worden verdeeld in inherente onzekerheden en kennisonzekerheden. Inherente onzekerheden, ook wel natuurlijke variabiliteit genoemd, kunnen niet worden gereduceerd door meer onderzoek te doen maar wel worden gemodelleerd door middel van kansverdelingen van variabelen in het probabilistische model. Kennisonzekerheid, of wel epistemische onzekerheid, komt terug in modelonzekerheid en statistische onzekerheid. Deze ontstaat door bijvoorbeeld het gebruik van vereenvoudigingen in modellen en gebrek aan kennis over processen. In het WBI worden onzekerheden zoveel mogelijk meegenomen door een probabilistische benadering te volgen. De probabilistische en semi-probabilistische methodes binnen WBI-2017 worden beschreven in (Diermanse, 2016a).

Doordat het WBI de waterstanden horend bij een bepaalde overschrijdingskans bepaalt rekening houdend met onzekerheden, worden de waterstanden meestal iets hoger dan zonder onzekerheden het geval zou zijn. Statistische onzekerheden zouden nog tot extra verhoging kunnen leiden. De verschillen hangen af van de locatie en de herhalingstijd van de te bepalen waterstand.

In tabel D.2 is voor een locatie zowel met als zonder onzekerheden gerekend. De verschillen zijn daar klein¹⁴.

¹⁴ We zijn in discussie met mensen van het WBI en Robert Slomp m.b.t. de keuze voor het al dan niet meenemen van onzekerheden in waterstanden met een bepaalde overschrijdingskansen. Wanneer onzekerheden worden meegenomen liggen de waterstanden hoger. Voor dit gebied zijn de verschillen klein.

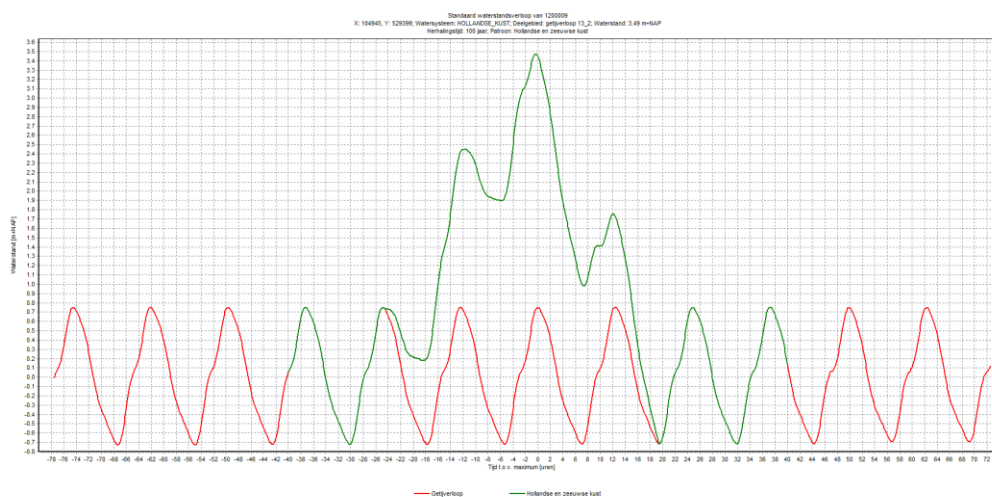
Tabel D.4.2 Piek waterstand (M + NAP) bij verschillende terugkeertijden in het ontwerp punt voor de locaties Hondsbosche zeewering en Helderse zeewering.

Naam		Hondsbosche zeewering	Helderse zeewering	
			Met onzekerheden	Zonder onzekerheden
Normtraject		13_2	13_4	
Norm faalkans (ondergrens)		1/10.000	1/1.000	
Locatie nr WBI (gewenst)		1200008	1100009	
Naam WBI		HK_1_13-2_dk00015	HK_2_13-4_dk_00009	
Piek waterstand (m + NAP)	1/100	3,49	3,40	3,40
	1/1.000	4,14	3,98	3,96
	1/3.000	4,45	4,24	4,21
	1/10.000	4,81	4,53	4,48
	1/100.000	5,51	5,08	4,95

Waterstandsverloop:

Het waterstandsverloop welke gebaseerd is op een combinatie van getij en stormopzet (zie leidraad hoofdstuk 5) is eenvoudig te verkrijgen uit de waterstandsverlooptool. De waterstandsverlooptool vraagt als invoer de locatie (klikken op de kaart), de piekwaterstand en de herhalingstijd. Het is niet duidelijk waarom de herhalingstijd wordt gevraagd. De daar ingevulde waarde beïnvloedt de resultaten niet.

Het waterstandsverloop voor locatie Hondsbosche zeewering, bij een herhalingstijd van 100 jaar en een piek van 3,49m is weergegeven in Figuur D.2.



