



Idee / verkenning

## > Kansinschatting falen waterkeringen

IDEA/EXPLORATION



PROOF OF CONCEPT



EXPERIMENT/PILOT



IMPLEMENTATION/IN OPERATION

### INHOUD

**INLEIDING**  
**GERELATEERDE ONDERWERPEN EN DELTAFACTS**  
**SCHEMATISCHE WEERGAVE**  
**TECHNISCHE KENMERKEN**  
**KOSTEN EN BATEN**  
**GOVERNANCE**  
**PRAKTIJKERVARING EN LOPEND ONDERZOEK**  
**KENNISLEEMTES**  
**LITERATUUR EN LINKS**  
**DISCLAIMER**

### INLEIDING

Bieden onze waterkeringen (dijken, duinen, kunstwerken) ons voldoende veiligheid tegen overstromen? Om deze vraag te kunnen beantwoorden heb je ten eerste een specificatie nodig van wat 'voldoende veiligheid' is. Deze specificatie is wettelijk vastgelegd in normen, uitgedrukt in een maximaal toegestane kans (per jaar) dat een waterkering faalt. Waterkeringen kunnen echter op verschillende manieren falen: Een waterkering kan onder andere te laag zijn, of te smal, of een te zwakke bekleding hebben. Hierdoor kan de waterkering bijvoorbeeld instabiel worden of kan er piping ontstaan. Dit zijn de verschillende *faalmechanismen*. Waterkeringen moeten op alle relevante faalmechanismen getoetst worden. Daarvoor is informatie nodig over enerzijds de lokale hydraulische *belastingen* op de waterkeringen, voornamelijk bestaande uit hoge waterstanden en golven: de hydraulische randvoorwaarden. Anderzijds wil je weten hoe *sterk* de waterkering is. De natuurlijke variatie in de hydraulische belasting op de waterkering, samen met de aanwezige sterkte van de waterkering bepaalt de kans op falen van een waterkering.



Computermodellen helpen dijkbeheerders bij het berekenen van de hydraulische randvoorwaarden voor het toetsen van primaire waterkeringen. Hydra is zo'n computermodel. Het is een probabilistisch model (model dat de werkelijkheid als kans x gevolg bepaalt) dat de statistiek van de hydraulische belasting op een waterkering bepaalt, op basis van de statistiek van de achterliggende bedreigingen zoals afvoer, storm en getij. Oftewel, hoe groot is de kans op allerlei soorten hydraulische belastingen. Hydra is met name ontwikkeld voor waterkeringen waarvoor *combinaties* van bedreigingen van belang zijn (meren, benedenrivieren, IJssel/Vecht delta en kusten), maar wordt ook toegepast in het bovenrivierengebied (waar feitelijk alleen de afvoer belangrijk is). Ondanks onze computermodellen kunnen we de werkelijke kans op falen van een waterkering nooit met 100% zekerheid vaststellen want:

- we kunnen niet alle keringen doormeten, de sterkte van een kering is dus niet altijd goed bekend;
- we rekenen met belastingen extremer dan belastingen die zijn waargenomen in de meetreeks;
- we maken gebruik van geotechnische toetsmodellen die per definitie geen exacte weergave zijn van de werkelijkheid.

Bij het berekenen van de faalkans wordt daarom niet alleen rekening gehouden met de natuurlijke variatie in de belasting, maar ook met kennisonzekerheden.

De Hydramodelen zijn ontwikkeld om te toetsen of waterkeringen voldoen aan de norm, Hydra's worden daarom toegepast in het Wettelijk Toets Instrumentarium (WTI). In het deltaprogramma is echter ook gebruik gemaakt van Hydra's om de faalkans van de waterkeringen voor verschillende scenario's te voorspellen, o.a. in het deltamodel om te verkennen hoe het veiligheidsbeeld verandert bij veranderend klimaat, strengere veiligheidsnormen en/of een veranderend waterbeheer. De huidige Hydrabenadering gaat uit van de overschrijdingskans. Voor de volgende toetsronde (vanaf 2017) zijn echter nieuwe normen voorgesteld, gebaseerd op *overstromingskans*. Om de waterkeringen op basis van deze nieuwe normen te kunnen toetsen, wordt een nieuw model ontwikkeld. In 2017 moet dit model klaar zijn waarbij de Hydra's

worden geïntegreerd in het integraal toetsinstrumentarium onder de naam Ringtoets.

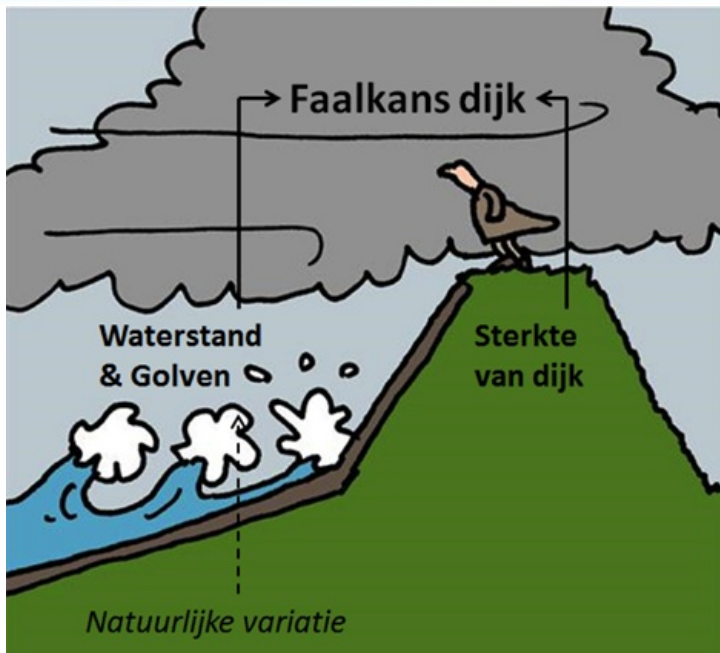
Deze deltafact bespreekt, wat Hydramodelen zijn, wat ze doen, welke rol Hydramodelen hebben bij de kansinschatting van het falen van dijken en welke ontwikkelingen er zijn.

## GERELATEERDE ONDERWERPEN EN DELTAFACTS

Trefwoorden: Hydra, hydraulische randvoorwaarden, toetsen waterkeringen

Deltafacts: De nieuwe normering

## SCHEMATISCHE WEERGAVE



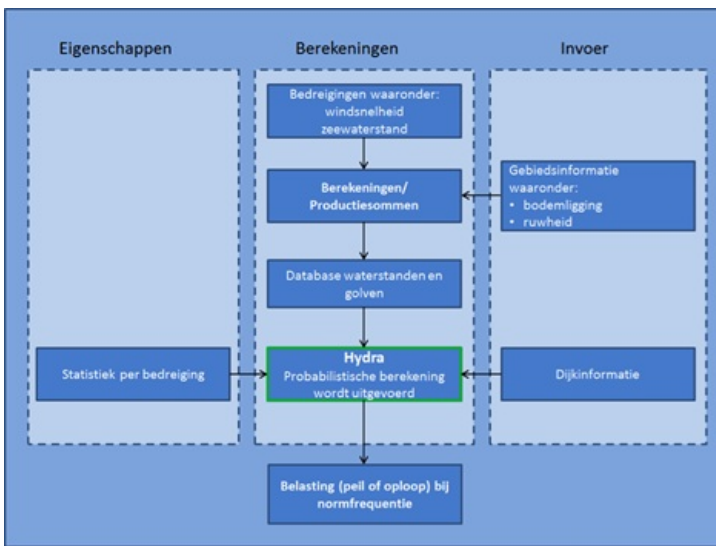
(Gebaseerd op [http://www.aanmaas.nl/informatie\\_op\\_maat/kinderen\\_0/kinderen/kids/dijk\\_weetjes?Id=2305603](http://www.aanmaas.nl/informatie_op_maat/kinderen_0/kinderen/kids/dijk_weetjes?Id=2305603))

De jaarlijkse kans op falen van een waterkering is afhankelijk van de sterkte van de kering en de natuurlijke variatie in de hydraulische belasting. De hydraulische belasting bestaat primair uit de waterstand en golven. Met Hydra's wordt de statistiek van de hydraulische belasting berekend.

## TECHNISCHE KENMERKEN

Hydra modellen leveren de hydraulische belasting bij de **normfrequentie**. Dit is nodig om per faalmechanisme te bepalen of de aanwezige sterkte van de waterkering voldoende is. Voor de hydraulische belasting kan gekozen worden uit drie vormen: de waterstand, de benodigde hoogte van de waterkering (kruinhoogtes) en de maatgevende golfcondities voor de toetsing van dijkbekledingen. Uit al deze mogelijke hydraulische belastingen wordt de belasting bij de normfrequentie bepaald, oftewel bij welke belastingen voldoet de waterkering nog aan de norm. Hydra doet dit voor een heleboel locaties, verspreid langs de rivieren, meren en de kust.

In de onderstaande figuur worden de invoer en de stappen weergegeven die in de basis nodig zijn om de belasting bij de normfrequentie uit te rekenen. De invoer van Hydra bestaat uit statistiek van de bedreigingen (stochasten, zoals afvoer, zeewaterstand en wind) en een database gevuld met waterstanden en golfhoogtes die berekend zijn met modellen voor de simulatie van waterbewegingen (WAQUA en SWAN) voor verschillende combinaties van (diezelfde) stochasten. Zoals in onderstaande figuur te zien wordt veel data en berekeningen buiten het Hydra model gegenereerd. De meeste informatie wordt meegeleverd met het Hydra model en is door een Hydra gebruiker niet te wijzigen. De enige informatie die door een Hydra-gebruiker dient te worden ingevoerd is de specificatie van 'Dijkinformatie': de te beschouwen locatie, de normfrequentie en de kenmerken van de waterkering ter plekke. De belangrijkste vraag in dit hoofdstuk is: Hoe werkt Hydra?



### Productiesommen

Eerst wordt per watersysteem bepaald welke bedreigingen beschouwd worden. In het watersysteem IJsselmeer zijn dat bijvoorbeeld het IJsselmeerpeil, de windsnelheid en de windrichting. Vervolgens wordt voor een groot aantal combinaties van waarden van de bedreigingen en uitvoerlocaties uitgerekend wat de waterstanden en golven zullen zijn. Dit worden productiesommen genoemd. Hierbij worden vooral extreme combinaties van bedreigingen doorgerekend. Voor de productiesommen worden hydraulische modellen gebruikt zoals Waqua en Sobek en golfmodellen zoals Swan gebruikt (DenHeijer& Berger, 2008; [Ministerie van Rijkswaterstaat, 2007](#)). In onderstaande tabel is een overzicht van de relevante invloedsvariabelen per watersysteem, we beperken ons hierbij tot de 'natuurlijke variabelen'. In onderstaande figuur is de indeling in verschillende watersystemen te zien.

Tabel 1. Overzicht van de relevante invloedsvariabelen (stochasten) per watersysteem. We beperken ons hierbij tot de "natuurlijke variabelen". Een variabele als het falen van een kering staat hier niet vermeld.

Basisvariabele	watersysteem				
	kusten	meren	bovenrivieren	benedenrivieren	IJssel-Vechtdelta
wind	x	X	x	x	x
waterstand op zee	x			x	
meerpeil		X			x
golven op zee	x				
rivierafvoeren			x	x	x



### Database

Alle gegevens uit de productiesommen worden in een grote database van waterstanden en golven geplaatst. Deze database bevat geen statistische informatie, maar alleen fysica. De database kan alleen worden aangepast door nieuwe productiesommen te draaien, maar dit kan in principe niet door de Hydra gebruiker gedaan worden. Dit kost namelijk veel tijd. Voor sommige beleidsstudies en gevoeligheidsonderzoeken is een snellere en eenvoudigere werkwijze nodig. In dergelijke studies worden daarom kleinere databases gebruikt (zoals voor 'Special Hydra-B') of worden vereenvoudigde modellen voor de productiesommen van de fysica gebruikt (zoals 'Bretpro' voor het IJsselmeergebied) (Den Heijer& Berger, 2008).

### Hydra gebruiker en dijk informatie

De Hydra gebruiker kiest een uitvoerlocatie in zijn watersysteem en geeft de dijk informatie; dat is informatie over de op die locatie aanwezige waterkering zoals het dijkprofiel, de dijkoriëntatie en de normfrequentie. In beleidsstudies of gevoeligheidsanalyses gebruikt Rijkswaterstaat vaak een standaard dijkprofiel of een selectie van dijkprofielen die door waterschappen en provincies voor een specifiek doel zijn aangeleverd.

### Hydra & belasting

Hydra leest de gegevens van de waterstanden en golven voor de geselecteerde locatie uit de database. Alle combinaties van waterstanden en golven worden vertaald tot belastingniveaus op de dijk. De Hydra gebruiker kan daarbij uit diverse types belastingen kiezen, waaronder 'alleen waterstand' of 'het golfoplooppniveau'. Het probabilistische rekenhart van Hydra combineert de belastingniveaus met de bijbehorende statistische informatie en bepaalt uiteindelijk het belastingniveau bij de gevraagde frequentie (Den Heijer& Berger, 2008).

### Hydramodelen en hun toepassing

Ieder watersysteem heeft een eigen kenmerkende combinatie van bedreigingen, daarom is tot nu toe voor ieder watersysteem een aparte Hydra gemaakt. Hydra-K is er bijvoorbeeld voor de kust en toetst de hoogte en sterkte van de waterkering en Hydra-M toetst de hoogte van de waterkeringen in het IJsselmeer en Markermeer, Hydra-B in het benedenrivierengebied en Hydra-VIJ in de IJssel- en Vechtdelta. In 2011 is een nieuwe Hydra ontwikkeld als vervanging van alle losse zoetwater Hydra's, deze Hydra met de naam Hydra-Zoet is echter nog niet wettelijk vastgesteld. Deze Hydra wordt onder andere gebruikt in het Deltamodel. In onderstaande tabel is de grote verscheidenheid aan Hydra's te zien.

Model	Gebied	Doel
Hydra-K	Kust: zoute wateren	Toetsing hoogte en sterkte waterkeringen
Hydra-M	IJsselmeer; Markermeer	Toetsing hoogte waterkeringen
Hydra-B	Benedenrivieren	Toetsing hoogte waterkeringen
Hydra-VIJ	Vecht- en IJsseldelta	Toetsing hoogte

		waterkeringen
Hydra-Q	IJsselmeer; Markermeer	Bepaling golfcondities voor toetsing dijkbekledingen
Hydra-R	Bovenrivieren	Toetsing hoogte waterkeringen
Special- Hydra-B	Benedenrivieren	Beleidsadvisering met vereenvoudigd Hydra-B
Hydra-BS	Benedenrivieren	Variant op Hydra-B voor verkenningen met faalkans voor meerdere stormvloedkeringen
Hydra-B(t)	Gehele rivierengebied	Onderzoek aan Hydra-B

### Nieuw hydramodel voor WTI2017

Sinds 1998 worden keringen getoetst met behulp van Hydramodellen. Naar aanleiding van de nieuwe normering op basis van overstromingskansen ipv overschrijdingskansen wordt een nieuw model opgezet genaamd RingToets met als rekenhart Hydra-Ring. Hydra-Ring vormt het hart voor de berekening van Hydraulische Randvoorwaarden en het rekenhart voor probabilistische analyses per faalmechanisme en dijkvak. RingToets is de user-interface voor de toetsers waarmee het toetsproces wordt doorlopen en van waaruit Hydra-Ring kan worden aangeroepen. Dit nieuwe instrument zal de verschillende Hydramodellen, zoals Hydra-K en Hydra-Zoet vervangen. Een belangrijk verschil tussen Ringtoets en de Hydra's is dat Ringtoets ook faalmechanisme-modellen bevat en dat onzekerheden in de sterkte van de kering daardoor expliciet kunnen worden meegenomen in de toetsing. De modellering van de hydraulische belasting in Ringtoets is zoveel mogelijk conform aan die van de Hydra's. In het programma Veiligheid Nederland in Kaart is geëxperimenteerd met een overstap naar overstromingskansen. In dit programma is PC Ring ontwikkeld, dit is ook een probabilistisch model waarmee faalkansen berekend kunnen worden voor verschillende faalmechanismen voor dijken, duinen en kunstwerken. Hydra-Ring bouwt voort op én PC Ring én de Hydra's, vandaar de naam ([Helpdesk Water, 2014c](#)).

In 2017 leveren Rijkswaterstaat en Deltares binnen het programma Wettelijk Toets Instrumentarium 2017 (WTI 2017) drie eindproducten op: het Voorschrift Toetsen op Veiligheid, nieuwe Hydraulische Randvoorwaarden en software ([Helpdesk Water, 2014b](#)) (zie Praktijkervaringen en Lopend onderzoek).

### KOSTEN EN BATEN

De nieuwe normering, zoals voorgesteld in deltaprogramma Veiligheid, is gebaseerd op een risicobenadering. De normen worden uitgedrukt in een maximaal toelaatbare overstromingskans per dijktraject. De ontwikkeling van Hydra-Ring is van belang om keringen op basis van de nieuwe op risico gebaseerde normen te kunnen toetsen.

Oorspronkelijk zitten er in de toetsingsmethode vele aannames, bijvoorbeeld over de faalmechanismen. In de nieuwe veiligheidsfilosofie worden de hierin verborgen onzekerheden meer expliciet meegenomen. Kennisontwikkeling zorgt ervoor dat onzekerheden wat betreft hydraulische belasting en de sterkte van de dijk worden verkleind. Hierdoor kan men in de toekomst dijkontwerpen maken, waarbij de onzekerheidsmarge kleiner is. Hierdoor kan het geld voor dijkversterking efficiënter worden besteed.

### GOVERNANCE

De Waterwet schrijft voor dat beheerders van primaire waterkeringen iedere zes jaar (binnenkort 12 jaar) moeten toetsen of hun keringen voldoen aan de wettelijke veiligheidseisen. Rijkswaterstaat heeft voor deze toetsing als taak de belastingen op de waterkering aan te leveren, voor dat doel heeft Rijkswaterstaat Hydra modellen ontwikkeld. De methoden en regels die ze bij de toetsing dienen te gebruiken, zijn vastgelegd in het Wettelijk Toets Instrumentarium (WTI). Het huidige wettelijk geldende toetsinstrumentarium is WTI 2006, hierin worden de gebiedsspecifieke Hydra's gebruikt. In 2011 is het toetsinstrumentarium in opdracht van de minister geactualiseerd, hiervoor is Hydra-Zoet ontwikkeld. Dit instrumentarium is echter niet wettelijk vastgelegd.

Momenteel wordt voor de vierde toetsronde (in 2017) het instrumentarium geactualiseerd (zie Lopend Onderzoek). In opdracht van het ministerie van Infrastructuur en Milieu, ontwikkelen Rijkswaterstaat en Deltares daartoe kennis samen met verschillende adviesbureaus. Uiteindelijk wordt het nieuwe instrumentarium als advies voorgelegd aan de minister. De waterschappen zijn op verschillende niveaus betrokken. Ze geven onder meer advies over de werkbaarheid van het instrumentarium, daarnaast moet de minister voor de beslissing over het instrumentarium de waterschappen consulteren (hoorplicht) ([Helpdesk Water, 2014a](#)).

### PRAKTIJKERVARING EN LOPEND ONDERZOEK



## Deltamodel

Ten behoeve van het Deltaprogramma is het Deltamodel ontwikkeld. Het model maakt onderdeel uit van het Delta-instrumentarium. Het voornaamste doel van het Deltamodel is het op consistente, reproduceerbare wijze berekenen en in beeld brengen van de (verandering van de) waterveiligheidsopgave die het gevolg is van (Waal, 2012):

- zeespiegelstijging, bodemdaling en mogelijke veranderingen in rivierafvoeren
- mogelijke actualisering van de waterveiligheidsnormen
- gebiedsgerichte strategieën om de veiligheidsopgave aan te pakken

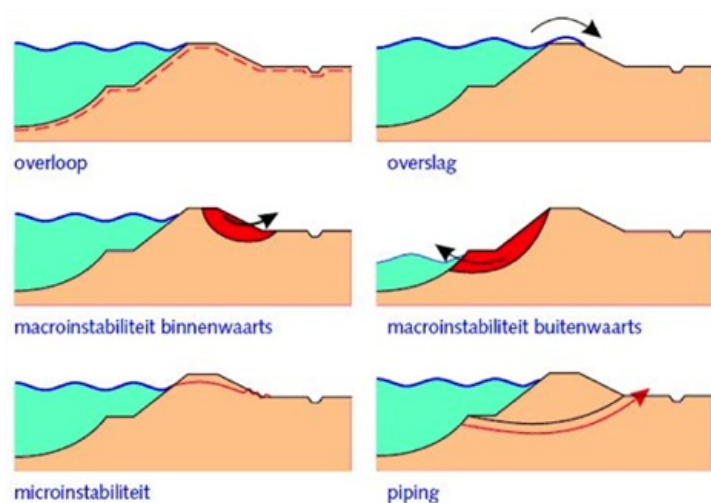
Het geografische toepassingsgebied beslaat de dijkkringgebieden en buitendijkse gebieden die liggen aan het buitenwater, exclusief de kust, de Wadden en de Westerschelde. Hier is destijds voor gekozen, omdat maatregelen aan de kust minder van invloed zijn op andere watersystemen dan maatregelen bijvoorbeeld in het rivierengebied. Hydra-Zoet maakt onderdeel uit van het Deltamodel en wordt gebruikt om de hydraulische belasting per klimaatscenario te vertalen naar een (verandering in de) veiligheidsopgave. Door klimaatverandering kan de opgave bijvoorbeeld toenemen (grotere hydraulische belasting) en door Ruimte voor de Rivier maatregelen kan de opgave afnemen (Waal, 2012).

Elk Deltaprogramma is vrij om naast het deltamodel andere Hydra's te gebruiken. Voor de Hollandse IJssel en het Volkerak-Zoommeer was dit noodzakelijk, omdat de keringen in dat gebied (categorie C keringen) niet in het deltamodel zitten. Ook wilde men graag gebruik maken van een (oude) Hydra variant waarin de faalkansen van meerdere stormvloedkeringen kan worden verdisconteerd dan in Hydra-Zoet mogelijk is (Waal, 2012).

## WTI 2017

In 2012 zijn de voorbereidende werkzaamheden voor het programma wettelijk toetsinstrumentarium 2017 gestart. In dit programma wordt een wettelijk instrumentarium ontwikkeld voor het toetsen van alle primaire waterkeringen. Dit zal waarschijnlijk het wettelijk toetsinstrumentarium uit 2006 vervangen. In het oude toetsinstrumentarium uit 2006 werd nog gewerkt met overschrijdingskansen en veel verschillende Hydra's. Ook werd niet expliciet rekening gehouden met onzekerheden in de sterkte van een dijk. Het nieuwe programma bereidt een instrument voor waarbij de dijken getoetst kunnen worden op basis van de nieuwe veiligheidsnormering (zie deltafact normering). Daarnaast wordt er onderzoek gedaan naar de verschillende faalmechanismen en effecten van rivier verruimende maatregelen op de hydraulische belastingen op keringen, maar ook naar de onzekerheden in de sterkte en belastingen van een waterkering. Immers, een kering kan op verschillende manieren falen en die verschillende faalmechanismen reageren verschillend op hydraulische belastingen. Met Hydra-Ring zullen bijdrage aan de overstromingskans per faalmechanisme worden verwerkt om te komen tot een overstromingskans (Rijkswaterstaat & Deltares, 2014). De faalmechanismen die worden beschouwd zijn:

- Macro- en microstabiliteit
- Piping (dijken en kunstwerken)
- Duinafslag
- Schade aan dijkbekleding (o.a. gras)
- Golfoverslag en overloop (dijken en kunstwerken)
- Niet sluiten van kunstwerken
- Constructief falen van kunstwerken



(WaterschapRivierenland, 2014)

## Van een groot aantal Hydra's naar Hydra Zoet en Hydra Zout.

Tot dat het wettelijk toetsinstrumentarium in 2017 af is, worden Hydra's gebruikt in onder andere het HWBP en het Deltamodel. Inmiddels is voor de zoute wateren een Hydra-Zout ontwikkeld, deze Hydra vervangt Hydra-K. Hydra-Zoet en Hydra-Zout zullen ook als benchmark worden gebruikt voor Hydra-Ring.

## Deltaprogramma Rivierengebied

In het Deltaprogramma Rivierengebied is discussie geweest over het gebruik van Hydra-Zoet in het Deltamodel. In het bovenrivierengebied heeft men nooit eerder gebruik gemaakt van een probabilistisch model. Tot nu toe werd vooral gekeken naar de effecten van ingrepen onder maatgevende omstandigheden (omstandigheden waarop het watersysteem is berekend). Nieuwe inzichten in faalmechanismen (zoals de sterkte van dijkbekleding) hebben de discussie aangewakkerd en geleid tot de ontwikkeling en gebruik van een Hydra voor het bovenrivierengebied (onderdeel van Hydra-Zoet). De

afvoergolven worden in Hydra gecombineerd met windstatistiek om de belasting op een dijk te bepalen. Dit is bijvoorbeeld van belang voor een rivierverruimende maatregel die als doel heeft om de maatgevende waterstand (waterstand die als uitgangspunt wordt genomen bij het ontwerpen van een dijk) te verlagen, zodat de dijken niet, of minder, hoeven te worden verhoogd. Echter, wanneer de rivier hierdoor breder wordt (bijv. bij een dijkverlegging), dan neemt de strijklengte van de wind over het wateroppervlak toe. Dit resulteert in hogere golven. De toename van de golfoploop tegen de dijk kan dan groter zijn dan de afname van de waterstand, waardoor de dijk alsnog moet worden verhoogd.

## KENNISLEEMTES

In het programma WTI 2017 wordt kennis ontwikkeld om onzekerheden te verkleinen. We noemen hier een aantal van de belangrijkste onzekerheden:

- In de tijd kan de belasting op de dijk variëren, het verloop van de belasting gedurende een hoogwatergebeurtenis kan bepalend zijn voor het falen van een dijk. Het is echter nog niet goed mogelijk om dit mee te nemen in de analyse.
- De sterkte van de dijk is zeer afhankelijk van de ondergrond. De ondergrond is vaak niet homogeen en mede daardoor moeilijk te modelleren. Wat voor invloed de ondergrond precies heeft op het falen van de dijk is onzeker. WTI2017 onderzoekt de wijze waarop deze onzekerheid gekwantificeerd kan worden.
- Er bestaan grote onzekerheden in de beschrijving van extreme wind (snelheid en windrichting) boven open water en hoe water precies reageert op deze extreme wind.
- Het is nog onbekend hoe de faalkans van keringen (evt. hogere belasting) zal veranderen bij toepassing van de nieuwe veiligheidsnormering.
- Er wordt veel onderzoek gedaan naar verschillende faalmechanismen. Onzekerheden zijn reduceerbaar, maar zijn per definitie significant aanwezig.

## LITERATUUR EN LINKS

- Den Heijer, F., Berger, H., 2008. *De hydrafamilie*.
- Helpdesk Water, 2014a. *WTI2017 in ontwikkeling*
- Helpdesk Water, 2014b. *Programmaplan 2017 gereed*
- Helpdesk Water, 2014c. *Veiligheid Nederland in Kaart*
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2007. *Hydraulische randvoorwaarden primaire waterkeringen, voor de derde toetsronde 2006-2011. Bijlage 1 artikel 1 van de Regeling veiligheid primaire waterkeringen.*
- Rijkswaterstaat & Deltares, 2014. *Programmaplan Wettelijk toetsingsinstrumentarium 2017.*
- Waal, de J.P., 2012. *Deltamodel 1.0, achtergronden waterveiligheidsbeschouwingen.* Deltares
- Waterschap Rivierenland, 2014. *Waarom dijkverbetering?*

*Deze factsheet is opgesteld door Deltares, 22 september 2014.*

Auteurs: F.Schasfoort, N. Kramer, N. Asselman  
Met medewerking van R. Schielen (RWS), H. de Waal en F. Diermanse.

## DISCLAIMER

De in deze publicatie gepresenteerde kennis en diagnosemethoden zijn gebaseerd op de meest recente inzichten in het vakgebied. Desalniettemin moeten bij toepassing ervan de resultaten te allen tijde kritisch worden beschouwd. De auteur(s) en STOWA kunnen niet aansprakelijk worden gesteld voor eventuele schade die ontstaat door toepassing van het gedachtegoed uit deze publicatie.