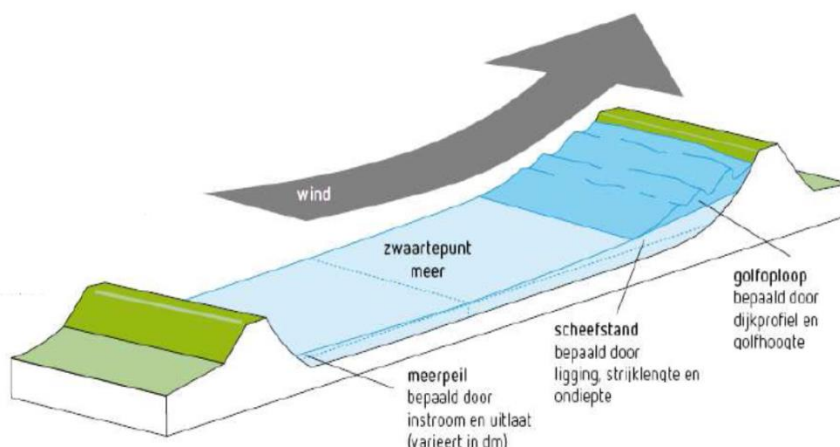
Figuur D.4.1 Het waterstandsverloop in de tijd voor de locatie Hondsbosche zeewering: overschrijdingskans is 1/100 en piek is 3,49m + NAP.

D.5 Vanuit meren

Tabel D.5.1 Normen en referentiekansen voor de gekozen breslocaties langs de meren.

Locatie	Naam	Normtraject	Norm faalkans (ondergrens)	VNK ref kans
3	Wieringermeer	12_2	1/1.000	1/700
4	“Hoorn”	13_7	1/1.000	1/17.000
5	Waterland	13_9	1/1.000	1/86.000

De gebieden aan de westkant van het IJsselmeer worden voornamelijk bedreigd door hoge meerpeilen en niet zozeer door stormen. Hoge meerpeilen in het IJsselmeer en Markermeer ontstaan wanneer gedurende enkele weken de toevoer van water naar het IJsselmeer (vanuit de IJssel, de Vecht en de regionale toevoer) groter is dan de afvoer naar zee (via de sluisen in de Afsluitdijk). Ze komen vrijwel uitsluitend in het winterhalfjaar voor, omdat in die periode de hoogste afvoeren in de IJssel en de regionale rivieren en kanalen voorkomen. Naast de watertoevoer hebben ook het zeeniveau en de wind¹⁵ een significante invloed op de (maximale) meerpeilen, omdat deze factoren de afvoer van overtollig water uit het meer naar de zee beïnvloeden. Voornamelijk westen en noordwestenwinden zijn ongunstig voor het IJsselmeer; er kan op dit moment niet gespuid worden en het water wordt opgestuwd in de richting van het Ketelmeer. De lokale waterstand langs de oevers van het meer hangt niet alleen af van het meerpeil maar ook van de scheefstand van het wateroppervlak. Deze scheefstand is vooral voor locaties aan de oostzijde van het meer belangrijk (Kramer, 2015).



Figuur D.5.1 Schematische weergave van de belasting op een dijk door het meerpeil, scheefstand en golfoverslag (Kramer, 2015).

Het beheersgebied van HHNK ligt aan de westzijde van het IJsselmeer. De dominante bedreiging is daar het waterpeil zelf en niet de stormopzet. De hoeveelheid water in het IJsselmeer is dan direct gerelateerd aan het waterpeil bij de kust van het HHNK. Dit meer kan dan gerepresenteerd worden door een takje met een volume gelijk aan dat van het IJsselmeer of Markermeer en een beginwaterstand. Indien we er van uitgaan dat de aanvoer van water vanuit de IJssel en Vecht en de afvoer via de spuilsuizen in evenwicht is, kunnen we er vanuit gaan dat het gehele initiële volume aan water in het meer beschikbaar is voor overstroming van de locaties aan de westzijde. Deze aanname dient beter onderzocht te worden en indien nodig gecorrigeerd te worden.

¹⁵ Af- of opwaaiing zorgt voor lagere/hogere lokale waterstanden bij het spuicompex.

Uitsplitsing HBN naar meerpeil, scheefstand en golfoverslaghoogte

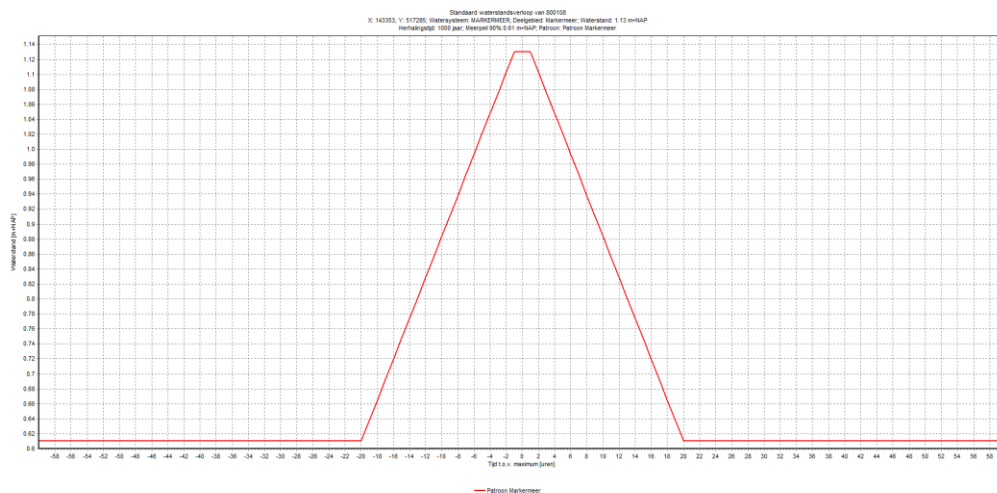
Hydra-NL berekent per MHW of HBN (Hydraulisch Belasting Niveau) tevens het hoofdillustratiepunt. Dit is de belastingcombinatie in het faalgebied met de grootste kans van voorkomen. Deze individuele belastingcombinatie is representatief voor de set van mogelijke combinaties die samen de overschrijdingskansen bepalen. Het berekende HBN kan worden opgesplitst in een bijdrage van het meerpeil, de scheefstand en golfoverslag.

Om randvoorwaarden te bepalen zijn met behulp van hydra-NL voor alle drie locaties de piekwaterstanden bij de gevraagde overschrijdingskansen bepaald en de bijbehorende 90% meerpeilen (de meerpeilen die in 90% van de gebeurtenissen die bijdragen aan dat overschrijdingspeil wordt overschreden). De resultaten zijn gegeven in tabel D.4.

Tabel D.4 laat zien dat de piekwaterstand voor Wieringen en Waterland bij condities met een overschrijdingskans van 1/1.000 en kleiner onder het meerpeil ligt. Bij 1/100 zijn de piekwaterstand en het meerpeil vrijwel gelijk. Voor die locaties wordt daarom gewerkt met een constant meerpeil gelijk aan de 90% percentielwaarde. Deze waarde wordt dan ook door WBI als toetspeil gebruikt. Bij Hoorn Drieban worden beide peilen opgegeven en wordt het verloop dat uit de waterstandsverlooptool komt, gelijk aan dat zoals weergegeven in Figuur D.4.

Tabel D.5.2 Piekwaterstanden en meerpeilen voor de locaties langs het IJsselmeer.

Naam		Wieringermeer	Hoorn Drieban	Waterland
watersysteem		Meren	Meren	Meren
normtraject		12_2	13_7	13_9
norm faalkans (ondergrens)		1/1000	1/1000	1/1000
locatie nr WBI		700134	800108	800057
Naam WBI		YM_1_12-2_dk_51	MM_2_13-7_dk_1532	MM_2_13-9_dk_1289
Piek waterstand (m + NAP)	1/100	0.85	0.91	0.5
	1/1000	1.09	1.13	0.73
	1/3000	1.22	1.25	0.86
	1/10000	1.38	1.38	1.01
	1/100.000	1.74	1.67	1.35
Meerpeil 90% (m + NAP)	1/100	0.84	0.28	0.45
	1/1000	1.14	0.61	0.75
	1/3000	1.3	0.81	0.91
	1/10000	1.49	1.03	1.1
	1/100.000	1.89	1.44	1.49



Figuur D.5.2 Waterpeil bij Hoorn-Drieban voor een overschrijdingskans van 1/1000 zoals gemaakt in de waterstandsverlooptool.

Voor de locatie Hoorn-Drieban is het meerpeil veel lager dan de piekwaterstand. De snelheid van instroom door een bres wordt bepaald door deze hoge piekwaterstand, terwijl het uiteindelijke volume dat beschikbaar is voor de overstrooming bepaald wordt door het meerpeil. Bij het modelleren moet er vanuit gegaan worden dat het volume in het meer gelijk is aan dat horend bij het genoemde meerpeil (uitgaande van een vlak meerpeil). De volumebalans zal meegenomen moeten worden.

LINKS:

WBI – HydraNL → <https://iplo.nl/thema/water/applicaties-modellen/waterveiligheidsmodellen/hydra-nl/>

Referentie

Kramer, N. (2015). Basisinformatie waterveiligheid IJsselmeergebied. Memo 1220103-001-VEB-0001 van 7 aug 2015 aan Albert Rimmelzwaal en Arthur Kors. Deltares, Delft.

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl