



Delft University of Technology

Op weg naar verbeterde keringen

Vijf jaar All-Risk-onderzoek naar nieuwe veiligheidsnormen

Kok, M.; Cortes Arevalo, V.J.; Vos, Martijn

DOI

[10.4233/uuid:1164f691-47bf-47e6-bdee-848c65e6f47b](https://doi.org/10.4233/uuid:1164f691-47bf-47e6-bdee-848c65e6f47b)

Publication date

2022

Document Version

Final published version

Citation (APA)

Kok, M., Cortes Arevalo, V. J., & Vos, M. (Eds.) (2022). *Op weg naar verbeterde keringen: Vijf jaar All-Risk-onderzoek naar nieuwe veiligheidsnormen*. TU Delft OPEN Publishing.
<https://doi.org/10.4233/uuid:1164f691-47bf-47e6-bdee-848c65e6f47b>

Important note

To cite this publication, please use the final published version (if applicable).
Please check the document version above.

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download, forward or distribute the text or part of it, without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license such as Creative Commons.

Takedown policy

Please contact us and provide details if you believe this document breaches copyrights.
We will remove access to the work immediately and investigate your claim.



Onder redactie van
Matthijs Kok
Juliette Cortes Arevalo
Martijn Vos

Op weg naar verbeterde keringen

*Vijf jaar All-Risk-onderzoek
naar nieuwe veiligheidsnormen*

AR
Risk

Oosterhout



Op weg naar verbeterde keringen

*Vijf jaar All-Risk-onderzoek naar nieuwe
veiligheidsnormen*

Redactie

Matthijs Kok | Juliette Cortes Arevalo | Martijn Vos



Inhoudsopgave



Artikel

Achtergrondkennis
over
waterveiligheid



Project

De All-Risk-
onderzoeken
samengevat



Storyline

All-Risk-casussen
uitgelicht door de
onderzoekers



Reflectie

De praktijkwaarde
van de All-Risk-
onderzoeken

Hoofdstuk 2
Risicoraamwerk

Hoofdstuk 6
Juridische en governance
aspecten bij de uitvoering

Hoofdstuk 3
Dynamica in hydraulische
belastingen

Hoofdstuk 4
Heterogeniteit in de
ondergrond

Hoofdstuk 5
Betrouwbaarheid en sterkte
van waterkeringen

*De hoofdstukken 2 en 6 hebben in het bijzonder tot doel om
aan integratie en dwarsdoorsnijdende inzichten te werken.*

VOORWOORD



**Dijkversterkingsoperatie van Utrecht tot Barcelona drijft op
nieuwe kennis**

Anouk te Nijenhuis en Erik Wagener

7

Managementsamenvatting

10

Woord van dank en partners

12

HOOFDSTUK 1

RISICOBENADERING VAN OVERSTROMINGEN



Introductie

Matthijs Kok en Maartje van Dijk

15



Hoe werkt de overstromingskansbenadering?

Wim Kanning en Bas Jonkman

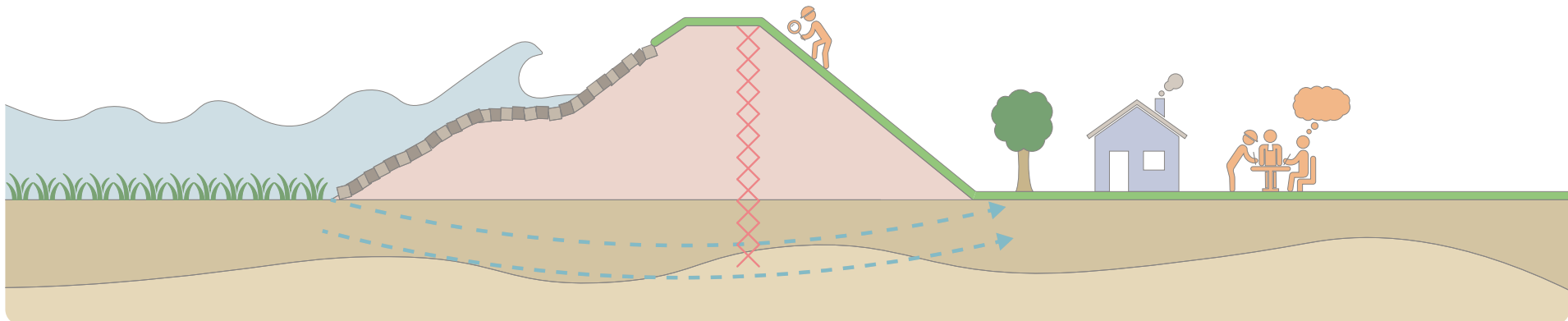
17



**Kansen en uitdagingen bij de juridische implementatie van de
nieuwe risicobenadering in het waterveiligheidsbeheer**

Willemijn van Doorn-Hoekveld en Marleen van Rijswijk

19



	Verbeteren van overstromingsrisicobeheer in Nederland en Duitsland door voorbij de dijken te kijken	21
	<i>Marleen van Rijswijk en Moritz Reese</i>	

	Het hoogwater van de zomer van 2021: eerste lessen en bevindingen	25
	<i>Bas Jonkman</i>	

	Een kijk op toekomstige waterveiligheid: ideeën van All-Risk-onderzoekers	28
	<i>Matthijs Kok</i>	

HOOFDSTUK 2 RISICORAAMWERK

	Introductie	33
	<i>Matthijs Kok</i>	

	A1 - Risicogestuurd assetmanagement	35
	<i>Wouter Jan Klerk</i>	

	A2 - Medegebruik van waterkeringen	39
	<i>Richard Marijnissen</i>	

	A3 - Betrouwbaarheidsanalyse dijken	43
	<i>Wim Kanning</i>	

	A4 - Ruimtelijke adaptatie in kustgebieden	47
	<i>Luca Iuorio</i>	

	Een breed groen perspectief op dijken	51
	<i>Richard Marijnissen</i>	

	Proefbelasten en monitoren als optimalisatiekansen voor dijkversterkingen	56
	<i>Mark van der Krogt en Wouter Jan Klerk</i>	

	Dubbele dijken: dubbel beschermd en dubbel verantwoordelijk?	59
	<i>Webinar team</i>	

	Risicogebaseerde inspecties en interacties tussen faalmechanismen	64
	<i>Webinar team</i>	

HOOFDSTUK 3 DYNAMICA IN HYDRAULISCHE BELASTINGEN

	Introductie	69
	<i>Tjeerd Bouma</i>	

	B1 - Beheer van vooroeverecosystemen	71
	<i>Beatriz Marin-Diaz</i>	

	B2 - Golfvoortplanting over vooroevers	75
	<i>Christopher Lashley</i>	

	B3 - Grootschalige onzekerheid in rivierwaterstanden	79
	<i>Matthijs Gensen</i>	

	Samenwerken met de splitsingspunten van de rivier	83
	<i>Matthijs Gensen</i>	

	Grootste risico rivieren: splitsingspunt of piping?	88
	<i>Webinar team</i>	

	Voorlanden: nuttig voor beheersbare waterveiligheid of alleen mooie natuur?	92
	<i>Webinar team</i>	

HOOFDSTUK 4 HETEROGENITEIT IN DE ONDERGROND

	Introductie	97
	<i>Hans Middelkoop</i>	

	C1 - Ondergrondgerelateerde faalmechanismen van dijken	99
	<i>Bas Knaake</i>	

	C2 - Grondwatergerelateerde dijkveiligheid	103
	<i>Teun van Woerkom</i>	

	C3 - Geofysische metingen van de bodem	107
	<i>Juan Chavez Olalla</i>	
	Van dijkgeschiedenis naar dijkversterking	111
	<i>Teun van Woerkom</i>	
	Betere kartering van de opbouw van de ondergrond	116
	<i>Webinar team</i>	
	Datagedreven dijkversterking: bouwen op nieuwe en historische data	121
	<i>Webinar team</i>	

HOOFDSTUK 5 BETROUWBAARHEID EN STERKTE VAN WATERKERINGEN

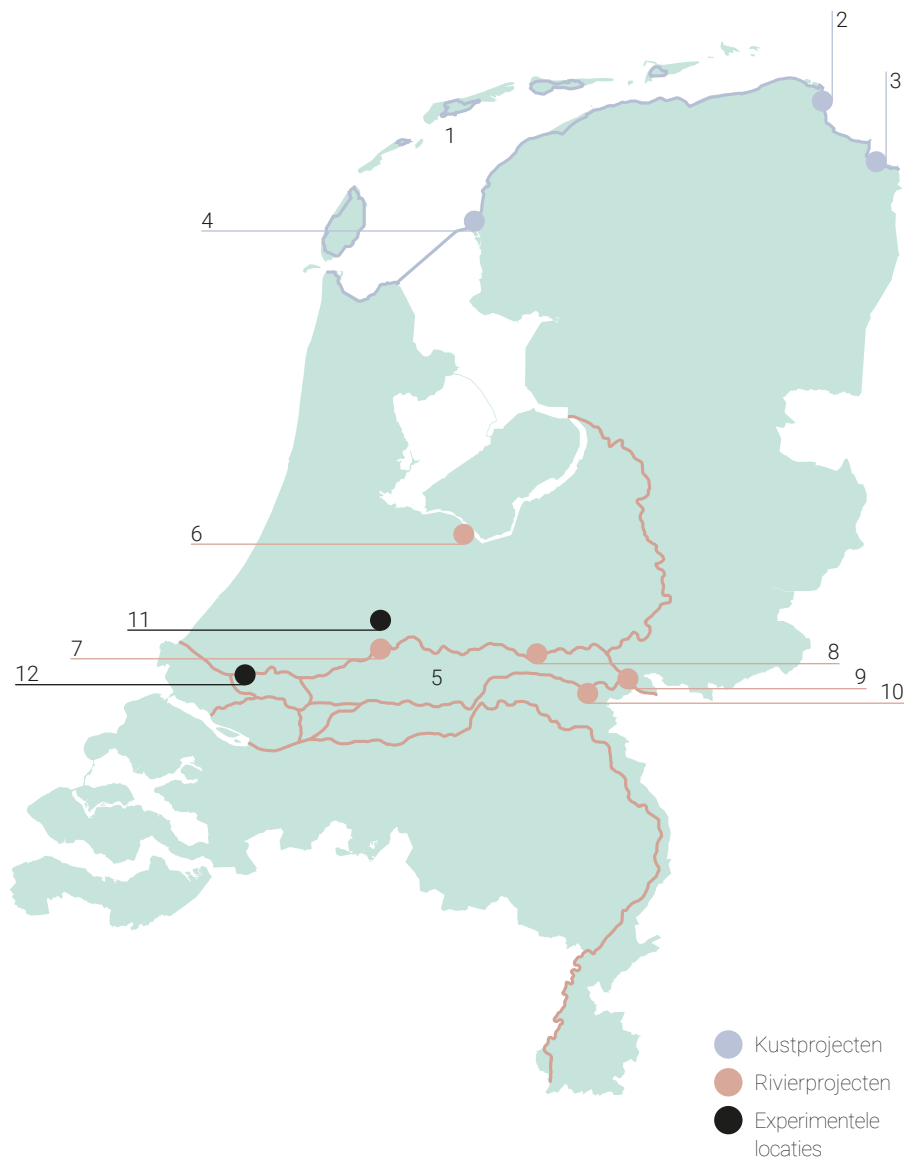
	Introductie	127
	<i>Bas Jonkman</i>	
	D1 - Resterende dijkweerstand	129
	<i>Guido Remmerswaal</i>	
	D2 - Modelleren van met damwanden versterkte dijken bij organische ondergrond	133
	<i>Arny Lengkeek</i>	
	D3 - Tijdsafhankelijke piping en interacties	137
	<i>Joost Pol</i>	
	D4 - Verwerking van prestaties uit het verleden	141
	<i>Mark van der Krogt</i>	
	D5 - Belasting en erosie door overslag	145
	<i>Vera van Bergeijk</i>	
	D6 - Bermen en ruwheidselementen	149
	<i>Weiqiu Chen</i>	
	Kleinere faalkans door tijdsafhankelijke pipegroei	153
	<i>Joost Pol</i>	

	Naar een realistische inschatting van weerstand tegen golfoverslag	158
	<i>Webinar team</i>	
	Macrostabiliteit – betere parameters, betere modellen of dijkversterking?	162
	<i>Webinar team</i>	

HOOFDSTUK 6 JURIDISCHE EN GOVERNANCE-ASPECTEN BIJ DE UITVOERING

	Introductie	167
	<i>Willemijn van Doorn-Hoekveld en Marleen van Rijswijk</i>	
	E1 - Juridische aspecten van implementatie	169
	<i>Monica Lanz en Willemijn van Doorn-Hoekveld</i>	
	E2 - Sectoroverschrijdende samenwerking	173
	<i>Emma Avoyan</i>	
	E3 - Inzicht in kennisarrangementen	177
	<i>Martijn van Staveren</i>	
	Nieuwe waterveiligheidsnormering: een juridische invalshoek	181
	<i>Willemijn van Doorn-Hoekveld en Monica Lanz</i>	
	Wat maakt samenwerking succesvol?	187
	<i>Emma Avoyan</i>	
	Verder kijken dan versterken	192
	<i>Webinar team</i>	
	Bibliografie	196
	Lijst van All-Risk-dissertaties	199
	Colofon	200

Projectlocaties



1 Waddenzee

B1, B2, D1, E1, E2



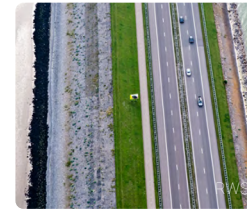
2 Dubbele Dijk

A2, A4, E1 p59



3 Brede Groene Dijk

A2, A4, E1 p51



4 Nieuw ontwerp Afsluitdijk

D5



5 Rivierengebied

C1, D1, D4, E1, E2



6 Eemdijk testlocatie

D2, D4



7 Streefkerk-Ameide

A1, A3



8 Grebbedijk

E2, E3



9 Rijn splitsingspunten

B3 p83 p88



10 Nijmegen-Lent

C2 p111



11 Oude rivierbedding

C3



12 Experimentele faciliteiten

D3, D6 p153



Peilhuisje bij Herwijnen tijdens hoogwater. Foto door HWBP

Voorwoord

Dijkversterkingsoperatie van Utrecht tot Barcelona drijft op nieuwe kennis

Zonder onze dijken en duinen zou 60% van Nederland regelmatig onder water staan. In dit gebied wonen 9 miljoen mensen. Het nieuwe rapport van het IPCC (februari 2022), het klimaatpanel van de Verenigde Naties, onderstreept het belang van werken aan waterveiligheid. De zeespiegel stijgt en we krijgen steeds vaker te maken met extreem weer. Met het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP), de grootste waterveiligheidsoperatie sinds de Deltawerken, zorgen we dat de kans op een overstroming tot een minimum wordt beperkt.

Het Hoogwaterbeschermingsprogramma gaat 1.500 km dijk versterken

Het Hoogwaterbeschermingsprogramma werkt met de waterveiligheidsnormen die in 2017 bij wet zijn vastgesteld. Daarbij is het uitgangspunt dat iedere Nederlander hetzelfde basis beschermingsniveau heeft. De kans dat hij of zij overlijdt door een overstroming moet kleiner zijn dan 1/100.000 per jaar.

Door Anouk te Nijenhuis

Innovatiecoördinator bij het Hoogwaterbeschermingsprogramma



en Erik Wagener

Directeur van het Hoogwaterbeschermingsprogramma



Om dit te bereiken versterkt het HWBP tot 2050 in heel Nederland circa 1.500 kilometer aan dijken en 500 sluizen en gemalen. Dit klinkt wellicht abstract, maar het komt grofweg overeen met de afstand tussen Utrecht en Barcelona. Voor deze operatie is tot 2050 ruim 12,7 miljard euro uitgetrokken. Gemiddeld gaat het om ca. 400 miljoen euro en 50 km dijken per jaar!

De dijkversterkingsopgave is niet in beton gegoten. De waterschappen hebben tot 2023 om de dijken te beoordelen. Vervolgens versterken ze waar nodig de dijken. De opgave van het HWBP kan dus groter of kleiner worden naarmate we beter weten hoe de dijken eraan toe zijn. Nieuwe kennis maakt het verschil bij het bepalen en realiseren van deze dijkversterkingsopgave.

Nieuwe kennis en innovatie is hard nodig

Al meer dan 1.000 jaar houden de dijken Nederland veilig. Na 1916 en 1953 zijn daar stormvloedkeringen en dammen aan toegevoegd. Ruimte voor de Rivier volgde na de hoogwaters van 1993 en 1995. Nieuwe kennis van

overstromingsrisico's was de aanleiding voor nieuwe, veelal scherpere normen voor de waterkeringen in 2017.

Ook nu zijn nieuwe kennis en innovaties van groot belang. De gigantische opgave vraagt een forse investering en een stevig tempo. Ook raken de vaak omvangrijke dijkversterkingen direct de mensen die langs de dijken wonen en belangrijke natuurgebieden en cultuurhistorie. Innovatie is nodig om de kosten per kilometer dijkversterking te verlagen, de doorlooptijd van projecten te verkorten en de maatschappelijk impact van dijkversterkingen te verminderen.

Het HWBP investeert daarom gemiddeld €10 miljoen per jaar in nieuwe kennis en innovaties. Daarbij wordt aan technische kennis gewerkt en aan innovaties die de aanpak en integraliteit van projecten verbeteren. De resultaten worden intussen zichtbaar in besparingen, duurzaamheid en betere inpassing in het landschap.

All-Risk geeft belangrijke impuls

Het All-Risk-onderzoeksprogramma geeft een impuls aan de kennis- en innovatieaanpak van het HWBP. Met nog meer dan 25 jaar voor de boeg is het HWBP bij uitstek een programma waarin de kennis en wijsheid vanuit de wetenschap kan worden benut in de praktijk. Door voort te bouwen op de kennis van wetenschappers en door samen te werken met Rijkswaterstaat, kennisinstellingen en de STOWA kan het HWBP nieuwe kennis in de praktijk brengen.

Wetenschap en praktijk

Onze waterveiligheidsoperatie vraagt om de inzet van onderzoekers en praktijkmensen. We hebben met All-Risk een brug gebouwd tussen wetenschap en praktijk. Dat het gelukt is om de verbinding echt te leggen,

blijkt wel uit het feit dat de onderzoekers in elk proefschrift de waarde voor de praktijk hebben benoemd. En uit de vele versterkingsprojecten waar onderzoekers mee hebben samengewerkt. Hieronder schetsen we enkele inspirerende onderzoeksresultaten.

Techniek

Het eerste voorbeeld is de praktijkproef voor damwanden. Hier is een full-scale proef (**Figuur 1**) uitgevoerd en bekostigd door het HWBP, waarbij de belasting zodanig is opgevoerd dat de damwanden echt gingen buigen. De gegevens uit deze proef zijn door meerdere onderzoekers in All-Risk gebruikt om te beschrijven wat er nu precies gebeurde tijdens de proef, en ook om deze proef in de wetenschappelijke literatuur te verankeren. Ook de vertaling naar de praktijk heeft hiermee een grote impuls verkregen, waarmee dijken doelmatiger kunnen worden ontworpen. Op damwanden kunnen kosten worden bespaard door de uitkomsten van



Figuur 1: De testopstelling van de Eemdijkproef gezien vanuit de lucht. Photo © NOS / Eric Feijten.

de proef en het daaraan gekoppelde onderzoek. Uit de proef blijkt verder dat de instroom van water naar de polder veel beperkter zal zijn. Dat geeft een gigantische reductie van het overstromingsrisico. Iets waar we op lange termijn rekening mee kunnen houden bij het dijkontwerp.

Een tweede voorbeeld is het “keuzemenu voorlanden” waarmee beheerders kunnen bepalen hoe actief ze de hoger gelegen gebieden voor de dijk willen beheren. Dit hoger gelegen gebied reduceert de golven en daarmee de overstromingsrisico's. Als je daar rekening mee houdt is er minder dijkversterking nodig. Nu is er een degelijke wetenschappelijke onderbouwing waarmee zorgen over het wegspoelen van de voorlanden bij extreme situaties worden weggenomen. Het ontwikkelde keuzemenu helpt ook om te bepalen op welke manier het beheer van zo'n voorland vormgegeven kan worden. Een mooie symbiose tussen All-Risk en de HWBP Innovatieprojecten Waddenzee en Voorlanden.

Projectaanpak

Ook voor de aanpak van projecten zijn er aansprekende resultaten. De versterking van de Grebbedijk langs de Nederrijn bood kans voor onderzoek naar integraliteit in HWBP projecten. Een optimistisch geluid uit All-Risk over de inzet op integraliteit in HWBP-projecten is een goede

stimulus om naar integrale oplossingen te blijven zoeken. Met een combinatie van motivatie, verbindende projectleiders en kennis kun je nu al ver komen, zo blijkt uit het onderzoek. In het project SAFE van Waterschap Rivierenland is All-Risk-onderzoek benut om onzekerheden mee te nemen in de planning en aanpak van het project. Deze aanpak leidt tot besparingen. Tot slot laten onderzoekers bij de Dubbele Dijk van Waterschap Noorderzijlvest en de Brede Groene Dijk van Waterschap Hunze en Aa's zien dat binnen wet- en regelgeving veel meer mogelijk is dan vaak wordt gedacht.

Op naar de praktijk

Het is goed om te zien hoe de wetenschap helpt om slimme oplossingen voor de grote waterveiligheidsopgave te vinden. De versterkingsprojecten weten nu de wetenschappers te vinden als er concrete uitdagingen zijn en de onderzoekers hebben de dynamiek van de projecten meegemaakt. Het HWBP staat te trappelen om de resultaten van All-Risk naar de praktijk van versterkingsprojecten te brengen. Dit zal ook nog werk met zich meebrengen, want met een mooi onderzoek is de praktijk van alledag niet gelijk veranderd. De betrokken waterschappen, de Programmadirectie en de HWBP Innovatieversneller helpen projecten graag om de resultaten van All-Risk in de praktijk toe te passen.

Managementsamenvatting

In een belangrijk deel van Nederland leven bewoners onder de zeespiegel en zijn ze kwetsbaar voor rivieroverstromingen. Daarom is in Nederland een praktijk ontwikkeld om vroegtijdig maatregelen te nemen om overstromingen te voorkomen. Sinds de start van de Deltawerken hebben er gelukkig alleen maar enkele kleine overstromingen plaatsgevonden. Deze kunnen gezien worden als een 'wake-up call' en ook is ervan geleerd. Zo heeft de dijkdoorbraak in Wilnis in 2003 aangetoond dat niet alleen overstromingen maar ook droogtes de regionale veendijken kunnen aantasten. Meer recentelijk herinnerde de laatste overstroming in Limburg ons en onze buurlanden eraan dat weersextremen zoals die we in de zomer van 2021 zagen, altijd mogelijk zijn. Het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP) zet zich al decennia in om de volgende ramp te voorkomen door de 'primaire' waterkeringen te versterken. Om de komende 25 jaar ongeveer 50 km dijken per jaar te helpen versterken, is in 2017 het onderzoeksprogramma All-Risk gestart door vijf universiteiten en meer dan 30 partners van overheid, onderzoeksinstituten, NGO's en het bedrijfsleven. Het onderzoek werd gefinancierd door de Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek (NWO), een van de belangrijkste wetenschapsfinanciers in Nederland. NWO investeert jaarlijks bijna 1 miljard euro in nieuwsgierigheidsgedreven onderzoek, onderzoek gericht op maatschappelijke uitdagingen en in onderzoeksinfrastructuur.

Na vijf jaar onderzoek presenteren we in dit boek de All-Risk-resultaten voor dijkprofessionals die werkzaam zijn in waterveiligheid, in binnen- en buitenland. Hoofdstuk 1 begint met de kansen en uitdagingen van de technische en juridische implementatie van de nieuwe Nederlandse risicogebaseerde benadering, terwijl we lessen uit de Duitse context van

waterveiligheid en de recente overstroming in Limburg in perspectief plaatsen om onze blik te verruimen.

Na het eerste hoofdstuk behandelt elk hoofdstuk één van de vijf All-Risk-onderzoeksthema's (A t/m E), variërend van het risicokader tot de juridische uitvoering. Elk hoofdstuk begint met een samenvatting van elk onderzoeksproject (veelal een promotieonderzoek), vervolgens belichten we de innovatieve bijdragen en aanbevelingen voor de praktijk en delen we in 'storylines' enkele casestudies. We sluiten elk hoofdstuk af met de reflecties uit de webinarreeks, waarin discussies hebben plaatsgevonden over de belangrijkste bevindingen uit het All-Risk-onderzoek met vertegenwoordigers uit onderzoek en praktijk.

Hoofdstuk 2 behandelt het risicokader dat overheden en technisch adviseurs voortaan gebruiken om het overstromingsrisico te beoordelen. Project A1 stelde vanuit technisch-inhoudelijk oogpunt methoden voor om kostenefficiënte versterkingsmaatregelen te kiezen en de kwaliteit van dijkinspecties te onderzoeken. Project A2 gebruikte de scenarioaanpak om schattingen van de overstromingskans van multifunctionele waterkeringen te verbeteren. Deze aanpak is ook toepasbaar om de principes van een dubbele dijk en de gevoeligheid voor zeespiegelstijging van de Brede Groene Dijk in combinatie met het kweldersysteem in de Waddenzee te onderzoeken. Samen met onderzoekers in andere hoofdstukken en het gerelateerde Nederlandse SafeLevee-project, gebruikte project A3 gebeurtenissen en experimenten uit het verleden om de faalkansen van waterkeringen beter te kunnen schatten. Ruimtelijk gezien sluit project A4 aan bij het Europese SARCC-project

om nieuwe alternatieven voor hoogwaterbescherming te ontwikkelen, zoals bijvoorbeeld in de gemeente Vlissingen in Zuidwest-Nederland.

Hoofdstuk 3 gaat in op de niet-zandige kusten van bijvoorbeeld de Waddenzee en het Schelde-estuarium en de belangrijkste vertakkende rivieren die de Nederlandse delta vormen (Waal, Nederrijn en IJssel). Met een combinatie van meettechnieken onderzocht project B1 het ontwerp van kwelder ecosystemen om de golfbelasting tijdens extreme stormen effectief te verminderen. Met behulp van bestaande fysieke meetgegevens en numerieke modelgegevens stelde project B2 een efficiëntere rekenkundige methode voor om rekening te houden met het volledige golfbelastingsspectrum dat de dijk en zijn begroeide voorlanden kan bereiken. Project B3 analyseerde historische afvoergegevens op een vernieuwende manier en gebruikte 1D-modellen om de gevoeligheid van waterstanden voor rivierruwheid en afvoerverdelingen in het Nederlandse Rijnsysteem te kwantificeren en te onderzoeken.

In Hoofdstuk 4 worden methoden voorgesteld om de beoordeling van de kenmerken van de ondergrond te verbeteren, door te kijken naar de natuurlijke ontwikkeling van de Rijn-Maasdelta, de historische dijkopbouw en de prestaties van nieuwe geofysische onderzoeksmethoden. Project C1 heeft voor de hele delta een overzicht verkregen van de invloed van de ondergrond op het faalpotentieel van dijken. Project C2 gebruikte parameters gerelateerd aan dijkgeometrie, drainagecondities en materiaaleigenschappen om de dijkstabiliteit te schatten. Project C3 heeft statistische methoden getest en gevalideerd om geofysische metingen om te zetten in fysieke eigenschappen van de ondergrond.

Hoofdstuk 5 gaat in op de modellen en empirische onderbouwing van faalmechanismen, en gaat daarnaast ook in op technieken om de inschatting van de betrouwbaarheid en sterkte van waterkeringen te verbeteren.

Project D1 bracht de Materiaal Punten Methode naar een volgend niveau om het faalproces na een afschuiving te evalueren. Project D2 evalueerde onder meer de 'full-scale' bezwijkproef "Eemdijk" – waar een gronddijk versterkt met damwanden tot bezwijken werd gebracht. Project D3 liet het belang van het faalmechanisme 'piping' zien door de groei van 'pipes' onder een dijk beter te modelleren met een tijdsafhankelijke belasting in plaats van een stationaire belasting. Project D4 liet zien hoe de prestaties en zettingen van dijken tijdens de aanleg belangrijke informatie kunnen geven over de sterkte gedurende de gehele levensduur. Project D5 gaf inzicht in wanneer en hoe golfoverslag bijdraagt aan erosie van het binnentalud. Project D6 onderzocht de rol van schuine ("diagonale") golfaanval op dijken en de effecten van overgangen op het dijkतालud.

Hoofdstuk 6 gaat in op de rol van regelgeving en bestuur bij de uitvoering van de technische innovaties en onderzoek voor versterkingsprojecten van het Hoogwaterbeschermingsprogramma. Project E1 adviseerde bij juridische vragen zoals die van de 'POV Waddenzee Dijken' over de toepassing van de Omgevingswet en de taakverdeling bij innovatieve projecten zoals het project Dubbele Dijk. Project E2 identificeerde cruciale factoren en voorwaarden voor het succes van sectoroverschrijdende samenwerking binnen versterkingsprojecten in het HWBP. Project E3 behandelt de waarde van ruimtelijke ordening en visueel ontwerp bij het bereiken en waarderen van verschillende vormen van kennis die kunnen bijdragen aan versterkingsprojecten.

Hoewel het uiteindelijke doel van het HWBP pas uiterlijk in 2050 bereikt wordt, hopen we dat de inzichten, methoden en instrumenten die zijn ontwikkeld in All-Risk van nut en inspiratie kunnen zijn. We staan open voor opmerkingen en suggesties, en werken graag verder samen met dijkprofessionals in de lopende en komende onderzoeksprogramma's en versterkingsprojecten om inzichten verder te testen en te ontwikkelen in de praktijk.

Woord van dank en partners

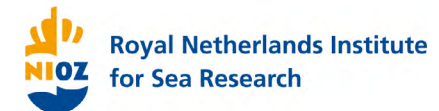
Het onderzoeksprogramma All-Risk (<https://www.all-risk-program.nl/>) is een ieder dankbaar die bijgedragen heeft aan het programma. Het programma was onderdeel van het onderzoeksprogramma Perspectief, binnen het TTW-domein (Toegepaste en Technische Wetenschappen) van NWO (Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek). In het Perspectief-programma worden onderzoekers en gebruikers uitgedaagd om gezamenlijk nieuwe, uitdagende onderzoeksprogramma's binnen de toepassingsgerichte en technische wetenschappen in te dienen die economische en maatschappelijke impact genereren op voor Nederland relevante thematische gebieden. We willen NWO bedanken voor de steun, en in het bijzonder Maartje van Dijk voor haar behulpzame houding en slimme suggesties.

Het onderzoeksprogramma kon niet worden uitgevoerd zonder de steun van de 'in-cash' bijdragen aan dit programma van Rijkswaterstaat, STOWA, Deltares, HWBP en Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier, en de vele, vele in-kind bijdragen.

We willen ook de volgende internationale instellingen die met ons hebben samengewerkt in het All-Risk-programma bedanken: U.S. Army Corps of Engineers, The University of Tokyo, Texas A&M University Galveston Campus, SSPEED Center, UFZ Helmholtz Centre for Environmental Research en het China Scholarship Council.

In het All-Risk-programma zijn 14 promovendi en 4 postdocs ondersteund bij het uitvoeren van hun onderzoek. Zonder de energie, kracht en slimheid van deze jonge en enthousiaste mensen zou het programma niet hebben bestaan.

Universiteiten



Financierende organisatie



Niet-gouvernementele organisatie



Onderzoeksinstituten



Overheidsinstanties



Adviesbureaus





Illustratie door Stephan Timmers.

stijg

Hoofdstuk 1

Risicobenadering van overstromingen

Introductie

Door Matthijs Kok en Maartje van Dijk

Dit boek gaat over de nieuwe overstromingsrisicobenadering, die tot doel heeft een transparanter en flexibeler kader te bieden voor efficiënte investeringen in risicobeperking. Het onderzoek is gefinancierd door de Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek (NWO) in het zogenaamde Perspectief-programma. NWO investeert jaarlijks bijna 1 miljard euro in nieuwsgierigheidsgedreven onderzoek, onderzoek gericht op maatschappelijke uitdagingen en in onderzoeksinfrastructuur. Het ontwikkelen van nieuwe technologie vereist het opzetten van nieuwe onderzoekslijnen, het overstijgen van oude netwerken en het creëren van nauwe samenwerking tussen wetenschappers en het bedrijfsleven. Het Perspectief-programma geeft ruimte aan gezamenlijk nieuwe, uitdagende onderzoeksprogramma's binnen de toepassingsgerichte en technische wetenschappen.



Deze programma's genereren economische en maatschappelijke impact op voor Nederland relevante thematische gebieden.

Dit hoofdstuk geeft achtergrondinformatie over de overstromingsrisicobenadering. In de eerste bijdrage constateren **Wim Kanning en Bas Jonkman** dat de conservatieve schatting van faalkansen impliceert dat in veel dijkvakken niet aan de nieuwste veiligheidsnormen wordt voldaan. Ze suggereren opties om dit conservatisme te overwinnen door verschillende soorten metingen en monitoringstechnieken te combineren, terwijl ze ook rekening houden met de ervaring van dijkbeheerders. De implementatie van dijkversterking roept echter veel vragen op, vooral met de toenemende roep om 'slimme en efficiënte' innovaties en aansluiting bij andere sectoren. **Willemijn van Doorn-Hoekveld en Marleen van Rijswick** wijzen erop dat veel van deze vragen gaan over de verantwoordelijkheden en taken van overheden en de beleidsinstrumenten die daarbij kunnen worden ingezet. Vroegtijdig juridisch advies kan daarom helpen deze knelpunten aan te pakken en de balans te vinden tussen de gewenste (juridische) zekerheid over de verantwoordelijkheden en de flexibiliteit om sectoroverschrijdende innovatie in de dijkversterkingsprojecten in te passen.

Marleen van Rijswick en Moritz Reese gaan verder in op de leerpunten tussen waterveiligheid in Nederland en Duitsland. Lessen voor Duitsland zijn onder meer het overwegen van een benadering zoals in de Nederlandse Omgevingswet om sectoroverschrijdende ruimtelijke ontwikkelingen in samenhang te bezien, en ook de Nederlandse

positionering van rampenbeheersing als derde laag van waterveiligheid. Voor Nederland kan het interessant zijn om een bouwverbod te overwegen in overstromingsgevoelige gebieden. In Duitsland heeft de aanwijzing van noodoverlooptgebieden het mogelijk gemaakt om kritieke knelpunten te reguleren.

In de '*fact finding*' naar de overstromingen in Limburg beschrijft **Bas Jonkman** de gevolgen van deze extreme gebeurtenis en geeft hij leerpunten aan voor de toekomst. Over het algemeen moeten we de voorstellingen verbeteren door rekening te houden met de kans op overstromingen in de zomer, met name voor kleine rivieren.

Het perspectief van All-Risk-onderzoekers wordt samengevat door **Matthijs Kok**. Hieruit volgt de overweging om geïntegreerde en interdisciplinaire strategieën voor de lange termijn te definiëren, om beter om te gaan met de klimaatscenario's. Natuurgerichte oplossingen in kwelders en voorlanden bieden kansen om veel ecosystemen te ondersteunen. Bovendien moet de daaruit voortvloeiende vermindering van het overstromingsrisico ook gericht zijn op het verbeteren van de kortetermijnrespons om verrassingen zoals in Limburg te voorkomen. De structurele robuustheid van de waterkering geeft een extra reactietijd bij een extreme gebeurtenis, rekening houdend met de ruimtelijke eisen bij het plannen van versterkingsinspanningen. Last but not least biedt het verzamelen van nieuwe gegevens in combinatie met modellen een belangrijk onderwerp om de beoordeling en het ontwerp van waterkeringen te verbeteren.

Hoe werkt de overstromingskansbenadering?

Door Wim Kanning

Onderzoeker aan de Technische Universiteit Delft



en Bas Jonkman

Hoogleraar Waterbouwkunde aan de Technische Universiteit Delft



De Nederlandse overstromingskansbenadering

De Nederlandse risicogebaseerde benadering van veiligheidsnormen voor hoogwaterbescherming dateert uit de jaren vijftig, toen Van Dantzig en anderen economisch optimale beschermingsniveaus hebben afgeleid voor Zuid-Holland. Dit gebeurde na de Watersnoodramp van 1953. Praktisch werd de aanpak vertaald naar een ontwerpwaterstand met een jaarlijkse overschrijdingsfrequentie van 1/10.000. De waterkeringen zijn zo ontworpen dat ze deze ontwerpwaterstand kunnen overleven. Deze methode wordt de overbelastingsbenadering genoemd. Later werd dit doorvertaald naar minder strenge normen voor gebieden met minder grote gevolgen.

Vanaf het jaar 2017, na een periode van meer dan 20 jaar studie en beraad, zijn er nieuwe veiligheidsnormen ingevoerd op basis van de overstromingskansbenadering. Het verschil met de overbelastingsbenadering is dat bij de overbelastingsbenadering één gebeurtenis (waterstanden, golven of een combinatie) met een bepaalde overschrijdingskans voldoende veilig gekeerd diende te worden, terwijl bij de overstromingskansbenadering naar verschillende combinaties van sterkte en belasting wordt gekeken, die samen een maximaal toelaatbare (jaarlijkse) faalkans mogen hebben.

In deze benadering worden aan waterkeringstrajecten veiligheidsnormen toegekend, gedefinieerd als maximaal toelaatbare faalkans, op basis van de economische waarde die ze beschermen, het individueel slachtofferisico en het groepsrisico. De nieuwe veiligheidsnormen worden in het Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium (BOI) ([Rijkswaterstaat, 2019](#)) vertaald in praktische eisen aan individuele dijkvakken en faalmechanismen zodat aan de nieuwe veiligheidsnormen wordt voldaan.

Efficiënte vermindering van het overstromingsrisico

De overstromingskansbenadering heeft verschillende voordelen. Ten eerste weerspiegelt deze de daadwerkelijke risico's (kansen en gevolgen) beter en maakt deze efficiënte investeringen mogelijk. De bijbehorende maximaal toelaatbare faalkansen zijn relatief gemakkelijk te communiceren ("kans op natte voeten"). Voorts is het een flexibel kader waarin onzekerheden expliciet worden meegenomen. Dit maakt een transparante veiligheidsbeoordeling mogelijk, en het ontwerp van zowel traditionele als innovatieve maatregelen. Verschillende soorten maatregelen om de veiligheid te vergroten, zoals versterking, monitoring en metingen die onzekerheden verkleinen, kunnen met de risicobenadering transparant worden geëvalueerd. De overstromingskansbenadering is geschikt om verschillende soorten kennis – fysische kennis over hydraulica en geotechniek en gedrag van dijken, alsmede kennis van statistiek en onzekerheden – te combineren. Zo worden bijvoorbeeld onzekerheden in waterstanden en afvoeren rond splitsingspunten meegenomen in het All-Risk-onderzoek van Matthijs Gensen, door integraal naar de drie Rijntakken te kijken in plaats van naar elke tak afzonderlijk. Verder sluiten de toelaatbare faalkansen

goed aan op definities in de EuroCode voor bouwwerken en bieden ze een duidelijke basis voor het meenemen van innovatieve oplossingen. Ook kan het daadwerkelijk falen (een bres) in plaats van initiërende mechanismen worden meegenomen, bijvoorbeeld door mee te nemen dat een kleinere taludinstabiliteit niet noodzakelijk tot een bres leidt. Dit alles zou moeten resulteren in efficiëntere investeringen in waterkeringen.

Een recept of een kader voor besluitvorming?

De overstromingskansbenadering biedt duidelijke voordelen, maar de huidige implementatie en resultaten laten ook uitdagingen zien die moeten worden overwonnen. Er is nog steeds conservatisme in het BOI en vooral in de keuzes in de modellering van de faalmechanismes. Dit conservatisme leidt mede tot zeer hoge gerapporteerde faalkansen – vaak hoger dan 1/100 per jaar – veel hoger dan recente ervaring doet vermoeden. Ook kan men zich afvragen of het BOI niet te veel als recept worden toegepast. Stimuleren zij wel voldoende het kritisch denken en het gebruik van alle beschikbare kennis en modellen? Dijken falen voornamelijk door gemiste zwakke plekken, worden deze goed geïdentificeerd? Er ligt veel nadruk op het maken van berekeningen, maar is er voldoende ruimte voor het gebruiken van ervaring van beheerders, metingen, monitoring en andere onzekerheidsreducties?

De overstromingskansbenadering biedt stimulansen voor reductie van deze onzekerheden, maar deze mogelijkheden kunnen meer worden benut, zoals ook door het ENW werd onderstreept in het advies “Naar geloofwaardige overstromingskansen” (ENW, 2020). De overstromingskansbenadering kan leiden tot veel optimalisaties zoals het All-Risk-onderzoek van Wouter Jan Klerk naar optimale dijkversterkingen heeft aangetoond. De praktische toepassing van deze nieuwe mogelijkheden is echter nog beperkt. Het onderzoek van Wouter Jan Klerk laat zien dat ook inspectie en onderhoud op een risico-gebaseerde manier kunnen

worden meegenomen; dit gebeurt echter nog niet in de praktijk. Het merendeel van het bovenstaande kan worden toegeschreven aan de relatief korte tijd dat de overstromingsrisicobenadering wordt toegepast.

Naar een veiliger Nederland

De nieuwe overstromingsrisicobenadering biedt een efficiënt, transparant en flexibel kader met duidelijke veiligheidsnormen. De aanpak heeft zijn waarde al in veel projecten bewezen. Na een eerste aanpassingsperiode om de oude manier van beoordelen en ontwerpen aan te passen aan de nieuwe aanpak, is het nu tijd om de voordelen van de nieuwe aanpak ten volle te benutten. All-Risk heeft kennis en instrumenten aangereikt om dit mogelijk te maken, bijvoorbeeld voor scherpere pipinganalyses zoals het onderzoek van Joost Pol laat zien. Wij hopen en verwachten dat in de komende jaren steeds meer nieuwe mogelijkheden in de praktijk zullen worden toegepast.



Figuur 1: Grondboring t.b.v. de analyse van het binnenwerk van een dijk. Foto door HWBP.

Kansen en uitdagingen bij de juridische implementatie van de nieuwe risicobenadering in het waterveiligheidsbeheer

Door Willemijn van Doorn-Hoekveld

Universitair Docent aan de Universiteit Utrecht



en Marleen van Rijswijk

Hoogleraar Europees en nationaal waterrecht aan de Universiteit Utrecht



Een van de bijzondere aspecten van het Nederlandse waterbeheer is dat er normen voor waterveiligheid zijn vastgelegd in de wet, de Waterwet. Het feit dat de primaire waterkeringen moeten voldoen aan deze normen, maakt dat het bevoegd gezag, de waterschappen en de Minister van Infrastructuur en Waterstaat, verantwoordelijk zijn en gehouden kunnen worden voor het al dan niet voldoen aan die normen. In 2017 zijn deze waterveiligheidsnormen gewijzigd van overschrijdingskansen naar een risicogestuurde benadering. Deze benadering is in lijn met de Europese Richtlijn Overstromingsrisicobeheer, maar kent uitdagingen voor de praktijk.

Een goede implementatie van de nieuwe waterveiligheidsnormering brengt vragen met zich mee. Hoe moeten de normen juridisch gekwalificeerd worden en hoe kunnen ze in de wetgeving neergelegd worden om voor de praktijk werkbaar te zijn en tegelijkertijd duidelijkheid te bieden

voor burgers en overheden? De nieuwe benadering biedt ook kansen. De vraag rijst in hoeverre de nieuwe risicobenadering ruimte laat voor innovaties en hoe het waterveiligheidsbeleid zich laat combineren met bijvoorbeeld het natuurbeleid of ruimtelijke ontwikkelingen. Daarom wordt er in het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP) gewerkt met innovatieve pilotprojecten, waarop de nieuwe risicobenadering met de bijbehorende wettelijke veiligheidsnormen wel van toepassing zijn, maar deze niet direct toepasbaar zijn. Dit leidt tot vragen over de verantwoordelijkheden en taken van overheden, als ook over de beleidsinstrumenten die daarbij ingezet kunnen worden. Aandacht verdient ook hoe overheden zowel binnen als buiten het waterveiligheidsbeheer kunnen samenwerken.

Een aantal van dit soort innovaties met juridische implicaties komt u ook vanuit een technische invalshoek tegen in dit boek, zoals de Dubbele Dijk en de Brede Groene Dijk. Daarnaast heeft het gebruik van voorlanden bij de beoordeling van waterkeringen juridische consequenties.

Naast deze inhoudelijke juridisch-bestuurlijke uitdagingen stelt de komst van de Omgevingswet de praktijk voor nieuwe vragen. Dit betreft een gigantische wetgevingsoperatie, waarbij 26 omgevingsrechtelijke wetten, waaronder de Wet ruimtelijke ordening, de Wet natuurbescherming, de Wet milieubeheer en de Waterwet, zullen opgaan in één wet, de Omgevingswet. Ook al is het uitgangspunt om zo 'beleidsneutraal' de

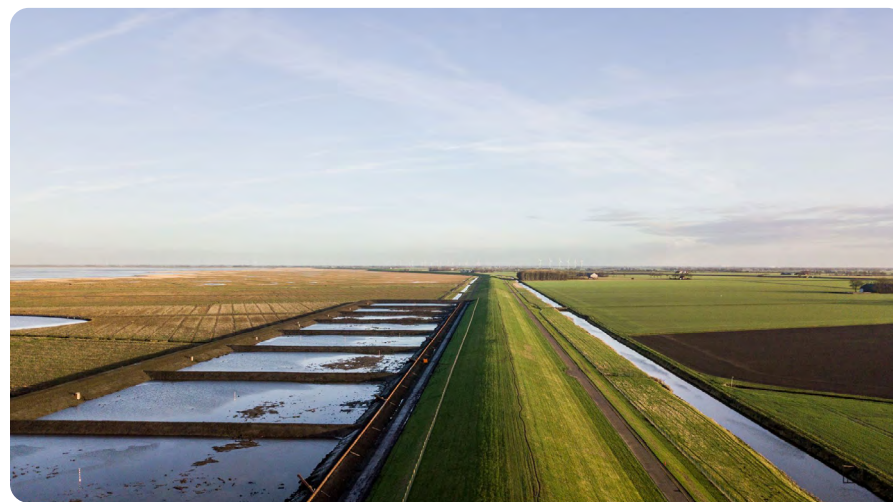
huidige wetgeving om te zetten, voor bijvoorbeeld de veiligheidsnormering voor primaire waterkeringen blijven er vragen bestaan.

De Omgevingswet is nog niet in werking getreden en door sommigen worden de kenmerken van de Omgevingswet, zoals de uitnodigingsplanologie en het geloof en vertrouwen in onderlinge samenwerking tussen bevoegde gezagen, bedrijven, burgers en omwonenden met argusogen aanschouwd. De hieraan verbonden flexibiliteit biedt echter ook kansen voor innovaties.

Wat de verschillende uitdagingen met elkaar gemeen hebben is de vraag hoe ver de taak en verantwoordelijkheid van de waterbeheerder strekt en welke beleidsinstrumenten er beschikbaar zijn om de nieuwe risicobenadering juridisch te implementeren, in zowel innovatieve projecten, zoals de Dubbele Dijk, als in de toepassing onder de Omgevingswet. Ook de noodzakelijke afstemming met andere beleidsvelden – met soms botsende en soms overlappende belangen – zoals de natuurbeschermingsregelgeving, vraagt aandacht en creativiteit. Dit kwam naar voren in het onderzoek naar de Brede Groene Dijk, maar blijkt tevens een van de grootste algemene juridische knelpunten te zijn binnen waterveiligheidsprojecten, zo volgt uit een enquête onder HWBP'ers.¹ Kansen voor innovaties zijn er genoeg, maar daarbij is het van belang de juridische discipline en de governance vroegtijdig bij dergelijke projecten te betrekken. Het recht wordt vaak gezien als veroorzaker van uitvoeringsproblemen, maar het recht draagt vaak ook bij aan een oplossing. Zo bleek men bij de Brede Groene Dijk een oplossing te hebben gevonden, die past binnen het natuurbeschermingsrecht, zelfs in een Natura 2000-gebied. Bij de Dubbele Dijk laat de wet de keuze aan het bevoegd gezag om de primaire waterkering aan te wijzen (i.c. de binnenliggende of de buitenliggende kering of beide keringen gezamenlijk) en daarmee staat het het

bevoegd gezag (de provincie die deze dient aan te wijzen) vrij om een voor de praktijk best werkbare en passende oplossing te kiezen.

Naast de uitdagingen die bestaan in de verkennings-, planuitwerking- en uitvoeringsfase bestaat er ook altijd de kans dat een waterkering faalt. Op het moment dat dit het geval is, zal er waarschijnlijk in alle gevallen schade ontstaan en dat leidt tot de onvermijdbare vraag wie gehouden is die schade te vergoeden. Ook hier gaat het wederom om de vraag welk overheidsorgaan bevoegd en verantwoordelijk is. Uit dit onderzoek blijkt temeer dat de taakstelling van de verschillende overheden, de verantwoordelijkheden die daarbij horen en de beleidsinstrumenten waarover de overheden beschikken om aan de taakstelling te voldoen zo duidelijk mogelijk moeten zijn, waarbij een goede balans moet worden gevonden tussen de gewenste (rechts)zekerheid en de behoefte aan flexibiliteit die noodzakelijk is om innovaties te realiseren.



Figuur 1: De Brede Groene Dijk. Foto door Waterschap Hunze en Aa's.

¹ Zie project "E2 - Sectoroverschrijdende samenwerking".

Verbeteren van overstromingsrisicobeheer in Nederland en Duitsland door voorbij de dijken te kijken

Door Marleen van Rijswijk

Hoogleraar Europees en nationaal waterrecht, Universiteit Utrecht



en Moritz Reese

*Helmholtz Centrum voor Milieuonderzoek GmbH (UFZ),
Afdeling milieu- en planningsrecht*



Dit artikel vloeit voort uit de samenwerking met de afdeling Omgevingsrecht van het Helmholtz Centrum voor Milieuonderzoek GmbH – UFZ in het All-Risk-project over nieuwe hoogwaterveiligheidsnormen in Nederland. Het artikel vergelijkt de Nederlandse en de Duitse benadering in het waterveiligheidsbeleid, zowel voor de overstromingsrisico's als de beheersing van deze risico's.

Overstromingsrisico's

Bekend is dat grote delen van Nederland door hun lage ligging zeer kwetsbaar zijn voor overstromingen vanuit de zee of rivieren. Daarom zijn er wettelijk bindende waterveiligheidsnormen vastgelegd in wetgeving. Deze waterveiligheidsnormen sluiten goed aan bij de aanpak in de EU-richtlijn over overstromingsrisicobeheer (Richtlijn 2007/60/EG), waarbij een risicobenadering als uitgangspunt wordt genomen voor de bescherming tegen overstromingen.

De vraag rijst wat de overstromingsrisico's in Duitsland zijn.

Overstromingsrisico's in Duitsland

Duitsland heeft de afgelopen decennia te maken gehad met ernstige overstromingen van rivieren. De bescherming tegen overstromingen vanuit rivieren is dan ook een belangrijke politieke zorg op alle niveaus, van de gemeenten tot de Länder (deelstaten). Het Duitse overstromingsrisicobeleid kreeg een impuls na grote overstromingen, zoals de overstromingen van de Elbe in 2002 en 2013, die beide aanleiding gaven tot aanpassingen in beleid, wetgeving en financieringsprogramma's voor betere beschermings- en preventiemaatregelen. De meest recente overstroming in de Eifel heeft opnieuw het debat aangewakkerd over de vraag of overstromingsrisico's en rampenbeheer geschikt zijn voor het beoogde doel. Ook de EU-richtlijn over overstromingsrisicobeheer heeft invloed op de huidige benadering, nu op grond daarvan in de Duitse wetgeving de verplichting is opgenomen om risicogebieden te bepalen, risico- en gevarenkaarten op te stellen en overstromingsrisicobeheerplannen op te stellen.

Overstromingen langs de kust spelen een ondergeschikte rol en de risico's zijn beperkt tot enkele regio's langs de Elbe en de Wesermond, zoals met name Hamburg en Bremen. De grote overstroming van Hamburg van 1962 is de laatste grote kustoverstromingen en heeft destijds geleid tot

versterking van dijken en de aanleg van veiligheidsroutes in Hamburg, Bremen en andere risicogevoelige agglomeraties.

Plotselinge overstromingen komen steeds vaker voor in stedelijke gebieden en zijn van invloed op stedelijk ontwikkelingsbeleid in heel Duitsland. Dit aspect van het overstromingsrisicobeheer hangt sterk samen met de aanleg van nieuwe stedelijke afwatering, stedelijke klimaatadaptatie en de ontwikkeling van "blauwgroene" infrastructuur in het stedelijk gebied om zo een sponswerking te realiseren.

In het volgende ligt de focus vooral op het beheer van overstromingsrisico's vanuit rivieren en de invloed op wetgeving en waterveiligheidsbeleid.

Wetgeving en beleid in Duitsland

In Duitsland is technische bescherming tegen overstromingen lange tijd de belangrijkste strategie geweest voor het beheer van overstromingsrisico's. Rivieren werden recht getrokken en dijken werden gebouwd om land geschikt te maken voor menselijke doeleinden. We zien dat wereldwijd gebeuren. Tegelijkertijd verspreidde de bebouwing zich nogal ongecontroleerd in overstromingsgevoelige gebieden langs de rivieren. Dit alles leidde tot een aanzienlijke toename van het overstromingsrisico en uiteindelijk tot grote schade bij de hiervoor genoemde overstromingen. Eveneens van belang is het feit dat verkleining van de uiterwaarden en het verhogen van dijken vaak leidden tot een stroomafwaartse verschuiving van het overstromingsrisico. De afgelopen decennia raakte men ervan overtuigd dat het aanhoudend gebruiken en verkleinen van de uiterwaarden het overstromingsrisico vergroot en dat dijkverhogingen geen adequaat en (kosten)effectief antwoord zijn op de hierboven beschreven problemen.

Overstromingsrisiconormen

In Duitsland zijn er geen wettelijk bindende normen voor overstromingsrisico's. Versterking van de waterkeringscapaciteit tot een waterstand die gemiddeld eens per honderd jaar optreedt wordt gebruikt als standaardnorm voor de bescherming tegen overstromingen. Grote dijktrajecten worden aangelegd en onderhouden door de Duitse Länder. Zij beschikken over de noodzakelijke bevoegdheden. Volgens de federale wetgeving en die van de Länder hebben ze het recht om landeigenaren te onteigenen voor zover nodig om dijken aan te leggen, te handhaven of te verplaatsen. De standaardnorm voor maatregelen ter bescherming tegen overstromingen en in het bijzonder voor de dimensionering van dijken in Duitsland is niet wettelijk geregeld, maar verankerd in een "private" norm van het *Deutsche Institut für Normierung* (DIN, <https://www.din.de/nl/over-normen/din-normen>). Volgens DIN-norm nr. 19712 moeten dijken en dammen zo worden gebouwd dat woongebieden worden beschermd tegen een "HQ-100"-overstroming, d.w.z. een overstroming die zich statistisch eens in de 100 jaar kan voordoen. Deze norm geldt echter in principe alleen voor nieuwe dijken en dijkversterkingen en wordt niet overal langs de rivieren doorgevoerd. Of en in hoeverre bestaande dijken worden versterkt en verhoogd, wordt niet wettelijk geregeld en is voornamelijk ter beoordeling van de betrokken Länder. De Länder volgen een multicriteria-benadering waarbij niet alleen rekening wordt gehouden met de hoogte van de dijken, maar uiteraard ook met de kosten-batenverhouding met betrekking tot de waarde en potentiële schade in de verschillende gebieden en de mogelijkheden om alternatieve maatregelen te nemen om de overstromingsrisico's te verminderen, zoals uitbreiding van uiterwaarden en overstromingspolders. Afhankelijk van de bestaande waarden in de beschermde gebieden, worden aanzienlijk lagere of hogere veiligheidsniveaus nagestreefd dan HQ-100. Zo variëren de hoogwaterveiligheidsniveaus in het Duitse Rijnbekken zich uit van

HQ-30 (in de bovenste trajecten) tot HQ-500 (in lagere delen en dichtbevolkte gebieden van Noordrijn-Westfalen). Ook binnen de Duitse deelstaten loopt het veiligheidsbeleid uiteen. Zo heeft Beieren voor al zijn dijken in het Donaustroomgebied een klimaatadaptatie-overschot op de HQ-100-norm ingevoerd. Andere Duitse staten hebben tot dusver afgezien van het toepassen van dergelijke aanpassingen in de veiligheidsniveaus en volgen liever een meer geïntegreerde strategie met meer nadruk op voorzorgsmaatregelen en ruimte voor de rivier.

In Duitsland bestaan geen wettelijke normen voor de waarschijnlijkheid van een doorbraak van de dijken of andere technische verdedigingswerken, zoals wel opgenomen in de Nederlandse wet (op basis van het Lokaal Individueel Risico en een maatschappelijke kosten-batenanalyse). Dijken moeten zo worden aangelegd dat ze bestand zijn tegen het overeengekomen hoogwaterpeil (volgens de hierboven beschreven speelruimte). Om dit te waarborgen werden wel vrij strenge technische normen opgesteld. Bovendien worden waterkeringen regelmatig onderworpen aan technische beoordelingen die deels formeel worden geregeld door wetgeving op Länder-niveau (een of twee keer per jaar, zogenaamde Deichschau/Deichzustandsuntersuchungen, zie DIN 19712, DWA 507/2011).

Problemen die nog meer aandacht behoeven na de overstroming van 2021

De overstroming van 2021 heeft een aantal belangrijke kwetsbaarheden laten zien die ook al zichtbaar waren tijdens en na de Elbe-overstroming uit 2013 en zelfs al daarvoor. Dit betreft met name oude stadsdelen die te dicht bij rivieren en wateren in valleien zijn gebouwd (**Figuur 1**). Deze locaties hebben vaak te kampen met een gebrekkige technische bescherming en het is veelal moeilijk of zelfs onmogelijk om binnen de historische

structuren de bescherming tegen overstromingen te realiseren. De aanpak moet zich enerzijds richten op het verder ruimte geven aan rivieren bovenstrooms en op het verbeteren van nood- en evacuatieregelingen. Aan de andere kant moet meer aandacht worden besteed aan het actief herbouwen en verplaatsen waarbij men niet herbouwt in de getroffen risicogebieden. Het Duitse bouwbesluit biedt wel juridische instrumenten om een dergelijke herstructurering van stadswijken te plannen en uit te voeren, maar is nog nooit op zo'n ingrijpende manier uitgevoerd.

Waar gebouwen nu door de overstroming zijn vernietigd of moesten worden gesloopt, is het de vraag of ze opnieuw moeten worden herbouwd



Figuur 1: Luchtfoto van de overstroming van de Mulde (zijrivier van de Elbe) in 2013 die Grimma overstroomde. Foto © UFZ Helmholtz Centrum voor Milieuonderzoek GmbH, Leipzig.

in het overstromingsgevoelige gebied. Dit wordt nu in principe voorkomen door de ontwikkelverboden op basis van artikel 78 van de Duitse Waterwet. Desondanks wordt er nu een levendige discussie gevoerd of deze verboden moeten gelden voor mensen waarvan het huis of bedrijf beschadigd is geraakt door overstromingen.

Vooral het beleid voor en optreden tijdens noodsituaties – werd bekritiseerd als te omslachtig en inefficiënt. Zowel op federaal als op Länder-niveau zijn initiatieven gelanceerd om de regelingen voor noodsituaties opnieuw te beoordelen en te verbeteren.

Zijn de resultaten van het All-Risk-project interessant voor Duitsland? Zijn er lessen die waardevol kunnen zijn voor het Duitse waterveiligheidsbeleid?

De eerste les zou de introductie van de watertoets kunnen zijn. Dit instrument voor het afstemmen van ruimtelijk en waterbeleid bestaat in Duitsland niet. Gezien de klimaatverandering en de noodzaak van stedelijke transformatie zou Duitsland kunnen overwegen om ook een dergelijke toets in te voeren, misschien als apart onderdeel van de Milieueffectrapportage (MER).

De tweede les kan volgen uit de Nederlandse rampenbeheersing als derde laag van het waterveiligheidsbeleid. Dit is in Duitsland weliswaar in ontwikkeling, vooral na de overstromingen van de Elbe van 2002 en 2013, maar deze pijler kan nog worden verbeterd. Wettelijke veiligheidsnormen kunnen in dit opzicht een stimulans zijn.

Zijn er ook lessen die Nederland kan leren van Duitsland?

Onderstaande Duitse beleidsinstrumenten kunnen inspirerend zijn voor Nederland.

Wat betreft het falen van gemeenten om de ontwikkeling in overstromingsgevoelige gebieden adequaat te beperken en te reguleren: de **aangewezen overstromingsgevoelige gebieden** en de bijbehorende **ontwikkelingsverboden** in Duitsland zijn zeer sterke en innovatieve instrumenten om bescherming tegen overstromingen effectief te koppelen aan ruimtelijke ontwikkeling en deze instrumenten zijn ook interessant buiten Duitsland. Hetzelfde geldt voor de verplichting voor de Länder om bestaande overstromingsgebieden formeel aan te wijzen als "**overstromingsruimtegebieden**". Na aanwijzing zijn in deze gebieden geen ontwikkelingen toegestaan die de functie van uiterwaarden belemmeren of bijzondere risico's opleveren (bijvoorbeeld door opslag van gevaarlijke stoffen). Daarnaast is er het instrument van zogenaamde **overstromingsgebieden**, waarbij het gaat om gebieden waar water afwatert en waar het de uitdaging is om afspoeling te verminderen of in ieder geval een toename door bijvoorbeeld door ontbossing te voorkomen.

Verder kan het Duitse hoogwaterbeschermingsprogramma en de **bijbehorende prioritering** ook in het buitenland interessant zijn. De criteria die in dit programma worden gehanteerd – voornamelijk om prioritaire projecten en directe fondsen te identificeren – lijken deels vergelijkbaar, maar ook deels verschillend van de Nederlandse benadering in het HWBP. Het lijkt erop dat de Duitse criteria meer ruimte laten voor lokale afwegingen en prioriteiten, en de prioritering voor versterkingsmaatregelen is zowel gebaseerd op gemeenschappelijke leidende criteria als op voorafgaande evaluatie en daaropvolgende aanvragen door de deelstaten. Door deze aanpak lijkt de Duitse benadering verder te gaan in de richting van regionale differentiatie wat ook een mogelijke trend voor Nederland kan zijn.

Het hoogwater van de zomer van 2021: eerste lessen en bevindingen

Door Bas Jonkman

Hoogleraar Waterbouwkunde aan de Technische Universiteit Delft



In juli 2021 werden het zuiden van Nederland en de landen om ons heen getroffen door hevige neerslag en grote overstromingen. Het betrof een extreme en uitzonderlijke gebeurtenis met grote maatschappelijke gevolgen – in ons land in Limburg. In opdracht van het Expertise Netwerk Waterveiligheid (ENW) heeft een breed consortium van kennisinstellingen, onder leiding van de TU Delft en Deltares, binnen enkele weken tijd een eerste analyse gemaakt van de beschikbare informatie (Jonkman et al., 2021). Meerdere All-Risk-onderzoekers hebben hieraan bijgedragen, aan onderwerpen zoals de waterkeringen, rivieren en schadeschatting. Omdat een overstroming effect heeft op de hele maatschappij, zijn niet alleen technische onderwerpen beschouwd, maar ook de maatschappelijke gevolgen van overstromingen, de crisisrespons en de gezondheidseffecten. In deze bijdrage zijn de eerste bevindingen en lessen en aandachtspunten voor de toekomst samengevat.

Bevindingen: schade groter dan bij overstromingen 1993 en 1995

De gemeten hoeveelheden neerslag en rivierafvoeren waren nooit eerder

zo groot, zeker niet in de zomer. Er wordt geschat dat een gebeurtenis zoals in juli 2021 slechts eens per 100 tot 1.000 jaar voorkomt. De piekafvoer op de Maas bij Eijsden ($3.280 \text{ m}^3/\text{s}$) en een aantal zijrivieren is de hoogste afvoer ooit gemeten. Wel waren verder benedenstrooms – voorbij Roermond – de waterstanden lager dan tijdens eerdere hoogwaters. Dit komt onder meer door de uitvoering van Maaswerken, maar ook door het “uitzakken” van de snelle hoogwatergolf.

In totaal zijn circa 2.500 huizen en 600 bedrijven getroffen. De geschatte totale schade door overstromingen bedroeg 350 tot 600 miljoen euro en onstond voor een groot deel in het Geuldal. De schade is daarmee groter dan die tijdens de overstromingen langs de Maas in 1993 en 1995.

Waterkeringen functioneerden goed

De primaire waterkeringen langs de Maas hebben de uitzonderlijk hoge belasting goed doorstaan. Wel zijn op enkele plekken bedreigingen opgetreden zoals piping (uitspoeling van het zand onder de dijk) en lokale hoogtetekorten. Daarom zijn op grote schaal tijdelijke maatregelen zoals zandzakken ingezet. Langs de rivier de Geul traden overstromingen het eerst op. Daar is wel gewaarschuwd, maar niet voor het hoogwater preventief geëvacueerd. In totaal werden 50.000 personen langs de Maas voor het hoogwater geëvacueerd, inclusief meerdere ziekenhuizen en zorginstellingen. Er zijn ook gegevens over gezondheidseffecten: twee derde



Bewoners evacueren uit het getroffen gebied in Limburg. Foto © Marcel van den Bergh.

van de geraadpleegde artsen rapporteerde een toename van psychische klachten. Ook was er sprake van een innamestop van drinkwater door vervuiling. In dezelfde periode leidden hevige overstromingen tot miljarden schade en honderden doden in Duitsland en België. Hier was de situatie catastrofaler dan in Nederland, onder meer door de grotere neerslaghoeveelheden en de steilere – sneller afstromende – rivieren.

Eerste lessen uit Limburg

Duidelijk is dat dit een voor Nederland een onverwachte, extreme en ongeëvenaarde gebeurtenis was. De bevindingen uit de studie kunnen benut worden voor vervolgstudies, evaluaties en het meer toekomstbestendig maken van het systeem. Hoewel deze studie een eerste verkenning betrof, zijn er op enkele gebieden al lessen en aanbevelingen te formuleren:

- **Verbeter de voorspellingen van regenval, hoogwater en de crisisbeheersing** en hun onderlinge aansluiting. Voorspellingen van regenval en afvoer wijzigden tot op het laatste moment, waardoor men niet kon anticiperen op een ernstige overstroming langs de Geul, ook niet in de waarschuwingen en crisisbeheersing.
- **Kennis van rivierhoogwaters:** herbeschouw (de kans op) het optreden van deze en andere zomerhoogwaters inclusief het effect van klimaatverandering. Zorg voor beter begrip van de combinatie van hoogwaters op de Maas en in de beken. Verwerk deze kennis in een goed samenhangend modelinstrumentarium voor neerslag, rivieren en beken, voor zowel waarschuwing als rivierbeheer. Implementeer meetstations die tijdens hoogwater blijven functioneren.
- **Gevolgen:** verzamel en analyseer de informatie van schade en schadeuitkering, om schademodeltering en kennis van beheersmaatregelen te verbeteren. Evalueer en monitor de economische en de gezondheidseffecten in en rondom de getroffen gebieden ook op langere termijn.
- **Waterveiligheid en waterkeringen:** evalueer de effecten van de reeds uitgevoerde rivierverruiming en dijkversterkingen. Analyseer hoe de keringen langs de Grensmaas en Plassenmaas het hebben gehouden onder deze extreme belasting (bv. met 'bewezen sterkte') en verwerk dit in de veiligheidsbeoordeling. Verbeter de kennis en modellen van faalmechanismen (zoals piping) door opgetreden incidenten te evalueren. Evalueer ook het functioneren van kunstwerken zoals stuwen en duikers.
- **Risicobeheersing en risicoreductie:** een belangrijke les is dat de kansen op hoogwater en de schade – zeker langs de beken – allebei groter zijn dan eerder verwacht. Evalueer voor de beken of aanpassing van de normering gewenst is, mede op basis van een kosten-batenanalyse. Beschouw ook het functioneren van het systeem voor meer extreme scenario's die nog buiten de normering vallen en dus "bovenmaatgevend"

¹Voor veel bebouwde kernen in het Zuid-Limburgse Heuvelland, zoals langs de Geul, is een beschermingsnorm van 1/25 per jaar gekozen (normeringskaart o.b.v. de Omgevingsverordening Limburg 2014). Dat is lager dan de norm voor de meeste bebouwde kernen (1/100 per jaar) langs regionale wateren elders in Limburg en de rest van Nederland.

zijn. Wat zou de neerslag die in Duitsland en België is gevallen bijvoorbeeld doen in ons land? Vooral de beken vragen aandacht: werk technische, ruimtelijke en organisatorische maatregelen uit om overstromingsrisico's te reduceren (cf. "meerlaagsveiligheid"), crisisbeheersing voor te bereiden en besluitvormers te informeren. Neem bij de uitwerking van deze maatregelen ook de combinatie met andere opgaven zoals droogte, natuur, woningbouw en klimaatadaptatie mee.

- **Governance en kennis:** evalueer de effectiviteit van de huidige governance rondom de Maas en beken (een samenspel tussen rijksoverheid, provincie, waterschap, gemeente, burgers) inclusief financieringsarrangementen. De crisis in Limburg heeft ook het belang van vakmanschap en kennis aangetoond. Als het erop aankomt kunnen we niet alleen op modellen vertrouwen. Ga na wat dit betekent voor de benodigde expertise in de betrokken beheersorganisaties en tijdens crises.
- **Implicaties voor de rest van Nederland:** deze extreme regenval in Limburg heeft experts, waterbeheerders en bewoners verrast. Ga na wat voor andere delen van Nederland het effect zou zijn van extreme buien zoals die deze zomer zijn gevallen, en of dit leidt tot aanvullende maatregelen.

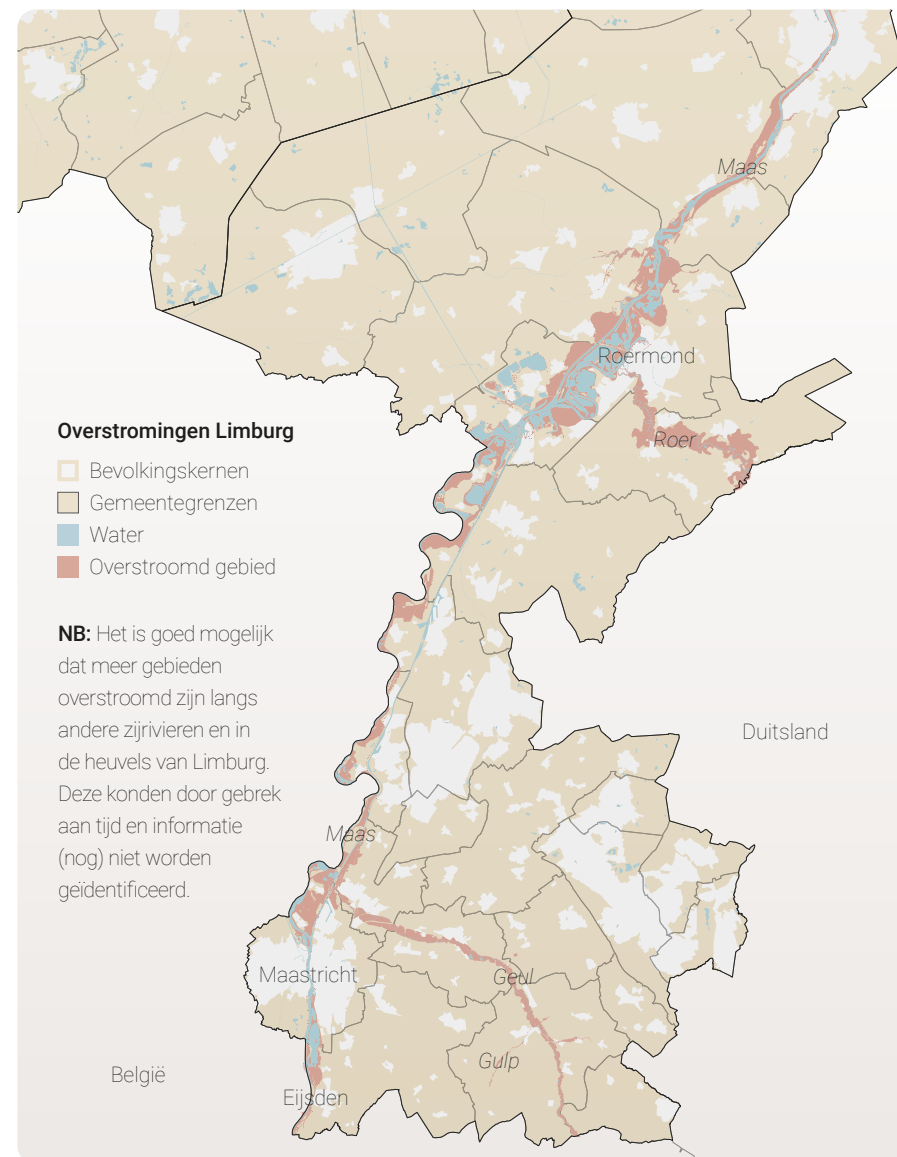
Voor de meeste van deze onderwerpen is het belangrijk om een internationaal perspectief (met Duitsland en België) te kiezen vanwege het grensoverschrijdend karakter van watersystemen in deze regio.

Betrokken partijen

Het onderzoek is uitgevoerd door een breed consortium: Deltares, TU Delft, HKV Lijn in Water, VU Amsterdam, Universiteit Utrecht, KNMI, WUR, Erasmus MC en Universiteit Twente, in opdracht van het Expertise Netwerk Waterveiligheid (ENW) en met steun van Waterschap Limburg en Rijkswaterstaat.

Meer lezen?

Task Force Fact Finding Hoogwater (2021). *Hoogwater 2021: feiten en duiding*. Doi: [10.4233/uuid:06b03772-eb00-4949-9c4d-7c1593fb094e](https://doi.org/10.4233/uuid:06b03772-eb00-4949-9c4d-7c1593fb094e)



Kaart met overstroomde gebieden tijdens de overstromingen van juli 2021 in Nederland. De kaart is gebaseerd op de fact-findingstudie en behelst de Maas en zijrivieren Geul, Gulp en Roer. Data achtergrondkaart van PDOK. Data overstroomd gebied van Slager et al. (2021). Illustratie door Martijn Vos.

Een kijk op toekomstige waterveiligheid: ideeën van All-Risk-onderzoekers

Door Matthijs Kok

Hoogleraar Waterveiligheid aan de Technische Universiteit Delft



In de afgelopen vijf jaar (vanaf 2017) heeft het onderzoeksprogramma All-Risk veel onderwerpen belicht voor de ondersteuning van dijkversterkingsprojecten in het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP). Maar wat zijn de ideeën en richtingen van de All-Risk-onderzoekers over toekomstig onderzoek? Dat was het onderwerp van een All-Risk-bijeenkomst met bijna alle onderzoekers in een van de forten van de Hollandse Waterlinie, op 4 november 2021 (**Figuur 1**). Onderstaande reflectie is de interpretatie van de auteur, geïnspireerd door de onderzoeksideeën die tijdens de bijeenkomst werden gepitcht (**Figuur 2**).

Overstromingsrisico is een kernbegrip dat gaat over de mogelijke gevolgen van een overstroming en de kans op een overstroming. De risicobenadering is echter meer dan dat. Het overstromingsrisico kan worden uitgedrukt in veel risicomaten, zoals groepsrisico (de kans dat een grote groep mensen om het leven komt) en individueel risico (de kans dat een individu overlijdt). De Nederlandse veiligheidsnormen voor overstromingen geven een basisniveau van bescherming voor elk dijksegment, waarbij de jaarlijkse kans dat iemand door een overstroming sterft niet

groter mag zijn dan 1/100.000. Per dijksegment wordt een extra beschermingsniveau toegevoegd naarmate de gevolgen van een overstroming ernstiger zijn, bijvoorbeeld door grotere verstoring van maatschappelijke en vitale infrastructuur. De meerwaarde van de risicobenadering zit daarentegen niet in alle getallen over kansen en gevolgen, maar in het genereren van inzicht in de impact en efficiëntie van maatregelen om het overstromingsrisico te beperken.

Het Nederlandse Hoogwaterbeschermingsprogramma versterkt de komende drie decennia bijna 2/3 van de primaire waterkeringen om aan de veiligheidsnormen te voldoen. In het licht van de nieuwe Omgevingswet kunnen deze versterkingsprojecten ook de landschappelijke kwaliteit verbeteren door gezamenlijke inspanningen tussen waterveiligheid en andere sectoren. De All-Risk-onderzoekers vinden dat beter inzicht nodig is in faalgebeurtenissen van waterkeringen en de mogelijkheden om de gevolgen van overstromingen te verminderen. Met die kennis wordt het gemakkelijker om in te spelen op ruimtelijke wensen en de groei van de bevolking en de economische waarde en om de voorbereiding op mogelijke overstromingen te verbeteren. All-Risk-onderzoekers stelden voor om niet alleen voordeel te halen uit het verkleinen van de kans op een overstroming, maar ook uit het op een effectieve manier verminderen van de mogelijke gevolgen. Op deze manier kunnen de waterkering en het omringende landschap worden ontworpen voor de resterende faalkans, zelfs

deze klein is. Ideeën van de All-Risk-onderzoekers zijn verder uitgewerkt in de volgende onderzoekscategorieën:

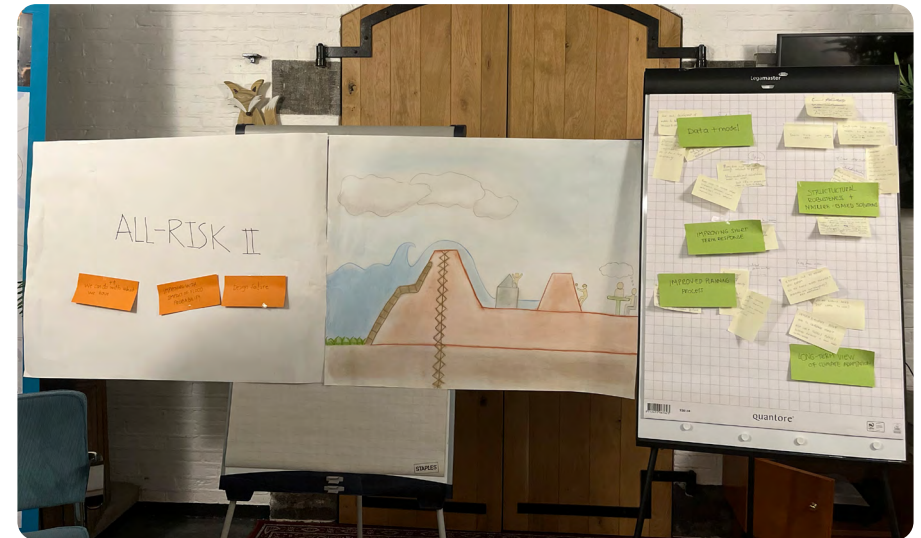
1. Geïntegreerde strategieën op lange termijn

Een belangrijke vraag is of elk laaggelegen gebied onder zeeniveau beschermd moet blijven. Op grond van historie kan men zien dat de mensheid graag op het droge leeft in plaats van in drijvende huizen. Ook is het vrijwillig wegtrekken uit deze gebieden niet aantrekkelijk. Voor de langere termijn kunnen verschillende strategieën voor verschillende klimaat-scenario's (bijvoorbeeld 1-5 m zeespiegelstijging) worden ontwikkeld met interdisciplinaire ontwerpinspanning, met meer dan alleen modellen, aangezien de fysieke realiteit veel gecompliceerder is dan een model kan

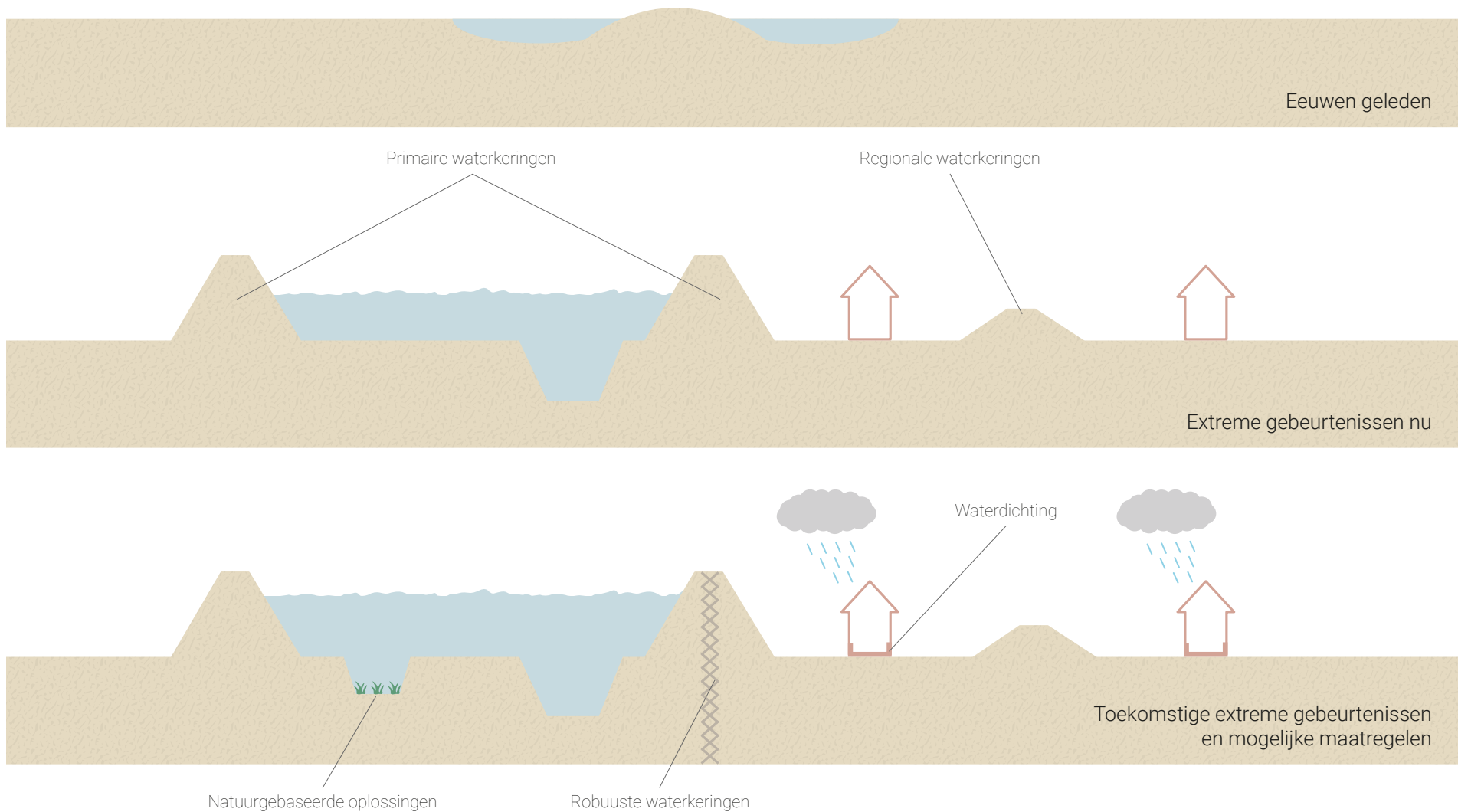
aangeven. Naast ruimtelijke ordening moeten ook technische vraagstukken worden aangepakt: is er een grens aan het verhogen van de dijken, en hoe zit het met het financiële vraagstuk? Zijn constructies als damwanden duurzamer als waterkering dan gronddijken? Hoeveel ruimte hebben dijken van aarde nodig? Er wordt wel eens gesuggereerd dat waterkeringen niet meer verhoogd kunnen worden. Een discussie daarover is zeker zinvol, als daarbij ook de gevolgen voor het riviergedrag en de toekomstige vereisten vanwege nieuwe klimaatontwikkelingen in beschouwing worden genomen (**Figuur 3**). Daarom is een integrale strategie nodig die inspeelt op de extreme gebeurtenissen, de gevolgen voor het rivierecosysteem en de bebouwde omgeving rond de voorgestelde waterkeringen.



Figuur 1: Deelnemers aan de bijeenkomst van 4 november 2021 presenteren en bediscussieren hun ideeën. Foto door Martijn Vos.



Figuur 2: Overzicht van de plaknotities die onderzoekers langs het dijkschema hebben geplaatst en die zijn gebruikt om de All-Risk-onderzoeksthema's te illustreren. Dit centrale schema toont een dijk die gedeeltelijk en geleidelijk bezwijkt terwijl het binnenland op de een of andere manier voorbereid is om de overstroming te weerstaan. Foto door Martijn Vos.



Figuur 3: Vergeleken met de rivieren vóór menselijk ingrijpen (boven), hebben de dijken gezorgd voor overstromingsveiligheid en riviernormalisatie, wat vele voordelen heeft opgeleverd. De vernauwing van de rivier heeft echter nevengevolgen zoals erosie van de rivierbedding, stijging van de waterstanden in de winter en bodemdaling (midden). De toekomst vraagt daarom om geïntegreerde strategieën die inspelen op extreme gebeurtenissen, de gevolgen voor het rivierecosysteem en de bebouwde omgeving rond de voorgestelde waterkeringen (onder). Gebaseerd op [Verhaal van de rivier](#) (Klijn et al., 2015, p. 14-15). Illustratie door Pien Buters en Martijn Vos.

2. Bouwen met de natuur

De belangrijkste uitdaging is om de bijdrage van "natuurgebaseerde oplossingen" aan de bescherming tegen overstromingen te bepalen. Onderzoek bijvoorbeeld het verhogen van de voorlanden om meer golven te dempen. Slibopvang vangt ook koolstof op, zuivert het water en ondersteunt de visserij en nog veel meer ecosysteemdiensten. Typische maatregelen om moerassen in stand te houden en uit te breiden zijn onder meer: zorgen voor sedimentaanvoer, herstel van schelpdierriffen (trapsediment) en zeegras.

3. Beperking van de gevolgen van overstromingen

Het overstromingsrisico kan worden beperkt door de gevolgen van overstromingen te verminderen. Wereldwijd hebben we de afgelopen decennia grotere economische schade en minder dodelijke slachtoffers door natuurlijke overstromingen gezien. Een verklaring hiervoor is dat de voorspellingen voor de korte termijn zijn verbeterd, maar is het genoeg? Toekomstig onderzoek kan ook gericht zijn op de kortetermijnrespons door bijvoorbeeld vroegtijdige waarschuwingssystemen voor overstromingen te verbeteren om ze effectiever te maken en kwetsbare groepen beter te bereiken.

4. Structurele robuustheid van waterkeringen

Met structurele robuustheid wordt bedoeld dat de constructie zelf (bijvoorbeeld grondconstructie met kleikern) niet volledig en plotseling bezwijkt, maar gedeeltelijk en geleidelijk. Ook de gevolgen van een overstroming kunnen verminderen als een constructie meer taai gedrag vertoont. Daarnaast leidt een beter voorspelbare dijkdoorbraak tot minder onzekerheid. Voor een beter begrip van het faalproces zijn verdere laboratorium- en veldtesten nodig. Een ander onderzoeksonderwerp is daarom het koppelen van het type overstroming of dijkdoorbraak aan veiligheidsnormen.

5. Leren van gegevens in combinatie met modellen

Vanuit gegevensoogpunt zijn er vele mogelijkheden om de kwaliteit van de beoordeling en het ontwerp van waterkeringen te verbeteren. Er zijn betere manieren om relevante ondergrondparameters zoals doorlatendheid in te schatten op basis van geologische kenmerken. Ook is de koppeling met modellen van belang, bijvoorbeeld het ontwikkelen en gebruiken van modellen om het daadwerkelijke gedrag en de prestaties van dijken beter te voorspellen. Ook kan de interpretatie van de triaxiale test worden verbeterd, omdat deze een grote onzekerheid heeft. Ten slotte kan de kalibratie van riviermodellen verbeterd worden door een groot deel van de rivier en een groot aantal omstandigheden mee te nemen, zogenaamde robuuste modelkalibratie.



Veldwerk om de nauwkeurigheid van visuele dijkspecties vast te stellen. Foto door Wouter Jan Klerks

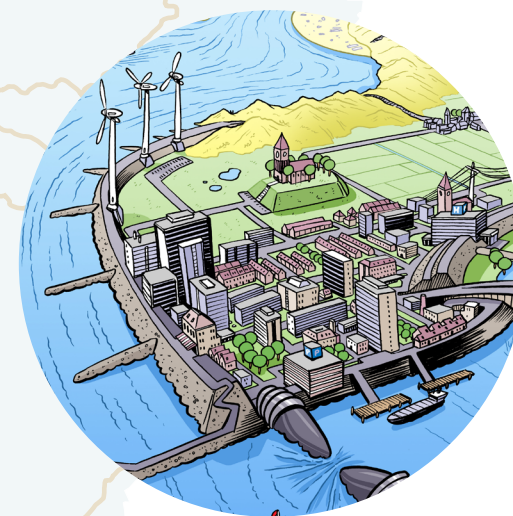
Hoofdstuk 2

Risicoraamwerk

Introductie

Door Matthijs Kok

Het project "risicoraamwerk" in het programma All-Risk (project A) gaat in op de aanpak die verantwoordelijke overheden en technische adviseurs gebruiken om het overstromingsrisico in te schatten. Voor dit project en de rest van de All-Risk-projecten is het bestaande Nederlandse probabilistische kader het uitgangspunt van onderzoek (zie [Kok et al., 2017](#)). Hierin is het overstromingsrisico een functie van zowel de overstromingskans als de gevolgen van een overstroming (economische schade en verlies van mensenlevens). Uitgangspunt is dat als de gevolgen groot zijn, meer bescherming tegen overstromingen nodig is. Een overzicht van een eerste probabilistische inschatting van het overstromingsrisico in Nederland is te zien in [VNK \(2015\)](#). Vanuit de risicobenadering zijn veiligheidsnormen voor het falen van waterkeringen afgeleid en vastgelegd in de Waterwet.



Deze normen zijn maximaal toelaatbare overstromingskansen per jaar en liggen in het bereik van 1/100 (voor gebieden met relatief kleine gevolgen) tot 1/1.000.000 (voor gebieden met zeer grote gevolgen). Het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP) heeft de taak om deze veiligheidsnormen te implementeren. All-Risk richt zich als geheel vooral op het kansgedeelte van de risicovergelijking.

Wouter Jan Klerk onderzocht in project [A1](#) de beslissingen over levenscyclusbetrouwbaarheid van waterkeringen. Zijn onderzoek richtte zich op de optimale dijkversterkingsmaatregelen, aangezien er veel maatregelen genomen kunnen worden om de dijken te versterken (damwanden, extra berm, etc.). Ook onderzocht hij de schades en inspecties van grasbekleding in een experiment met inspecteurs. Zijn bevinding is dat inspecteurs niet altijd alle beschadigde plekken zien en Wouter Jan geeft aanbevelingen om de inspecties te verbeteren.

In het project Multifunctioneel gebruik van Waterkeringen ([A2](#)) onderzocht **Richard Marijnissen** verschillende gevallen van multifunctioneel gebruik van waterkeringen. Hij ontwikkelde ook een risicoraamwerk waarbij het falen van een object (bv. een huis) in een waterkering als scenario kan worden opgenomen, met de kans dat dit scenario zich zal voordoen. Dit is een groot verschil met de huidige praktijk, waarbij in de stabiliteitsberekening met zekerheid wordt aangenomen dat huizen niet bijdragen aan de dijksterkte en verdwenen zijn. Richard onderzocht ook de principes van een dubbel dijksysteem en de gevoeligheid van een dijk-kweldersysteem voor zeespiegelstijging.

In het project Dijkbetrouwbaarheidsanalyse ([A3](#)) onderzoekt **Wim Kanning** de modellering van faalmechanismen en hoe onzekerheden in dijkprestaties kunnen worden bepaald en het best kunnen worden gereduceerd. Bijvoorbeeld door gebruik te maken van gegevens uit eerdere gebeurtenissen en experimenten. Ook ligt de focus op eigenschappen van de ondergrond en hoe dit die dijkprestaties beïnvloeden.

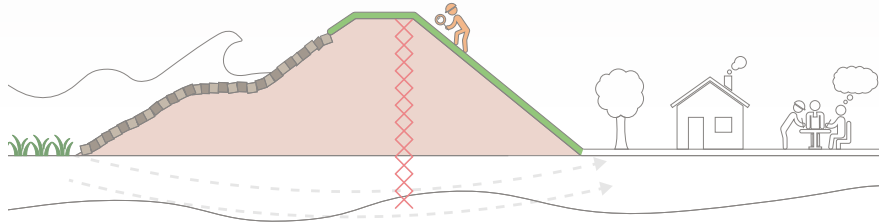
In zijn onderzoek Landschap en waterkeringen ([A4](#)) onderzoekt **Luca Iuorio** de ruimtelijke dimensie van hoogwaterbescherming. Ruimtelijke ontwikkeling is in zijn aanpak onderdeel van de risicobenadering en 'engineering' onderdeel van het ruimtelijk ontwerp. Hij ontwikkelt nieuwe alternatieven voor hoogwaterbescherming, bijvoorbeeld in Vlissingen waar golfoverslag over de dijk een integraal onderdeel is van het ontwerp van het stedelijk landschap.

We geven hier twee aanbevelingen voor de praktijk. Ten eerste is het belangrijk om de veiligheidsbijdrage van alle soorten maatregelen te optimaliseren. In een praktijkstudie is aangetoond dat de kosten voor het versterken van de dijk met 50% kunnen worden verlaagd ten opzichte van de huidige praktijk. De tweede aanbeveling is om het algemene risicoraamwerk voor multifunctionele dijken toe te passen. Het toepassen van dit kader leidt tot beoordelingen die veel geloofwaardiger zijn dan de methode die nu wordt toegepast.

Projectsamenvatting

A1 - Risicogestuurd assetmanagement

Inspecties, onderhoud en versterking van dijken bij de nieuwe waterveiligheidsnormen



Uitkomst

Dit project heeft nieuwe methoden opgeleverd voor het ondersteunen van beslissingen over de levenscyclusbetrouwbaarheid van dijksystemen. Het op systeemniveau optimaliseren van dijkversterkingen leidt tot significant lagere kosten. Het reduceren van onzekerheid door monitoren en proefbelasten leidt tot lagere versterkingskosten, en lagere risicokosten, zowel op korte als lange termijn. Het is ook aangetoond dat imperfecties in inspecties en onderhoud van waterkeringen leiden tot een faalkanstoename. Deze bijdrage wordt tot op heden niet meegenomen, en dit onderzoek laat zien hoe belangrijk het is om inspecties en onderhoud goed mee te nemen in inschattingen van de faalkans.

Door Wouter Jan Klerk

Technische Universiteit Delft



Project start: 09/2017

Project einde: 09/2021

Promotoren

Dr. ir. W. Kanning

Technische Universiteit Delft

Prof. dr. ir. A.R.M. Wolfert

Technische Universiteit Delft

Prof. dr. ir. M. Kok

Technische Universiteit Delft



Figuur 1: Veldproef voor het bepalen van de nauwkeurigheid van visuele dijkinspecties bij Tiel. Foto door Wouter Jan Klerk.

Motivatatie en uitdagingen

Het assetmanagement van waterkeringen in Nederland (zie **Figuur 2**) bouwt voort op eeuwen aan ervaring. Er zijn grote stappen gezet in het beter inschatten van de veiligheid van waterkeringen op basis van faalkansen en het begrip van faalmechanismen is sterk verbeterd. Als onderzoeker en adviseur bij Deltares, zag ik dat voor dit thema veel te winnen is in de vertaling van kennis naar beslissingen. In dit project heb ik drie thema's beschouwd, ik ben ervan overtuigd dat die ons assetmanagement in de praktijk naar een hoger niveau kunnen tillen. Door dijkversterkingen op systeemniveau te optimaliseren kunnen dijkversterkingsprojecten veel efficiënter en effectiever worden. Het reduceren van grote onzekerheden in de sterkte met proefbelastingen en waterspanningsmetingen leidt tot kostenefficiëntere dijkontwerpen. En het in beeld brengen van de nauwkeurigheid van inspecties en vertalen naar faalkansen verbetert niet alleen de faalkansschattingen, maar ook de keuzes die we daarop baseren.

Onderzoeksdoel

De uitdaging is om methoden te ontwikkelen waarmee de missing links tussen dijkversterking, onderhoud, monitoring en inspectie op verschillende tijd- en ruimteschalen kunnen worden ingevuld. Daarmee kan bijvoorbeeld de vraag beantwoord hoe versterking met een diepwand in één dijkvak (**Figuur 2, foto linksonder**) helpt bij het voldoen aan de normen voor een dijktraject in de komende decennia, of hoe vaker inspecteren helpt met het blijvend voldoen aan de veiligheidseisen.

Innovatieve componenten

In dit onderzoek wordt gebruik gemaakt van technieken voor systeemoptimalisatie. Dit is bijvoorbeeld toegepast op een HWBP-project, waar op basis van een optimalisatie van verschillende typen

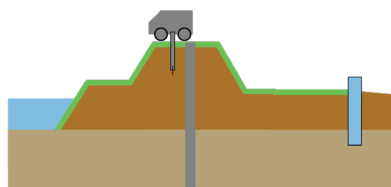


Figuur 2: Voorbeeld van activiteiten voor asset management van dijken: foto 1 en 4 versterking, 2 en 3 inspectie. Foto's door respectievelijk [HWBP \(2018, p.103\)](#) / Pascal Ogink, Hoogwaterbeschermingsprogramma, Wouter Jan Klerk en Mark van der Krogt.

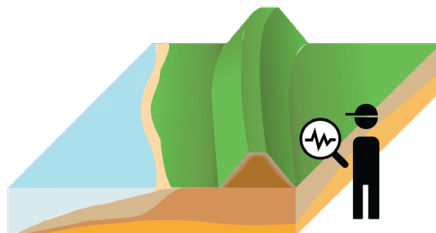
versterkingsmaatregelen een scope voor het project is bepaald (**Figuur 3.1 en 3.2**). Hierbij is op een optimale wijze de trajecteis vertaald naar kosteneffectieve versterkingsmaatregelen op dijkvakniveau.

Beslisbomen en Bayesiaanse beslisanalyses (**Figuur 3.3**) worden gebruikt om monitoringuitkomsten te vertalen in onzekerheidsreductie van faalkansen. Echter, de nauwkeurigheid (detectiekans) van inspecties is onduidelijk en om deze te bepalen is een veldproef uitgevoerd (**Figuur 3.4**).

1) Betrouwbaarheid dijktraject

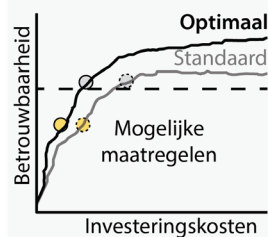


Afwegen van versterkingsmaatregelen en
onzekerheidsreductie

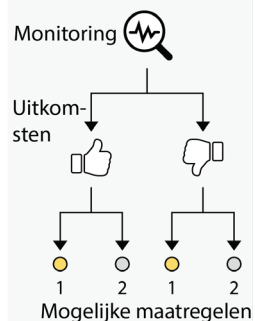


Inspecties, onderhoud en
versterking van dijktrajecten

2) Optimalisatie



3) Beslisbomen



4) Veldproef



Nauwkeurigheid en
consistentie van visuele
inspecties

Figuur 3: Het onderzoek richt zich op het relateren van beslissingen en maatregelen op dijkvak-niveau aan de veiligheid van een dijktraject. Figuur 3.1 is gebaseerd op schema's van Wouter Jan Klerk en overzicht dijktraject gemaakt door Richard Marijnissen.

De uitkomsten hiervan zijn gebruikt om de impact van schade en imperfecte inspecties op de faalkans te onderbouwen. Hiervoor is een degradatiemodel gemaakt op basis van oude inspectieresultaten, zodat met een dynamisch Bayesiaans Netwerk de levensduurkosten van verschillende strategieën voor inspectie en onderhoud kunnen worden bepaald.

Relevant voor wie en waar?

Binnen Nederland is dit onderzoek van belang voor waterschappen, Rijkswaterstaat en het HWBP. Internationaal is het nuttig voor iedereen met een interesse in risico- of prestatiegestuurd assetmanagement van waterkeringen en dat wil gebruiken voor het optimaal plannen van projecten en optimaliseren van inspecties en onderhoud.

Voortgang en toepassing

Het is aangetoond dat het optimaliseren van dijkversterkingen op systeemniveau tot circa 40% lagere versterkingskosten kan leiden. Kostenbesparingen door proefbelasten en dijkmonitoring liggen in de orde van 25% doordat kleinere onzekerheden leiden tot efficiëntere dijkontwerpen.

Naast de investeringskosten kunnen ook de kosten van overstromingsrisico's worden verkleind. Als schade aan grasbekledingen wordt meegenomen in de faalkansen, kunnen deze een orde groter uitvallen dan de faalkansen die zijn ingeschat bij de beoordeling. Door dit mee te nemen kan de effectiviteit van bijvoorbeeld frequentere inspecties goed worden gewaardeerd, wat leidt tot effectiever en efficiënter assetmanagement.

Verdere verbetering is mogelijk door het inwinnen van inspectiedata te verbeteren, zodat degradatie beter kan worden ingeschat. Daarnaast is het van belang om nader te onderzoeken wat de precieze invloed is van schade op de faalkans van bekledingen.

Aanbevelingen voor de praktijk

- Beschouw dijkversterkingen op systeemniveau, dat leidt tot kosten-efficiëntere en transparantere keuzes.
- Zorg dat onzekerheidsreductie zowel bij dijkversterkingen als daarbuiten goed wordt overwogen en zorg voor financiële middelen om dit te ondersteunen.
- Neem onzekerheidsreductie mee als effectief startpunt voor lange-termijnadaptatie van waterkeringen.
- Verbeter het inwinnen van inspectiedata om degradatiegedrag beter te begrijpen.
- Zorg voor een organisatie waar visuele inspecties continu gericht worden verbeterd.



Belangrijkste projectresultaten



Klerk, W.J.; Kanning, W.; Kok, M.; Wolfert, R. (2021). [Optimal planning of flood defence system reinforcements using a greedy search algorithm](#). Doi: 10.1016/j.res.2020.107344.

Klerk, W. J., Kanning, W., & Kok, M. (2018). [Time-dependent reliability in flood protection decision making in The Netherlands](#). Doi: 10.1201/9781351174664

Klerk, W.J.; Kanning, W.; Kok, M.; Bronsveld, J.; Wolfert, A.R.M. [Accuracy of visual inspection of flood defences](#). Doi: 10.1080/15732479.2021.2001543

De kaart geeft locaties van het bewuste versterkingsproject en de veldproef voor het bepalen van inspectiekwaliteit weer.

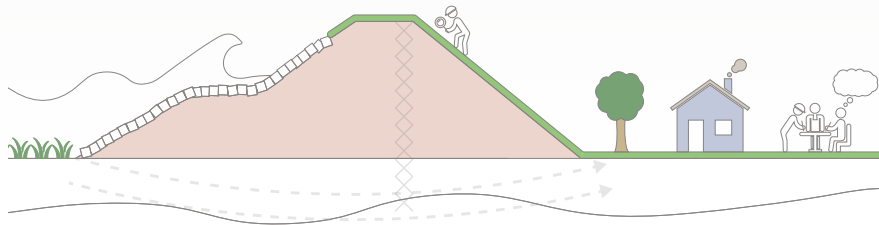


Foto's door Waterschap Rivierenland.

Projectsamenvatting

A2 - Medegebruik van waterkeringen

Beoordelingskader en richtlijnen voor implementatie



Uitkomst

Door het analyseren van drie casussen is een verbeterd raamwerk ontwikkeld voor het probabilistisch beoordelen van dijken. Hierbij is rekening gehouden met traditioneel medegebruik (bijvoorbeeld huizen) en ook met innovatievere gebruiksvormen waarbij natuur de dijk op termijn versterkt. Aan de ene kant laten we zien dat medegebruik direct probabilistisch meegenomen kan worden door middel van scenario's en (hydraulische) transmissiemodellen. Aan de andere kant bieden we voorbeelden waarin de geometrie en opbouw van de dijk zijn afgestemd op medegebruik terwijl tegelijkertijd de waterveiligheid is vergroot. Als laatste laat het onderzoek zien dat de modderige natuurlijke vooroevers van dijken aan de kust op lange termijn significant kunnen bijdragen aan de waterveiligheid en daarom in waterveiligheidsstrategieën meegenomen zouden moeten worden.

Door Richard Marijnissen

Wageningen Universiteit



Project start: 09/2017

Project einde: 09/2021

Promotoren

Dr. ir. J.M. van Loon-Steensma

Wageningen Universiteit

Prof. dr. ir. M. Kok

Technische Universiteit Delft

Prof. dr. C. Kroeze

Wageningen Universiteit



Figuur 1: Een rivierdijk in het Nederlandse landschap. Foto door Richard Marijnissen.

Motivatie en uitdagingen

Mijn bijdrage als ingenieur en onderzoeker is om de behoeften van mens en natuur met elkaar te verbinden. Waterkeringen beschermen ons tegen het water, maar zijn ook geïntegreerd met allerlei andere zaken zoals woningen en natuurgebieden. Afhankelijk van de locatie komen sommige functies vaker voor dan andere (**zie Figuur 2**). Dit medegebruik van waterkeringen heeft vaak tot gevolg dat zeer conservatieve aannames worden gedaan over de functies om een robuust ontwerp te maken dat aan de veiligheidsnorm voldoet. Alhoewel nieuwe functies extra beperkingen kunnen opleggen aan het ontwerp van keringen, kunnen sommige elementen juist bijdragen aan de veiligheid. De kwelders op de vooroever van de Waddenzee kunnen bijvoorbeeld de golven dempen voor deze bij de dijk aankomen. Ze groeien mee met de zeespiegelstijging, omdat er klei bezinkt. Daardoor zijn minder dijkversterkingen nodig. Daarnaast bieden kwelders natuurwaarden. In de nieuwe probabilistische benadering die recent is geïmplementeerd in Nederland kunnen de effecten van natuurlijke en traditionele versterkingsmaatregelen beter worden gekwantificeerd. Toch is er nog geen eenduidig beoordelingskader voor multifunctionele keringen.

Onderzoeksdoel

Het doel van het onderzoek is om meer inzicht te krijgen in het effect van het medegebruik van waterkeringen op de waterveiligheid. Dat doe ik door de nieuwe probabilistische methodiek toe- en aan te passen voor traditionele dijkconcepten (bijvoorbeeld met huizen) en nieuwe “nature-based” dijkconcepten.

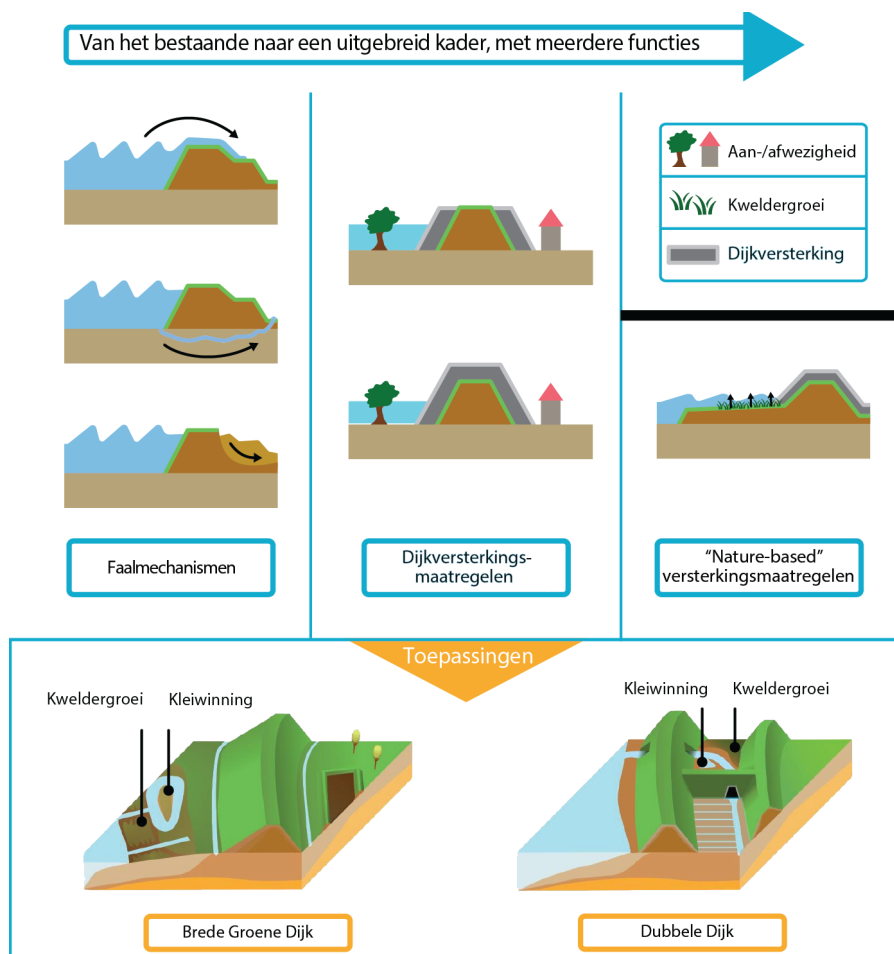
Innovatieve componenten

Mijn onderzoek integreert bestaande inzichten in waterveiligheid, risico-beoordelingen en “nature-based solutions” in een beoordelingskader. Om



Figuur 2: Een scala aan verschillende functies kan je op/bij een waterkering tegenkomen, waaronder een huis op een rivierdijk (**foto boven**), vkwelders en kleiputten aan de kust (**linksonder**) tot meer ongebruikelijke objecten (**rechtsonder**). Foto's zijn respectievelijk van Flickr (door Grotevriendelijkereus, CC BY-NC-SA 2.0), waterschap Hunze en Aa's en Richard Marijnissen.

dit kader te ontwikkelen wordt gebruik gemaakt van bestaande faalkans-beoordelingsmethodes voor verschillende mechanismen (**Figuur 3, links-boven**). Ik heb de effecten van verschillende dijkversterkingsmaatregelen (bijvoorbeeld dijkverhoging of -verbreding) vergeleken voor situaties met en zonder bomen en huizen (**Figuur 3, midden boven**). Ik heb het beoordelingskader uitgebreid om de effecten van kwelders op de dijkversterkings-opgave bij zeespiegelstijging te kwantificeren (**Figuur 3, rechtsboven**).



Figuur 3: Onderzoeksc componenten voor het bepalen van een beoordelingskader met medegebruik binnen de nieuwe overstromingsrisicobenadering. Gebaseerd op schema's van Richard Marijnissen.

Ik pas deze concepten van deze kaders toe op twee additionele casussen (**Figuur 3, schema's onder**): de Brede Groene Dijk, en de Dubbele Dijk. Hoe zijn de dijkontwerpen aangepast voor de aanwezigheid van andere functies zoals kleiwinning en kwelderontwikkeling? Hoe kunnen deze functies de dijk versterken en welke risico's kleven aan deze functies? In de laatste stap zullen de nieuwe inzichten over risico's en toepassingen verwerkt worden in het beoordelingskader. Hiermee kan ik extra aanbevelingen geven over het effectief implementeren van multifunctionele en "nature-based" concepten in de overstromingsrisiconormen.

Relevant voor wie en waar?

De resultaten zijn te gebruiken in het beleid en bij het ontwerpen, onderhouden en beoordelen van waterkeringen binnen de nieuwe overstromingsrisicobenadering. Waterschappen in het noorden van Nederland zijn gebaat bij het implementeren van de resultaten van dit onderzoek in hun dijkversterkingsprojecten.

Voortgang en toepassing

Conservatieve schattingen van faalkansen voor waterkeringen met meerdere functies leiden tot een systematische onderschatting van de betrouwbaarheid van deze dijken. Het uitgebreidere beoordelingskader verwerkt de kansen van verschillende scenario's voor dijkelementen, zoals bomen en huizen, om de betrouwbaarheid van de waterkering te bepalen. In sommige gevallen kan de faalkans van de dijk 100 keer zo klein zijn als conservatieve benaderingen doen geloven. Niet alleen voor traditionele functies, maar ook voor "nature-based" functies is een uitgebreider kader nodig. Natuurlijke vooroevers kunnen opslibben en zo de effecten van zeespiegelstijging op de keringen beperken. Verder kan het opgeslibde materiaal worden ingezet om dijken te versterken. Het herkennen van de potentie van andere functies om de veiligheid

te verbeteren is cruciaal om dijken in de toekomst slim te versterken. Voor een uitgebreidere beschrijving van het onderzoek, **klik op de onderzoeksresultaten hieronder**.

Aanbevelingen voor de praktijk

- Neem scenario's of transmissiemodellen van medegebruik waar mogelijk mee in de risicoanalyse.
- Houd er rekening mee dat de effecten van medegebruik op de waterveiligheid groter zijn naarmate de veiligheidsnorm voor de dijk hoger is.
- Overweeg sediment te managen op de kwelders voor dijken langs de kust.
- Beoordeel de waterveiligheidsvoordelen op zowel de korte als lange termijn van concepten als de Dubbele Dijk.

Belangrijkste projectresultaten



Marijnissen, R., Esselink P., Kok, M., Kroeze, C., van Loon-Steensma, J.M. (2020). [How natural processes contribute to flood protection – A sustainable adaptation scheme for a wide green dike.](#)
Doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139698

Marijnissen, R., Kok, M., Kroeze, C., & van Loon-Steensma, J. (2020). [Flood risk reduction by parallel flood defences – Case-study of a coastal multifunctional flood protection zone.](#)
Doi: 10.1016/j.coastaleng.2021.103903

Marijnissen, R., Kok, M., Kroeze, C., and van Loon-Steensma, J. (2019). [Re-evaluating safety risks of multifunctional dikes with a probabilistic risk framework.](#)
Doi: 10.5194/nhess-19-737-2019



Deze onderzoekscomponenten zijn toegepast in twee innovatieve dijkversterkingsopgaves in het noorden van Nederland en in het rivierengebied.

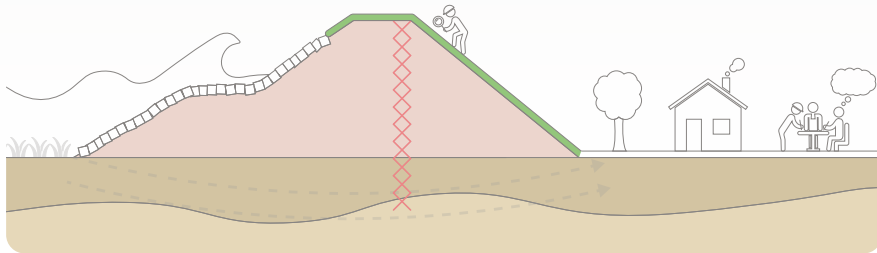


Dubbele Dijk. Foto door Waterschap Noorderzijlvest.

Projectsamenvatting

A3 - Betrouwbaarheidsanalyse dijken

Betere modellen voor de beoordeling en het ontwerp van dijksystemen



Uitkomst

Dit project ontwikkelt betere methoden voor de beoordeling van de sterkte en betrouwbaarheid van dijken. Daarbij worden gegevens uit het verleden en experimenten benut om uiteindelijk het ontwerp van waterkeringen te kunnen verbeteren. Met de verbeterde methoden uit MSc- en PhD-research richten we ons op wat er in de ondergrond zit en hoe dit de prestaties van dijken beïnvloedt. Dijken kunnen falen als de eigenschappen van de ondergrond niet goed worden onderzocht en inspectie en onderhoud van de dijk niet goed worden uitgevoerd. Al met al hebben we geconcludeerd dat het belangrijk is om verder te kijken dan modellen en een bredere kijk te krijgen op wat dijken beter laat presteren.

Door Wim Kanning

Technische Universiteit Delft



Project start: 09/2017 (Parttime)

Project einde: 09/2021



Figuur 1: Dijkdoorbraak in Breitenhagen, Duitsland. Foto door [Weichel \(2013\)](#).

Motivatie en uitdagingen

Het zien van de ravage door overstroming van New Orleans in 2005 heeft een sterke motivatie gegeven om te werken aan dijkveiligheidsvraagstukken (**Figuur 2, foto rechtsonder**). De gevolgen van de overstroming waren zeer groot en indrukwekkend (**Figuur 2, foto boven en linksonder**). Door deze gebeurtenis zag ik met eigen ogen de moeilijkheden van het voorspellen van dijkveiligheid en de noodzaak om onzekerheden in modellen te verminderen, zowel in het buitenland als in Nederland.

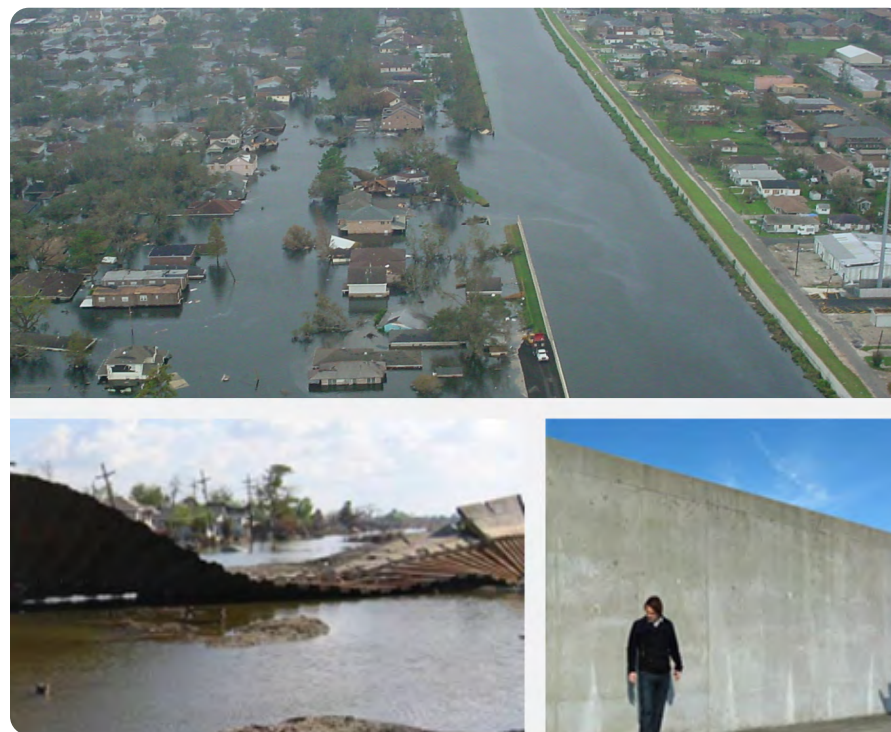
Enerzijds liet New Orleans zien dat faalmechanismen die in Nederland vooral in boeken en laboratoria voorkomen, ook in het echt op grote schaal tot overstromingen kunnen leiden. Anderzijds liet deze ramp zien dat het modelleren van deze faalgevallen veel meer inhoudt dan het toepassen van bekende rekenregels. Sterk onzekere ondergrondcondities bepalen de sterkte van de dijk. Heel kleine zwakke zones in de ondergrond waren bijvoorbeeld de oorzaak van dijkinstabiliteit. Ontwerpers en beoordelaars van dijken dienen goed rekening te houden met de onzekere factoren die de sterkte van een dijk bepalen.

Onderzoeksdoel

Het doel is het verbeteren van het modelleren van faalmechanismen van waterkeringen. Samen met MSc-studenten en PhD-onderzoekers van All-Risk en SAFElevee onderzoek ik hoe onzekerheden in dijksterkte het best meegenomen kunnen worden in beoordeling en ontwerp.

Innovatieve componenten

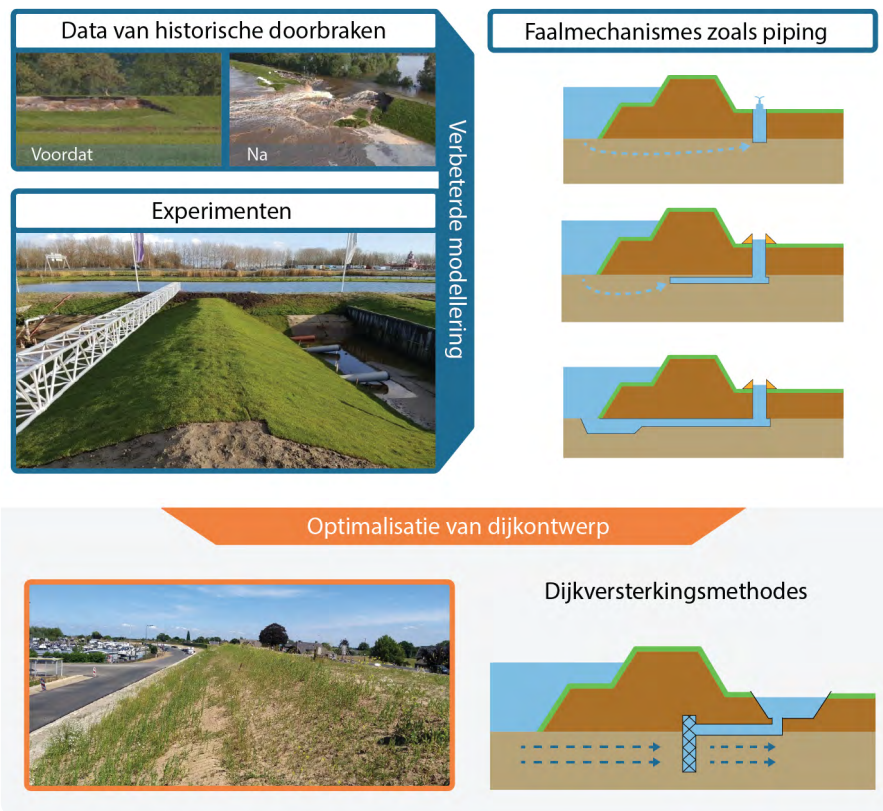
Ons onderzoek draagt bij aan het beter begrijpen van faalmechanismen om zo het ontwerp van waterkeringen te optimaliseren. Hierdoor kan er efficiënter en met beter ingepaste maatregelen worden voldaan aan de



Figuur 2: **Boven en linksonder:** Falen van een keermuur bij de 17th Street Canal in New Orleans door orkaan Katrina (foto's door U.S. Army Corps of Engineers en [IPET, 2005](#)). **Rechtsonder:** Herbouwde keermuur New Orleans in 2013 (foto door Bianca Hardeman).

nieuwe hoogwaterbeschermingsnormen. Enkele gerelateerde projecten waar ik als dagelijkse begeleider aan werk met de PhD-onderzoekers zijn:

- **De tijdsafhankelijke ontwikkeling van faalmechanismen met Joost Pol** (project [D3](#)). Hierin kijken we naar de snelheid van de progressie van het faalmechanisme piping. Dit is nodig om in te kunnen schatten hoe lang het duurt voort dat falen optreedt door piping langs de kust (kort hoogwater) en rivieren (lang hoogwater).



Figuur 3: Componenten van dit onderzoek. **boven:** de dijkdoorbraak in Breitenhagen, Duitsland (bron: [Weichel 2013](#)); **midden:** het Flood Proof Holland piping experiment (bron: [Pol, Kanning & Jonkman, 2021](#)), en **onder:** dijkversterkingen rond Kinderdijk in Zuid-Holland (bron: [TU Delft \[SAFELevee\], 2021](#)). De piping- en dijkversterkingsmethoden zijn aangepast naar [van Beek \(2015\)](#).

- **Een methode om de meest waarschijnlijk oorzaak van (oude) dijkdoorbraken te bepalen met Job Kool** (tevens onderdeel van het onderzoeksproject *SAFELevee*). Hier ontwikkelen we een gestructureerde methode op basis van verschillende mogelijke faalscenario's met data van voor en na de doorbraak, om zo de meest waarschijnlijke oorzaak te bepalen. We hebben deze methode toegepast om de meest waarschijnlijke oorzaak van de dijkdoorbraak bij Breitenhagen in Duitsland in 2013 te bepalen. De methode is generiek en dus ook toepasbaar op andere faalgevallen.
- **Optimalisatie van dijkversterkingen met Wouter Jan Klerk** (project [A1](#)). Hierin kijken we naar verschillende mogelijkheden om aan de norm te voldoen. Bijvoorbeeld door onzekerheden in ondergrond te reduceren of door het optimaal toepassen van dijkversterkingsmethoden.

Relevant voor wie en waar?

Andere onderzoekers geïnteresseerd in probabilistische analyses en modellering van faalmechanismen. Organisaties die dijkversterkingen ontwerpen en autoriteiten die de ontwerpvoorwaarden vaststellen.

Voortgang en toepassing

Voor een gedetailleerde beschrijving van de voortgang en bevindingen, **bekijk de projectresultaten op de volgende pagina**. De analyse van de dijkdoorbraak bij Breitenhagen in Duitsland (in 2013) laat zien dat de meest waarschijnlijke oorzaak een oude doorbraak is. Dit zorgde waarschijnlijk voor erosie van de deklaag voor de nieuwe dijk, met als resultaat een directe connectie tussen de rivier en de zandlaag onder de dijk. Dat leidde tot sterk toenemende waterdrukken, waardoor de dijk instabiel werd.

Door het meenemen van tijdsafhankelijke pipingprogressie in veiligheidsanalyses kan er vooral winst worden geboekt bij zeedijken, waar geen

piping tot ontwikkeling kan komen door kortdurende hoogwaterbelasting. Voor de langer durende hoogwaterbelasting op rivierdijken is er een groot tijdsverschil tussen begin van erosie en dijkdoorbraak, wat belangrijk is om te weten voor de inzetbaarheid van noodmaatregelen.

Ten slotte laat ons praktijkvoorbeeld met vijf dijksegmenten langs de Lek zien dat aanvullende monitoringsinformatie alleen waardevol is als het besluit over de dijkversterking daardoor anders kan uitpakken.

Aanbevelingen voor de praktijk

- Kijk voorbij de modellen en neem ook de historische gebeurtenissen in de dijkondergrond en andere informatiebronnen mee, zoals analyses van historische dijkdoorbraken,
- Oude dijkdoorbraken en voormalige riviermeanders zijn de meest kritische dijkvakken.
- Neem inspecties serieuzer.
- Doe meer moeite om piping te begrijpen.
- Geef casestudies een centralere plaats bij de ontwikkeling van instrumenten voor dijkbeoordeling.

Belangrijkste projectresultaten



Kanning, W., Schweckendiek, T. (2019). [Bayesian inference of piping model uncertainties based on field observations](#).
Doi: 10.3850/978-981-11-2725-0_IS4-9-cd

Jongejan, R.B., Diermanse, F., Kanning, W., Bottemad, M. (2020) [Reliability-based partial factors for flood defenses](#).
Doi: 10.1016/j.res.2019.106589

Kool, J.J., Kanning, W., Jommi, C., Jonkman S.N. (2020). [A Bayesian hindcasting method of levee failures: The Breitenhagen case](#). Doi: 10.1080/17499518.2020.1815213



Het onderzoek vindt plaats op enkele belangrijke locaties in Nederland en in het buitenland. Hier worden data van ondergrond en dijkopbouw en historische gegevens verzameld en experimenten uitgevoerd voor de optimalisatie van veiligheidsanalyses van dijken.

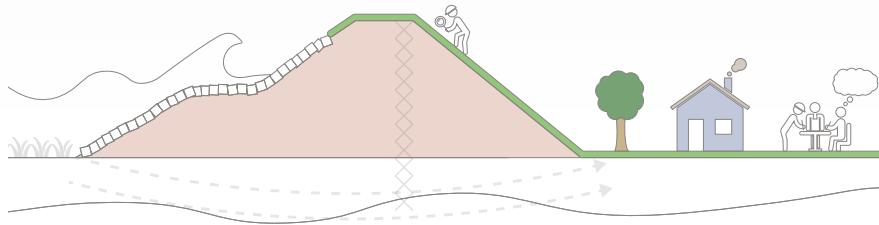
Foto's door Waterschap Rivierenland.



Projectsamenvatting

A4 - Ruimtelijke adaptatie in kustgebieden

Nieuwe mogelijke synergieën tussen infrastructuur voor overstromingsbescherming en stedelijk landschapontwerp



Uitkomst

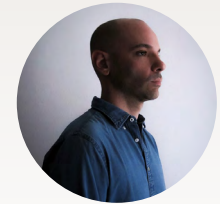
De huidige uitdagingen in verband met overstromingsrisico's als gevolg van de klimaatverandering zetten druk op het ontwerpen van stedelijke gebieden waar natuurlijke en door de mens gemaakte condities soms niet met elkaar in evenwicht zijn. Tegenwoordig wordt het overstromingsrisico meestal georganiseerd om de kans op overstromingen te verkleinen. De ontwikkelde kansbenadering van overstromingsrisicobeheer leidt niet altijd tot een goed ontworpen landschap; vooral in uiterwaarden en kustgebieden heeft de infrastructuur voor waterkeringen een aanzienlijke invloed op de stedelijke structuur. Dit project belicht nieuwe mogelijke synergieën tussen infrastructuur voor overstromingsbescherming en stedelijk landschap door middel van geïntegreerd ontwerp. Ontwerpen is dan ook een fundamentele activiteit om de ruimtelijke uitdagingen van klimaatverandering in zijn complexiteit te onderzoeken.

Door Luca Iuorio

Technische Universiteit Delft

Project start: 09/2020

Project einde: 09/2022



Bijdragen

Dr. ir. F.L. Hooimeijer

Technische Universiteit Delft

Prof. dr. ir. M. Kok

Technische Universiteit Delft



Figuur 1: Eembaai vanaf het strand bij Delfzijl, Nederlandse Waddenzee.
Foto door Luca Iuorio.

Motivatie en uitdagingen

Vooraf in de Nederlandse context groeit het besef dat design en engineering (ontwerp en techniek) twee kanten van dezelfde medaille zijn. In de laatste decennia heeft dit bewustzijn aanleiding gegeven tot verschillende experimentele programma's waarin waterveiligheidsmaatregelen steeds meer vragen om het doorbreken van de scheidingen en tussen de bubbels van stedenbouw en waterveiligheid. Ruimte maken voor water is een van de kenmerken geworden van een nieuwe generatie overstromingsbeheerplannen en strategieën die gericht zijn op een vernieuwde houding over het samenleven met water. Leven met water is echter meer gericht op de discipline van ruimtelijk ontwerp dan op het voornamelijk op techniek gebaseerde risicoparadigma. Ruimtelijke ontwikkeling is een onderdeel van de risicobenadering, en engineering is een onderdeel van het ruimtelijk ontwerp. Door beter rekening te houden met de geschiedenis, de dynamiek en overgangsaspecten van verstedelijkte gebieden, is het mogelijk om alternatieve manieren te bedenken voor klimaatadaptatie en de milieucrisis, gebruikmakend van de infrastructurele en ruimtelijke kenmerken van ontwerp.

Doel van het onderzoek

De hoofdvraag van het onderzoek is hoe de risicobenadering (een product van de kans op overstromingen en de maatschappelijke en economische gevolgen) te vertalen naar ruimtelijke aspecten. Door meer rekening te houden met de perceptie van burgers en hun beleving van steden en landschappen, ontstaan nieuwe mogelijke perspectieven om de ruimtelijke dimensies van beschermde gebieden te integreren in het waterkeringssysteem en zo het algehele risico te verminderen.

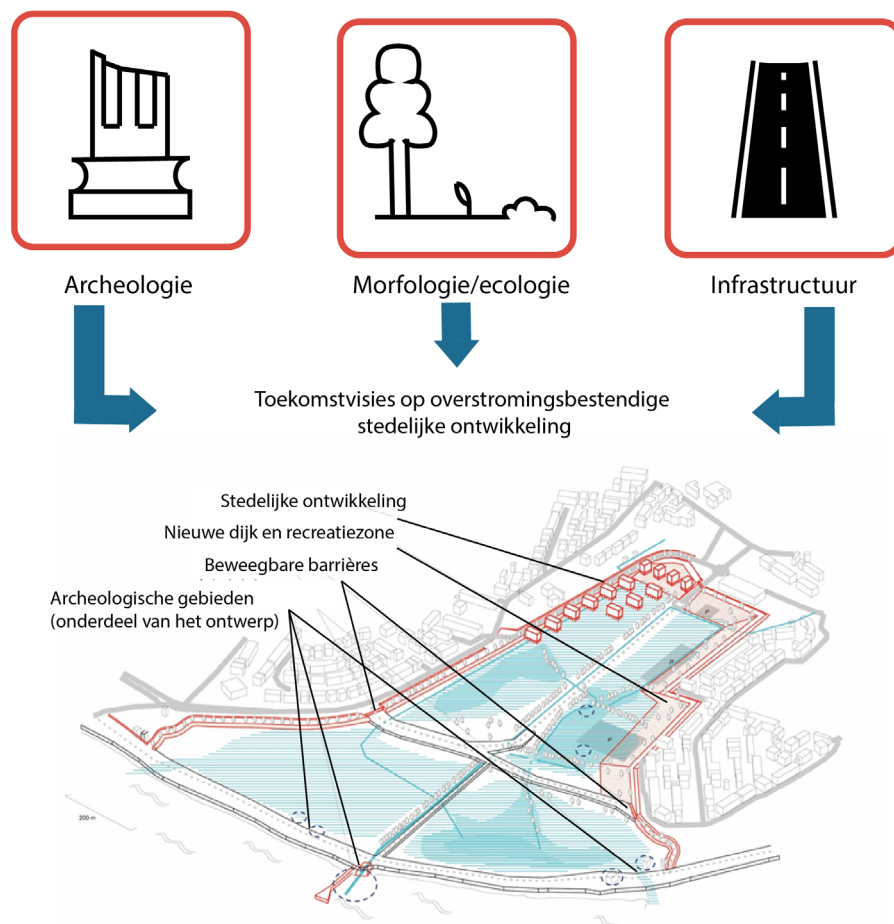


Figuur 2: Gezin zwemmend in de Waddenzee, Eemshaven, augustus 2021. Foto door Luca Iuorio.

Innovatieve componenten

Het onderzoek verkent of het mogelijk is infrastructuur voor waterkeringen te ontwikkelen binnen een ruimtelijke benadering. We erkennen dat waterkeringen fysieke objecten zijn die geïntegreerd zijn in het stedelijk landschap en die van invloed zijn op de stedelijke ontwikkeling en de manier waarop mensen omgaan met water (en watergerelateerde risico's) door waterkeringen. Dit onderzoek verkent alternatieve modellen van kustbeheer door het integreren van ruimtelijke ordening en stedelijk ontwerp. De ruimtelijke inpassing in het landschap van niet alleen de traditionele dijken, maar ook innovatieve maatregelen voor natuurgerichte oplossingen, het accepteren van wateroverslag, het implementeren van tijdelijke dijken, en verandering van landgebruik beschouwen

Integratie van historische kaarten en kaarten voor ruimtelijke ordening



Figuur 3: Schematische weergave van de innovatieve componenten. Toekomstvisievoorbeelden voor Southend-on-Sea getekend door Andrea Bortolotti en Luca Iuorio.

we hierbij als de belangrijkste maatregelen om het overstromingsrisico van de Nederlandse stedelijke kustgebieden te verminderen. Met deze verkenning komen we tot toekomstvisies om te laten zien hoe het betrekken van hele stedelijke gebieden bij het ontwerp van waterkeringen kan zorgen voor een complexer en veerkrachtiger waterbeheer op basis van ruimtelijke maatregelen.

Relevant voor wie en waar?

Dit project is relevant voor zowel waterveiligheidexperts als ruimtelijke planners. Zo gaat het onderzoek over de grote fysieke erfenis van de bebouwde omgeving aan de kust, waar veranderingen in de bouw- en planingsinfrastructuur door specialisten ook invloed kunnen hebben op het waarnemen en ervaren van steden en landschappen door burgers.

Voortgang en toepassing

Verwijzend naar de Interreg SARCC-projectlocaties Vlissingen (NL) en Southend-on-Sea (VK) (zie <https://www.interreg2seas.eu/en/SARCC>), hebben wij voorgesteld om meer golfoverslag en overstroming te accepteren en een secundaire kering te bouwen in plaats van een verhoging van de bestaande primaire waterkering. Op die manier hebben we specifieke zones aangepast om te functioneren als een opvangbassin voor overtollig water in het geval van extreme hoogwaters, terwijl het bestaande en verbeterde drainagenetwerk in het gebied aan het eind van de storm wordt gebruikt als afvoer. Met de visies voor deze stedelijke gebieden als overstroombare parken, kunnen de waterkeringen beter worden geïntegreerd in nieuwe gebiedsontwikkelingen, ze verbeteren de openbare ruimte en houden rekening met recreatieve functies. Bovendien hebben we de nieuwe stedelijke ontwikkeling binnen het gebied overstromingsbestendig ontworpen (bijv. verhoogd op palen of alternatieve functies op de begane grond, zoals parkeergarages). De resulterende ruimtelijke ingrepen helpen

een mogelijke overstroming in het jaar 2100 te weerstaan door de gevolgen te verminderen. De dijk blijft een fundamenteel onderdeel van de stad, maar vertegenwoordigt slechts een element van het complexe en bredere territoriale ontwerp. Daarentegen zijn de bergingsgebieden – waar water dat eenmaal over de dijk loopt nu kan worden opgevangen – een actief onderdeel van de stedelijke omgeving; de seizoensgebonden gecontroleerde overstromingen veranderen de configuratie van de open ruimtes en passen het stadsweefsel aan de stormgebeurtenissen aan. Voor een gedetailleerde beschrijving van de bevindingen, zie de **projectresultaten hieronder**.

Aanbevelingen voor de praktijk

- Houd ook rekening met de ruimtelijke vorm van de cultuurlandschappen en de technische vormgeving van verstedelijkte gebieden bij het ontwerp van waterkeringen.
- Probeer innovaties op het gebied van waterkeringen te ontwikkelen door de kansen en gevolgen van overstromingsrisico's te verkleinen.

Belangrijkste projectresultaten



Iuorio, L. & Bortolotti, A. (2021). [Integrated coastal flood design: changing paradigm in flood risk management](#)
Doi: 10.24404/616051311d74bb0008d549ca



Het onderzoek omvat proeflocaties in Nederland, maar ook in het VK en Italië. Let op: De ontwerpen voor Vliissingen en Southend-on-Sea zijn ontwikkeld in het kader van het Interreg SARCC Project.

Dubbele Dijk. Foto door Waterschap Noorderzijlvest.





Storyline

Een breed groen perspectief op dijken

Hoe de kwelders en kleiput een handje helpen in de strijd tegen zeespiegelstijging

Door Richard Marijnissen

Wageningen Universiteit

Wij Nederlanders zijn trots op onze massieve dijken en deltawerken die de zee al voor decennia buiten de deur hebben gehouden. Als een waterbouwer, ging ik er natuurlijk vanuit dat waterkeringen de sleutel blijven om ons aan te passen aan klimaatverandering. In mijn promotieonderzoek aan de universiteit Wageningen, realiseerde ik me dat de vooroeveren van de waterkeringen net zo goed kunnen meehelpen om ons te beschermen tegen zeespiegelstijging. Dit is het geval bij de “Brede Groene Dijk”, een pilot om dijken te versterken met gebiedseigen klei uit de naastgelegen kwelders. Dit verhaal gaat over mijn onderzoek naar het veiligheidsconcept van de Brede Groene Dijk, en de lessen uit het project die kunnen helpen andere gebieden te wapenen tegen zeespiegelstijging.

De uitdaging

“Hoe kunnen waterveiligheid en natuur gecombineerd worden in één dijkontwerp?”

Dijkversterkingen zijn van levensbelang in Nederland, waar de primaire keringen aan strenge normen moeten blijven voldoen ondanks een veranderd klimaat. De kustgebieden naast deze dijken moeten echter ook beschermd worden voor hun grote ecologische waarde. Twee verschillende functies, natuur en waterveiligheid, concurreren voor ruimte maar worden beide bedreigd door zeespiegelstijging. Het Brede Groene Dijk project

Omslagfoto: de Brede Groene Dijk. Foto door Waterschap Hunze en Aa's.

heeft als doel deze twee functies met elkaar te verbinden. Vandaar dat dit project onderdeel is van mijn onderzoek.

DE DIJKEN AAN DE NOORDOOSTKUST

De Eems-Dollard

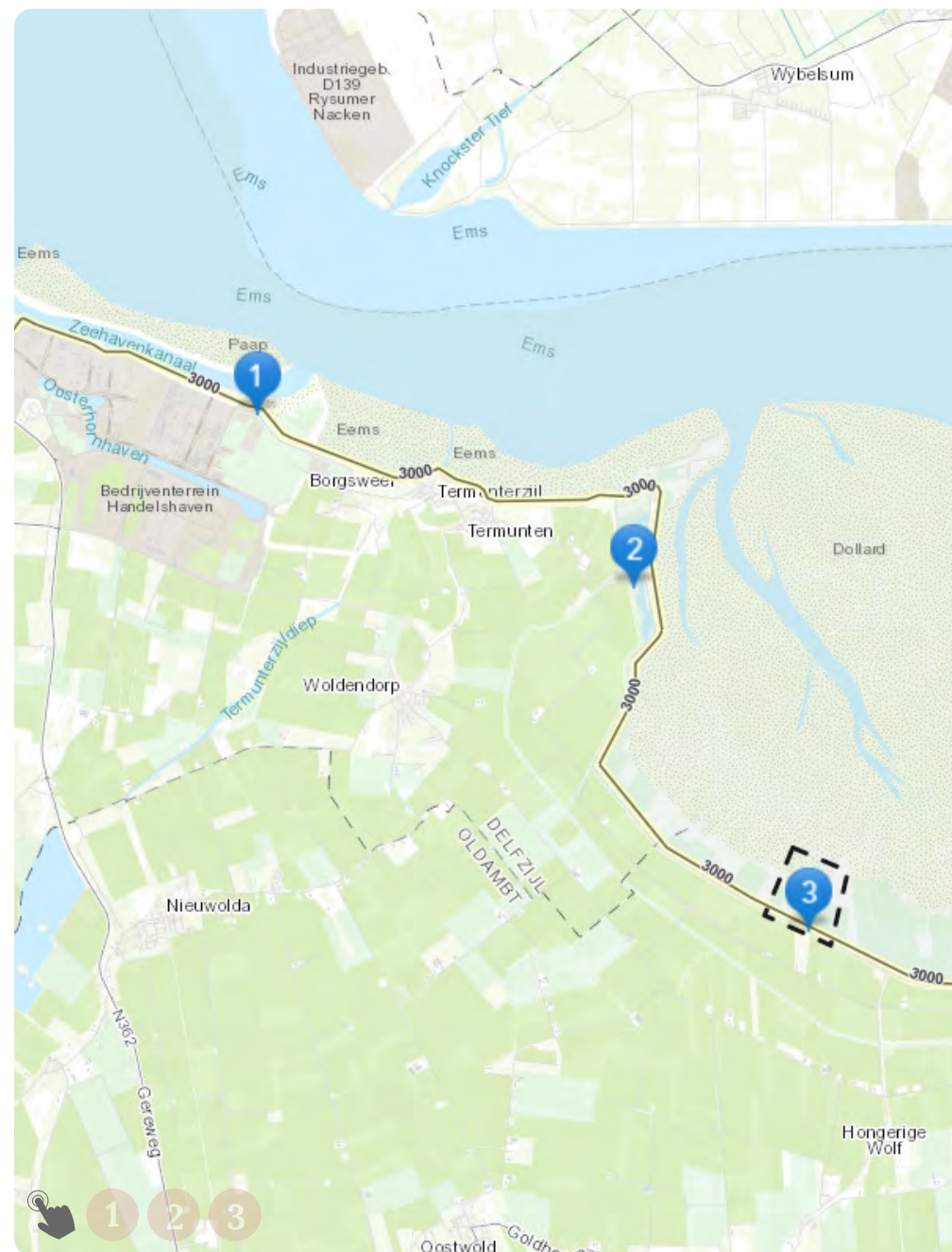
In het noordoostelijkste puntje van Nederland stroomt de Eems uit in de Waddenzee. In het Eems-estuarium ligt de 100 vierkante kilometer grote Dollard. Hier vind je aan de kust zouttolerante plantengemeenschappen, genaamd kwelders, die dienen als voedsel en een rustplaats voor vele trekvogels. Dit ecosysteem wordt bedreigd door een groeiende hoeveelheid fijn sediment in het water die het zonlicht tegenhoudt. Eeuwen van inpolderen, baggeren en natuurlijke erosieprocessen hebben bijgedragen aan de vertroebeling van het estuarium.

Twee werelden komen samen

Geïnspireerd door de brede grasdijken in Duitsland heeft Waterschap Hunze en Aa's een pilot gestart om natuur en waterveiligheid te combineren. De pilot "Brede Groene Dijk" is een brede dijk met een flauw buitentalud dat vloeiend opgaat in de kwelder zonder gebruik te maken van stenen of asfalt in de bekleding. De dijk zal in de loop van de tijd versterkt worden met het overvloedige sediment in de Dollard. Klei wordt gewonnen uit de haven van Delfzijl (1), in polder Breebaart (2), en uit de kwelder bij de dijk zelf (3, zie de kaart rechts).

De pilot Brede Groene Dijk

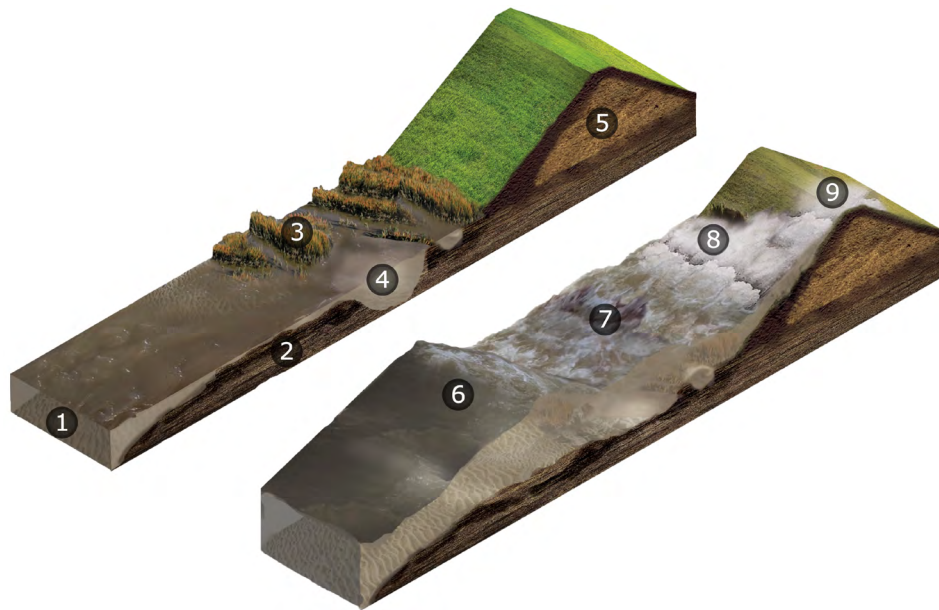
De pilot Brede Groene Dijk ging van start in 2018 met het uitgraven van de kleiput. De put is ongeveer vier hectare groot, heeft een gemiddelde diepte van anderhalf meter, en heeft een vogelbroedeiland voor de bedreigde kluut in het midden. Vandaar dat deze put de "klutenplas" wordt



Kaartgegevens van Esri, HERE, Garmin, NOAA FAO, USGS, NGA. Data overstromingskaart uit National Georegister.



De Brede Groene Dijk gezien van boven. Foto door waterschap Hunze en Aa's.



De meest essentiële processen in de kwelder, de kleiput en de dijk. Zie de tekst voor betekenis van de nummers. Illustratie door Richard Marijnissen.

genoemd. De gewonnen klei uit de klutenplas is meer dan een jaar gelden in ontwateringsvakken naast de dijk gelegd om te rijpen tot klei.

De onderzoeksvraag

Voor mijn onderzoek heb ik ingeschat hoeveel klei in de klutenplas en kwelder aanslibt en hoeveel klei er nodig is om de dijk te versterken in verschillende zeespiegelstijgingsscenario's. De belangrijkste vraag is:

“Is het versterken van de dijk tegen zeespiegelstijging met aangeslibde klei uit de kwelder en klutenplas haalbaar?”

De kwelder, de kleiput en de dijk

Het samenbrengen van alle gecompliceerde processen in een werkbaar model was het lastigste onderdeel van het onderzoek. Ik heb me op negen essentiële processen gericht, in plaats van te proberen alles te modelleren.

Kalm weer

Elk tij komt sediment zwevend in het zeewater van de Dollard aan bij de vooroever (1). Het hoogtij is soms hoog genoeg om de kwelder te bereiken en sediment af te zetten (2). Door het aanslibben van slib en modder vormt zich een intergetijdeplaat waar zouttolerante planten op kunnen groeien (3). Een put houdt extra water met slib vast waardoor meer slib in de put kan bezinken (4). Over de jaren vormt zich in de put een nieuwe kleilaag die uitgegraven kan worden om de dijk mee te versterken (5).

Stormcondities

Alleen bij hoge waterstanden tijdens stormen (hoogstens twaalf keer per jaar) kunnen golven de dijk bereiken (6). De hoge golven verliezen doorgaans al veel van hun energie als ze breken over het intergetijdegebied (7) maar heel sterke golven kunnen nog de dijk beschadigen (8) of zelfs over dijk slaan (9).

WAT VOORSPELLEN DE MODELLEN?

De kleiput

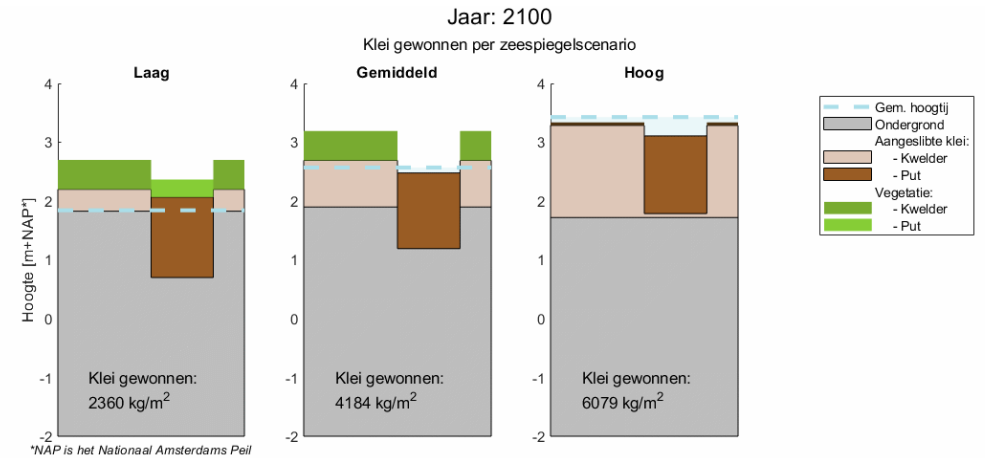
De put vult zich netjes op en zal vol zijn over ongeveer 22 jaar (rond het jaar 2040). Als de zeespiegelstijging versnelt vult de put zich vaker met water en kan deze dus vaker slib opvangen. Daardoor zal de put zich steeds sneller opvullen in het hoge zeespiegelstijgingsscenario. Mijn modelresultaten laten ook zien dat 75% van de put al binnen de 10 jaar na uitgraven weer gevuld is. Een diepe put vangt slibrijk water efficiënter in dan een ondiepe put. Naarmate de put ondieper wordt, verloopt het opvullen van de put dus steeds langzamer.

De dijk in 2100

Zolang de zeespiegelstijging niet te veel versnelt kunnen de kwelder en de kleiput genoeg sediment invangen om niet te verdrinken. Echter, in het hoogste zeespiegelstijgingsscenario (H) stijgt de zeespiegel zo snel dat de kwelder niet genoeg sediment kan invangen om mee te groeien. Uiteindelijk verdrinkt de kwelder. Golven breken boven de ondiepe kwelder, maar naarmate de diepte ten opzichte van het zeeniveau toeneemt kunnen steeds grotere golven de dijk bereiken. Als gevolg daarvan moet de dijk steeds grotere golven weestaan. Het voorkomen dat de kwelder op den duur verdrinkt is daarom noodzakelijk om grote dijkversterkingen in de toekomst te voorkomen.

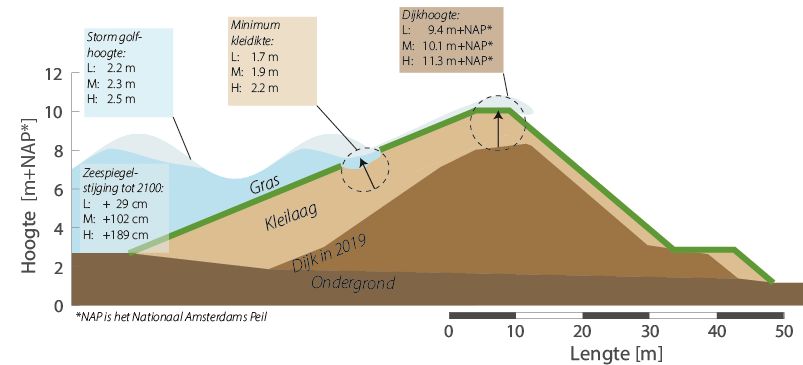
AMBITIES IN EVENWICHT

Ook al zal de kleiput in de kwelder zich weer vullen met klei, de klei zal niet zo sterk zijn geconsolideerd als klei die op natuurlijke wijze in de kwelders over de eeuwen is afgezet. Daardoor zal de hoeveelheid klei die opnieuw uit een opgepulde put gewonnen kan worden altijd lager uitvallen.



Voorspelde opvulling van de kleiput tot 2100. Illustratie door Richard Marijnissen.

2019



De dijk in 2100. Illustratie door Richard Marijnissen.

Dit is hoe de Brede Groene Dijk er volgens de modellen in 2100 uit zou moeten zien in een laag (L), gemiddeld (M) en hoog (H) zeespiegelstijgings-scenario

(De dijk in dit plaatje is voor het hoge scenario.)

"Moet nieuwe klei elders in de kwelder gewonnen worden of is het de moeite waard klei uit de put te blijven winnen en de overgebleven kwelder met rust te laten?"

In het lage zeespiegelstijgingsscenario is het opnieuw ontgraven van de put niet effectief om klei te winnen. Deze vult zich niet snel genoeg op om meer dan drie keer per eeuw ontgraven te worden, wat relatief weinig klei oplevert. In hoge zeespiegelstijgingsscenario's is het veel efficiënter doordat de versnelde zeespiegelstijging de put sneller laat opvullen. Dit zorgt ervoor dat er veel vaker ontgraven kan worden, maar de keerzijde is dat meer klei voor dijkversterking nodig zal zijn.

Een evenwicht moet gevonden worden met de beoogde natuurlijke waarden. Voor de optimale invang van sediment zijn diepe putten die vaak ontgraven worden nodig, maar om jonge kweldernatuur te laten ontstaan zijn ondiepe putten die zelden worden ontgraven juist wenselijk.

GELEERDE LESSEN

Het versterken van waterkeringen tegen de zeespiegelstijging om de veiligheidsnormen in de toekomst te halen is een van de grootste uitdagingen deze eeuw. Dijken zijn en blijven een integraal onderdeel, maar een breed groen perspectief helpt om deze uitdaging effectiever aan te pakken. In feite moeten we de ingenieurs van de natuur herkennen en aan het werk zetten, bijvoorbeeld de kwelders in de Dollard, om de kustverdediging op orde te houden.

De pilot Brede Groene Dijk is een goed voorbeeld van een integrale oplossing. Het proces van opslibbing in de putten helpt zowel in het helderder maken van het water in de Dollard, als het leveren van bouw materiaal voor toekomstige dijkversterkingen. Toch blijven er uitdagingen om de natuurwaarden in evenwicht te houden met dijkversterkingen.

Hoe verder?

Mijn promotieonderzoek is nog maar het topje van de ijsberg van alle onderzoeken die binnen de pilot Brede Groene Dijk worden verricht. Andere vragen waaraan gewerkt wordt zijn:

- Hoeveel klei is *precies* nodig voor de dijk, rekening houdend met alles, van meerdere stormen tot koeien op de dijk?
- Hoeveel klei slibt echt op in de klutenplas?
- Wat is er nodig om het sediment uit de Dollard geschikt te maken als klei voor dijkversterkingen?
- en nog veel meer!

Alhoewel veel vragen open blijven, helpen de inzichten uit mijn onderzoek om de Brede Groene Dijk straks echt te implementeren op grotere schaal, in de Dollard en daarbuiten.

Meer lezen?

Scan de QR code of klik erop om de storyline online te bekijken.



Dit verhaal is gebaseerd op de volgende Engelstalige publicaties:

- Marijnissen, R., Kok, M., Kroeze, C., & van Loon-Steensma, J. (2020). The Sensitivity of a Dike-Marsh System to Sea-Level Rise—A Model-Based Exploration. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(1), 42. Doi: [10.3390/jmse8010042](https://doi.org/10.3390/jmse8010042)
- Marijnissen, R., Esselink, P., Kok, M., Kroeze, C., van Loon-Steensma, J.M. (2020). How natural processes contribute to flood protection – A sustainable adaptation scheme for a wide green dike. *Science of The Total Environment* 739, 139698. Doi: [10.1016/j.scitotenv.2020.139698](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139698)

Dankwoord

Dit werk maakt deel uit van het Perspectief-programma All-Risk met projectnummer P15-21, dat wordt gefinancierd door NWO-domein Toegepaste en Technische Wetenschappen. Ik bedank Erik Jolink en Cora Kuiper van Waterschap Hunze & Aa's, collega PhD's aan de Universiteit Wageningen, en Juliette Cortes van het All-Risk editorial team voor hun inbreng in deze verhaallijn.



Storyline

Proefbelasten en monitoren als optimalisatiekansen voor dijkversterkingen

Door Mark van der Krogt en Wouter Jan Klerk
Technische Universiteit Delft

Inschattingen van de faalkansen van dijken worden door veel verschillende onzekerheden beïnvloed. Onzekerheden over bijvoorbeeld de sterkte van de ondergrond of de respons van de waterspanningen bij hoogwater, leiden niet zelden tot dijkversterkingen met grote stabiliteitsbermen.

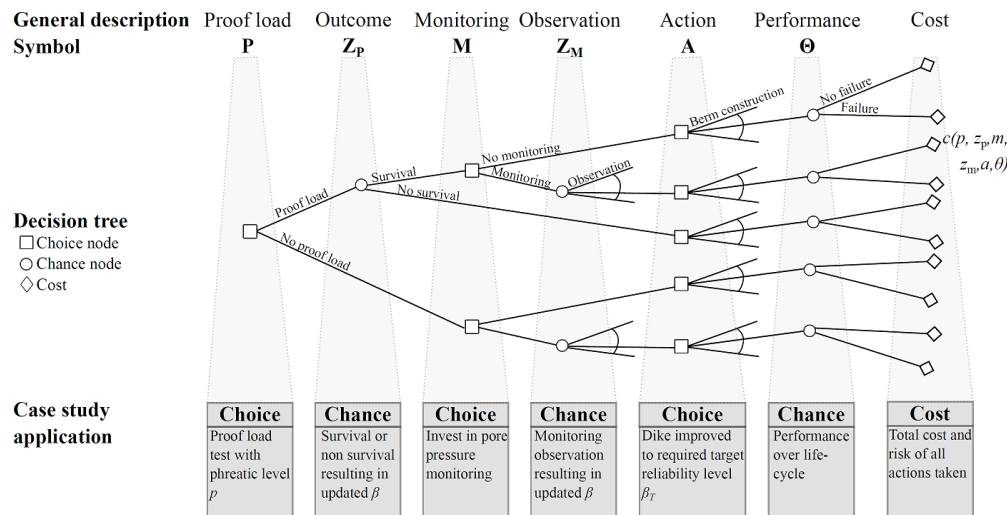
Hoewel het verkleinen van die onzekerheden altijd heel veelbelovend klinkt, is toepassing in de praktijk vaak lastig, en leidt het niet altijd tot het verwachte of gewenste resultaat. Als verhoogde waterspanningen zich bijvoorbeeld maar gedurende korte tijd voordoen, is de kans niet zo groot dat er in die tijd precies een relevant

hoogwater voorbijkomt. Ook kunnen er opeens ‘andere’ onzekerheden opduiken, die voordat begonnen werd met meten nog niet in het vizier waren, maar wel een grote invloed op de faalkans hebben. Denk bijvoorbeeld aan de waterspanningen in het dijklichaam, terwijl de meetcampagne alleen op de waterspanningen in het watervoerend pakket waren gericht. Dan heb je wel wat geleerd, maar niet de informatie die echt nodig is.

"Als je dat van tevoren had geweten..."

Afgelopen maanden hebben wij gewerkt aan een methode om vooraf te beschouwen of onzekerheidsreductie winst oplevert en welke methode tot de hoogste verwachte winst leidt.

Omslagfoto: Proefbelasting door infiltratie van de Hollandse IJsseldijk. Foto door Michiel van der Ruyt.



Figuur 1: Beslisboom voor dijkversterkingsmanagement. Bron: van der Krogt et al. (2020, Figuur 1).

Influential factors	Positive impact	Remark
Proof load level	Higher proof load, more uncertainty reduction.	The increased risk of failure does not always outweigh the potential benefits, especially if consequential damage is high.
Larger geotechnical uncertainty	Proof loading is more effective	Pore pressure monitoring might become attractive only after reducing geotechnical uncertainty. It is recommended to determine the sequence of measures based on their relative uncertainty contribution and consider other methods (e.g., site investigation).
Higher construction cost of stability berms	Uncertainty reduction methods are more attractive as the benefits are larger.	Other methods for reinforcement might be more effective.

Tabel 1: Specifieke factoren die een rol spelen bij de beslissing om waterspanningen te gaan monitoren of om te gaan voor een proefbelasting. Bron: van der Krogt et al. (2020, Tabel 4).

In de gemiddeld 5 jaar tussen ‘afkeuren’ en ‘versterken’ is er waardevolle tijd beschikbaar om extra onderzoek te doen. We beschouwen twee manieren:

1. Uitvoering van een proefbelasting door kunstmatig het freatisch vlak te verhogen.
2. Monitoring van waterspanningen om de respons van de freatische lijn bij hoogwater beter in beeld te krijgen.

In onze methode berekenen we wat de waarde is van de extra informatie die we verwachten als gevolg van proefbelasten en monitoren. De extra informatie die die oplevert, leidt tot meer inzicht, en tot verbeterde faalkansschattingen voor de macrostabiliteit. In de meeste gevallen is de onzekerheidsreductie alleen niet genoeg om aan de faalkanseis te voldoen, maar kan wel een veel kleinere berm worden aangelegd. Onder de streep leidt de extra informatie dus gemiddeld tot een lager overstromingsrisico en goedkopere dijkversterkingen.

We vergelijken de kosten en baten van verschillende strategieën met wel en niet proefbelasten en monitoren. De ‘basisstrategie’ bestaat enkel uit het aanleggen van een stabiliteitsberm. Hierbij nemen we ook de mogelijke extra kosten mee zoals het risico op schade bij een mislukte proefbelasting. De lagere kosten ten opzichte van ‘niks doen’, noemen we de Value of Information, ofwel Vol. Een positieve Vol geeft dus aan dat een strategie gemiddeld gezien een goede keuze is.

De berekeningen laten zien welke factoren en omstandigheden bepalend zijn voor de beslissing om waterspanningen te gaan monitoren of om te kiezen voor een proefbelasting. Een zeer duidelijke uitkomst is dat het heel belangrijk is om de onzekerheidsreductie in te steken op de onzekerheden die het meest bepalend zijn voor de faalkans. Een probabilistische

analyse geeft de belangrijkste aanknopingspunten om te bepalen welke dat zijn.

"richt het onderzoek op de onzekerheden die het meest bepalend zijn voor de faalkans"

Andere specifieke factoren die een rol spelen bij de beslissing om waterspanningen te gaan monitoren of een proefbelasting uit te voeren staan in Tabel 1.

De resultaten laten zien dat het van essentieel belang is om zorgvuldig na te gaan hoe en welke onzekerheden kunnen worden verminderd om tot efficiënt beheer van waterkeringen te komen. En voor iedere dijk kan dat weer net wat anders liggen.

Meer lezen?

Scan de QR code of klik erop om de storyline online te bekijken.



Ben je benieuwd welke factoren en omstandigheden nog meer bepalend zijn voor de beslissing om waterspanningen te gaan monitoren of om te gaan proefbelasten? Lees het zelf in ons artikel:

van der Krogt, M.G., Klerk, W.J., Kanning, W., Schweckendik, T., Kok, M. (2020). Value of information of combinations of proof loading and pore pressure monitoring for flood defences. *Structure and Infrastructure Engineering*. Doi: [10.1080/15732479.2020.1857794](https://doi.org/10.1080/15732479.2020.1857794)

Over de auteurs

De auteurs zijn promovendus aan de TU Delft en onderzoeker bij Deltares. Dank aan Wim Kanning, Timo Schweckendiek en Matthijs Kok, voor de hulp bij de totstandkoming van het onderzoek en het artikel.

Reflectie

Dubbele dijken: dubbel beschermd en dubbel verantwoordelijk?

Webinar team

Moderator



Marleen van Rijswijk
Universiteit Utrecht

Introductie



Kees de Jong
Noorderzijvest

Sprekers



Richard Marijnissen
Wageningen Universiteit

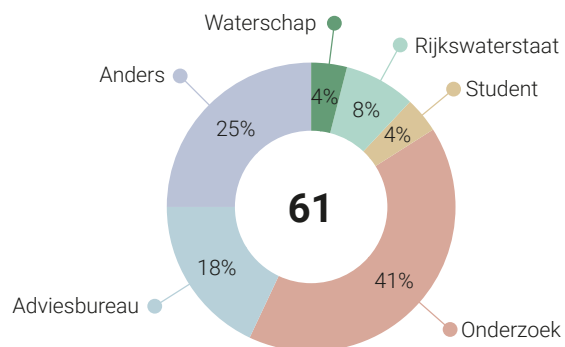


Willemijn van Doorn-Hoekveld
Universiteit Utrecht



Monica Lanz
Universiteit Utrecht

Deelnemers



Artist impression van het dubbele dijkontwerp. Afbeelding door Waterschap Noorderzijvest.

Casus dubbele dijk:

Het dubbele dijksysteem in Groningen is een concept waarbij twee parallelle dijken tijdens stormen samen de vereiste veiligheid bieden aan het achterland. In het gebied ertussen kan zeewater in- en uitstromen en dat biedt kansen voor nieuw landgebruik. Denk bijvoorbeeld aan aquacultuur, zilte teelt, hoogwatervluchtplaatsen en fourageergebied, kleiwinning.

Tijdens het All-Risk-webinar werden de vragen behandeld over de manier waarop een dubbele dijk kan bijdragen aan de waterveiligheid en de verdeling van waterbeheerverantwoordelijkheden tussen overheden bij dit concept. In de nabeschuiving hieronder vindt u wat er uit de discussie tussen wetenschap en praktijk is voortgekomen.

Wilt u de presentaties van de onderzoekers terugzien? Dat kan door op **de QR code te klikken of deze te scannen**.



Deze reflectie komt voort uit de discussie tussen All-Risk-onderzoekers en deelnemers aan het gelijknamige All-Risk-webinar van 17 mei 2021.

De discussie

Tijdens het webinar werd duidelijk dat er enige controverses bestaan omtrent het concept van dubbele dijken. Aan de ene kant biedt het concept interessante nevenfuncties (zilte teelt, aquacultuur, herstel van natuur, kleiwinning). Aan de andere kant ontstaat de vraag of de tweede dijk daadwerkelijk bijdraagt aan de waterveiligheid en hoe dat zich verhoudt tot de kosten. Daarover is het laatste woord nog niet gezegd. Gewezen wordt op verschillende denkbare toepassingen van dubbele dijken: van een lage buitenste en een hoge binnenste dijk (of juist andersom) tot zandige kusttoepassingen zoals op de eilanden Vlieland en Terschelling met de zeereep als buitenste kering en het landinwaartse grensprofiel als binnenste kering (inclusief de tussenliggende duinvalleien). Ook de invulling van het tussengebied kent meerdere opties (denk bijvoorbeeld aan ruimte voor drijvende woningen/recreatiewoningen zoals in Zeeland/Waterdunen).

Het is eerst zaak om te bedenken wat het beoogde doel is en welke meerwaarde met een dubbele dijk wordt gecreëerd. Daarna kan nagedacht worden over welke dijk – de binnenste, de buitenste of beide dijken tezamen – technisch en juridisch gezien het best als primaire kering beschouwd kan worden. Theoretisch hoeft alleen bij de binnenste kering

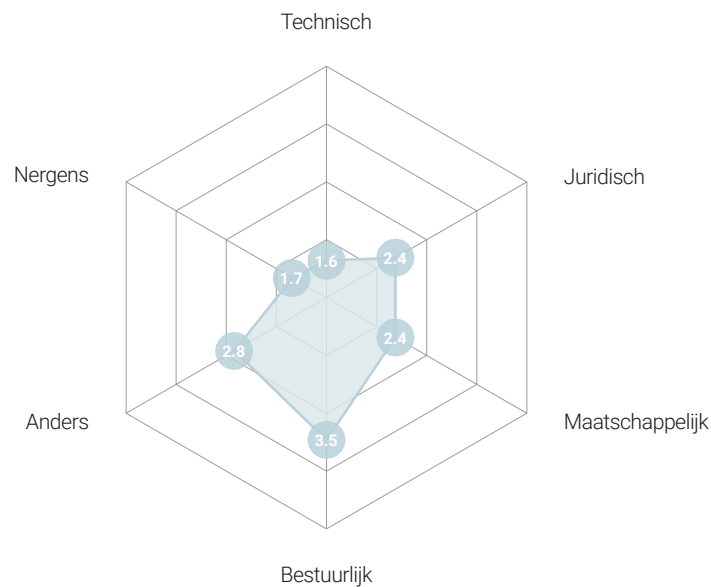


Welke woorden associeert u met het concept van een dubbele dijk?

aan de veiligheidsnorm te voldoen. Deelnemers geven er de voorkeur aan om beide dijken gezamenlijk als primaire kering aan merken. Vanuit de veiligheidsbeoordeling wordt het juist als meest praktisch gezien de dijk met de grootste bijdrage aan de reductie van de overstromingskans als primaire kering aan te wijzen.

Waar liggen de grootste uitdagingen?

Door deelnemers wordt aangestipt dat het aanwijzen van de primaire kering zou kunnen veranderen in de loop van de tijd. Opslibbing van het tussengebied zou bijvoorbeeld voor een verschuiving kunnen zorgen: van een binnenste primaire kering naar een buitenste primaire kering. De vraag resteert hoe een dergelijk dynamisch (eco)systeem 'juridisch goed' mee kan bewegen.



Waar liggen de grootste uitdagingen voor de implementatie van een dubbele dijk?

Mocht één van de twee keringen relatief weinig bijdragen aan de waterveiligheid, dan kan deze worden meegenomen in de berekeningen zolang hij er ligt. Juridisch gezien kan er dan voor worden gekozen om deze niet aan te wijzen als primaire kering en activiteiten op deze kering in de Keur te reguleren. Wanneer de reden voor het aanleggen van de dubbele dijk buiten de waterveiligheid is gelegen zal de bekostiging vanuit het HWBP overigens niet op voorhand mogelijk zijn. Indien het versterken van maar één dijk kostenefficiënter is, zal het idee van een “dubbele dijk” op den duur kunnen worden ondermijnd. Als men alleen naar de korte termijn kijkt, zal een dubbele dijk daarom niet altijd de meest voor de hand liggende keuze zijn. Bij een langetermijnperspectief kan een dubbele dijk wel duidelijke meerwaarde hebben, ook voor de waterveiligheid in breder perspectief.

De verantwoordelijkheid voor het waterbeheer in het binnengebied is ook aan de orde gesteld. Volgens de Waterwet is ofwel Rijkswaterstaat, ofwel het waterschap integraal waterbeheerder. Dus voor zowel het waterkwantiteits- als het waterkwaliteitsbeheer en de waterveiligheid. De gehele primaire kering wordt gerekend als binnendijks gebied. Daarom is het waterschap de waterbeheerder en ook de verantwoordelijke voor het waterbeheer in het tussengebied. Het waterschap kan verplichtingen voor het waterbeheer opleggen aan de gebruikers van het binnengebied via de Keur.

Een perspectief voor de toekomst?

Deelnemers wijzen er ook op dat de toegevoegde waarde van een dubbele dijk op de korte termijn kan verschillen met de toegevoegde waarde op de lange termijn. Zo ontstaan er vervolgvragen over welke waarde dit concept heeft bij een scenario waarin een versnelde zeespiegelstijging werkelijkheid wordt. Kun je met de opslibbing van het achterland een bijdrage leveren aan een lagere overstromingskans op de lange termijn en kan daarmee zeespiegelstijging worden bijgehouden? Ook wordt geopperd dat wellicht twee veiligheidsnormen gehanteerd kunnen worden: één voor het tussengebied waarin een lagere veiligheid wordt geboden en één voor het gebied achter de binnenste dijk (ter bescherming van grote aantallen slachtoffers en kapitaalintensieve investeringen).

Als voorbeeld wordt het scenario aangehaald waarin er gekozen wordt om de Westerschelde blijvend open te houden ten behoeve van de bereikbaarheid van de haven van Antwerpen. Achterin de Westerschelde, langs de hals van Zuid-Beverland zou dan een overstroombare buitenste dijk kunnen worden gerealiseerd met een tussengebied waarin nog lang agrarisch gebruik mogelijk zal zijn en waarbij de binnenste dijk dan dient ter bescherming van het achterland. Een ander voorbeeld betreft de Brede Groene Dijk, waarbij ook al is ingeschat dat opslibbing van het voorland gebruikt kan worden om de dijk tegen zeespiegelstijging te wapenen (zie <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139698>).

Er wordt opgemerkt dat breder gekeken kan worden naar dijkversterkingen: die kunnen bijvoorbeeld een aanjager zijn voor gebiedsontwikkelingen. Denk bijvoorbeeld aan klimaatbestendige landschappen waarbij het tussengebied een buffer biedt voor het lager gelegen achterland (met een brede verdedigingszone). Het zou daarbij van toegevoegde waarde zijn om bij de evaluatie en monitoring van primaire waterveiligheid ook deze brede en op de lange termijn gerichte insteek te volgen. De hamvraag is wie verantwoordelijk is voor het op de lange termijn laten opslibben en wie ondertussen de veiligheid op korte termijn waarborgt. Door deelnemers wordt geconstateerd dat het perspectief om op de lange termijn de waarde van de grond én de waterveiligheid te behouden nog niet alom aanwezig is bij overheden. Het Deltaprogramma zou daarin een meerwaarde kunnen bieden.

Voordat dit langetermijnperspectief bestuurlijk en organisatorisch van de grond kan komen zal vertrouwen tussen overheden nodig zijn. Op de vraag of de verdeling van verantwoordelijkheden tussen overheden een innovatief concept als de Dubbele Dijk in de weg kan staan, antwoordt driekwart van de respondenten bevestigend. Volgens deelnemers illustreren de antwoorden op deze vraag hoe moeilijk meervoudigheid van gebruiksfuncties in onze gedachten- en beleidswereld ligt. De uitkomst raakt aan de verhouding tussen de overheden die verantwoordelijk zijn voor de ruimtelijke inrichting van een gebied (gemeenten, provincies, Rijk) en de waterschappen met hun focus op functionele waterveiligheid. Toch zijn er ook positieve geluiden: deelnemers geven aan dat met de twaalfjaarlijkse veiligheidsbeoordeling en -evaluatie veel kan worden gedaan. Een helder verhaal over “waarom doen we iets en hoe doen we dat dan” en nuchter benoemen wat het beheer inhoudt kan veel rust en ruimte voor toekomstgerichte discussie en oplossingen brengen, en... waar een wil is, is vaak ook een weg.



All-Risk-aanbevelingen:

- Kijk wat het beoogde doel is en welke meerwaarde met een dubbele dijk wordt gecreëerd.
- Bedenk daarna welke dijk – de binnenste, de buitenste of beide dijken tezamen – technisch en juridisch gezien het best als primaire kering beschouwd kan worden.*
- Technisch-theoretisch gezien adviseren wij de binnengelegen kering als primaire kering te beschouwen, waarop de veiligheidsnorm van toepassing is.*
- Juridisch gezien kan in aanvulling hierop ook de voorliggende kering als primaire kering worden aangewezen of actief worden gereguleerd als waterkerend object (c.q.voorland) in de Keur/legger*

**De deelnemers geven de voorkeur aan het aanwijzen van beide keringen als primaire kering, inclusief het middengebied. De huidige veiligheidsbeoordelingspraktijk geeft de voorkeur aan de dijk met de grootste bijdrage aan de reductie van de overstromingskans.*

Luchtfoto van de buiten- en binnendijk van het dubbele dijksysteem. Foto door Waterschap Noorderzijlvest.



Voorbeelden van activiteiten voor beheer van dijken. Foto door Wouter Jan Klerk.

Het thema:

De waterveiligheidsnormen gaan uit van een kans op overstromen. Die kans proberen we met allerlei faalmodellen en statistische technieken zo goed mogelijk te benaderen, en vervolgens met gerichte maatregelen te reduceren. Maar in hoeverre levert dat een goed inzicht in de overstromingskans op? En vergeten we geen belangrijke factoren?

In dit webinar kijken we naar twee aspecten die tot dusver niet expliciet worden meegenomen bij het bepalen van de overstromingskans: de invloed van schade aan de bekleding door bijvoorbeeld graverij op de faalkans en interacties tussen faalmechanismen die kunnen leiden tot ander faalgedrag dan nu wordt aangenomen. Hoe kunnen we hier rekening mee houden, en hoe beïnvloedt dit het handelingsperspectief in de praktijk?

Wilt u de presentaties van de onderzoekers terugzien? Dat kan door op **de QR code te klikken of deze te scannen**.



Reflectie

Risicogebaseerde inspecties en interacties tussen faalmechanismen

Webinar team



Moderator

Mattheijs Kok
Technische Universiteit Delft



Sprekers

Wouter Jan Klerk
Technische Universiteit Delft



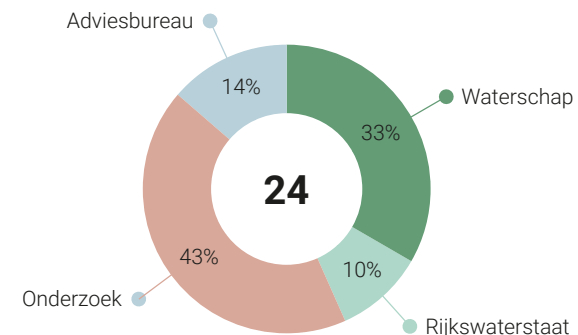
Introductie

Oscar van Dam
Hoogheemraadschap van Delfland



Joost Pol
Technische Universiteit Delft

Deelnemers



Deze reflectie komt voort uit de discussie tussen All-Risk-onderzoekers en deelnemers aan het gelijknamige All-Risk-webinar van 4 oktober 2021.

De discussie

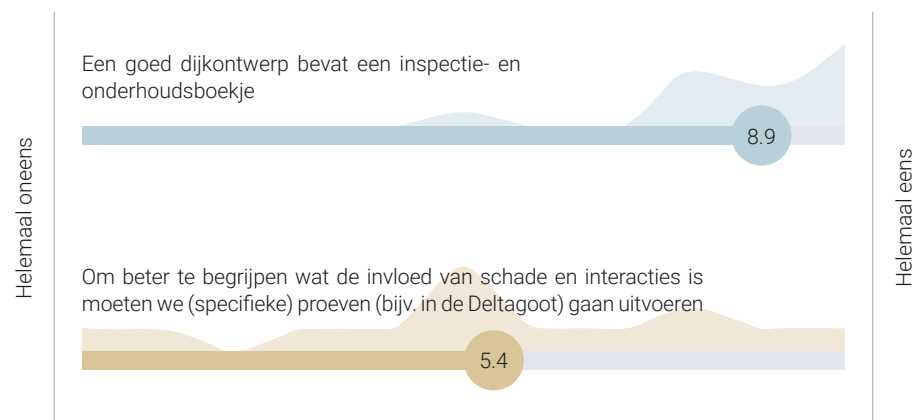
In de presentatie is ingegaan op de nauwkeurigheid van dijkinspecties, die met een veldproef van dijkinspecteurs van Waterschap Rivierenland is onderbouwd. Daaruit blijkt dat zeker niet alle schades worden waargenomen bij de dijkinspecties en dat hiermee dus rekening moet worden gehouden bij het inschatten van faalkansen van waterkeringen. In de onderzochte casus is de invloed van schade op de trajectfaalkans gekwantificeerd. Daaruit blijkt dat sprake is van een grotere faalkans en dat bestaande inspecties veelal onvoldoende zijn om aan de veiligheidsnorm te voldoen. Met gerichte maatregelen kan de invloed van schade op de veiligheid flink worden verkleind. Dit is onderbouwd met een totale kostenanalyse en een analyse van de constructieve robuustheid van het beschouwde dijktraject, wat een nieuwe en handige indicator is om de invloed van keuzes in ontwerp, inspectie en onderhoud inzichtelijk te maken.

Waar denk je aan bij dijkinspecties?

Uit de discussie bleek een behoorlijke consensus over het belang van het meenemen van schade aan waterkeringen, ook in de context van ontwerp, hoewel ook herkend wordt dat dit vaak lastig is. Het idee dat ieder dijkontwerp een (risicogestuurd) inspectie- en onderhoudsboekje moet bevatten wordt breed ondersteund, hoewel nog niet precies bepaald is waar dit dan uit zou moeten bestaan. Er zijn wel belangrijke onzekerheden, onder andere in de precieze invloed van schade. De stemming over het nut van Deltagootproeven was verdeeld, met name omdat er primair gekeken moet worden naar de risicobijdrage van verschillende onzekerheden. Er werd wel herkend dat er niet zo veel bekend is over de precieze effecten van schade.



Waar denkt u aan bij dijkinspecties?



In het verder onderzoeken van de precieze effecten van schade werden met name grote graverij i.r.t. interne erosie/instabiliteit en schade aan de grasmat van belang geacht. Een belangrijke reden is dat dit bij zeer veel waterkeringen een rol kan spelen en daardoor de implicaties op landelijk niveau groot kunnen zijn. Een soortgelijke redenering gaat op voor steenbekledingen. Met name door het beperkte areaal worden asfaltbekledingen en teenconstructies als minder belangrijk gezien.

Hoe zit het met de interacties tussen faalmechanismen?

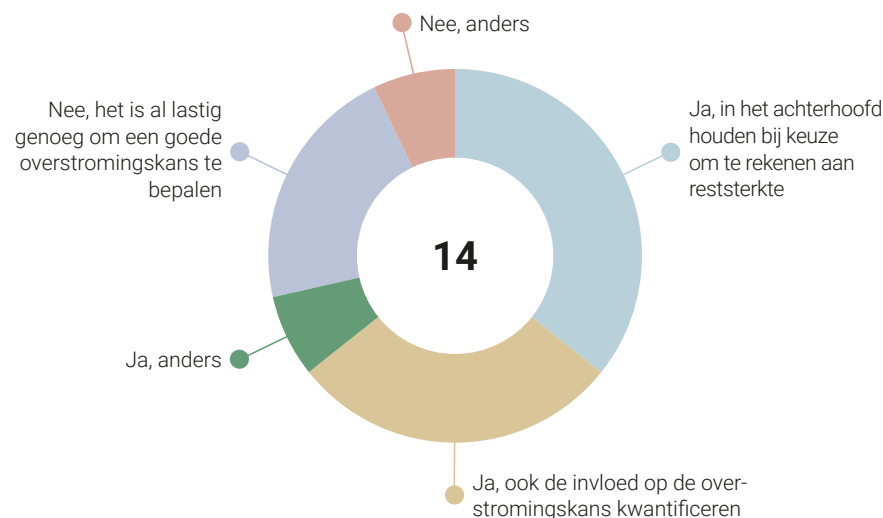
In de presentatie is toegelicht wat we verstaan onder interacties tussen faalmechanismen en wanneer deze invloed kunnen hebben op de overstromingskans. Dit is met name het geval als reststerkte niet meer (of



Waar denkt u aan bij interacties tussen faalmechanismen?

verminderd) aanwezig is door een vaker voorkomend initieel faalproces. Het onderzoek naar interacties heeft dan ook veel raakvlakken met het onderzoek naar reststerkte. Een analyse van reststerkte (en dus ook interacties) is echter altijd maatwerk, bijvoorbeeld met behulp van faalpa-analyses of integrale faalkansanalyses.

In de discussie was er wel erkenning dat dit soort analyses soms nodig zijn om de stap te maken van een wat conservatievere benadering op basis van initieel falen naar een scherpere overstromingskansbenadering. Ongeveer 2/3 zou wel iets willen doen met interacties: in het achterhoofd houden bij analyses van reststerkte of zelfs volledig kwantificeren. Anderzijds is ook ingebracht dat het een complexere



Zou u bij de beoordeling van keringen iets willen doen met interacties?

analyse is die dus meer werk met zich meebrengt, en dat er nog veel onbekend is over de faalprocessen.

Er is dan ook vooral behoefte aan kennisontwikkeling. Hoe werken die interacties dan precies? De interacties zijn lastig te vatten in ons voorstellingsvermogen en in de literatuur ook niet goed beschreven. Hierbij zou het nuttig zijn om een beschrijving te hebben van faalgevallen in de praktijk waarbij meerdere mechanismen een rol spelen. Daarnaast heeft een deel van de groep behoefte aan een handreiking of rekenvoorbeelden.

All-Risk-aanbevelingen:

- Houd expliciet rekening met de nauwkeurigheid van inspecties en onderhoud in ontwerp(keuzes).
- Vul nader onderzoek naar het effect van bijvoorbeeld schade van de grasmat in met een risicogestuurde insteek: experimenteel onderzoek (bijv. in de Deltagoot) is alleen zinvol waar een significante risicoreductie te verwachten is.
- Richt het onderzoek naar risicoreductie primair op de gevolgen van grote graverij en schade aan gras- en steenbekledingen, omdat dit op veel plaatsen speelt.
- Houd rekening met interacties bij het toepassen van reststerkte, al dan niet kwantitatief.
- Verdere kennisontwikkeling is nodig in de vorm van casusbeschrijvingen van doorbraken (bijv. via de ILPD-database van de TU Delft, <https://leveefailures.tudelft.nl>), kennis over faalprocessen na initiatie en kwantificering van het effect op de faalkans van interacties voor een aantal praktijkcases.



Meting van de hoogte waarop het vloedmerk door stormgolven op de dijk is gedeponeed. Foto door Beatriz Marin-Diaz.

Hoofdstuk 3

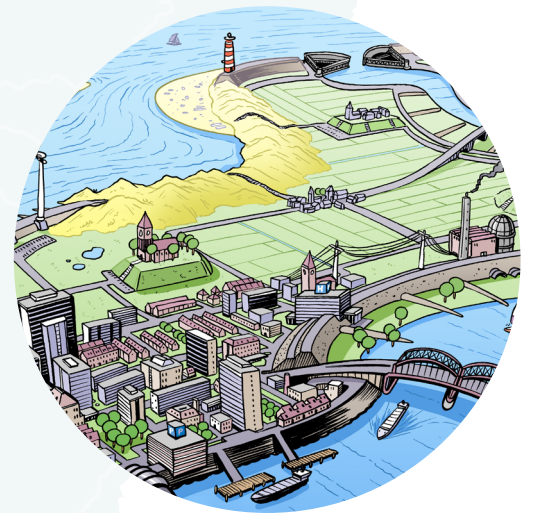
Dynamica in hydraulische belastingen

Introductie

Door Tjeerd Bouma

Om optimale dijken te kunnen ontwerpen langs onze 'slikkige' kusten (Waddenzee, Schelde-estuarium, enz.) en de vele kronkelende en vertakkende rivieren die onze Delta hebben gevormd, moet je de extreme hydraulische belasting kunnen voorspellen die deze dijken ondervinden. Deze extreme omstandigheden zijn stormvloeden die onze 'slikkige' kusten treffen en de hoogste rivierafvoeren die een extreme waterstand langs de rivierdijken geven. Deze hydraulische belastingen worden al heel lang gemeten en bestudeerd. Toch spelen er momenteel drie vragen die dringend beantwoord moeten worden:

1. In welke mate hangt het golfdempende vermogen van buitendijkse getijdegebieden (kwelders genoemd in Noord-Nederland; schorren in het zuiden; hierna kwelders genoemd) af van hun ligging, onder welke omstandigheden kunnen ze groeien, en hoe kunnen we ze aanleggen en beheren voor waterveiligheid?



2. Houden we voldoende rekening met de rol van laagfrequente (lange) golven (infragravitatiegolven ofwel IG-golven), als we de golven beschouwen die een zeewering en haar begroeide intergetijdengebied bereiken?
3. In hoeverre kunnen we de waterstanden in rivieren tijdens piekafvoeren correct voorspellen en in welke mate hangt dit af van ons vermogen om de waterverdeling bij riviervertakkingspunten goed te voorspellen?

Onderzoek heeft aangetoond dat kwelders tijdens extreme stormen de golfbelasting op dijken effectief verminderen ([Möller et al., 2014](#); [Vuik et al., 2016](#); [Willemsen et al., 2020](#)) en de diepte van dijkdoorbraken verkleinen ([Zhu et al., 2020](#)). Maar voordat we kwelders grootschalig voor waterveiligheid kunnen toepassen, moet er nog een aantal sleutelvragen worden beantwoord. Daarom heeft **Beatriz Marin Diaz** in project "[B1 - Beheer van vooroeverecosystemen](#)" de volgende vragen onderzocht:

1. hoe de mate waarin getijdeplaten en kwelders de golfoploop reduceren afhangt van hun landschappelijke ligging,
2. wat bepaalt waar kwelders zich kunnen vestigen,
3. welk type sediment nodig is om kwelders zo aan te leggen dat de bresgroei tijdens een dijkdoorbraak wordt verminderd,
4. hoe begrazingsbeheer de weerstand van kwelderkliffen tegen erosie kan maximaliseren en
5. hoe beheersmaatregelen op de voorliggende getijdeplaten kwelderexpansie kunnen stimuleren.

Daarnaast onderzocht **Chris Lashley** in project "[B2 - Golfvoortplanting over vooroevers](#)" hoe IG-golven het risico van golfoverslag veranderen en of dat afhangt van de aanwezigheid van ondiepe voorlanden. De zeer lange IG-golven nemen namelijk in hoogte toe boven ondiepe gebieden. Chris zijn onderzoek richtte zich met name op het vinden van praktisch

toepasbare empirische relaties om het effect van IG-golven op zeeweringen te beschrijven. Door slim gebruik te maken van bestaande experimenten in golfgoten en nieuwe numerieke beschrijvingen, ontwikkelde hij empirische modellen als volwaardig alternatief voor de bestaande numerieke modellen, die veel rekentijd op de computer vergen.

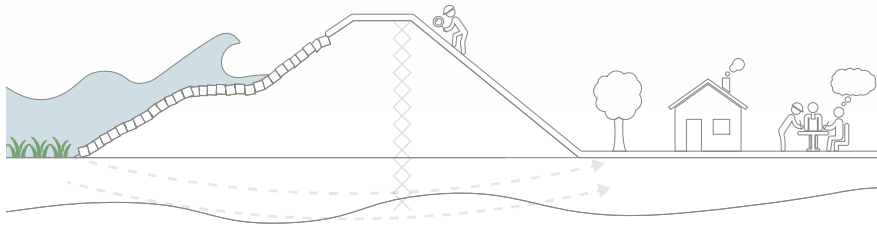
Uit metingen van extreme waterstanden tijdens dagen met piekafvoeren is het duidelijk geworden dat het nauwkeurig voorspellen van juist deze extreme waterstanden zeer complex is. En nu veel delen van de rivieren binnen het programma Ruimte voor de Rivier zijn hervormd en verbreed, is dit alleen nog maar complexer geworden. In project "[B3 - Grootschalige onzekerheid in rivierwaterstanden](#)" heeft **Matthijs Gensen** gewerkt aan het inzichtelijk maken van de grootte van de onzekerheden in voorspelde rivierwaterstanden en hoe deze onzekerheden te verminderen zijn. Hiervoor heranalyseerde hij gegevens van historische rivierafvoeren, gebruikte hij 1D-modellen om de gevoeligheid van waterstanden voor bodemruwheid te kwantificeren en onderzocht hij het effect van de waterverdelingen bij riviervertakkingen op de waterstand in de verschillende rivierarmen.

Uit dit onderzoek komen drie belangrijke aanbevelingen voor de praktijk. Ten eerste moeten we, om kwelders te gebruiken voor waterveiligheid, de netto sedimentatie op de voorliggende getijdeplaten stimuleren, fijne sedimenten gebruiken bij het 'aanleggen' van kwelders en als beheersmaatregel extensieve begrazing toepassen. Ten tweede zal het uitbreiden van de huidige beoordelingsmethodiek van dijken door toevoeging van de empirische relatie voor het effect van IG-golven op golfoploop, realistischere beoordelingen opleveren. Ten derde is gebleken dat het expliciet rekening houden met riviervertakkingen leidt tot significante verbeteringen van de voorspelde waterstand en de onzekerheid in de voorspelde rivierafvoer aanzienlijk vermindert.

Projectsamenvatting

B1 - Beheer van vooroeverecosystemen

Inzichten in de dynamiek van kustecosystemen ten behoeve van hun toepasbaarheid als kustbescherming

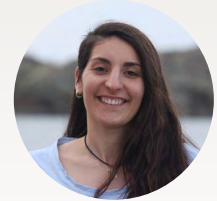


Uitkomst

Dit project toont de waarde van natuurlijke kustecosystemen voor het verlagen van de golfbelastingen op dijken en het opbouwen van erosiebestendige hooggelegen bodems voor de dijk (**Figuur 1**). Het project biedt inzicht in (1) het belang van de afmetingen van zowel getijdeplaten als kwelders (schorren genoemd in Zuid-Nederland) voor verminderde golfoploop op dijken, (2) het belang van de hoogte(veranderingen) van getijdeplaten op kwelderontwikkeling, (3) hoe milieuvriendelijke beheersmaatregelen getijdeplaten kunnen stabiliseren en daarmee kwelderuitbreiding kunnen vergemakkelijken, (4) hoe kwelders de weerstand van de bodem tegen erosie onder hoge stroomsnelheden (zoals die optreden bij een dijkdoorbraak) verhogen t.o.v. een onbegroeide getijdeplaat en (5) hoe de erosieweerstand van kwelderkliffen afhangt van begrazingsbeheer en sedimenttype, wat belangrijke kennis is omdat dit de breedte van een voor een dijk aanwezige kwelder bepaalt.

Door Beatriz Marin-Diaz

NIOZ – Koninklijk Nederlands
Instituut voor Onderzoek der Zee



Project start: 09/2017

Project einde: 11/2021

Promotoren

Prof. dr. T.J. Bouma

NIOZ

Dr. L.L. Govers

Universiteit Groningen

Prof. dr. H. Olff

Universiteit Groningen

Prof. dr. D. van der Wal

NIOZ



Figuur 1: Dijk beschermd door een kwelder in de Nederlandse Waddenzee. Foto door Beatriz Marin-Diaz.

Motivatatie en uitdagingen

Harde waterbouwkundige werken zoals dijken zijn op veel plaatsen nodig om ons te beschermen tegen overstromingen. Ik zag dat zowel in Barcelona, waar ik vandaan kom, als ook langs de Waddenkust, die ik nu bestudeer (**Figuur 2 linksboven**). De vereiste technische maatregelen kunnen echter minder ingrijpend worden als we ze slim combineren met natuurlijke vooroeverecosystemen zoals kwelders. Dit leidt tot hybride oplossingen (**Figuur 1**). De zout- en overstromingstolerante planten die in buitendijkse kwelders groeien, kunnen bijdragen aan kustbescherming door de bodem te stabiliseren en golven te verminderen. Maar daarnaast leveren ze ook diverse andere ecosysteemdiensten zoals het verbeteren van de waterkwaliteit, het vastleggen van koolstof en habitat voor unieke biodiversiteit (**Figuur 2 rechtsboven**). Hybride waterkeringen zijn veelbelovend, omdat door het behoud en herstel van natuurlijke ecosystemen zoals kwelders en slikken, de veiligheidsstatus van zo'n 100 km Waddenzeedijk mogelijk van "onvoldoende" naar "veilig" zou kunnen veranderen. Tot op heden belemmeren onzekerheden over de daadwerkelijke effectiviteit het praktisch toepassen van dergelijke ecosystemegerichte hybride waterkeringen. Daarom ben ik als milieubioloog zeer gemotiveerd om kennis te genereren die de implementatie van ecosysteme-gebaseerde kustverdediging mogelijk maakt en daarmee het verlies van kustecosystemen tegen gaat en mogelijk zelfs omdraait naar herstel.

Onderzoeksdoel

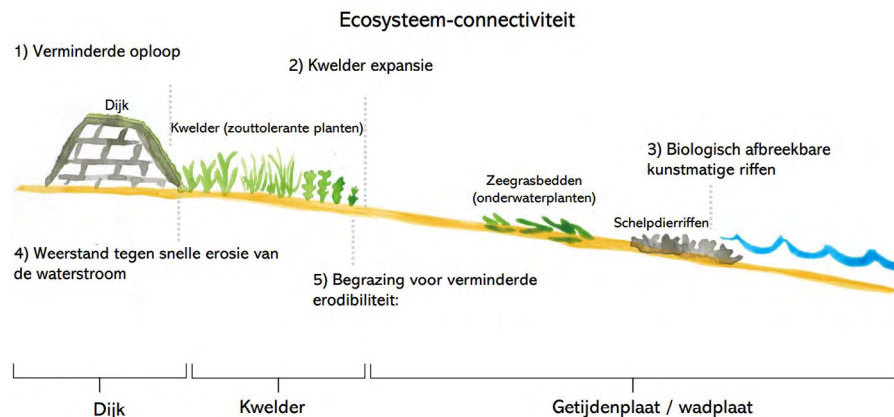
In dit project bestudeer ik belangrijke kennislacunes over het functioneren van natuurlijke kustecosystemen zoals kwelders en getijdeplaten die voor waterkeringen te vinden zijn, en hoe effectief beheer zowel de waterveiligheid als de ecologische waarde ten goede kan komen.



Figuur 2: **Linksboven:** meting van de hoogte waarop het vloedmerk door stormgolven op de dijk is gedeponeerd. **Rechtsboven:** overgang tussen kwelder en getijdeplaat. **Linksonder:** biologisch afbreekbare kunstmatige riffen ingezet op de droogvallende getijdeplaat nabij Griend, in de Waddenzee. **Rechtsonder:** vee grazend op een kwelder. Foto's door Beatriz Marin-Díaz.

Innovatieve componenten

1. De rol van getijdeplaten en kwelders op golfdemping en het verminderen van de golfoploop op zeedijken werd gekwantificeerd door drie jaar meten langs de Waddenzeekust (**Figuur 2 linksboven en kaart**).
2. Door een 20-jarige tijdreeks van luchtfoto's en hoogtekaarten te combineren, kon ik bepalen welke factoren de ontwikkeling van kwelders in de Waddenzee stimuleren.
3. De potentie om kunstmatige riffen te gebruiken voor kwelderuitbreiding door zeewaarts gelegen getijdeplaten te laten opslibben, werd met collega's experimenteel onderzocht (**zie kaart p74**). Ik heb de golfdemping en veranderingen in bodemhoogte geanalyseerd (**Figuur 2 linksonder**).
4. De erosieweerstand van de bovenste bodemlaag van kwelders en getijdeplaten bepaalt hoe diep een bres tijdens een dijkdoorbraak kan



Figuur 3: Schematische samenvatting van de belangrijkste bevindingen. De figuur benadrukt ook het belang van ecosysteemconnectiviteit. Laaggelegen schelpdierriffen verminderen golven en houden sediment vast, wat een hogere plaat geeft, wat kwelderuitbreiding faciliteert. De kwelder beschermt de dijk door een hoog en erosiebestendig voorland te vormen, waardoor de golfoploop tijdens stormen vermindert. Illustratie door Beatriz Marin-Diaz.

worden (Zhu et al., 2020). Met een stroomgoot die hoge stroomsnelheden kan genereren (zoals tijdens een dijkdoorbraak), heb ik bepaald welke factoren de erosieweerstand van kwelders en droogvallende getijdeplaten bepalen.

5. Het effect van begrazingsbeheer op de weerstand tegen kliferosie, is essentieel om het effect van begrazingsbeheer op kwelderbreedte te begrijpen. In golfgoten heb ik de weerstand tegen kliferosie gemeten, door kwelderbodems te verzamelen in gebieden met een verschillend begrazingsbeheer, en met een verschillende kwelderleeftijd en kwelderhoogte (**Figuur 2 rechtsonder**).

Relevant voor wie en waar?

Alle partijen die *of* betrokken zijn bij het ontwerp van kustverdediging waarbij natuurlijke kustecosystemen gebruikt worden, *of* bij het beheer van kustecosystemen, zoals waterschappen, natuurbeheerders en NGO's.

Voortgang en toepassing

Figuur 3 vat de belangrijkste bevindingen samen over (1) hoe kustecosystemen bijdragen aan kustbescherming en (2) het belang van ecosysteemconnectiviteit voor het beheer van kwelders. Verwijzend naar **Figuur 3** (zie voor details de **projectresultaten op de volgende pagina**):

1. **Verminderde oploop:** kwelders verminderden altijd de golfoploop ten opzichte van een onbegroeide getijdeplaat, zelfs als de vegetatie heel kort is.
2. **Kwelderexpansie:** de aangroei van een kwelder is vaak gerelateerd aan het ophogen van de zeewaarts liggende getijdeplaat. Daarom kan kweldervorming op locaties met een lage sedimentdepositie alleen door technische maatregelen worden bereikt.
3. **Biologisch afbreekbare kunstmatige riffen:** het experiment toont het enorme potentieel om de morfologie van getijdeplaten te beïnvloeden. De afmetingen van de riffen moeten voldoende groot zijn en de materiaalkeuze moet goed tegen de hydrodynamische blootstelling kunnen.
4. **Weerstand tegen snelle erosie van de waterstroom:** kweldervegetatie vangt fijn sediment en organisch materiaal in, waardoor op den duur een zeer sterke, erosiebestendige toplaag ontstaat. Alleen zanderige plekken met pioniervegetatie waren zeer erosiegevoelig, vergelijkbaar met kale getijdeplaten. Kwelders voor hoogwaterveiligheid moeten idealiter niet met zand worden gebouwd, omdat deze gevoelig zijn voor erosie.
5. **Begrazing voor verminderde erodibiliteit:** begrazing door zowel kleine (bijv. hazen, ganzen) als grote herbivoren (bijv. runderen) vermindert de erosiegevoeligheid van kwelderkliffen met een fijnkorrelige bodem. Intensieve begrazing door runderen kan de bodem echter verdichten, waardoor de bodem inklinkt en daalt. Dit kan in gebieden met een lage sedimentaanvoer een negatief effect hebben op de mogelijkheid van een kwelder om met de zeespiegelstijging mee te groeien.

Aanbevelingen voor de praktijk

- Wij raden aan om de bestaande kwelders te behouden, omdat deze onafhankelijk van het seizoen, de vegetatietoestand of het begrazingsbeheer zorgen voor een stabiele bodem en een verlaagde golfoploop op de dijken. Om kweldererosie te voorkomen en kweldervorming te stimuleren, is het aan te raden de hoogte van de zeewaarts gelegen getijdeplaten te handhaven en/of verhogen door opslibbing te stimuleren, bijvoorbeeld door de ecosysteemconnectiviteit te verbeteren.
- Voor toekomstige restauraties van kwelders wordt aanbevolen om fijnkorrelige sedimenten of slib te gebruiken. Gebruik van grof zand, maakt kwelders gevoelig voor erosie of zorgt ervoor dat het erg lang kan duren voordat ze erosiebestendig beginnen te worden.
- Begrazing met hoge intensiteit moet worden vermeden, aangezien dit negatief is voor de biodiversiteit en de hoogte van de bodem kan verlagen. We raden aan om kleine herbivoren zoals hazen en ganzen in de lage kwelders te beschermen, omdat ze de erosiegevoeligheid kunnen beperken en de biodiversiteit kunnen vergroten, zonder negatieve bijwerkingen.

Belangrijkste projectresultaten



Marin-Diaz, B. et al. (2021). [On the use of large-scale biodegradable artificial reefs for intertidal foreshore stabilization.](#)

Doi: 10.1016/j.ecoleng.2021.106354

Marin-Diaz, B., Govers, L.L., van der Wal, D., Olff, H., Bouma, T.J. (2021). [How grazing management can maximize erosion resistance of salt marshes.](#) Doi: 10.1111/1365-2664.13888

Marin-Diaz, B., Govers, L.L., van der Wal, D., Olff, H., & Bouma, T.J. (2022). [The importance of marshes providing soil stabilisation to resist fast-flow erosion in case of a dike breach.](#) Doi: 10.1002/EAP.2622



Onderzoekslocaties nabij de Noord- en Zuid-Nederlandse kust en de locatie waar het biologisch afbreekbare kunstmatige rif is bestudeerd, op de droogvallende platen nabij Griend, gelegen in de Waddenzee.

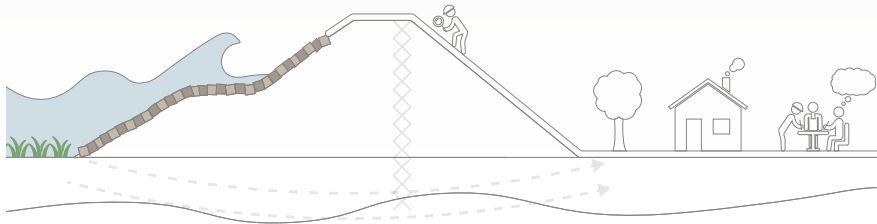
Foto door Beatriz Marin-Diaz.



Projectsamenvatting

B2 - Golfvoortplanting over vooroevers

De invloed van lange golven (infragravatiegolven) op overslag bij zeeweringen met ondiepe vooroevers



Uitkomst

In dit project zijn nieuwe empirische methoden ontwikkeld om de grootte en het relatieve belang van laagfrequente (lange) golven (infragravatiegolven ofwel IG-golven) op de golfoverslag te schatten bij zeeweringen met ondiepe vooroevers. Om dit te bepalen, zijn twee benaderingen gebruikt: de eerste methode is een aanvulling op de nu gebruikelijke benadering waarbij eerst met behulp van numerieke modellering aan de hand van fasegemiddelden de golfparameters aan de dijkvoet worden geschat, en vervolgens middels een empirische schattingsmethode de golfoverslag wordt bepaald. De tweede benadering is volledig empirisch en gebruikt diepwatergolf-parameters als input en haalt daar ook direct de gegevens over IG-golven uit. Bij deze laatste methode wordt van een constant oplopend voorland uitgegaan. Deze benaderingen werden

Door Christopher Lashley

Technische Universiteit Delft



Project start: 09/2017

Project einde: 09/2021

Promotoren

Prof. J.W. van der Meer

IHE-Delft

Dr. J.D. Bricker

Technische Universiteit Delft

Prof. dr. ir. S.N. Jonkman

Technische Universiteit Delft



Figuur 1: Dijk aan de Waddenzee deels bedekt met asfalt en deels met gras, met ervoor een ondiep, flauw hellend slik. Foto door Jaap van Duin.

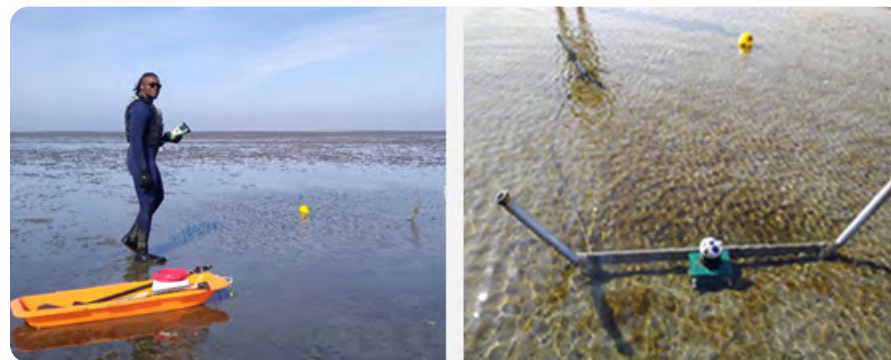
vervolgens samengevoegd tot een probabilistisch raamwerk, waarmee de impact van lange golven op de veiligheid van dijken langs de Nederlandse Waddenkust kon worden gekwantificeerd.

Motivatie en uitdagingen

Om natuurlijke ecosystemen zoals kwelders (schorren genoemd in Zuid-Nederland) en getijdeplaten volwaardig mee te kunnen nemen in het ontwerp en de beoordeling van de veiligheid van zeedijken, moeten we hun impact op golven en de kans op overstromingen tijdens extreme stormen volledig begrijpen. Hoewel het effect van dergelijke ondiepe voorlanden op korte windgolven (periodes van minder dan 25 seconden) nu redelijk goed wordt begrepen, is dat totaal nog niet het geval voor de IG-golven met veel langere periodes van minuten. Tijdens extreme stormen planten deze golven zich ver voort en reiken ze tot aan de zeeweringen. Hoewel dat dit een effect kan hebben op de kustdynamiek, de waterveiligheid en de kans op overstroming, worden in de huidige benaderingen de IG-golven totaal verwaarloosd of slechts indirect meegenomen in waterveiligheidsanalyses. In Nederland speelt deze vraag sterk in de Waddenzee, omdat die kilometers lang vrij ondiep is, terwijl de golven die binnenkomen voor een deel in de veel diepere Noordzee worden gegenereerd. Een beter inzicht in hoe IG-golven zich over ondiepe vooroevers voortplanten, is niet alleen nuttig voor de Waddenzee, maar ook voor het ontwerpen van natuur-inclusieve waterveiligheidssystemen voor andere kustgebieden, zoals de Caribische eilanden waar ik vandaan kom.

Onderzoeksdoel

Het onderzoek wil een antwoord geven op de vraag: onder welke omstandigheden zijn IG-golven significant aan de voet van een waterkerende



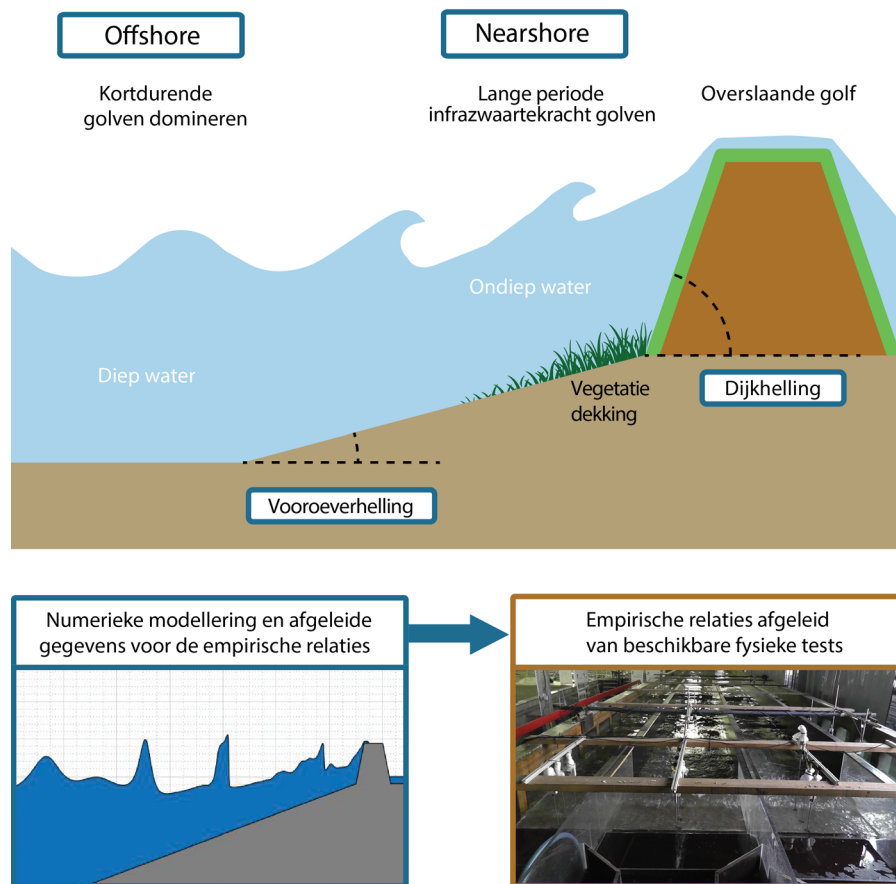
Figuur 2: Recent veldwerk om golven en stromingen te meten tijdens de jaarlijkse winterstormen op dezelfde locatie. Foto's door Pieter van der Gaag.

constructie (zoals een dijk), en wat is hun impact op de golfoverslag en de overstromingskans als de IG-golven een significante hoogte hebben bij de dijk?

Innovatieve componenten

Om bovenstaande vragen te beantwoorden zijn de volgende methoden toegepast en zoveel mogelijk gevalideerd met veldmetingen:

- **Numerieke modellering:** omdat veldmetingen en fysieke modelproeven in golfgoten vaak moeilijk en duur zijn, kunnen numerieke modellen een goede alternatieve benadering bieden om de interactie tussen golven en de vooroever op een snelle, kosteneffectieve manier te bestuderen. In dit onderzoek werden geavanceerde numerieke modelleringstools zoals SWAN, SWASH, XBeach en OpenFOAM toegepast om de golfhoogten in de buurt van de kust te berekenen, en daarmee vervolgens de overslagdebieten van golven die over de dijk heen slaan in te schatten.



Figuur 3: Onderdelen van het onderzoek om de invloed van golven dicht bij de kust in te schatten op basis van de offshore- en dijkarakteristieken voor nauwkeurigere dijkontwerpen en overstromingsrisicobeoordelingen. Gebaseerd op schema's van Christopher Lashley. Foto fysieke modeltest door Corrado Altomare en Tomohiro Suzuki (Flanders Hydraulics Research, België).

- **Empirische modellering:** met behulp van eerder uitgevoerde fysieke moedelproeven en nieuwe numerieke gegevens, werd empirisch de relatie bepaald tussen de vooroevereigenschappen, de golven dichtbij de kust en het golfoverslagdebiet. Deze empirische relaties kunnen vervolgens in de praktijk gebruikt worden voor het nauwkeuriger definiëren van dijkontwerpen en overstromingsrisicobeoordelingen. Dankzij de nieuwe empirische relaties kunnen we nu de invloed van IG-golven, inclusief het versterkende effect van ondiepe voorlanden, accuraat inschatten op basis van: (1) de grootte van de offshore-golven; (2) de kenmerken van de vooroever, zoals de helling en de vegetatiebedekking; en (3) de helling van de dijk.

Relevant voor wie en waar?

Het verbeterde begrip van de voortplanting van IG-golven over ondiepe voorlanden is nuttig voor kustingenieurs, onderzoekers, ecologen en overstromings- en risicoadviseurs.

Voortgang en toepassing

Bevindingen geven aan dat lange IG-golven van belang worden bij locaties die zijn blootgesteld aan hoge offshore golven en tegelijk gekenmerkt worden door ondiepe, licht glooiende vooroevers met weinig plantbegroeiing. Bovendien toonde de vergelijking met numerieke modellen aan dat modellen die meer rekencapaciteit vragen, niet noodzakelijkerwijs nauwkeurigere voorspellingen bieden voor de golfparameters dicht bij de kust of het golfoverslagdebiet.

De invloed van lange IG-golven dicht bij de kust is het belangrijkste voor kusten met ondiepere wateren, flauwere vooroeverhellingen, weinig plantbegroeiing en mildere dijkhellingen. Met empirische aanpassingen, kunnen modellen die gebaseerd zijn op fasegemiddelden, zoals

SWAN, worden gebruikt om deze IG-golven te schatten, hoewel ze deze lange golven niet modelleren. Voor meer details, zie de **projectresultaten hieronder**.

Aanbevelingen voor de praktijk

- Zelfs wanneer de lange IG-golfhoogte bij een waterbouwkundige constructie (zoals een dijk) klein is, kan de invloed op de golfperiode – en daarmee op het golfverslagdebiet – aanzienlijk zijn.
- De invloed van lange IG-golven is sterk afhankelijk van de lokale bathymetrie van de vooroever en de hoogte van de belastingen (waterstanden/golven). Onze aanbeveling is daarom om altijd een snelle controle op de verwachte grootte van de IG-golven uit te voeren. Dit kan snel door gebruik te maken van de binnen dit project ontwikkelde empirische relaties en tools zoals we die nu gebruiken (bijvoorbeeld SWAN).
- Het is belangrijk om niet alleen de golfdemping te beoordelen, maar ook om goed te kijken naar de evolutie van de spectrale golfperiode over de vooroever.

Belangrijkste projectresultaten



Lashley, C.H., Jonkman, S.N., Van der Meer, J.W., Bricker, D.J. & Vuik, V. (2021). [The Influence of Infragravity Waves on the Safety of Coastal Defences: A Case Study of the Dutch Wadden Sea](#)
Doi: 10.5194/nhess-2021-211

Lashley, C.H., Van der Meer, J.W., Bricker, D.J. & Altomare, C. (2021). [Formulating Wave Overtopping at Vertical and Sloping Structures with Shallow Foreshores Using Deep-Water Wave Characteristics](#).
Doi: 10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000675

Lashley, C.H., Bricker, D.J., Van der Meer, J.W., Altomare, C. & Suzuki, T. (2021). [Relative Magnitude of Infragravity Waves at Coastal Dikes with Shallow Foreshores: A Prediction Tool](#).
Doi: 10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000576



De onderzoekscomponenten werden uitgevoerd binnen een case study in het noorden van Nederland.

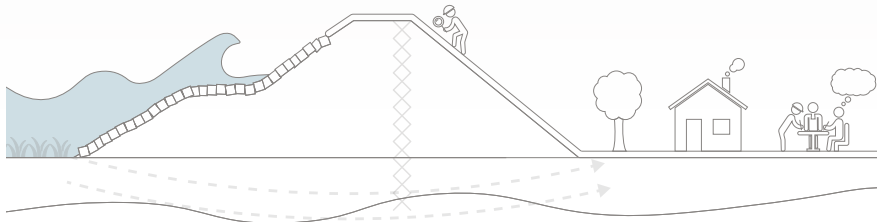


Foto door Beatriz Marin-Diaz.

Projectsamenvatting

B3 - Grootschalige onzekerheid in rivierwaterstanden

Rekening houden met het gehele riviersysteem en afvoerbereik voor het ontwerpen van rivierinterventies in splitsende rivieren



Uitkomst

In dit project hebben we beter inzicht gekregen in het gedrag van splitsende rivieren. We hebben aangetoond dat de grootste riviertak de afvoerverdeling grotendeels bepaalt en daardoor de waterstanden in het hele benedenstroomse riviersysteem domineert. Ook de effectiviteit van ingrepen in het riviersysteem worden sterk beïnvloed door de aanwezigheid van splitsingspunten. Ingerepen moeten daardoor specifiek ontworpen worden om ongewenste waterstandsverhogingen te voorkomen. Daarnaast heeft het onderzoek aangetoond dat de waterbalans van de afvoeren op een splitsingspunt niet per se gesloten is wanneer afvoeren geschat worden uit waterstandsmetingen. Door het expliciet meenemen van de waterbalans kan een betere schatting gemaakt worden van de afvoerverdeling over de riviertakken.

Door Matthijs Gensen

Universiteit Twente

Project start: 09/2017

Project einde: 09/2021



Promotoren

Prof. dr. S.J.M.H. Hulscher

Universiteit Twente

Dr. J.J. Warmink

Universiteit Twente

Dr. F. Huthoff

Universiteit Twente



Figuur 1: Splitsingspunt in de Rijn bij Pannerden. Foto door Rijkswaterstaat.

Motivatatie en uitdagingen

In het afgelopen decennium, is in Nederland het programma Ruimte voor de Rivier uitgevoerd. In dit programma zijn diverse grootschalige ingrepen gedaan zoals dijkverleggingen en veranderingen in uiterwaarden met als doel de waterstanden langs de grote rivieren te verlagen. Wanneer deze ingrepen uitgevoerd worden in de buurt van een splitsingspunt, kunnen deze ook de afvoerverdeling beïnvloeden. De afvoerverdeling op de splitsingspunten van de Rijn heeft een dominante invloed op de waterstanden langs de benedenstroomse takken. Deze waterstanden bepalen de hydraulische belastingen en daarmee de hoogte en sterkte van de 1.430 km rivierdijken in Nederland. Wij verwachten dat de ruwheid van de rivierbodem en het effect van grootschalige ingrepen met name bepalend zijn voor onzekerheden in waterstanden en de afvoerverdeling.

Onderzoeksdoel

Mijn doel is het kwantificeren en waar mogelijk reduceren van onzekerheden in rivierwaterstanden gerelateerd aan een onzekere afvoerverdeling, om in de toekomst nauwkeuriger en robuuster dijken te kunnen ontwerpen.

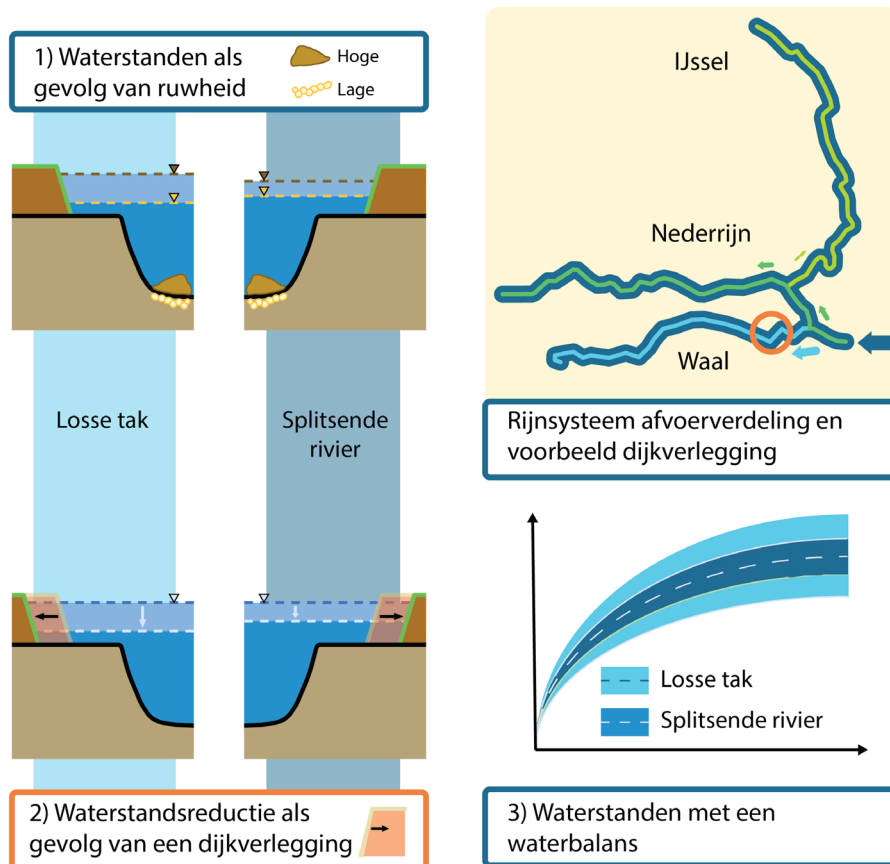
Innovatieve componenten

De afvoerverdeling bij splitsingspunten heeft een dominante invloed op ontwerpwaterstanden. In een splitsende rivier zullen waterstanden namelijk heel anders reageren op een verandering in dwarsdoorsnede of afvoerregime dan in een rivier zonder splitsingspunten. Mijn onderzoek naar de Rijn met zijn drie belangrijkste takken (**Figuur 3 rechtsboven**), bevat nieuwe componenten waarin ik het volgende kwantificeer:



Figuur 2: Splitsingspunt van de Bovenrijn bij Pannerden, waar ongeveer 2/3 van de Rijnafvoer naar de Waal wordt gestuurd en de overige 1/3 naar de Nederrijn en IJssel wordt gestuurd. Foto door Rijkswaterstaat, beeldbank.rws.nl / Joop van Houdt.

1. Onzekerheden in waterstanden in de drie takken als het gevolg van onzekerheden in de ruwheid van de rivierbodem. Met behulp van een 1D-model, heb ik de gevoeligheid van de waterstanden bepaald voor verschillende combinaties van hoge en lage ruwheid (**zie Figuur 3, linksboven**).
2. Veranderingen in waterstanden in het riviersysteem als gevolg van een ingreep in de Waal. Ik heb een gesimplificeerde 1D-schematisatie gebruikt om het effect van ingrepen te bepalen voor een vrije afvoerverdeling en voor een vaste afvoerverdeling (**zie Figuur 3, linksonder**).



Figuur 3: De drie componenten van mijn onderzoek dat gaat over de interactie tussen afvoerverdeling en waterstanden. Gebaseerd op schema's van Matthijs Gensen.

- Veranderingen van de waterstanden wanneer er rekening gehouden wordt met een sluitende afvoerverdeling in een splitsende rivier (**Figuur 3, rechtsonder**).

Relevant voor wie en waar?

Beleidsmakers, onderzoekers en anderen die betrokken zijn bij het ontwerpen en plannen van ingrepen in rivieren.

Voortgang en toepassing

Rekening houden met de interactie tussen rivierwaterstanden en de afvoerverdeling reduceert de onzekerheid in waterstanden sterk in het hele riviersysteem benedenstrooms van splitsingspunten. Deze interactie zorgt bijvoorbeeld voor een afname van de afvoer naar een tak als daar een onverwacht hoge waterstand optreedt. Dit balancerende effect is sterk afhankelijk van de relatieve grootte van de benedenstroomse riviertakken. Voor de Rijn betekent dit dat de stromingscondities in de Waal de onzekerheden in de waterstanden in alle benedenstroomse takken domineren. De condities op de andere takken, voornamelijk de IJssel, hebben maar een zeer beperkte invloed op de waterstanden in de andere takken. Verder laat het onderzoek zien dat er rekening gehouden moet worden met de afvoerverdeling bij het plannen van nieuwe ingrepen in de rivier. Een compenserende ingreep in een andere tak om negatieve effecten op de afvoerverdeling te voorkomen is idealiter van hetzelfde type, bijv. twee uiterwaardvergravingen. Anders kan het zo zijn dat bij middelhoge afvoeren of juist bij zeer extreme afvoeren er een sterke afwijking van de afvoerverdeling ontstaat. U kunt via de **projectresultaten op de volgende pagina** meer details vinden over het onderzoek.

Aanbevelingen voor de praktijk

- Beschouw een splitsende rivier als één systeem waarbij waterstanden en afvoeren afhankelijk van elkaar zijn.
- Neem de waterbalans expliciet mee bij het afleiden van relaties tussen waterstand en afvoer.
- Meet afvoeren in meerdere takken op dezelfde dag om de waterbalans mee te kunnen nemen en de nauwkeurigheid van de metingen beter te kunnen beoordelen.
- Bepaal het effect van onzekerheid in de afvoerverdeling op overstroomingsrisico's in het hele rivierensysteem.

Belangrijkste projectresultaten



Gensen, M.R.A., Warmink, J.J., Huthoff, F., Hulscher, S.J.M.H. (2020). [Feedback mechanism in bifurcating river systems: the effect on water-level sensitivity.](#)
Doi: 10.3390/w12071915

Gensen, M.R.A., Warmink, J.J., Huthoff, F., Hulscher, S.J.M.H. (2021). [Human interventions in a bifurcating river system: Numerical investigation and uncertainty assessment.](#)
Doi: 10.1111/jfr3.12762

Berends, K.D., Gensen, M.R.A., Warmink, J.J., Hulscher, S.J.M.H. (2021). [Multidecadal Analysis of an Engineered River System Reveals Challenges for Model-Based Design of Human Interventions.](#) Doi: 10.3390/civileng2030032



De Rijn en zijn splitsingspunten de Pannerdenschekop en de IJsselkop.



Foto's door Rijkswaterstaat, beeldbank.rws.nl



Storyline

Samenwerken met de splitsingspunten van de rivier

Over de mogelijkheid om meer vrijheid toe te laten voor de riviermanagers rond de splitsingspunten

Door Matthijs Gensen

Universiteit Twente

Een splitsingspunt in een rivier balanceert waterstandsvariaties vanuit benedenstroomse takken. In de Rijn in Nederland bepalen de condities in de Waal nabij het splitsingspunt grotendeels de variaties in waterstanden langs alle Rijntakken. De condities in de Nederrijn en IJssel kunnen slechts kleine waterstandsvariaties veroorzaken, waardoor we wellicht meer managementvrijheid hebben in deze takken, bijvoorbeeld voor een meer natuurlijke ontwikkeling van de uiterwaarden.

De splitsende Rijn

Vlak nadat de Bovenrijn Nederland binnenkomt, splitst deze in drie takken: de Waal, de Nederrijn en de IJssel. Op de splitsingspunten worden de

afvoer en de daarbij behorende overstromingsrisico's verdeeld over de takken. Zoals zoveel rivieren over de wereld, veranderen de Rijntakken voortdurend vanwege natuurlijke rivierdynamiek of door menselijk ingrijpen. Zulke veranderingen hoeven geen probleem te vormen, zolang we maar sturen op nieuwe kansen. In de laatste 20 jaar hebben we de traditionele aanpak van het verhogen van dijken aangepast door de rivier meer ruimte te geven, waarbij we ook ruimte hebben geboden voor recreatie en natuurontwikkeling. Nieuwe kansen blijven ontstaan. In het Hoogwaterbeschermingsprogramma worden bijvoorbeeld dijken versterkt om met een veranderd klimaat om te kunnen

Omslagfoto: Splitsingspunt in de rivier bij Pannerden. Foto door Rijkswaterstaat, beeldbank.rws.nl / Joop van Houdt.

gaan. Tegelijkertijd wordt er op landelijk en regionaal niveau gekeken of het versterken gepaard kan gaan met het strategisch ontwikkelen van de ruimte om de dijken.

Een strikte afvoerverdeling

Ondanks nieuwe kansen, blijven we heel strikt met de afvoerverdeling over de drie Rijntakken. In het Nederlandse beleid wordt de afvoer die elke tak moet krijgen heel precies gespecificeerd. Deze beleidsmatige afvoerverdeling bepaalt voor een Bovenrijnafvoer van $16.000 \text{ m}^3/\text{s}$ de afvoerverdeling met een precisie van $1 \text{ m}^3/\text{s}$. Elk jaar wordt er gekeken of met de huidige situatie rond de splitsingspunten de precieze afvoerverdeling wordt gevolgd.

Beperkte vrijheid voor riviermanagers

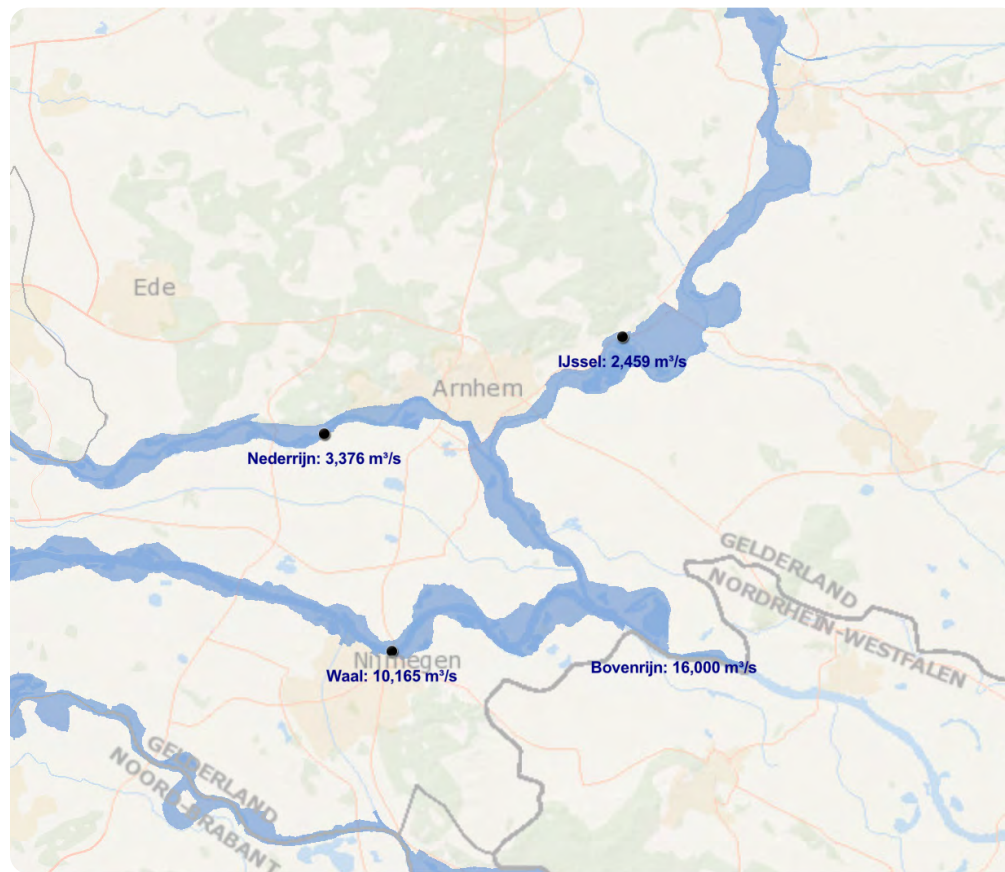
Het beleid bepaalt ook dat elk menselijk ingrijpen nabij een splitsingspunt niet tot een verandering van de afvoerverdeling van meer dan $5 \text{ m}^3/\text{s}$ mag leiden. Als deze limiet zou worden overschreden, moeten er aanvullende maatregelen worden genomen om dit te voorkomen. Deze striktheid beperkt de vrijheid van riviermanagers. De situatie rond de splitsingspunten moet zoveel mogelijk gelijkblijven, anders zouden te sterke afwijkingen van de beleidsmatige afvoerverdeling kunnen ontstaan. Mede daardoor wordt bijvoorbeeld de vegetatie nabij het splitsingspunt strikt onderhouden, waardoor natuurlijke ontwikkeling van vegetatie niet mogelijk is.

Het feedbackmechanisme tussen afvoerverdeling en waterstanden

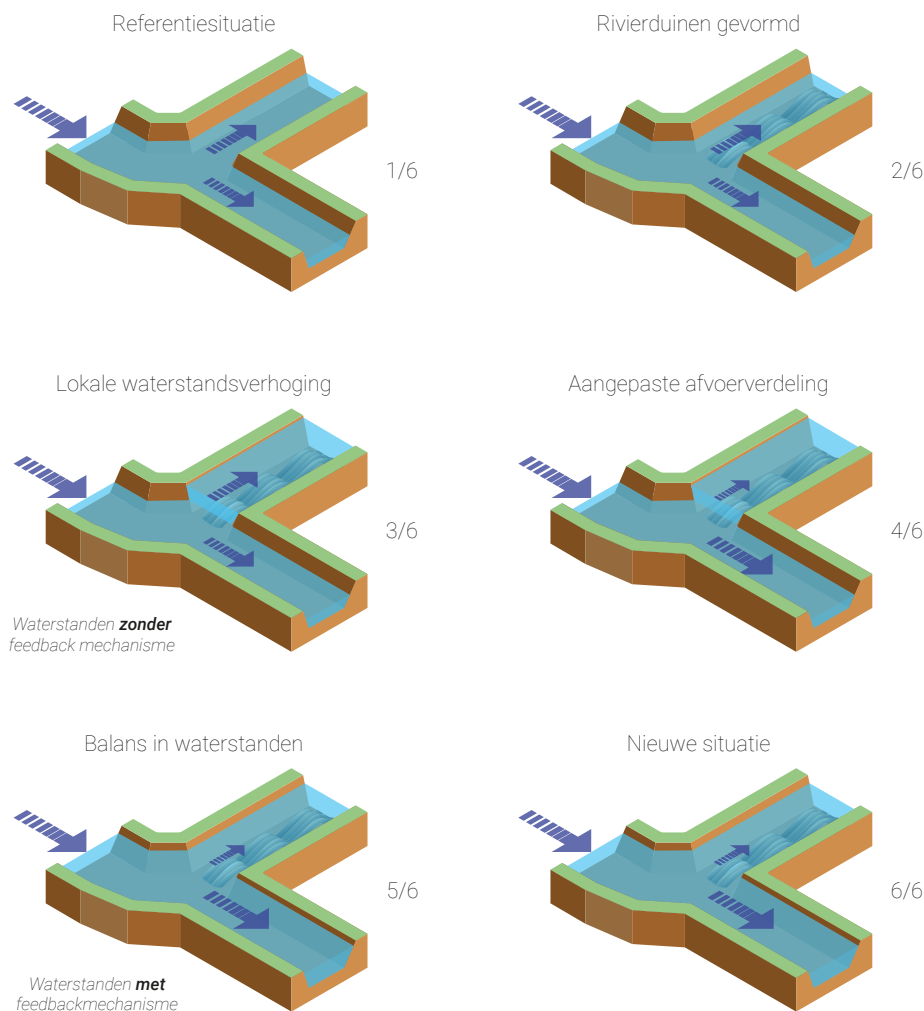
Op een splitsingspunt verdeelt de afvoer zich over de benedenstroomse takken. Bij middelmatige en hoge afvoeren zijn de Rijntakken vrij afstromende rivieren, waarbij de afvoerverdeling bepaald wordt door de waterstanden in de benedenstroomse takken. De afvoerverdeling bepaalt echter ook weer de waterstand, samen met andere riviercondities. De



Locatie van een toekomstige dijkversterkingsproject langs de Waal. Foto via dijkversterkingwolverensprok.nl.



Afvoerverdeling over de drie Rijntakken. Kaartdata van Esri, DeLorme, NaturalVue, NOAA OCS, geonames.org.



De effecten van het feedbackmechanisme vanuit een referentiesituatie waarbij er geen rivierduinen aanwezig zijn, tot een nieuwe situatie waarin er in een van de takken rivierduinen aanwezig zijn. Gebaseerd op schema's van Matthijs Gensen.

belangrijkste condities zijn o.a. (1) de geometrie van de rivierdoorsnede, (2) de stromingsweerstand/ruwheid van de rivierbodem veroorzaakt door de vorming van rivierduinen op de bodem, en (3) de ruwheid veroorzaakt door vegetatie in de uiterwaarden.

Het kwantificeren van variaties in waterstanden door veranderende condities

Als onderzoeker bij de Universiteit Twente onderzoek ik voor het All-Risk-programma onder meer hoe het feedbackmechanisme op splitsingspunten waterstandsvariates beïnvloedt. Ik heb een hydraulisch model gebruikt om de variaties in waterstanden in te schatten die ontstaan als gevolg van een verandering van de ruwheid in een van de takken. Ik heb hierbij twee modelbenaderingen toegepast: voor een “losse tak” en een “splitsende rivier”. Voor de “losse tak” wordt er een enkele tak gemodelleerd, waarbij het feedbackmechanisme dus niet actief is en de afvoer in de tak gelijk is aan die van de beleidsmatige afvoerdividing. Voor de “splitsende rivier” worden alle takken gemodelleerd, is het feedbackmechanisme actief en wordt de afvoerdividing dus vrijgelaten.

Variates in waterstanden

De figuur op de volgende pagina laten zien hoe de waterstanden in de “losse tak” en in de “splitsende rivier” veranderen als gevolg van een verandering van de ruwheid.

Hoge ruwheid in de Waal

Als zich hoge duinen vormen in de Waal, zullen de waterstanden in alle takken sterk stijgen. Bij Nijmegen kan er een waterstandsstijging ontstaan van 45 cm als het feedbackmechanisme niet actief is. Deze stijging wordt gehalveerd als het feedbackmechanisme wel actief is, waarbij we grote stijgingen van de waterstanden langs de IJssel en Nederrijn zien.

Hoge ruwheid in de Nederrijn

Als zich hoge duinen vormen in de Nederrijn, zullen er kleine waterstandsvarianties plaatsvinden. Zonder het feedbackmechanisme, zal de waterstand bij Driel met 17 cm stijgen. Dit wordt gereduceerd tot slechts 4 cm als het feedbackmechanisme actief is, waarbij de waterstand in de IJssel met 9 cm zal stijgen.

Hoge ruwheid in de IJssel

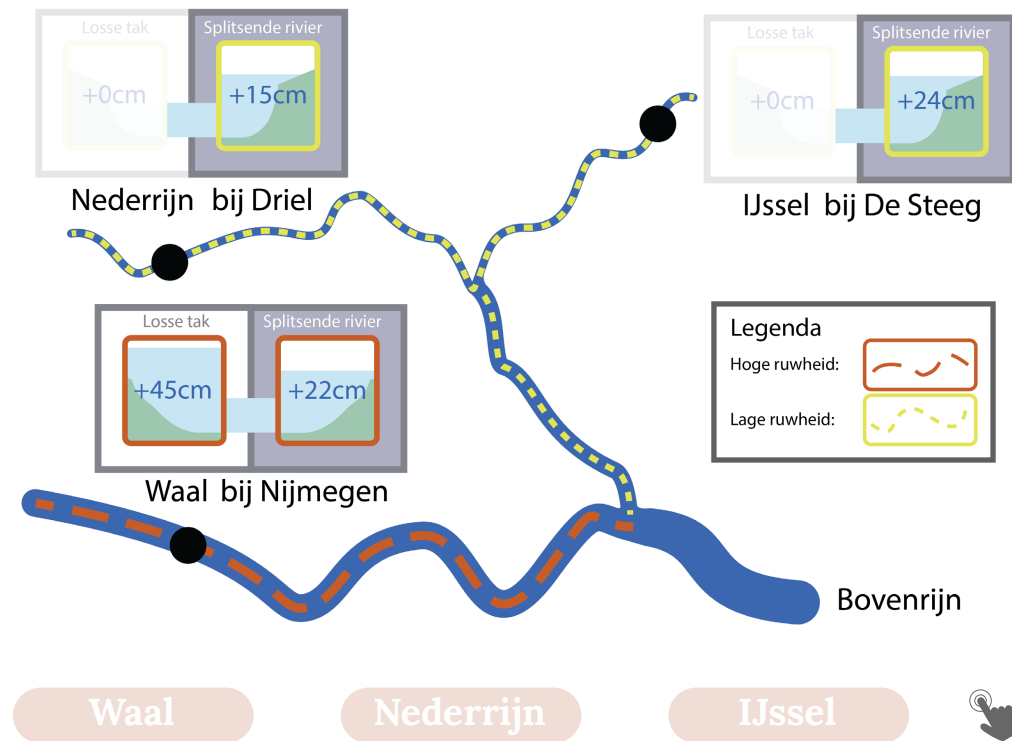
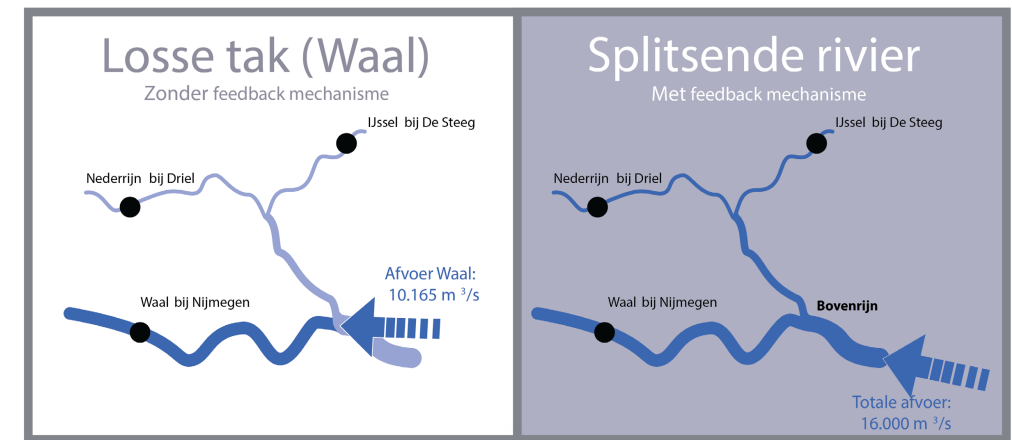
Als zich hoge duinen vormen in de IJssel, zullen de waterstandsvarianties iets hoger zijn dan bij duinvorming in de Nederrijn. Nog steeds zijn die variaties kleiner dan die worden veroorzaakt door duinen in de Waal. Als het feedbackmechanisme actief is, worden de waterstandsvarianties in de IJssel sterk gereduceerd.

Nieuwe inzichten uit het onderzoek

De ruwheid in de Waal bepaalt voor een groot deel de waterstanden langs alle Rijntakken. Omdat de Waal de grootste Rijntak is, is deze beter in staat om de afvoerverdeling te sturen dan de andere twee takken. Daarom zijn de waterstandsvarianties die ontstaan door de condities in de Nederrijn en IJssel veel kleiner. Als we deze verschillen erkennen, is het logisch dat de condities in de Waal strikt gehandhaafd worden. Aan de andere kant, zouden we wellicht meer ruimte kunnen nemen voor de condities in de Nederrijn en IJssel. Daarbij wordt wel opgemerkt dat er in dit onderzoek gefocust is op de ruwheid van de rivierbodem. Afhankelijk van de ruimtelijke schaal kunnen bij veranderende condities in de uiterwaarden andere waterstandsvarianties optreden.

Twee beperkingen met de beleidsmatige afvoerverdeling

Op basis van mijn onderzoek, denk ik dat de beleidsmatige afvoerverdeling momenteel te strikt is en dat we het zouden moeten hebben over hoe meer flexibiliteit in de afvoerverdeling ervoor kan zorgen dat er nieuwe



Verandering in waterstand naar aanleiding van veranderingen in ruwheid voor een enkele riviertak en een splitsende rivier. Gebaseerd op schema's van Matthijs Gensen.

kansen ontstaan voor de korte termijn (bijv. minder restricties op de ontwikkeling van vegetatie) en op de lange termijn (bijv. een meer kosteneffectieve afvoerverdeling). In denk dat er specifiek twee beperkingen zijn met de beleidsmatige afvoerverdeling:

- Ten eerste zouden we echt duidelijk moeten maken dat we de afvoerverdeling niet zo specifiek kunnen bepalen zoals we dat zouden willen. De condities in de rivieren die optreden bij ontwerpcondities van de dijken kennen we niet. Daardoor zou de daadwerkelijk optredende afvoerverdeling sterk kunnen afwijken van de beleidsmatige afvoerverdeling.
- Ten tweede denk ik dat we eerder zouden moeten kijken naar variaties in waterstanden dan naar de afwijkingen van de afvoerverdeling. Mijn onderzoek heeft laten zien dat een afwijking in de afvoerverdeling in verschillende takken tot andere waterstandsvariaties leiden. Momenteel kijken we vooral naar de afwijking van de afvoerverdeling in plaats van de waterstandsvariaties, waardoor we mogelijk kansen missen om ons riviermanagement te verbeteren. Zolang de waterstandsvariaties klein blijven, zou een afwijking van de afvoerverdeling misschien toelaatbaar moeten zijn.

Een splitsingspunt kan onze vriend zijn

Ik denk dat we het meer moeten hebben over hoe we met de splitsingspunten kunnen samenwerken in plaats van er enkel restricties aan op te leggen. We moeten erkennen dat we waterstanden en afvoerverdeling niet precies kunnen voorspellen. Het zijn echter de splitsingspunten die ons helpen om de grootste variaties in waterstanden in te perken. Daarmee hoeft een splitsingspunt geen vijand te zijn, maar kan die juist onze vriend zijn!

Meer lezen over dit onderzoek?

Scan de QR code of klik erop om de storyline online te bekijken.



Deze storyline is gebaseerd op de volgende vrij toegankelijke publicaties:

- Gensen, M.R.A., Warmink, J.J., Huthoff, F., Hulscher, S.J.M.H., 2020. Feedback Mechanism in Bifurcating River Systems: the Effect on Water-Level Sensitivity. *Water* 12, 1915. Doi: [10.3390/w12071915](https://doi.org/10.3390/w12071915)
- Projectsamenvatting "[B3 - Grootschalige onzekerheid in rivierwaterstanden](#)"

Dankwoord

Dit onderzoek is onderdeel van het Perspectief-programma All-Risk met projectnummer P15-21, welke (gedeeltelijk) is gefinancierd door NWO-TTW, in samenwerking met de volgende private en publieke partners: Rijkswaterstaat, Deltares, STOWA, HKV, Natuurmonumenten, Waterschap Noorderzijlvest, Waterschap Vechtstromen, It Fryske Gea en Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier. We danken Bert Voortman (Rijkswaterstaat), collega's bij de Universiteit Twente, Tjerk Westerduin (ontwerper) en Juliette Cortes (All-Risk-redactie) voor hun input bij het ontwikkelen van deze storyline.



Hoogwater in de Waal, 1995. Foto door Matthijs Kok.

Overstromingsrisico langs de Rijntakken:

Risico's van overstromingen langs de grote rivieren vragen continu onze aandacht. Daarbij spelen vele oorzaken een rol, en in dit webinar vragen we aandacht voor nieuw onderzoek naar de rol van twee van deze oorzaken: de twee splitsingspunten van de Rijntakken en de rol van het faalmechanisme piping. Kan aannemelijk worden gemaakt dat één van beide oorzaken dominant is?

Wilt u de presentaties van de onderzoekers terugzien? Dat kan door op **de QR code te klikken of deze te scannen.**



Reflectie

Grootste risico rivieren: splitsingspunt of piping?

Webinar team

Moderator



Matthijs Kok
Technische Universiteit Delft

Sprekers



Matthijs Gensen
Universiteit Twente

Introductie

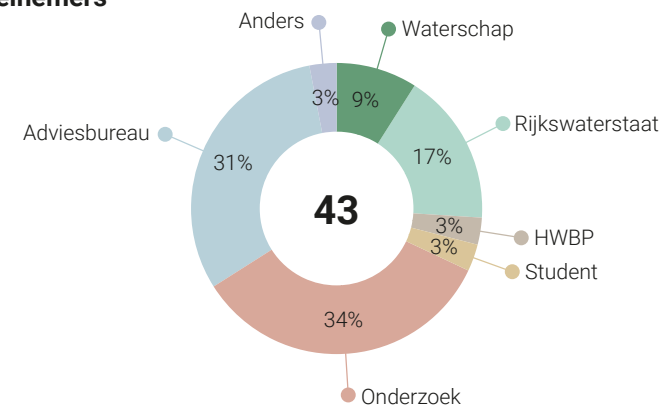


Henk van Hemert
Rijkswaterstaat

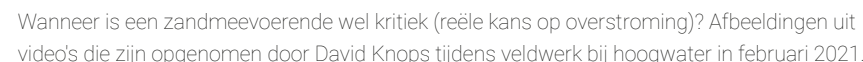


Joost Pol
Technische Universiteit Delft

Deelnemers



De discussie

[illegible]

Tijdens het webinar is aangegeven dat er vele onzekerheden bestaan over het gedrag van de afvoer bij de splitsingspunten en het effect van piping op de overstromingskans, en de vraag doet zich dan ook voor of deze onzekerheden in voldoende mate zijn afgedekt door de huidige ontwerppraktijk. Het antwoord op deze vraag is voor beide onderzoeken verschillend. Over het algemeen wordt aangenomen dat de onzekerheid in de afvoerverdeling bij de splitsingspunten voldoende wordt afgedekt. Hoe groot de onzekerheid is, is echter moeilijk te kwantificeren. Bij piping wordt veel parameteronzekerheid afgedekt door te rekenen met



4 Splitsingspunten



21 Piping



3 Weet ik niet

0 Beide even groot

0 Beide
verwaarloosbaar

Welke onzekerheidsbron levert de grootste bijdragen aan de huidige overstromingskans?

kansverdelingen of veilige rekenwaarden. Fundamentelere onzekerheden over hoe het pipingproces in de praktijk werkt worden doorgaans niet gekwantificeerd, maar afgedekt door veilige uitgangspunten te hanteren. Sturing van afvoerverdeling tijdens hoogwater leverde een interessante discussie op. Bijna alle deelnemers geven aan dat actieve sturing van de afvoerverdeling tijdens een hoogwater overstromingsrisico's in belangrijke mate kan verkleinen. De helft van de deelnemers zegt daarom dan ook dat dit overwogen moet worden als maatregel. Een kwart van de deelnemers zegt echter dat actieve sturing niet wenselijk is vanuit een ethisch oogpunt. Want waar ga je dan extra afvoer heen sturen? En wie is dan daarvoor verantwoordelijk? Bij de stelling "Welke strategie om risico's en (kennis)onzekerheden af te dekken is het verstandigst?" koos geen van de aanwezigen voor "Stevigere dijken". Opvallend. Is er een anti-versterksentiment? Met onderzoek en metingen kan het risico zoals we dat berekenen, wel verkleind worden, maar ook onderzoek levert niet altijd dit gewenste resultaat, en kan ook verrassingen opleveren.



12 Splitsingspunten



4 Piping



5 Weet ik niet

0 Beide even groot

2 Beide
verwaarloosbaar

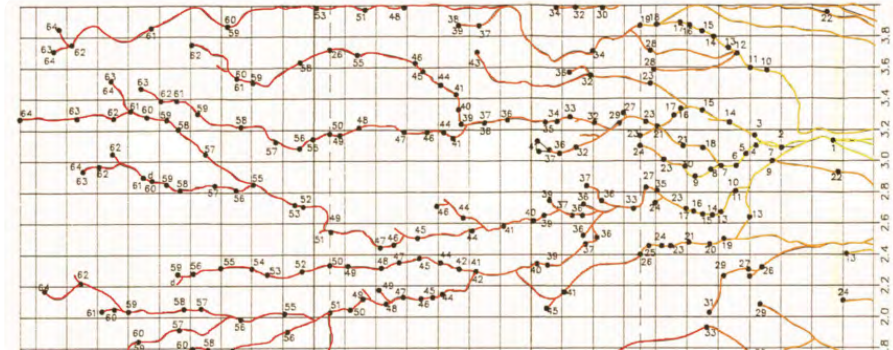
Welke onzekerheidsbron levert de grootste bijdragen aan de overstromingskans als alle keringen versterkt zijn en aan de norm voldoen?

Antwoord op de algemene vraag

Het antwoord op de vraag of piping of – in de huidige situatie – de splitsingspunten nu voor het grootste risico zorgen, werd door de deelnemers van het webinar duidelijk beantwoord: door 5 keer zoveel mensen werd aangegeven dat piping voor het grootste risico zorgt, met als reden dat piping ook al bij minder hoge afvoeren voor problemen kan zorgen. Door degenen die de splitsingspunten als grootste bron aanwezen werd aangegeven dat een andere afvoerverdeling op een hele Rijntak voor problemen kan zorgen, en dan ook nog voor alle faalmechanismen (dus ook voor piping!). Voor de toekomstige situatie werd dit geheel anders ingeschat: er wordt van uitgegaan dat de dijkversterkingen effectief zijn en dat daardoor de kans op piping daarna zo klein wordt dat het geen dominante rol meer speelt, maar dat de onzekerheid rond het splitsingspunt blijft.

Piping vertoont soms ook splitsingspunten op microschaal

De splitsingspunten zijn op grote schaal te zien bij de Rijntakken in Nederland, maar splitsingspunten zie je soms ook op microschaal bij piping. In de figuur rechts is dat goed te zien. Deze opname is afkomstig uit een pipingproef in de Deltagoot van het Waterloopkundig Laboratorium in 1991, en het patroon van vele splitsingspunten kan verbazingwekkend genoeg gezien worden voordat zich een doorgaande 'pipe' ontwikkelt.



Opname van een pipingproef uit 1991. Afbeelding uit [Silvis \(1991, appendix 15\)](#).

All-Risk-aanbevelingen:

- Piping: dijkversterking in combinatie met kennisontwikkeling is belangrijk. Maar investeer ook in goede monitoring van zand-meevoerende wellen, handvatten voor interpretatie en prioritering en snelle beheersmaatregelen.
- Bij piping is het van belang om de tijdsduur van de hoogwatergolf mee te nemen. Een kortdurende golf levert namelijk minder risico op dan een langdurende belasting. Dit onderscheid is ook van belang voor de kust omdat daar de duur van het hoogwater relatief kort is.
- Splitsingspunten: kennisontwikkeling over de afvoerverdeling bij hoge afvoeren is belangrijk om faalkansen nauwkeurig te bepalen.

Daarbij is het wel relevant om aan te geven dat de splitsingspunten effectief verstoringen in waterstanden dempen en dus voor een balans in waterstanden zorgen langs de verschillende takken. In de toekomst, wanneer alle dijken aan de normen voldoen, zal de onzekerheid in afvoerverdeling een belangrijke bron van onzekerheid blijven. Wel wordt bij het ontwerpen van dijken langs de Rijntakken rekening gehouden met deze onzekerheid.

- Aanbevolen wordt om de onzekerheid in dijkversterkingen in samenhang te beschouwen met de onzekerheid van de ruwheid, omdat verstoringen van de afvoerverdeling veroorzaakt kunnen worden door ruwheidsverschillen.



Een dijk in het waddengebied, beschermd door een voorliggende kwelder. Foto door Beatriz Marin-Diaz.

Het thema:

Kwelders zijn begroeide buitendijkse voorlanden die in het zuiden van Nederland schorren worden genoemd. In de 19^e en begin 20^e eeuw werden kwelders in de noordelijke provincies vooral aangelegd ten behoeve van een agrarische functie. Een recente analyse van historische watersnoodrampen door [Zhu et al. \(2020\)](#) toonde dat dijken met voorlanden aanzienlijk minder kwetsbaar zijn voor dijkdoorbraken tijdens stormen, en dat de bressen veel minder diep worden als het wel mis gaat. Een kwelder voor een dijk draagt dus op meerdere manieren bij aan de veiligheid.

Wilt u de presentaties van de onderzoekers terugzien? Dat kan door op **de QR code te klikken of deze te scannen**.



Reflectie

Voorlanden: nuttig voor beheersbare waterveiligheid of alleen mooie natuur?

Webinar team

Moderator



Tjeerd Bouma
NIOZ – Koninklijk Nederlands Instituut voor Onderzoek der Zee

Sprekers



Beatriz Marin Diaz
NIOZ / Universiteit Groningen

Introductie

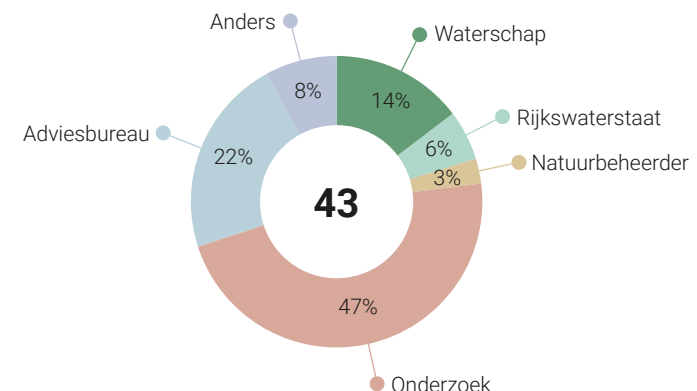


Jan-Willem Nieuwenhuis
Waterschap Noorderzijlvest



Christopher H. Lashley
Technische Universiteit Delft / IHE Delft

Deelnemers





Tijdens het All-Risk-webinar is ingegaan op (1) de effectiviteit van voorlanden voor golfdemping en het verlagen van de golfoploop op verschillende locaties in de Waddenzee, (2) hoe het beheer van voorlanden onzekerheden in de stabiliteit van deze systemen kan verminderen en (3) hoe laagfrequente (lange) golven (Infragravitiiegolven ofwel IG-golven) – door voorlanden worden beïnvloed.

Na de presentaties werd als eerste de vraag gesteld of kwelders gerestaureerd moeten worden op plekken waar de dijken het meest blootgesteld zijn aan golven. De meeste stakeholders vonden dat kwelderrestauratie een toegevoegde waarde heeft voor natuur en veiligheid, maar dat technische middelen nodig zijn voor de aanleg van kwelders op de meest golf-geëxponeerde locaties.

Vervolgens werd aangegeven dat het creëren van kwelders niet altijd een verbetering van de natuurwaarde is, aangezien kwelders een lagere natuurwaarde kunnen hebben dan de slikken die ze zouden vervangen. Hierdoor was er een tendens waarneembaar dat de waterschappen graag naar buitendijkse oplossingen kijken, terwijl natuurorganisaties meer kans zien voor binnendijkse oplossingen. Tot slot werd erop gewezen dat hoge voorlanden het meest waardevol zijn voor waterveiligheid, terwijl de lage voorlanden (zoals bijv. pioniervegetatie) vaak waardevoller zijn vanuit natuurwaarde bezien. Het creëren van een breed voorland waarin zowel hoge en lage voorlanden samen voorkomen, lijkt dus het meest wenselijk.

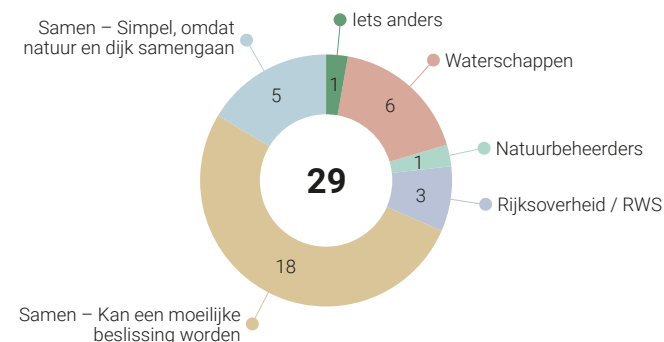
Vervolgens werd besproken wie verantwoordelijk zou moeten zijn voor het beheer van de voorlanden. Hieruit volgde dat waterschappen het liefst de uiteindelijke zeggenschap zouden hebben, gezien zij verantwoordelijk zijn voor de waterveiligheid, een primaire voorwaarde voor het voortbestaan van Nederland. Rijkswaterstaat ziet het liever als een nationale verantwoordelijkheid, omdat de Waddenzee een nationaal erfgoed is en de effecten van eventuele maatregelen gebiedsoverstijgend zijn. De natuurorganisaties zetten in op een gezamenlijke aanpak, zodat naast het waterveiligheidsbeheer ook het natuurbeheer wordt ingebed. Een belangrijke opmerking vanuit de hoek van de aannemers was dat het beheer ook haalbaar moet zijn in lange termijn onderhoudscontracten. Er wordt

steeds vaker gevraagd naar contracten waarin de aanleg en het onderhoud van het waterkerende systeem gezamenlijk worden geoffreerd. Dan moeten eventuele werkzaamheden aan het voorland ook binnen het contract mogen, als dit onderdeel maakt van het waterkerende systeem.

Welke type monitoring zou er moeten worden toegepast?

Naar aanleiding van de presentaties werd besproken welke monitoringsstrategieën effectief zouden zijn. De meningen liepen uiteen of het wel nuttig zou zijn om IG-golven te meten, aangezien hun effect gering lijkt te zijn in vergelijking tot de overige onzekerheden in het berekenen van de faalkans van dijken. De metingen zijn relatief prijzig en er is relatief weinig kennis over het interpreteren van IG-golven. Eerst zouden bestaande datasets van golfboeien beter geanalyseerd moeten worden. Hier stond tegenover dat veel deelnemers hechten aan het principe *meten is weten*. Indien er in de toekomst specifiek gemeten zou gaan worden aan IG-golven, dan is het belangrijk dat minimaal op twee locaties te doen: een gebied waar veel IG-golven verwacht worden en een gebied waar we gebaseerd op de huidige kennis geen effect van IG-golven verwachten. Overigens loopt in de Eems-Dollard het zeer lang lopende project Meerjarige Veldmetingen Eems-Dollard. Hier worden op twee locaties (Uithuizerwad en Dubbele Dijk) vlak voor de dijk de golfcondities gemeten, inclusief lange golven en wordt middels bakken in de dijk de golfoverslag gemeten.

De deelnemers waren positiever over het doorgaan met het impliciet meten van de golfoploop middels veekranden. Daarbij werd wel aangegeven dat er geen noodzaak is om continu te meten. Er moeten eenduidige protocollen beschikbaar zijn om direct na grotere stormen met hoge waterstanden te gaan meten, om kennis op te bouwen over die stormen die het minste voorkomen. Er werd aangegeven dat alternatieve meetmethodes onderzocht kunnen worden om de haalbaarheid van meer



Deelnemers reacties op de vraag wie over het beheer van voorlanden zou moeten beslissen?

metingen te verhogen. Dit was aanleiding voor een levendige discussie onder de waterschappers. Iedereen is het er over eens dat metingen onmisbaar zijn voor een solide kennisbasis, maar dat de meet- protocollen meer gestandaardiseerd zouden moeten worden tussen de verschillende waterschappen en overige partijen.

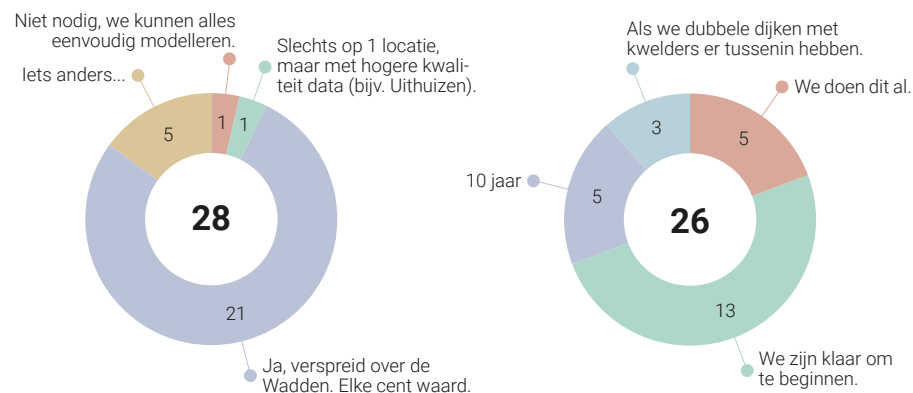
Waar zitten de kennisleemtes?

Ten slotte werd er besproken in hoeverre er nog kennisleemtes bestaan die het onmogelijk maken om kwelders mee te nemen in het ontwerpen en uitvoeren van kustbeschermingssystemen. De meerderheid van de deelnemers leek het er over eens te zijn dat er voldoende technische kennis is om kwelders toe te passen voor waterveiligheid. De deelnemers geven aan dat ze hier al mee gestart zijn of klaar zijn om te starten. Er zijn relatief weinig kennisgaten. De belangrijkste overgebleven kennisleemtes lijken te zijn dat er weinig veldmetingen zijn over de golfdemping tijdens maatgevende stormen en dat de langetermijnstabiliteit van kwelders nog slecht begrepen is.

De natuurbeheerders benadrukken dat ze de voorkeur geven aan een dubbeldijksysteem met landwaarts aangelegde wisselpolders boven

buitendijkse oplossingen. Dit om de unieke natuurwaarde van de buitendijkse getijdeplaten te behouden. En omdat deze beschermd zijn door Europese wetgeving, zullen grootschalige buitendijkse ingrepen moeilijk zijn te realiseren. Waterveiligheid is echter zwaar verankerd in de Nederlandse wetgeving. Juridisch maatwerk lijkt daarom noodzakelijk om op dit dossier verder te komen. Ondanks de soms tegengestelde visies, lijken er toch vooral veel kansen te liggen in het herkennen van gezamenlijke belangen. Toekomstig onderzoek moet zich daarom richten op hoe die gezamenlijke belangen kunnen worden gerealiseerd en vooral ook praktisch worden uitgewerkt.

De overkoepelende conclusie was dat het gebruik van voorlanden voor waterveiligheid weliswaar uitdagend is, maar vooral veelbelovende kansen biedt om de (deels) samengaande doelen ten aanzien van waterveiligheid en natuur te realiseren. Voorlanden die bestaan uit kwelders/



Reacties van deelnemers op twee vragen - **Links:** Zou het zinvol zijn om langs de hele Waddenkust door te gaan met het meten van golven en golfoploop middels vloedmerkfazettingen, om zo onzekerheden in kennis over golfdemping te verminderen? **Rechts:** Hoe lang duurt het voordat we vooroevers actief kunnen mee ontwerpen, als integraal onderdeel van een kustverdedigingsplan?

schorren met daarvoor onbegroeide getijdeplaten, bieden een aantrekkelijk perspectief voor het daardwerkelijk implementeren van de veel besproken nature-based solutions. Implementatie vergt een fundamenteel begrip van het totale systeem, om middels de juiste maatregelen de gewenste voorlandtypes op de gewenste plek te krijgen en zo te beheren, dat zowel de natuur als waterveiligheid sterker worden.

All-Risk-aanbevelingen:

- De inpasbaarheid van begroeide voorlanden (kwelders/schorren) voor waterveiligheid biedt veel kansen, maar roept ook vragen op over wie eindverantwoordelijk moet zijn voor het beheer. Het zou goed zijn om pilots te starten, en zo praktische ervaring op te doen met co-management.
- Investeer in het ruimtelijk-expliciet meten van golven, golfdemping en golfoploop en -overslag langs de gehele Waddenkust, en vergelijk daarbij gebieden met en zonder begroeide voorlanden, en met en zonder onbegroeide getijdeplaten. Leg bij deze metingen de focus op de zeldzame sterkste (maatgevende) stormen.
- Het is belangrijk te blijven leren over (1) hoe kwelders aan te leggen op golf-geëxposeerde plekken en (2) de processen die de lange termijn dynamiek van kwelders sturen.
- Omdat de aanleg van kwelders voor waterveiligheid niet overal buitendijks mogelijk zal zijn, is het belangrijk nu ook al gedegen kennis op te bouwen over de aanleg van binnendijkse oplossingen zoals wisselpolders tussen dubbeldijksystemen.



Onderzoek van de deklaag met Ground Penetrating Radar (GPR) op De Gijsterdijk in Nationaal Park De Biesbosch. Foto door Juan Chavez Olalla.

Hoofdstuk 4

Heterogeniteit in de ondergrond

Introductie

Door Hans Middelkoop

Verschillende faalmechanismen van dijken zijn gerelateerd aan de ondergrond. Piping onder een dijk is direct afhankelijk van de lithologie van de ondergrond, die de grondwaterstroming en de mogelijke vorming van piping bepaalt. Andere mechanismen, zoals afschuiven op het dijkwal, hangen vooral samen met de lokale grondwaterstanden en veranderende waterspanningen in het dijklichaam die ontstaan tijdens perioden van hoogwater. Daarnaast kan de vorming van diepe erosiekuilen in de riviergeul indirect de stabiliteit van de rivieroever en ook de dijk bedreigen, vooral waar de geul dicht langs de dijk ligt. Het is duidelijk dat modellen die worden gebruikt voor de beoordeling van de dijkstabiliteit informatie vereisen over de eigenschappen van de ondergrond, maar die vertonen een grote ruimtelijke heterogeniteit. Te eenvoudige schattingen van "gemiddelde" eigenschappen van de ondergrond



kunnen leiden tot te ruime ontwerpnormen, terwijl gedetailleerd plaatselijk onderzoek van de eigenschappen van de ondergrond duur is.

Het project "Heterogeniteit in de ondergrond" beoogt risicobeoordelingen te ondersteunen door een betere beoordeling van de heterogeniteit van de ondergrond, het leggen van verbanden tussen heterogeniteit van de ondergrond en dijkopbouw en het inzetten van nieuwe geofysische onderzoeksmethoden.

In project [C1](#) heeft Bas Knaake kennis over de natuurlijke ontwikkeling van de Rijn-Maasdelta omgezet in 3D-modellen van de ondergrond en relevante materiaaleigenschappen. Hij identificeerde kritische omstandigheden in de ondergrond voor de vorming van diepe erosiekuilen in de rivierbodem door uitschuring, en bepaalde waar de ondergrondsamenstelling de rivieroever gevoelig maakt voor zettingsvloeiing. Door dit te combineren met de kritische eigenschappen van de ondergrond voor piping, kreeg hij een overzicht op deltaschaal van de invloed van de ondergrond op het faalpotentieel van dijken.

Teun van Woerkom bepaalde in project C2 het relatieve belang van dijkgeometrie, drainagecondities en materiaaleigenschappen bij dijkdoorbraak met behulp van een hydrostabiliteitsmodel. Hij hield daarbij ook rekening met onzekerheden in de belasting door rivieroverstromingen. Hij ontwikkelde een model dat de opbouw van de dijk reconstrueert op basis van de dijkgeschiedenis, bekende dijkprofielen en lokale boor- of sondeergegevens om realistischere schattingen van dijkopbouw en bezwijkmogelijkheden te verkrijgen.

Juan Chavez Olalla onderzocht in project C3 geofysische onderzoeksmethoden voor het documenteren van dijkmaterialen en van de ondergrond onder de dijken. Hij testte methoden gebaseerd op Electrical Resistivity Tomography (ERT), Frequency Domain Electromagnetics (FDEM), en Ground Penetrating Radar (GPR) data. Hij gebruikte gedetailleerde lithologische

dwarsdoorsneden, bepaald in het veld, voor het testen en de validatie van statistische methoden om geofysische signalen om te zetten in fysische eigenschappen van bodems voor een bepaalde geologische omgeving.

Onze resultaten leiden tot drie belangrijke aanbevelingen voor de praktijk. Ten eerste verschaft kennis van de natuurlijke ontwikkeling van de Rijn-Maasdelta waardevolle inzichten in de verwachte variabiliteit van eigenschappen van de ondergrond voor overstromingsrisicobeoordelingen. Toch blijft de lokale variabiliteit binnen sedimenttypes groot, waardoor directe voorspelling van materiaaleigenschappen onmogelijk is. Niettemin kan deze informatie gebruikt worden om boorcampagnes en sonderingen efficiënt in te zetten, juist op die plekken waar zich kritische omstandigheden in de ondergrond kunnen voordoen.

Ten tweede, verbetert een beter begrip van de grondwaterstroming onder en in rivierdijken de schattingen van de drukcondities tijdens rivieroverstromingsfasen aanzienlijk, omdat het daardoor mogelijk is rekening te houden met de heterogeniteit en gelaagdheid van het rivierdijkmateriaal en de veranderende rivierwaterstanden tijdens een overstromingsgolf. Door historische informatie over dijkversterking te combineren met boorgegevens ter plaatse kan de schematisering van de lokale dijkopbouw voor faalrisicobeoordelingen aanzienlijk worden verbeterd.

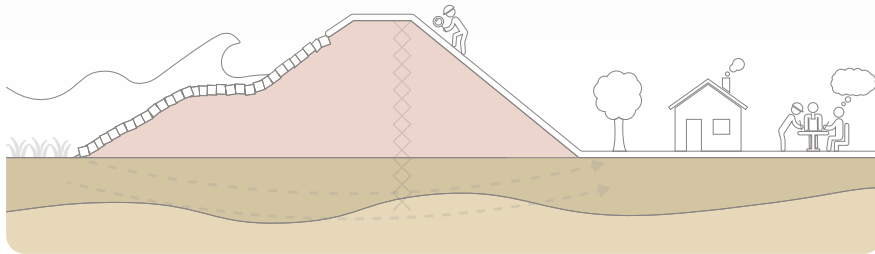
Ten derde kan de opbouw van de ondergrond worden vastgelegd in geofysische gegevens. Het detailniveau van de informatie is kleiner dan bij sonderingen, maar het levert een aaneengesloten beeld van de ondergrond. Bestudering van de patronen in geofysische gegevens maakt het mogelijk de geologische opbouw uitvoeriger te beschrijven. Het maakt het met name mogelijk kleine lithologische anomalieën op te sporen die onzichtbaar zijn vanaf het oppervlak of in sonderingstransecten.



Projectsamenvatting

C1 - Ondergrondgerelateerde faalmechanismen van dijken

Kwantitatief onderzoek naar de architectuur van de ondergrond en variabiliteit voor betere inschattingen voor faalmechanismen



Uitkomst

Dit project heeft betere kwantitatieve schattingen opgeleverd van regionale en lokale variabiliteit binnen verschillende typen afzettingen (zogenoemde architecturale elementen). De architectuur van de ondergrond en gerelateerde afzettingscondities spelen een belangrijke rol, bijvoorbeeld bij erosiekuilen in de rivierbedding of zettingsvloeiingslocaties in de rivieroever nabij dijken in de Rijn-Maasdelta. Relevante geotechnische eigenschappen tonen aanzienlijke verschillen op lokale schaal wat kan leiden tot kritieke verschillen in ondergrondskarakteristieken. Deze karakteristieken zijn noodzakelijk voor ondergrondschematisaties bij risicobeoordelingen om tot realistischere parameterwaarden te komen en gerelateerde onzekerheden te verkleinen. Dit

Door Bas Knaake

Universiteit Utrecht



Project start: 12/2017

Project einde: 11/2021

Promotoren

Prof. dr. H. Middelkoop

Universiteit Utrecht

Dr. K.M. Cohen

Universiteit Utrecht

Prof. dr. E. Stouthamer

Universiteit Utrecht



Figuur 1: Veldwerk en verzameling van ondergronddata. Foto door Bas Knaake.

zorgt ook voor een efficiënter gebruik van beschikbare middelen door dataverzameling te focussen op de kritische plekken binnen een dijk-segment voor een faalmechanisme.

Motivatatie en uitdagingen

Verschillende faalmechanismen zijn gerelateerd aan de opbouw van de ondergrond die grote ruimtelijke variabiliteit laat zien (**zie foto's in Figuur 1 en 2**). Bestaande risicobeoordelingsmethoden bouwen op gesimplificeerde ondergrondeigenschappen. Door de afzettingsgeschiedenis zijn er systematische patronen binnen deze eigenschappen te herkennen. Geologische karakterisaties en reconstructies kunnen belangrijke context geven voor schattingen van relevante ondergrondparameters waardoor onzekerheden worden verkleind.

Als aardwetenschappers bestuderen wij de sedimentologie en genese van de ondergrond en de daaraan gerelateerde processen. Dit project is daardoor zeer geschikt om deze kennis te integreren met kennis over verschillende faalmechanismen om te zien hoe de ondergrond hierbij een rol speelt. Deze kennis is van belang voor het ontwerpen van dijken, omdat ze informatie toevoegen over de eigenschappen van de dijk.

Doel van het onderzoek

Dit project integreert bestaande kennis en informatie over de ondergrond in de Rijn-Maasdelta in Nederland die belangrijk is voor faalmechanismen van dijken.

Innovatieve componenten

De focus van dit project ligt op faalmechanismen als (1) erosiekuilen en (2) zettingsvloeiing van rivieroeveren (**Figuur 3, links**). We kijken naar de relatie tussen deze processen en de opbouw van de ondergrond



Figuur 2: Veldwerk en verzameling van ondergronddata die de primaire input vormen voor ondergrondschematisatie en reconstructie. Foto's door Bas Knaake.

zoals oude stroombanen van rivieren (**Figuur 3, midden**). In dit project bepalen we locaties van erosiekuilen in de huidige rivierlopen in de Rijn-Maasdelta (**Figuur 3, rechts**) en maken we gebruik van een database van historische zettingsvloeiingen.

We vergelijken locaties waar erosiekuilen voorkomen met geologische karteringen, zoals van oude rivierlopen. Ook gebruiken we hierbij 3D-modellen van de Geologische Dienst Nederland (<https://www.dinoloket.nl>) om regionale en lokale opbouw van de ondergrond bij deze locaties in kaart te brengen. Dit geeft belangrijke inzichten in de relevante eigenschappen van de ondergrond voor de faalmechanismen.

In een volgende stap ligt de focus op het karakteriseren van geologische en geotechnische eigenschappen van de verschillende architecturale elementen. Dit geeft inzicht in potentiële risicogebieden voor faalmechanismen wat kan leiden tot betere ontwerpen van dijken.

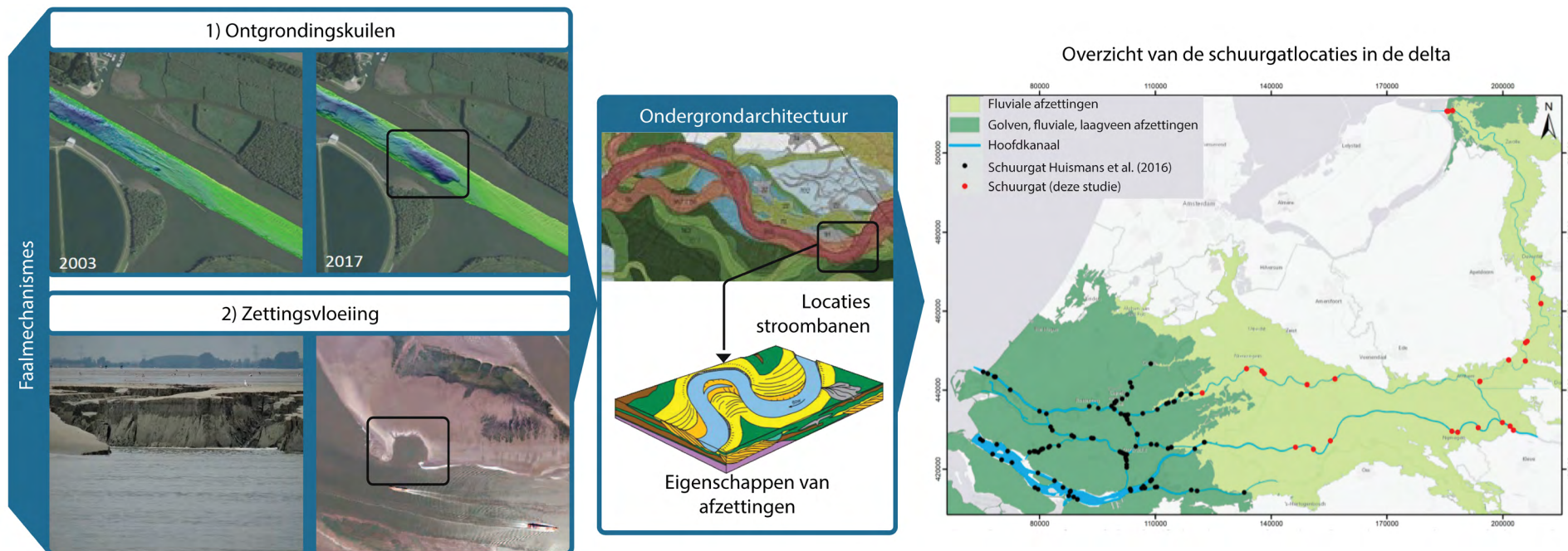
Relevant voor wie en waar?

De afzettingsgeschiedenis van de ondergrond kan adviseurs en organisaties helpen om potentiële risicogebieden voor faalmechanismen in kaart te brengen wanneer bepaalde maatregelen worden genomen in de rivier of dijken worden versterkt.

Voortgang en toepassing

De erosiekuilen in de Rijn-Maasdelta laten een duidelijke relatie zien met de opbouw van de ondergrond en afzettingsgeschiedenis. De benedenstroomse delta is gekarakteriseerd door een hoge afwisseling van

erodibiliteit van de ondergrond met als gevolg een sterke toename van het voorkomen van erosiekuilen. Deze relatie is met name duidelijk in de Dordtsche Kil, vlak bij Dordrecht, waar de ondergrondopbouw de lokale rivierdiepte sterk beïnvloedt. Als gevolg van de afzettingsgeschiedenis is het noordelijke deel gekarakteriseerd door een stugge, moeilijk erodeerbare kleilaag afgewisseld met zandlichamen van oude rivierlopen. Het zuidelijk deel is voornamelijk ingesneden in meer homogeen zand waardoor in het noordelijk deel lokaal erosiekuilen voorkomen in tegenstelling tot het zuidelijk deel. Voor details van de resultaten, zie de **projectresultaten op de volgende pagina**.



Figuur 3: Hoofdcomponenten van het onderzoek. Foto's zettingsvloeiing door Deltares, middelste figuur door Kim Cohen and rechter figuur aangepast van Gouw (2017). Overzichtskaart met locaties van erosiekuilen op basis van Huismans et al. (2016) en Knaake et al. (2019).

Aanbevelingen voor de praktijk

- Gebruik genetische kennis van de ondergrond en architecturale opbouw voor een meer regionale aanpak om tot realistische schattingen van parameterwaardes te komen en risicobeoordelingen minder gevoelig te maken voor lokaal gemeten uitschieters.
- Focus op goede parameterisatie (realistische parameterwaardes) van architecturale elementen voor risicobeoordelingen.
- Gebruik beschikbare ondergrondkennis voor een efficiëntere aanpak van nieuwe dataverzameling door te focussen op kritieke gebieden voor faalmechanismen.

Belangrijkste projectresultaten



Cox, J.R., Huismans, Y., Knaake, S.M., Leuven, J.R.F.W., Vellinga, N.E., van der Vegt, M., Hoitink, A.J.F. & Kleinhans, M.G. (2021). [Anthropogenic Effects on the Contemporary Sediment Budget of the Lower Rhine-Meuse Delta Channel Network](#). Doi: 10.1029/2020EF001869

Winkels, T.G., Cohen, K.M., Knaake, S.M., Middelkoop, H. & Stouthamer, E. (2021). [Geological framework for assessing variability in subsurface piping parameters underneath dikes in the Rhine-Meuse delta, the Netherlands](#). Doi: 10.1016/j.enggeo.2021.106362

Knaake, S.M., Straatsma, M.W., Huismans, Y., Cohen, K.M., Stouthamer, E. & Middelkoop, H. (in review). The influence of subsurface architecture on scour hole development in the Rhine-Meuse delta, the Netherlands.



Dit project focust op de hoofdtakken van de huidige Rijn-Maasdelta tot en met de Westerschelde. Aan de Dordtse Kil nabij Dordrecht (zie kaart) wordt gerefereerd in de voortgangresultaten.

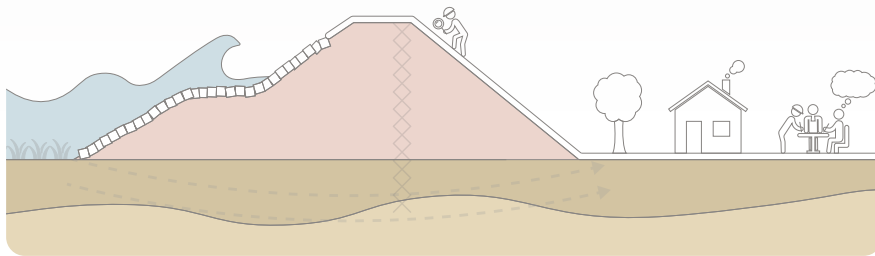
Dordtse Kil 'vluchthaven' kijkend richting Dordrecht. Foto door Rijkswaterstaat, beeldbank.rws.nl / Joop van Houdt.



Projectsamenvatting

C2 - Grondwatergerelateerde dijkveiligheid

Onderzoek naar de ruimtelijke en temporele variatie in ondergrond, grondwaterstanden en dijkstabiliteit



Uitkomst

Dit project leidt tot een beter begrip van de grondwaterstroming door en rond rivierdijken en verbeterde methoden voor het bepalen van grondwaterstanden bij hoge rivierwaterstanden. Er zijn nieuwe methoden ontwikkeld voor het bepalen van grondwaterstroming, gebaseerd op modellering die als alternatief dienen voor analytische benaderingen en de grondwatervoorspellingen nabij rivierdijken aanzienlijk kunnen verbeteren. Met de verbeterde methoden laten we zien hoe big data, historische dijkopbouw en freatisch grondwater vanwege variabele rivierwaterstanden kunnen worden meegenomen in de dijkveiligheidsbeoordeling.

Door Teun van Woerkom

Universiteit Utrecht



Project start: 09/2018

Project einde: 09/2022

Promotoren

Prof. dr. ir. M.F.P. Bierkens

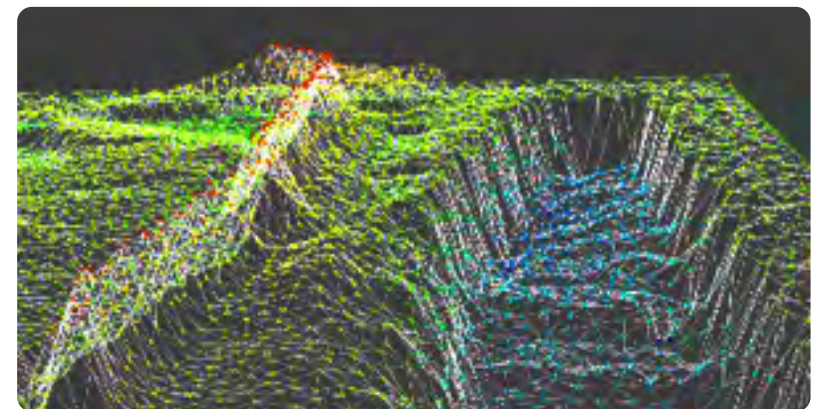
Universiteit Utrecht

Dr. L.P.H. van Beek

Universiteit Utrecht

Prof. dr. H. Middelkoop

Universiteit Utrecht



Figuur 1: Relatieve belang van dijkgeometrie, drainagecondities en materiaaleigenschappen bij dijkdoorbraak met hulp van een hydrostabiliteitsmodel. Afbeelding door Teun van Woerkom.

Motivatie en uitdagingen

In Nederland, een land waar de geschiedenis verweven is met hoogwaterveiligheid, zijn we ons bewust van de grote invloed die hoge rivierwaterstanden hebben op dijkdoorbraken. De invloed van hoogwater op de grondwaterstroming wordt veel minder begrepen door zowel waterbeheerders als bewoners, omdat het vaak geen zichtbaar proces is. Toch is het zo dat als er vanuit de rivier meer water door de ondergrond sijpelt, sloten binnendijs vollopen en akkers nat worden zonder dat er sprake is van een overstroming (**Figuur 2, boven**).

Grondwaterstroming en hoge waterspanningen zijn daarnaast van groot belang voor verschillende faalmechanismen van dijken, waaronder piping en dijkstabiliteit. Uiteraard hangt het effect van grondwater sterk samen met de variabele ondergrondeigenschappen. Vanwege de beperkte kennis en beschikbaarheid van gegevens over de ondergrond en het dijkmateriaal, wordt het grondwater echter vaak te simplistisch meegenomen. Omdat het proces ondergronds is, is visuele waarneming bovendien moeilijk en zijn veldgegevens voor validatie belangrijk maar schaars (**Figuur 2, onder**).

Doel van het onderzoek

Het vergroten van de kennis over de relatie tussen ondergrond, rivierwaterstanden en grondwaterstanden en het ontwikkelen van meer realistische grondwaterscenario's in dijkstabiliteitsberekeningen.

Innovatieve componenten

De huidige schematisering van grondwater in dijkbeoordelingen is sterk vereenvoudigd. Daarom richt mijn onderzoek zich op de temporele en ruimtelijke componenten van grondwatergerelateerde dijkstabiliteit:

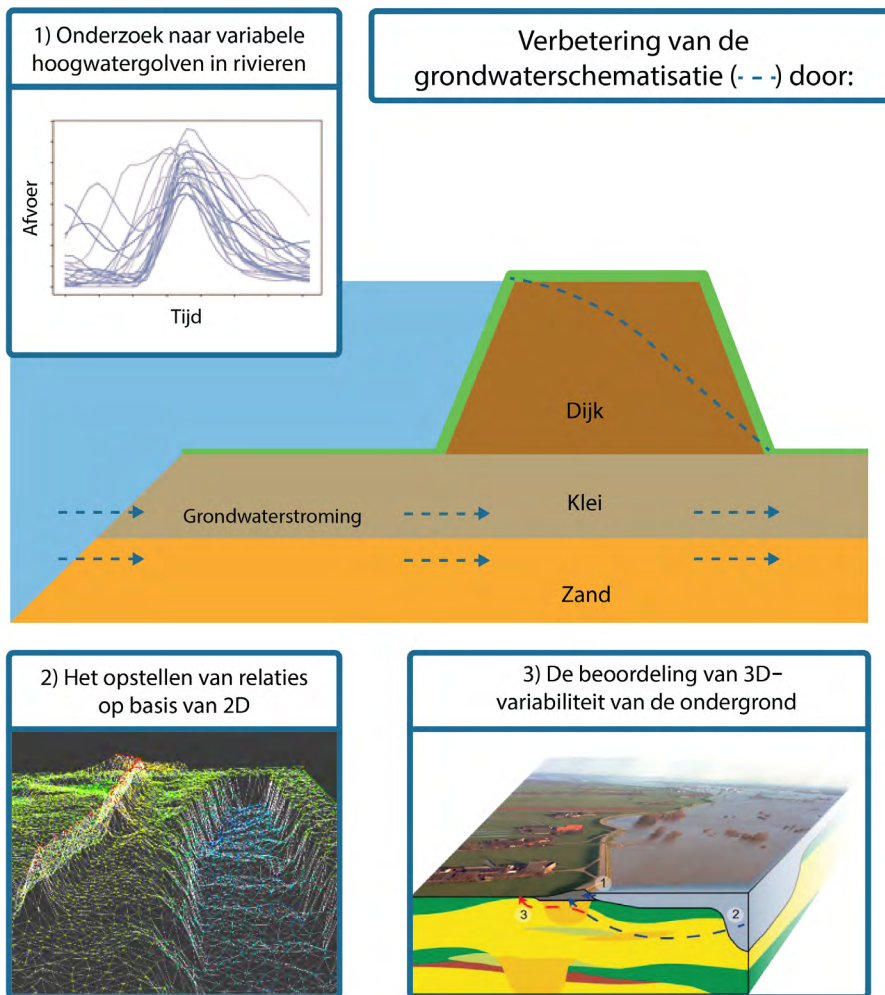
1. **De vorm van hoogwatergolven** is zeer variabel, maar dijkontwerpen worden gemaakt op basis van één karakteristiek hoogwater. Mijn



Figuur 2: **Boven:** Kwel door de dijk en de ondergrond: natte voeten zonder overstroming (Foto door Waterschap Rivierenland). **Onder:** Peilbuis die in de bodem wordt geplaatst om de grondwaterstand te meten (Foto door Waterschap Brabantse Delta) en veldwerk voor dataverzameling (Foto door Bas van der Meulen).

onderzoek toont aan dat de hydrologie in de dijk en de ondergrond sterk verschilt bij hoogwatergolven, waarmee de huidige praktijk ter discussie wordt gesteld.

2. Om de algemene kennis te vergroten besteed ik ook aandacht aan de **interactie tussen materiaaleigenschappen**, grondwaterhydrologie en dijkstabiliteit. Vele simulaties van een gekoppeld grondwater- en dijkstabiliteitsmodel gaven inzicht in de belangrijkste factoren die van invloed zijn op de dijkstabiliteit en de grondwaterstanden. De



Figuur 3: Belangrijkste onderdelen van het onderzoek ter verbetering van de grondwaterschematisatie voor de dijkstabiliteitsberekeningen. Gebaseerd op schema's van Teun van Woerkom.

resultaten zijn vergeleken met stabiliteitsberekeningen van een rivierdijk om de toepasbaarheid van deze interacties als een eerste-ordebepaling van dijkstabiliteit aan te tonen.

3. **Het beoordelen van de variabiliteit van de ondergrond in 3D** is gebruikelijk in geologische omgevingen, maar het gebruik ervan bij de beoordeling van de veiligheid van dijken (en de bijbehorende grondwaterhydrologie) is tot nu toe beperkt gebleven. Dit onderdeel richt zich op het bepalen van verschillen tussen 2D- en 3D-modellering, en suggereert betere manieren om 3D-effecten te parametriseren.

Relevant voor wie en waar?

Onderzoekers die werken op het raakvlak van aardwetenschappen en civiele techniek. Innovatieve organisaties die gebruik willen maken van de nieuwste kennis over processen aan de basis van dijkveiligheid.

Voortgang en toepassing

Dynamische grondwaterberekeningen lieten zien welke parameters de grootste invloed op de dijkstabiliteit hebben: (1) variaties in waterspanningen, (2) de geometrie en het materiaal van de dijk en (3) materiaaleigenschappen van de ondergrond.

Dijkheterogeniteit als gevolg van historische dijkversterkingen heeft ook een grote invloed op de waterspanningen in de dijk. Ik heb een methode ontwikkeld om mogelijke scenario's van dijkopbouw te creëren, die verschillende waterspanningen opleveren. Door meerdere scenario's van dijkopbouw en waterspanningen te gebruiken kan een probabilistische analyse van de grondwaterstanden worden uitgevoerd.

In een volledige probabilistische analyse moeten ook dynamische waterspanningen als functie van de rivierwaterstanden worden meegenomen. Het

gebruik van tijdsafhankelijke grondwaterstroming leidt in veel gevallen tot een aanzienlijke verlaging van de faalkans van dijken in vergelijking met statische grondwaterstanden. Voor details, zie de **projectresultaten hieronder**.

Last but not least, de historische dijk bij Nijmegen-Lent wordt gebruikt als voorbeeld van hoe heterogeniteit in een dijk kan worden bepaald door de bouwgeschiedenis te simuleren. Archeologische waarnemingen kunnen de kennis van historische dijken vergroten en simulaties van variabele dijkopbouw verbeteren.

Aanbevelingen voor de praktijk

- Gebruik modelsimulaties met realistische ondergrond- en dijkopbouwscenario's voor het bepalen van grondwaterstanden.
- Gebruik tijdsafhankelijke grondwaterstanden – die ontstaan als gevolg van variabele rivierwaterstanden – in plaats van statische grondwaterstanden voor realistischere schattingen van grondwaterstanden.
- Neem variabiliteit in de dijkopbouw mee om een duidelijk beeld van de spreiding in mogelijke grondwaterstanden te geven.

Belangrijkste projectresultaten



van Woerkom, T.A.A., van Beek, L.P.H., Middelkoop, H. & Bierkens, M.F.P. (2021). [Global Sensitivity Analysis of Groundwater Related Dike Stability under Extreme Loading Conditions](#). Doi: 10.3390/w13213041

van Woerkom, T.A.A., van Beek, L.P.H., Middelkoop, H., Bierkens, M.F.P. (2020, February 13-14). A coupled hydro-stability model for a sensitivity analysis on dike stability.

van Woerkom, T.A.A., van Beek, L.P.H., Middelkoop, H., Bierkens, M.F.P. (2020, March 12-13). Sensitivity analysis of river dike macro-stability: It's just hydro-logic!



De bevindingen van dit onderzoek zullen toepasbaar zijn op dijkversterkingsprojecten in Nederland.

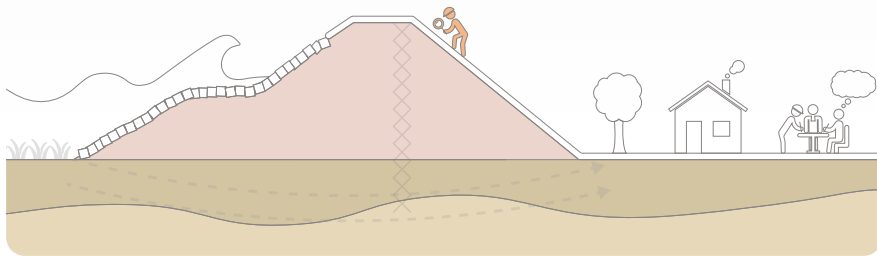
Huidige impressie van de bypass bij Nijmegen-Lent, met de oude dijk zichtbaar tussen de twee riviertakken. Foto by DaMatrix from Wikimedia Commons, [CC BY-SA 4.0](#).



Projectsamenvatting

C3 - Geofysische metingen van de bodem

Richtlijnen voor het beter in kaart brengen van de horizontale variabiliteit van de ondergrond



Uitkomst

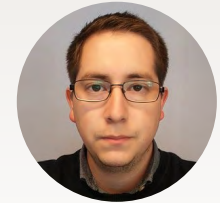
Het doel van dit project was om statistische methoden te ontwikkelen om geofysica te integreren in de karakterisering van de bodemheterogeniteit. De aspecten van heterogeniteit die aan bod zijn gekomen, zijn de geometrie van bodemlagen en de variabiliteit van materiaaleigenschappen op kleine en grote schaal. De uitkomst van dit onderzoek zijn richtlijnen om de horizontale variabiliteit van de bodem beter in kaart te brengen.

Door Juan Chavez Olalla

Technische Universiteit Delft

Project start: 09/2017

Project einde: 09/2021



Promotoren

Prof. dr. ir. T.J. Heimovaara

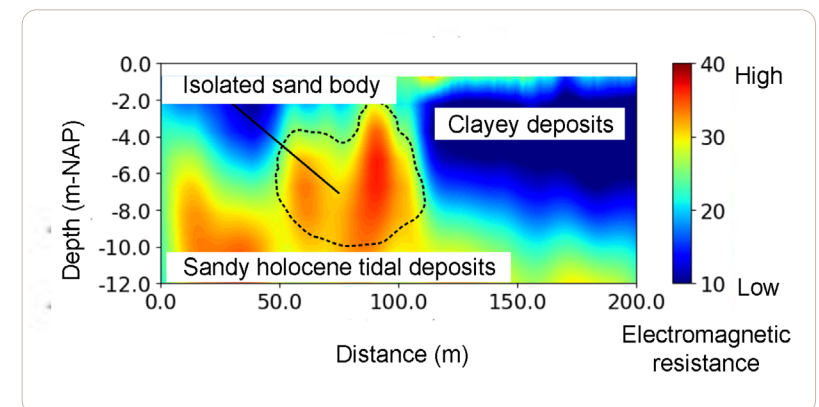
Technische Universiteit Delft

Dr. R. Ghose

Technische Universiteit Delft

Dr. D.J.M. Ngan-Tillard

Technische Universiteit Delft



Figuur 1: Detectie van oude rivierbeddingen met Electrical Resistivity Tomography. Afbeelding door Juan Chavez Olalla.

Motivatatie en uitdagingen

Traditionele grondonderzoeksmethoden meten de horizontale variabiliteit van de bodem vaak onvoldoende. Als gevolg daarvan worden geofysische methoden steeds populairder voor geotechnische toepassingen zoals in dijken en wegen omdat ze de bodem horizontaal op een aangesloten manier in kaart brengen. Echter, de operationele inspanning die voor veel geofysische methoden vereist is, loont niet altijd. De verwachtingen liggen in sommige gevallen buiten de fysieke grenzen van de methoden. De praktische uitdaging is daarom om de schaal van heterogeniteit te vinden die geofysische methoden nog kunnen opsporen en die tegelijkertijd waardevolle informatie opleveren voor geotechnische berekeningen.

Doel van het onderzoek

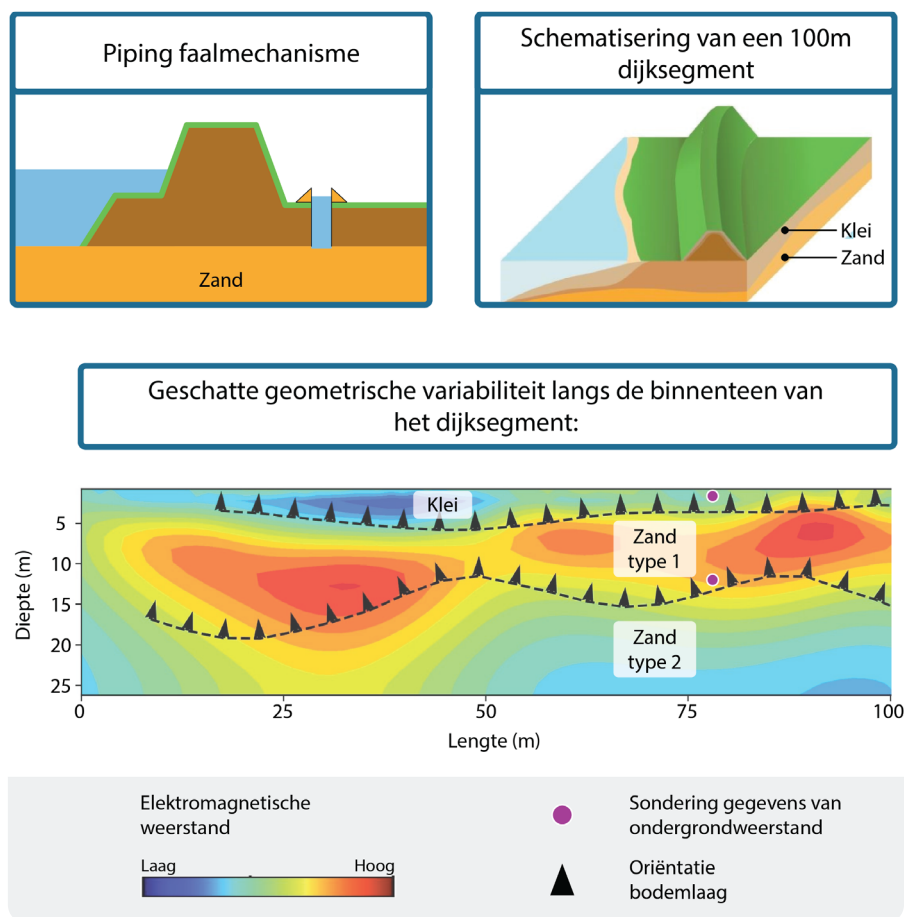
Ik formuleer methoden om de volgende vraag te beantwoorden: hoe kunnen geofysische gegevens worden gebruikt bij het beter in kaart brengen van de bodemvariabiliteit? Concreet werk ik aan onzekerheden in de geometrie van bodemlagen en materiaaleigenschappen.

Innovatieve componenten

Ik kijk naar het type bodemvariabiliteit dat een rol speelt bij faalmechanismen van dijken (**Figuur 3, linksboven**). Bij bijvoorbeeld klei-op-zand-dijken zorgt de dikte van de kleilaag aan de landzijde voor weerstand tegen piping (**Figuur 3, rechtsboven**). Dijken zijn longitudinale structuren, dus het is een uitdaging om variabiliteit in kaart te brengen met puntgegevens, zoals sonderingen. Een onderdeel van mijn onderzoek is het bestuderen van de geometrische variabiliteit van lagen met geofysische methoden (**Figuur 3, onder**). Ik besteed speciale aandacht aan elektromagnetische methoden die snel grote afstanden kunnen onderzoeken zoals Electrical Resistivity Tomography (ERT), Frequency



Figuur 2: Geofysisch onderzoek in dijken en bijbehorende instrumentatie. Foto's door Juan Chavez Olalla.



Figuur 3: Combinatie van geofysische gegevens en puntgegevensmetingen om de schematisering van de ondergrond onder de dijken te verbeteren. Bronnen: linkerfiguur aangepast van [van Beek \(2015\)](#), rechterfiguur gebaseerd op schema van Richard Marijnissen en onderste figuur beschikbaar gesteld door Juan Chavez Olalla.

Domain Electromagnetics (FDEM) en Ground Penetrating Radar (GPR) data. Het innovatieve aspect is de statistische combinatie van geofysische gegevens en puntgegevens. Eerdere benaderingen gebruiken alleen puntgegevens, dus ze houden niet expliciet rekening met de geometrische variabiliteit tussen gegevenspunten. Een ander onderdeel van dit onderzoek houdt verband met complexere geofysische methoden, zoals seismische verkenning, die grote operationele inspanningen vergen. Ik bestudeer de gevallen waarin deze methoden nuttige informatie kunnen opleveren voor geologische schematisering.

Relevant voor wie en waar?

De uitkomsten van dit onderzoek zijn relevant voor adviseurs die dijkveiligheid beoordelen waar de horizontale variabiliteit van geologische lagen zeer onzeker is.

Voortgang en toepassing

Voorlopige onderzoeken op testlocaties tonen aan dat geologische architectuur goed wordt weergegeven in geofysische gegevens. Het verticale detailniveau dat hiermee wordt vastgelegd, is kleiner dan dat van sonderingen. Het horizontale detailniveau is echter groter. Door de patronen in geofysische gegevens te bestuderen, is het mogelijk om complexe geologische architectuur te beschrijven. In dit onderzoek wordt een aanpak geformuleerd om geologische kennis, puntgegevens en geofysica te combineren. Een deel van deze aanpak is gericht op het ophalen van geometrische variabiliteit uit tomogrammen. Een ander onderdeel van deze aanpak is gericht op het correleren van geofysische en geotechnische eigenschappen. De elektrische weerstand is bijvoorbeeld sterk gecorreleerd met de conusweerstand van een sondering. Voor details over de resultaten, [zie de projectresultaten op de volgende pagina](#).

Aanbevelingen voor de praktijk

- Gebruik een sequentiële aanpak voor geofysisch onderzoek van grof (goedkoop en snel) tot fijn (duur en langzaam).
- Interpreteer geofysische gegevens binnen een grotere geologische context.
- Interpreteer geofysische gegevens op een consistente en reproduceerbare wijze.
- Definieer de beoogde geologische kenmerken die in kaart moeten worden gebracht met geofysica vóór het inmeten.
- Leg kwantitatieve relaties tussen geofysische en geotechnische eigenschappen.

Belangrijkste projectresultaten



Chavez Olalla, J., Winkels, T.G., Ngan-Tillard, D.J.M. & Heimovaara, T.J. (2021). Geophysical tomography as a tool to estimate the geometry of soil layers: Relevance for the reliability assessment of dikes. Doi: 10.1080/17499518.2021.1971252

Chavez Olalla, J. (2020) Layer interpolation with tomographic aid. Athens, Third European Regional Conference of IAEG, 20-24 September 2020.



Montfoort: Testen van geofysische methoden om een grote rivierbedding in kaart te brengen (met Fysische Geografie groep Universiteit Utrecht).

Kleine oude rivierbedding: Oude rivierbeddingen in kaart brengen waar conventionele grondonderzoeksmethoden niet toereikend zijn.

Leendert de Boespolder: De horizontale correlatiestructuur van geotechnische eigenschappen berekenen met geofysische tomografie.

Afbeelding door Juan Chavez Olalla.





Storyline

Van dijkgeschiedenis naar dijkversterking

Samenwerking tussen technisch managers en archeologen kan betere simulaties van de dijkopbouw opleveren voor dijkveiligheidsberekeningen

Door Teun van Woerkom

Universiteit Utrecht

Door de eeuwen heen zijn de meeste rivierdijken in Nederland meerdere malen versterkt, wat heeft geleid tot zeer variabele dijkopbouw. Het materiaaltype in de dijk en de variabiliteit daarvan is een belangrijke factor bij dijkveiligheidsberekeningen. Archeologische waarnemingen kunnen de kennis van historische dijken vergroten en simulaties van variabele dijkopbouw verbeteren.

Als All-Risk-onderzoeker aan de Universiteit Utrecht heb ik me vooral gericht op het simuleren van grondwaterstroming door de natuurlijke ondergrond rond de dijken, die uit meerdere lagen bestaat. Toen

een collega me een foto liet zien van archeologisch onderzoek bij een versterkingsproject, was ik net zo verrast als hij: er waren duidelijk meerdere lagen van verschillende materiaaltypen zichtbaar. De gelaagde dijkopbouw zou echter geen verrassing moeten zijn, aangezien ik wist dat veel rivierdijken in Nederland een lange geschiedenis hebben. Gedurende hun bestaan zijn ze meermaals verhoogd en verbreed. Bij elke versterking is nieuw materiaal toegevoegd met (iets) andere karakteristieken, waardoor de huidige rivierdijk zeer variabel is (zoals te zien is op de beelden op de volgende pagina).

Omslagfoto: Verschillende materiaalagen van een historische dijk. Afbeelding aangepast uit [Rondags \(2019\)](#).

Dijkvariabiliteit ontbreekt in de dijkveiligheidsbeoordeling

Het dijkmateriaal staat algemeen bekend als een van de belangrijkste factoren die de dijkstabiliteit beïnvloeden. De dijkopbouw wordt echter meestal te eenvoudig en homogeen verondersteld, terwijl de echte dijk waarschijnlijk uit veel verschillende materialen in lagen van variabele dikte bestaat. Deze aanname kan leiden tot foutieve berekeningen van de dijkveiligheid, wat tot gevaarlijke situaties kan leiden in combinatie met mogelijk hogere afvoeren door klimaatverandering in de toekomst. Dit probleem resulteerde in de volgende vraag:

"Kunnen we archeologische gegevens gebruiken om variabele dijkopbouw te simuleren en de huidige berekeningen van dijkstabiliteit te verbeteren?"

Normering van dijken in Nederland

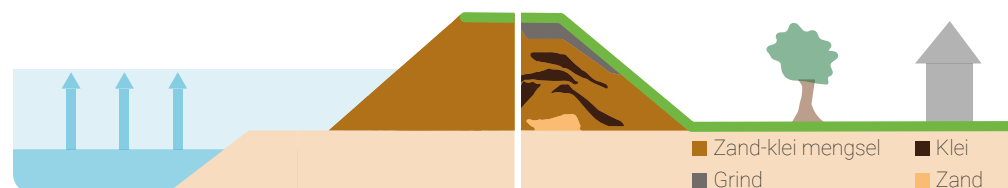
De nieuwe veiligheidsnormen voor dijken zijn enorm hoog. De Grebbedijk bijvoorbeeld heeft een kans op een dijkdoorbraak van eens in de 30.000 jaar. Om de veiligheid van een dijk met deze precisie te berekenen, is een nauwkeurige bepaling van dikeigenschappen van belang. Historische gegevens van de aanleg van rivierdijken in de veiligheidsinschatting kunnen dus nuttig zijn. Deze historische gegevens zijn echter niet op elke locatie beschikbaar en zijn vaak ook lastig ontsloten.

Historische dijkdoorsneden in Nederland

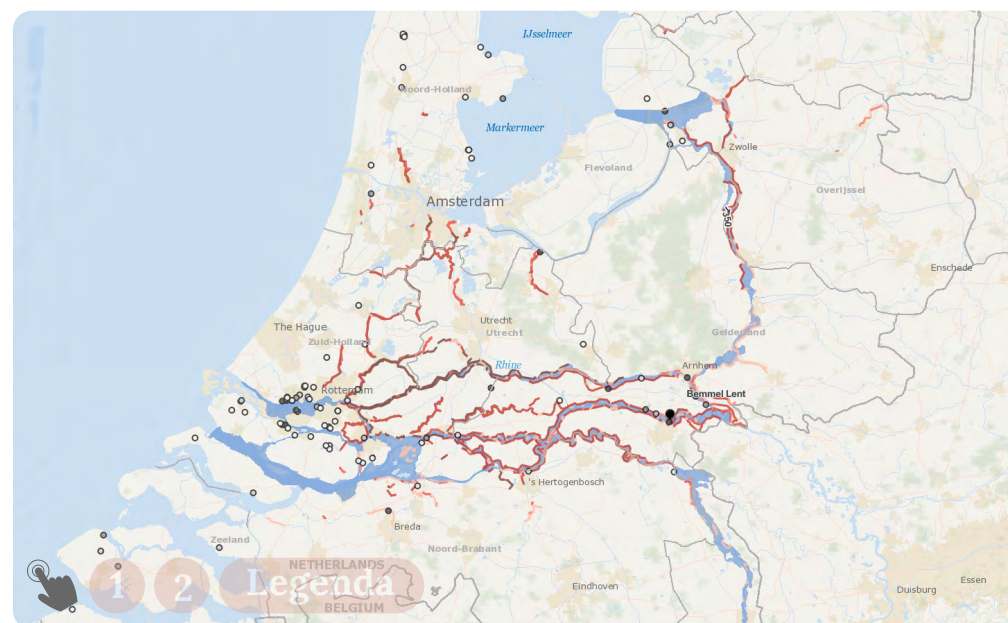
Door meerdere bronnen over historische dijken te combineren vond ik 106 locaties in Nederland waar archeologisch onderzoek werd gedaan naar dijkopbouw. De kaart toont deze gecombineerde dataset met alle 106 locaties, 47 (grijsachtige punten) bevatten historische dijkdoorsneden en slechts in 12 (donkerste grijze punten) gevallen bevatten de data een gedetailleerde geometrie en gedetailleerde beschrijvingen van dijkopbouw en materiaal van historische dijkversterkingen.



Beelden van een historische dijk, die duidelijk uit meerdere lagen van verschillende materiaaltypen bestaat. Foto's uit [Rondags \(2019\)](#).



Dijken met een homogene en een variabele opbouw die moeten zorgen voor hoogwaterveiligheid bij hoge rivierwaterstanden. Gebaseerd op schema's van Teun van Woerkom.



Kaartdata van Esri, (IHO-IOC) GEBCO, DeLorme, NaturalVue, NGS. Dijkleeftijden uit Nationaal Georegister.

1825



1900



2020



Historische kaarten van Bemmelsedijk. Gebaseerd op tiled services van topotijdreis.nl (onderdeel Kadaster).

Ouderdom van dijken in Nederland

Deze locaties zijn niet de enige plekken waar nog historische rivierdijken aanwezig zijn. Veel dijken zijn door de tijd meermaals versterkt met verschillende materialen. Kaart 2 (op de vorige pagina) toont de ouderdom van de eerste bouwphase van de rivierdijken.

Vroege Middeleeuwen

De eerste dijken ontstaan rondom dorpen, die desondanks nog regelmatig overstromen.

Vanaf ongeveer 1200

Langs alle grote rivieren werden dijken aangelegd. Het materiaal voor de dijken werd door de dorpelingen vaak lokaal afgegraven uit de uiterwaarden naast de dijk.

Vanaf ongeveer 1800

Institutionalisering van de dijkveiligheid en de opkomst van stoommachines resulteerden in grootschalige dijkversterkingen.

Na 1958

Met de nieuwe Deltawet staat waterveiligheid hoog op de landelijke agenda en worden methoden voor dijkversterking verder genormaliseerd.

Voorbeeld van een historische rivierdijk: Bemmelsedijk, Nijmegen-Lent.

Een van de rivierdijken waarvan de eerste bouwphase in de vroege Middeleeuwen ligt en die gedetailleerd is gedocumenteerd is de Bemmelsedijk bij Nijmegen-Lent. Deze dijk is onlangs afgegraven om met een by-pass meer ruimte te creëren voor de rivier de Waal.

Historische evolutie Bemmelsedijk

De Bemmelsedijk is aangelegd in 1327 en is daarmee ook zichtbaar op de oudste beschikbare topografische kaart van het gebied, daterend uit 1815. Vanaf dat jaar blijft de dijk op dezelfde plaats liggen tot de aanleg van de by-pass in 2015. Veel andere rivierdijken in Nederland met een vergelijkbare ouderdom zijn door de jaren heen ook nooit verplaatst, waardoor de historische dijkopbouw waarschijnlijk ook nog aanwezig is in de huidige rivierdijk.

Simulatie van variabele dijkopbouw aan de hand van historische karakteristieken

Om variabele dijkopbouw mee te nemen in de beoordeling van de dijkveiligheid, heb ik Dijk-TETRIS ontwikkeld: 'Typical Embankment Tessellation using Regionally Inherited Statistics'. Het algoritme maakt gebruik van statistieken over in het verleden gebruikte materialen, de grootte van historische dijkversterkingen en helling van het dijktralud om hypothetische dijkdoorsneden te construeren. Hiernaast vind je een simulatie van een TETRIS-Bemmelsedijk in vergelijking met de bouwgeschiedenis van de echte Bemmelsedijk. De bouwgeschiedenis van de TETRIS-dijk is vrijwel gelijk aan die van de echte dijk. Ook voor nabijgelegen rivierdijken zonder archeologische doorsnede is TETRIS op deze manier in staat om de historische dijkopbouw te simuleren.

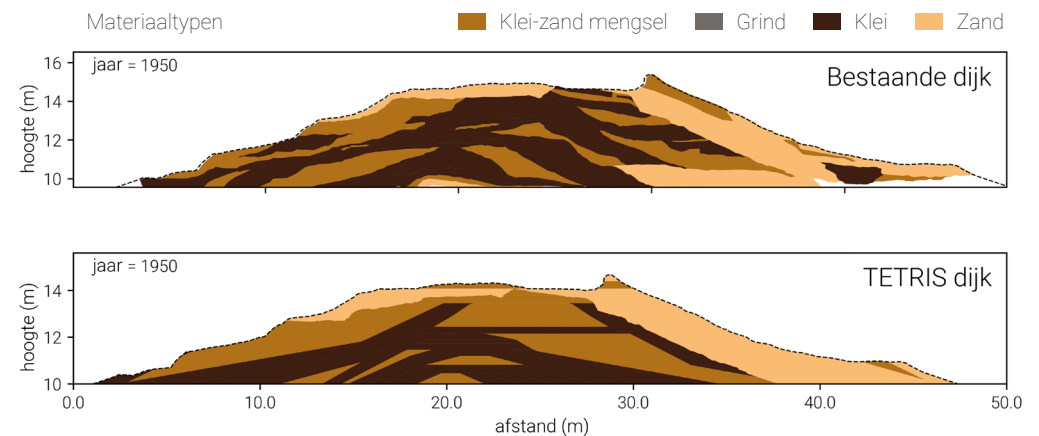
Kansen en uitdagingen van dijken-TETRIS

Het TETRIS-algoritme kan de zeer variabele dijken simuleren op basis van archeologische dikeigenschappen. Dit heeft de volgende implicaties:

- De evolutie van de grondwaterdruk bij hoge rivierwaterstanden kunnen beter worden ingeschat door niet alleen een variabele ondergrond te gebruiken, maar ook een variabele dijkopbouw.
- Berekeningen aan dijkstabiliteit kunnen rekening houden met heterogene dijkopbouwen. Door meerdere dijkopbouwen te simuleren kan een probabilistische analyse van de dijkstabiliteit worden gedaan.



Huidige impressie van de by-pass bij Nijmegen-Lent, met de oude rivierdijk nog zichtbaar tussen de twee riviertakken. Foto door DaMatrix van Wikimedia Commons, CC BY-SA 4.0.



De bouwgeschiedenis en variabiliteit van een bestaande rivierdijk (boven) en een dijk gesimuleerd door TETRIS (onder). Afbeelding door Teun van Woerkom.

- Een validatie van de TETRIS-simulaties met hydrologische, geofysische of geologische gegevens kan de betrouwbaarheid van de gesimuleerde TETRIS-dijken verbeteren.

Hoewel het algoritme de dijkopbouw die is waargenomen in historische dijken nauwkeurig kan nabootsen, blijven er uitdagingen:

- De variatie in materiaaltypen en dijkhistorie in Nederland is groot op kleine schaal, waardoor dijken die 1 km uit elkaar liggen er heel anders uit kunnen zien. Omdat het algoritme afhankelijk is van de archeologische waarnemingen, wordt het algoritme minder nauwkeurig op locaties waar geen gedetailleerde archeologische waarnemingen van dichtbij beschikbaar zijn.
- Variabiliteit in de dijkopbouw is niet puur een gevolg van verschillende versterkingsfasen. Ook dijkdoorbraken en het snel opvullen van de bres met allerlei beschikbaar materiaal, kunnen variabiliteit veroorzaken.

HOE NU VERDER?

Technisch managers binnen de waterschappen zouden het TETRIS-algoritme al kunnen gebruiken om de dijkstabiliteitsberekeningen te verbeteren. Om het algoritme verder te ontwikkelen, is het nodig meer archeologische waarnemingen van dijkopbouw toe te voegen aan de database. Deze zijn nodig om de spreiding van dijkenmerken beter in te schatten, wat de TETRIS-voorspellingen van nabijgelegen dijken ten goede komt. Daarnaast zou ik elke samenwerking willen aanmoedigen tussen specialisten op het gebied van dijkveiligheid en dijkgeschiedenis, omdat deze vakgebieden veel meer met elkaar verweven bleken dan eerder werd gedacht. Deze samenwerking kan uiteindelijk leiden tot veel kleinere onzekerheden in schattingen van dijkveiligheid en dus in veiligere rivierdijken in het algemeen.

Meer lezen?

Scan de QR code of klik erop om de storyline online te bekijken. Of bekijk:



- Geoscan en de archeologie van de dijk. <https://www.hwbp.nl/kennisbank/pov-dgg/artikelen/geoscan-en-de-archeologie-van-de-dijk>
- Assessing lithological uncertainty in river dikes: Simulating construction history and its implications for flood safety assessment; van Woerkom et al. (in preparation).

Dankwoord

Dit werk maakt deel uit van het Perspectief-programma All-Risk met projectnummer P15-21, dat wordt gefinancierd door NWO-domein Toegepaste en Technische Wetenschappen. Mijn dank gaat uit naar Maurits van Dijk (technisch manager dijkversterkingsprojecten bij Waterschap Drents Overijsselse Delta) en Jan-Willem Oudhoff (specialist dijkarcheologie bij Buro de Brug), collega's van de Universiteit Utrecht, Pien Buter (visual design), en Juliette Cortes (redactionele ondersteuning) van het All-Risk-team voor hun inbreng in deze storyline.

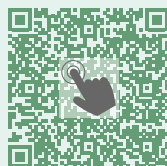


Zoeken naar oude rivierbeddingen met Electrical Resistivity Tomography. Foto door Juan Chavez Olalla.

Het thema:

Beter gebruik maken van informatie over de ondergrond om de parameterschattingen te verbeteren van modellen die het optreden van piping, glijden van kanaaloevers of andere faalmechanismen van rivierdijken bepalen.

Wilt u de presentaties van de onderzoekers terugzien? Dat kan door op **de QR code te klikken of deze te scannen**.



Reflectie

Betere kartering van de opbouw van de ondergrond

Webinar team

Moderator



Hans Middelkoop
Universiteit Utrecht

Sprekers



Juan Chavez Olalla
Technische Universiteit Delft

Introductie

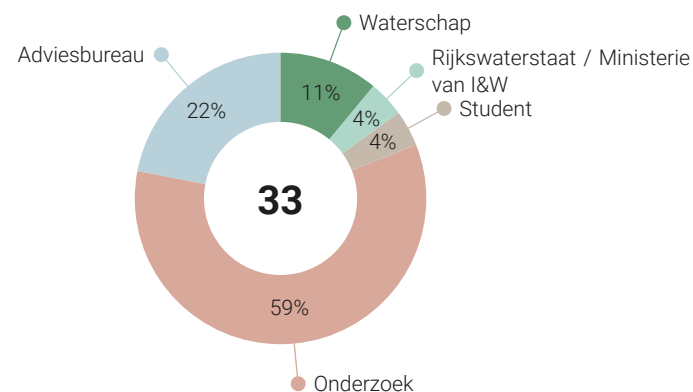


Ane Wiersma
Deltares



Bas Knaake
Universiteit Utrecht

Deelnemers



Deze reflectie komt voort uit de discussie tussen All-Risk-onderzoekers en deelnemers aan het gelijknamige All-Risk-webinar van 2 juni 2021.

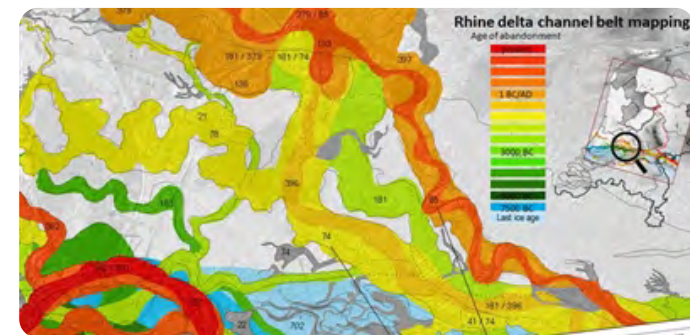
De structuur van de ondergrond

De structuur van de ondergrond, het voorkomen van zand en kleilagen en de eigenschappen van doorlatende zandlagen zijn belangrijke randvoorwaarden voor faalmechanismen van dijken, met name voor piping. De heterogeniteit in de ondergrondstructuur van de Rijn-Maasdelta is het gevolg van de paleogeografische ontwikkeling van de delta en de daarbij optredende afzetting van sediment. De ondergrondstructuur varieert op verschillende ruimtelijke schalen. We kunnen deze heterogeniteit in kaart brengen met behulp van verschillende brongegevens. Op de grofste schaal betreft de heterogeniteit de ligging van de zandlichamen van oude rivieren dwars door de delta. Deze informatie is vervat in de GeoTOP-gegevens en is goed bekend. Op een meer gedetailleerde schaal omvat de heterogeniteit het plaatselijk voorkomen van zandlenzen of andere vormen van plaatselijke lithologische verschillen die moeilijk te detecteren zijn. Gegevens van kegelpenetratietests (CPT)IF en boringen worden nu uitgebreid toegepast op deze schaal. Dit blijven echter "punt"-waarnemingen; geofysische methoden zouden hier een belangrijke aanvulling kunnen vormen omdat ze een volledig 2D-profiel van de ondergrondstructuur en materiaaleigenschappen opleveren. Voorwaarde is natuurlijk wel dat de geofysische gegevens gekoppeld kunnen worden aan de eigenschappen van de ondergrond, bijvoorbeeld door sonderingen te combineren met enkele boringen. De hamvraag is dan ook: hoe kunnen we beter gebruik maken van informatie uit de ondergrond om de parameterschattingen te verbeteren van modellen die het optreden van piping, glijvloeiing van geu-loevers of andere faalmechanismen van rivierdijken bepalen?

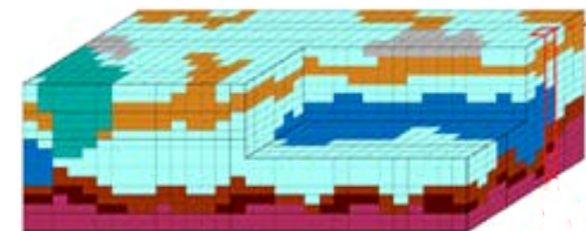
Discussie

Welke informatiebronnen?

Deelnemers hebben behoefte aan ondergrondinformatie op een ruimtelijke schaal van enkele meters in horizontale richting. In verticale richting is een veel hogere (dm) resolutie gevraagd. 'Ondergrondkaarten' zitten verwerkt in GeoTOP, die lateraal een goed beeld geven, maar verticaal minder detail geven. Van de huidige beschikbare gegevensbronnen



Ondergrondkaarten



GeoTOP

Snapshots van enkele van de beschikbare gegevens om de ondergrond in kaart te brengen.
Afbeeldingen door Geologische dienst Nederland | TNO.

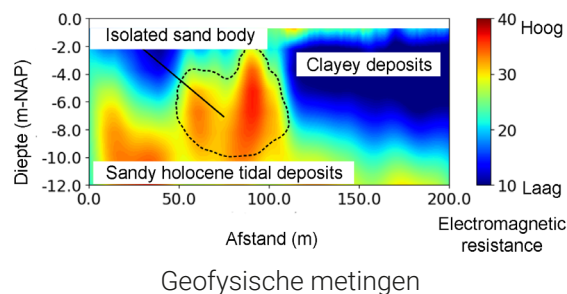
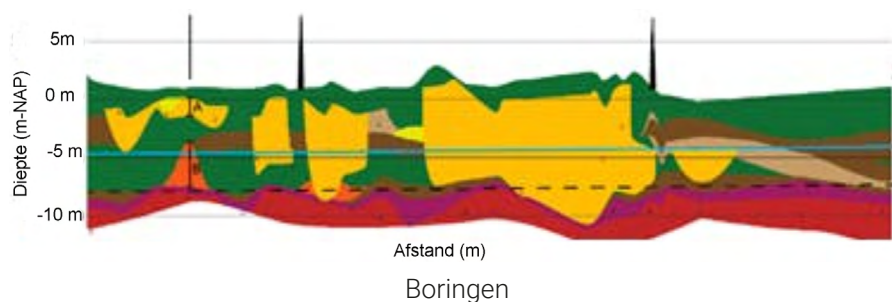
is een duidelijke voorkeur voor boringen en CPT's, waarbij de detailinformatie uit de CPT's het zwaarste weegt. Boringen zijn aanzienlijk duurder, hebben soms minder verticaal detail en geven alleen in aanvulling met labonderzoek de benodigde parameterwaarden voor de modellen.

Combineren van CPT's met boringen, aangevuld met geofysische profielen, kan het meeste ruimtelijke detail opleveren. Gegevens uit de boringen dienen om CPT-uitkomsten en geofysische profielen te vertalen naar lithologie en parameters voor de modellen. Dit zou met directe 1-op-1-vergelijking op de boorlocaties kunnen gebeuren, via eenvoudige

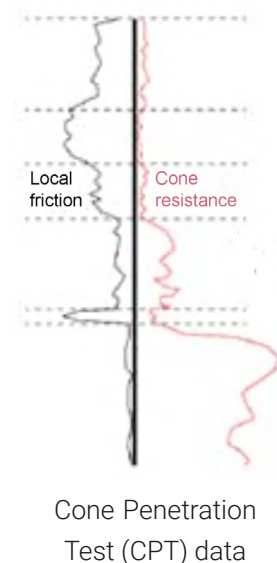
empirische relaties bij meerdere boringen of verfijnder (met lokale neural network technieken).

Belemmeringen voor de uitvoering?

De deelnemers noemden verschillende 'technische' belemmeringen om deze integratie van bronnen in de praktijk toe te passen. Er zijn met name nog stappen te zetten met de standaardisatie van procedures, met uniforme normen en richtlijnen, en uiteindelijk opname in de Nederlandse basisregistratie ondergrond (BRO)¹. Daarnaast zijn er ook niet-technische



Snapshots van enkele van de beschikbare gegevens om de ondergrond in kaart te brengen. Afbeeldingen links door Juan Chavez Olalla. Afbeelding CPT door Geologische dienst Nederland | TNO



¹ <https://basisregistratieondergrond.nl>

belemmeringen, waaronder budgettaire overwegingen, haalbaarheid, ervaring en opleiding en acceptatie van nieuwe methoden.

In het algemeen wordt de grootste uitdaging gezien in de mismatch tussen de gegevensvereisten en het detailniveau van de modellen die nu worden toegepast om het optreden van faalmechanismen te bepalen enerzijds en de beschikbaarheid, resolutie en kwaliteit van in-situgegevens uit het veld anderzijds.

Conclusie en perspectief

Aanzienlijke vooruitgang kan worden geboekt door een goede weergave van de ondergrond, de opbouw en de eigenschappen ervan, als input te gebruiken voor modellen die de faalmechanismen van dijken bepalen. De winst zit in het opsporen van kritische plekken in de ondergrond die nader gedetailleerd onderzoek vereisen en in het verminderen van de onzekerheid van modelparameters. 'Grootschalige' informatie zoals ondergrondkaarten en GeoTOP kan een goede context bieden voor verder lokaal onderzoek. Voor dit laatste zijn er goede mogelijkheden in het combineren van (goedkope) sonderingen, boringen en geofysische methoden. De uitdaging is om de sonderings- en geofysische gegevens te vertalen naar informatie voor modellen. Kennis over de ondergrond en de wijze waarop verschillende sedimenttypen zijn gevormd, kan bijdragen tot vermindering van de onzekerheid in modelparameters op plaatsen waar dergelijke informatie ontbreekt, bijvoorbeeld door a priori bekende verschillen in korrelgrootte tussen genetisch verschillende typen ondergrondmateriaal. Geofysische methoden zijn ook bij uitstek geschikt om zeer lokale en "onvoorspelbare" heterogeniteiten in de ondergrond op te sporen.

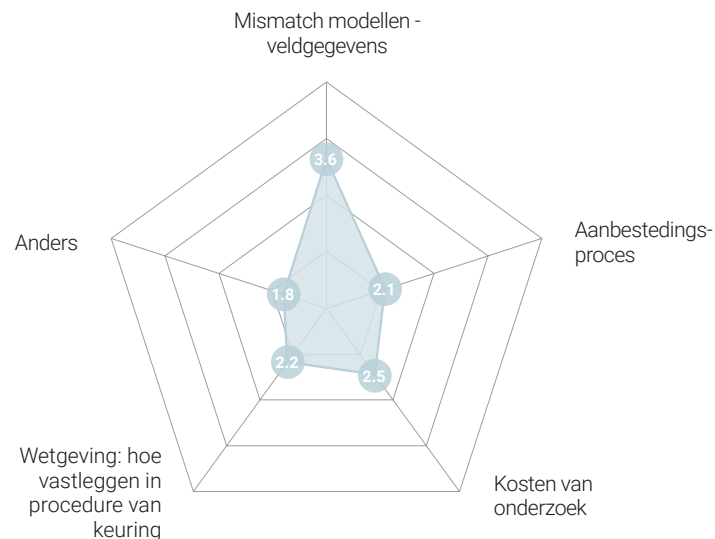
Technische barrières



Niet-technische barrières



De antwoorden van de deelnemers op de vragen welke technische of niet-technische belemmeringen er zijn voor het gebruik van deze informatie?



Antwoorden van deelnemers op de vraag waar de grootste uitdagingen liggen.

Een belangrijke wetenschappelijke uitdaging blijft de mismatch tussen beschikbare informatie over de heterogene ondergrond enerzijds en de huidige modellen, de schematisatie daarvan en de vereiste modelparameters anderzijds. Het is belangrijk dat we verbetering bereiken in de informatie over de ondergrond en de toepassing in de modellen, maar dat dit ook kan worden omgezet in een hanteerbare methode voor toepassing in de praktijk voor de beheerders, waarin men kan werken met 'gestandaardiseerde' procedures.

Het testen van huidige en nieuwe methoden is moeilijk. We kunnen onderzoeken hoe dit het beste kan door ons te richten op specifieke gevallen of dijktrajecten waarbij onderzoekers samenwerken met de regionale wateroverheden. Naast gegevens over de ondergrond, hebben

we bij voorkeur gegevens tot onze beschikking die informatie geven over grondwaterstanden, grondwaterstroming, piping, etc., onder extreme hydraulische omstandigheden. Met deze gegevens kunnen we leren hoe het dijksysteem reageert onder dergelijke omstandigheden en waar kritische situaties (kunnen) ontstaan. Extreme hoogwaterpieken (zoals deze zomer langs de Maas) zijn belangrijke gebeurtenissen om dergelijke gegevens te verzamelen, maar deze zijn zeldzaam. Toch blijft het verzamelen van veldgegevens van voorbije en toekomstige hoogwatergebeurtenissen belangrijk.

All-Risk-aanbevelingen:

- Gebruik de genetische kennis over de 'opbouwelementen' van de delta in een regionale aanpak voor meer realistische en robuuste parameterschattingen;
- Zorg bij risicobeoordelingen voor een goede parameterisatie van de genetische opbouwelementen van de delta;
- Gebruik a priori ondergrondkennis voor een betere stroomlijning van data-acquisitie en om deze te kunnen toespitsen op kritische gebieden;
- Combineer puntmetingen van boorkernen en CPT's met geofysische gegevens voor een betere en volledig 2D-schematisatie van de ondergrond onder dijken.

Reflectie

Datagedreven dijkversterking: bouwen op nieuwe en historische data

Webinar team

Moderator



Marc Bierkens
Universiteit Utrecht

Sprekers



Mark van der Krogt
Technische Universiteit Delft

Introductie

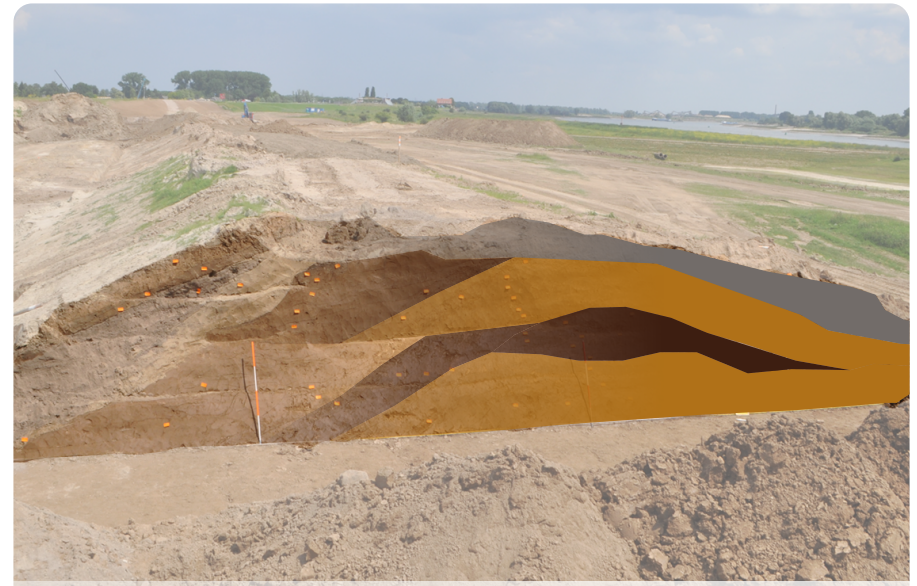
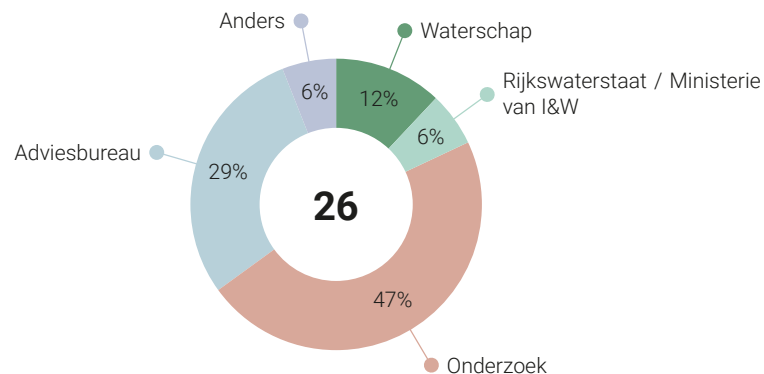


Martin van der Meer
Fugro



Teun van Woerkom
Universiteit Utrecht

Deelnemers



Verschillende materiaallagen van een historische dijk. Afbeelding aangepast uit Rondags (2019)

Het thema:

De technische beoordeling van dijkversterkingsprojecten in Nederland wordt overspoeld met gegevens. Voor, tijdens en na dijkversterkingen worden veel gegevens verzameld en opgeslagen. Dit webinar probeert een brug te slaan tussen conventionele en nieuwe databronnen door nieuwe methoden te presenteren voor het verbeteren van de veiligheid van dijken door middel van data en het bespreken van het algemene gebruik van verschillende databronnen.

Wilt u de presentaties van de onderzoekers terugzien? Dat kan door op **de QR code te klikken of deze te scannen**.

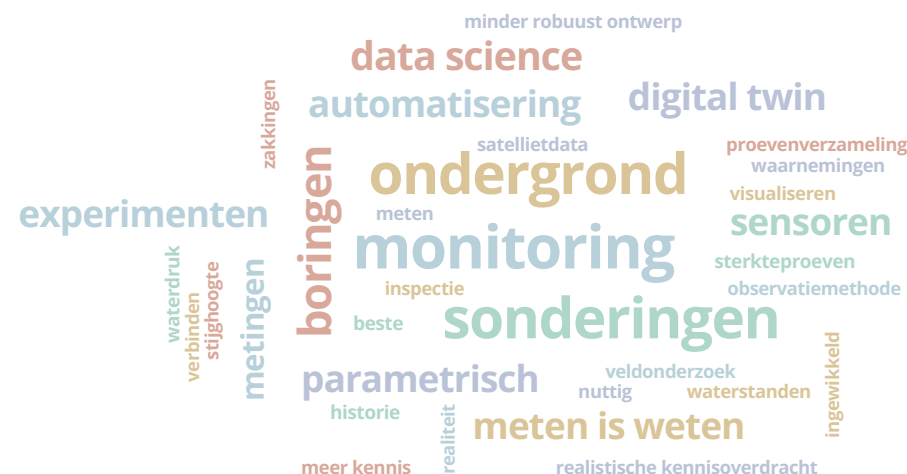


Deze reflectie komt voort uit de discussie tussen All-Risk-onderzoekers en deelnemers aan het gelijknamige All-Risk-webinar van 5 juli 2021.

Datagedreven dijkversterkingen

Naast van oudsher veelgebruikte databronnen zoals boringen, sonderingen en statistiek van buitenwaterstanden, is er recent steeds meer aandacht voor het langduriger monitoren van grondwaterstanden, historische data, gedragsinformatie tijdens belastingen en het combineren van gegevens uit verschillende databronnen. Een van databronnen die tot nu toe niet wordt gebruikt zijn archeologische data van de dijkopbouw. Door het gebruiken van de eigenschappen van historische dijken, kan een inschatting worden gemaakt van de dijkopbouw van huidige dijken. Deze informatie kan daaropvolgend ook gebruikt worden voor grondwater- en dijkstabiliteitsschematisering, waarmee de dijkveiligheid in meer detail kan worden beoordeeld. Een ander onderdeel is het gebruik maken van geobserveerd gedrag van dijken om faalkansschattingen te verbeteren. Voorbeelden van gedragsinformatie zijn overleefde belastingen zoals hoogwater of proefbelastingen, en metingen gedurende dergelijke belastingsituaties.

Naast deze nieuwe technieken zijn er al veel bestaande technieken om verschillende databronnen te interpreteren. Een combinatie van alle typen data zou wellicht het meest complete beeld geven, maar dit is in de praktijk een onmogelijke opgave. Er moet dus prioriteit worden gegeven aan die typen die het meest effectief zijn.

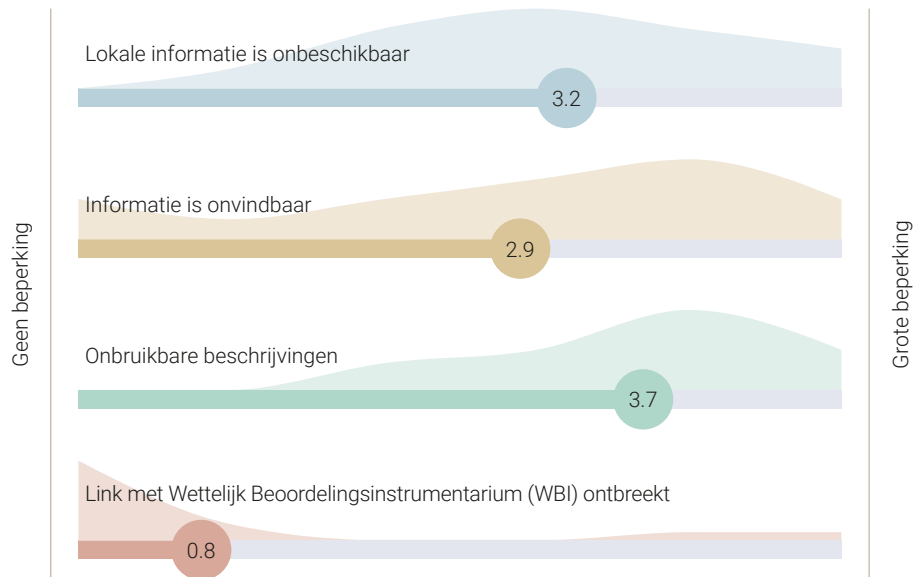


Reacties van deelnemers op de vraag: Aan welke begrippen denkt u als u denkt aan "datagedreven dijkversterking"?

Overdenkingen bij het gebruik van twee nieuwe databronnen: archeologische dijkdoorsneden en proefbelastingen

Twee nieuwe databronnen zijn besproken: archeologische dijkdoorsneden, te gebruiken om de dijkopbouw beter te begrijpen, en bewezen sterkte door proefbelastingen van dijken, te gebruiken om onzekerheid in de sterkte te verkleinen.

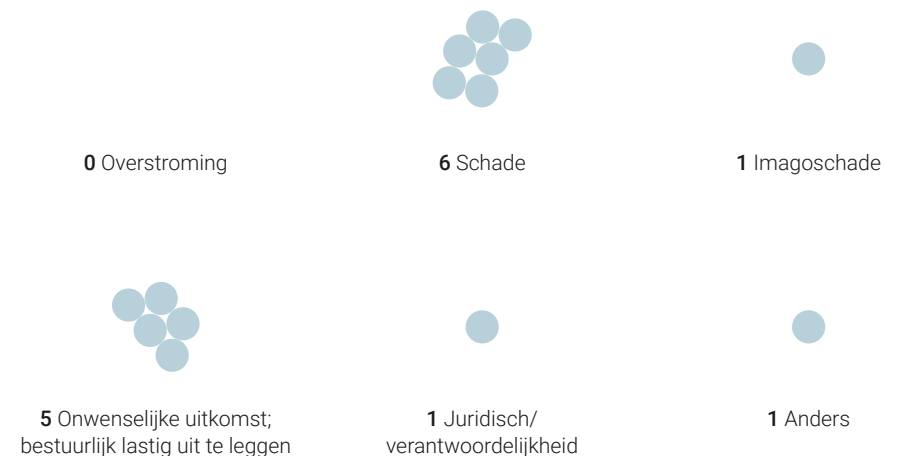
Het gebruik van archeologische dijkdoorsneden is volgens de deelnemers te implementeren in het Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium [WBI] ([Rijkswaterstaat, 2017](#)). Het WBI wordt vooral gezien als een basis voor de beoordeling van veiligheid, als een soort recept. In veel situaties wordt er al veel verder gekeken dan de WBI-regels en daar past het gebruik van historische data ook in. Daarnaast zou het mooi zijn als er ook vaker standaard classificatietesten gedaan worden als er grondonderzoek



Reacties van deelnemers op de vraag: In hoeverre vindt u de volgende aspecten een beperking voor het gebruik van archeologische gegevens in de dijkbeoordeling?

gedaan wordt. Als deze testen worden ingezet in een breed scala aan typen onderzoeken, zoals geotechnisch en historisch onderzoek, kunnen verschillende typen onderzoek gemakkelijker gecombineerd worden en zijn er betere conclusies te trekken over het gedrag van grond. Een dergelijke classificatienorm van Nederlandse grond op basis van testen is al ontwikkeld en zou een goede toevoeging aan de historische data zijn.

Veel deelnemers vinden 'schade' het grootste risico van een proefbelasting. Dit is opmerkelijk want in een kosten-batenanalyse wordt dit risico expliciet meegenomen. Een risico-neutrale beslisser zou altijd kiezen voor een proefbelasting wanneer de potentiële 'winst' van een overleefde proefbelasting hoger is dan de risico's van schade tijdens een proefbelasting.



Antwoorden van de deelnemers op de vraag: Wat is volgens u het grootste risico van het gebruik van proefbelastingen?

Het feit dat deelnemers 'schade' toch als grootste risico en 'onwenselijk' aangeven, kan aanduiden dat de beslissingsnemers risico proberen te vermijden. Veel deelnemers vinden het ook (bestuurlijk) lastig uit te leggen als een proefbelasting tot schade leidt. Daarnaast vindt men het lastig om uit te moeten leggen dat de dijk zwakker is dan gedacht. Dit is opmerkelijk, omdat het vinden van een zwakke plek zeer waardevol is. Zeker als die plek anders onopgemerkt was gebleven.

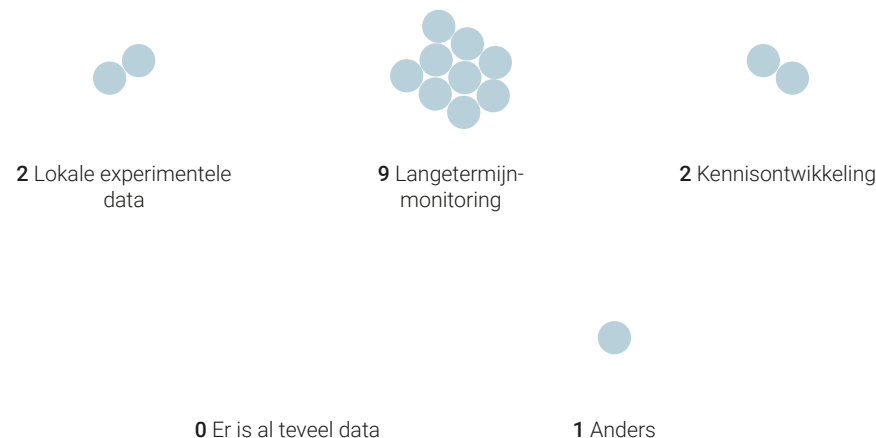
Optimalisatie van datagebruik bij dijkversterkingen

De nieuwe databronnen, historische dijkgegevens en proefbelastingen, zijn slechts twee van de vele mogelijkheden om meer informatie over onze dijken te vergaren. Als we deze verschillende mogelijkheden voorleggen bij de aanwezigen wordt langetermijnmonitoring gezien als beste optie om dijkversterkingen mee te optimaliseren. Vaak zien we echter dat alle informatie na een dijkversterking in een (oplever)dossier verdwijnt en niet wordt gebruikt om continu het veiligheidsbeeld bij te stellen.

Vooraf waterspanningen op de lange termijn worden benoemd als data die momenteel bijna altijd ontbreken, waardoor onzekerheidsschattingen lastig zijn. Echter, de invloed van de onzekerheid van waterspanningen is niet noodzakelijkerwijs de grootste onzekerheid in berekeningen. De deelnemers geven een duidelijke prioritering voor het verbeteren van het overstromingsrisicobeheer (zie de figuur rechts). Meer meten is belangrijk, net als probabilistisch rekenen. Full-scale experimenten zijn ook belangrijk. Het gebruik van historische data is minder aantrekkelijk dan bijv. risicogestuurd onderzoek, door minder goede beschikbaarheid en lastige punten met betrekking tot de beschrijving.

Conclusie en perspectief

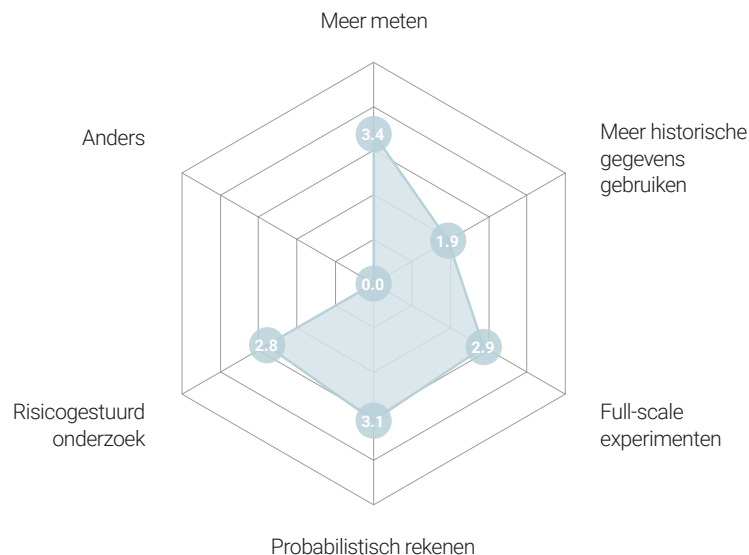
Wat voor databronnen ook zijn gebruikt, men is unaniem van mening dat data zo veel mogelijk moet worden (her)gebruikt, in een zo breed mogelijke toepassing van projecten. Het ideale toekomstbeeld is dat actuele en historische data worden gebruikt om continu de faalkans en



Reacties van deelnemers op de vraag: Welke gegevens kunnen we gebruiken om de dijkversterking het beste te optimaliseren?

restlevensduur bij te kunnen stellen en zo 'in control' te zijn met betrekking tot de hoogwaterveiligheid. Hiervoor is het wenselijk om alle data over actuele en historische dijkversterkingen openbaar beschikbaar te hebben. Dit behoeft goede afspraken tussen de opdrachtgever (waterschap) en opdrachtnemer (consortium/aannemer) over gegevens die relevant zijn of relevant kunnen worden in de toekomst.

Aangezien verwacht wordt dat we veel baat kunnen hebben bij langdurige monitoring van dijken, verdient dit aspect extra aandacht. Relevante kennisvragen zijn:



Reacties van deelnemers op de vraag: Wat zijn volgens u de belangrijkste stappen om de beheersing van overstromingsrisico's te verbeteren?

- Hoe lang moet er gemonitord worden om betrouwbare karakteristieken af te kunnen leiden?
- Hoe kunnen we vooraf specificeren hoe nieuwe data en inzichten de dijkversterking zullen beïnvloeden?

Een misvatting is dat met deze langetermijndata het gedrag generiek kan worden vastgelegd in simpele rekenregels. Hoewel metingen het gedrag zullen verduidelijken, blijft het in de geotechniek belangrijker om de situatie te begrijpen en te interpreteren.

Om continu de restlevensduur van dijken vast te kunnen stellen, is het ook nodig om beter inzicht te krijgen in hoe grond en grondgedrag

veranderen in de tijd en wat het effect op de faalkans is. Bijvoorbeeld een toenemende faalkans door scheurvorming en een afnemende faalkans door ageing van de grond en bewezen sterkte. De impact van toekomstige klimaatverandering speelt hierbij ook een belangrijke rol. Samen met de al bestaande monitoringsmethoden en nieuwe ontwikkelingen zal de toolbox van de dijkveiligheid-specialist steeds meer mogelijkheden bevatten om de betrouwbaarheid van dijken beter in te kunnen schatten.

All-Risk-aanbevelingen:

- Gebruik innovatieve data in de beoordeling van dijkveiligheid, dat kan veel nieuwe inzichten geven en de beoordeling verbeteren.
- Zet in op langetermijnmonitoring van dijken.
- Maak gegevens van dijken beschikbaar voor breder (her)gebruik.



Onderzoekers, studenten en dijkwerkers bij een grote schaal pipingproef in de proefpolder van Flood Proof Holland in Delft. Foto door Joost Pol

Hoofdstuk 5

Betrouwbaarheid en sterkte van waterkeringen

Introductie

Door Bas Jonkman

Zonder onze waterwerken zou Nederland niet bestaan. De betrouwbaarheid van de waterkeringen die grote delen van Nederland beschermen is dan ook essentieel. In totaal moet er de komende decennia – tot 2050 – bijna 1.500 kilometer aan keringen langs de rivieren, kust en grote meren versterkt worden. Dit is bijna 40% van de totale lengte van de keringen. Deze opgave staat centraal in het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP). Er worden heel hoge eisen gesteld aan de kwaliteit en betrouwbaarheid van versterkte dijken. Ook de inpasbaarheid in de omgeving is in een dichtbevolkt land als Nederland van groot belang. Dit vereist verder gaande verbetering van de kennis van keringen en de kwaliteit van oplossingen. Gelet op de lange looptijd van het landelijke dijkversterkingsprogramma – decennia – is het nuttig om ook in kennisprogramma's zoals All-Risk



kennis te ontwikkelen die na enkele jaren in het HWBP meegenomen kan worden. En ook om een cyclus van kennisontwikkeling op korte en langere termijn aan het HWBP te koppelen.

All-Risk-project D "Betrouwbaarheid en sterkte van waterkeringen" heeft op verschillende manieren tot een beter begrip opgeleverd van faalmechanismen en versterkingen. Het onderzoek van Joost Pol (D3) heeft laten zien hoe de groei van pipes onder een dijk beter begrepen en gemodelleerd kan worden. Een ander belangrijk faalmechanisme betreft golfoverslag: Vera van Bergeijk (D5) heeft inzicht gegeven in wanneer golfoverslag leidt tot erosie van dijken. Weiqiu Chen (D6) heeft de rol van scheve golfval en transitie in de dijk weten te kwantificeren.

Een lastig en "onzeker" faalmechanisme betreft de stabiliteit van dijken. Mark van der Krogt (D4) liet zien hoe het gedrag en zetting van de dijk tijdens de aanleg informatie opleveren over de sterkte tijdens de rest van de levensduur. Guido Remmerswaal (D1) heeft de volgende generatie stabiliteitsmodellen een stap verder gebracht "van kinder- naar tienerschoenen". Met deze kennis kan beter worden beoordeeld of er sprake is van risico van een serie vervolgafschuivingen na initieel falen. Belangrijke inzichten in ons vakgebied komen vaak uit grootschalige projecten of experimenten. Arny Lengkeek (D2) heeft de bezwijkproef van de door een damwand versterkte Eemdijk bestudeerd. Hij heeft kennis ontwikkeld om het gedrag van dit soort constructief versterkte dijken beter te begrijpen. Al deze inzichten van All-Risk-onderzoekers zullen bijdragen aan een scherpere beoordeling en efficiëntere versterking van keringen.

De inzichten zijn in samenwerking met experts van overheden, onderzoeksinstituten en bedrijven ontwikkeld.

Naast het directe onderzoek, is een niet te onderschatten component de ontwikkeling van "human capital". All-Risk-onderzoekers en -afstudeerders gaan bijna allemaal verder binnen dit uitdagende werkkterrein.

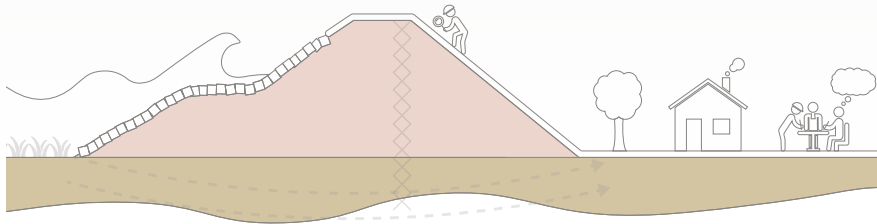
Uit dit project volgen drie hoofdaanbevelingen die kunnen bijdragen aan een betere beoordeling en een beter ontwerp van dijken. Ten eerste kunnen nieuwe kennis en meer geavanceerde modellen helpen om de veiligheid en benodigde versterking tegen instabiliteit en piping beter te bepalen. Ten tweede is het zeer waardevol om kennis te vergaren over het gedrag van dijken door metingen tijdens hoogwater, in de bouwfase en in grootschalige schaalproeven. Ten derde kunnen de nieuwe kennis en modellen rondom overslagbestendigheid gebruikt worden voor ontwerp en beoordeling.

Overigens kunnen extreme gebeurtenissen ook nieuwe inzichten geven in de veiligheid en de daaruit volgende versterkingsopgave. Het hoogwater in Limburg van de zomer van 2021 zal leiden tot een bijstelling van de inschattingen van de kansen op hoogwater. Bij hetzelfde hoogwater hebben de waterkeringen langs de Maas een extreem hoge belasting veilig doorstaan – een vorm van bewezen sterkte. Het optreden van deze onverwachte zomeroverstromingen heeft laten zien dat het werk aan onze waterveiligheid nooit af is en dat er veel onzekerheden zijn – zeker in een veranderend klimaat.

Projectsamenvatting

D1 - Resterende dijkweerstand

Inzicht in het proces na een afschuiving



Uitkomst

De huidige beoordeling van een binnenwaartse afschuiving van een dijk is beperkt tot het voorspellen van de kans op de eerste afschuiving. Het daaropvolgende faalproces kan niet voorspeld worden met de conventionele methodes. Tijdens dit project is de Materiaal Punten Methode (MPM) doorontwikkeld, waarmee het proces na de eerste afschuiving geëvalueerd kan worden. Analyses met behulp van MPM van een eenvoudige dijkgeometrie tonen aan dat een significante reductie van de overstromingskans haalbaar is door het gehele faalproces te beoordelen. Bovendien toont de analyse aan dat vervolgafschuivingen waarschijnlijker zijn wanneer de eerste afschuiving veroorzaakt wordt door een zwakke laag.

Door Guido Remmerswaal

Technische Universiteit Delft



Project start: 09/2017

Project einde: 09/2021

Promotoren

Dr. P.J. Vardon

Technische Universiteit Delft

Prof. dr. M.A. Hicks

Technische Universiteit Delft



Figuur 1: Macro-instabiliteit in Saksen-Anhalt (Duitsland) zonder overstroming.
Foto uit Jüpner et al. (2015).

Motivatatie en uitdagingen

De uitdaging van dit project is het voorspellen voor welke dijken een afschuiving acceptabel is, wat afhankelijk is van of er na de afschuiving een overstroming plaatsvindt. Het faalproces van een afschuiving begint met een scheur in de kruin of binnentalud (**Figuur 2, foto 1**). Hierna ontstaan er vervormingen wanneer de helling afschuift (**Figuur 2, foto 2**). Voor dijken met reststerkte kunnen deze vervormingen stoppen voordat een overstroming ontstaat. Soms ontstaan er echter grote deformaties, (**Figuur 2, foto 3**) wat mogelijk tot een vervolgafschuiving leidt. Een overstroming na vervormingen en afschuivingen is voor sommige dijken onwaarschijnlijk, terwijl dit bij andere dijken tot een dijkdoorbraak kan leiden (**Figuur 1, foto 4**). Een eerste afschuiving is acceptabel wanneer een dijkdoorbraak onwaarschijnlijk is. Het meenemen van reststerkte zorgt voor efficiëntere ontwerpen, waardoor versterkingen kunnen plaatsvinden waar ze het hardst nodig zijn. Door het modelleren en begrijpen van het faalproces is beter te voorspellen of het faalproces stopt voordat een dijkdoorbraak ontstaat. Met die kennis kunnen de richtlijnen voor dijkafschuiving worden geëvalueerd en uitgebreid.

Doel van het onderzoek

Voor de implementatie van de nieuwe standaarden voor dijkveiligheid zijn realistische schattingen van de overstromingskansen nodig. Dit is echter lastig doordat de huidige methodes enkel het begin van het faalproces voorspellen en niet het gehele proces tot aan overstroming. Het doel van dit onderzoek is het ontwerpen van een methode die het gehele faalproces na een dijkafschuiving kan modelleren, waarmee het effect van reststerkte op de overstromingskansen bepaald kan worden.

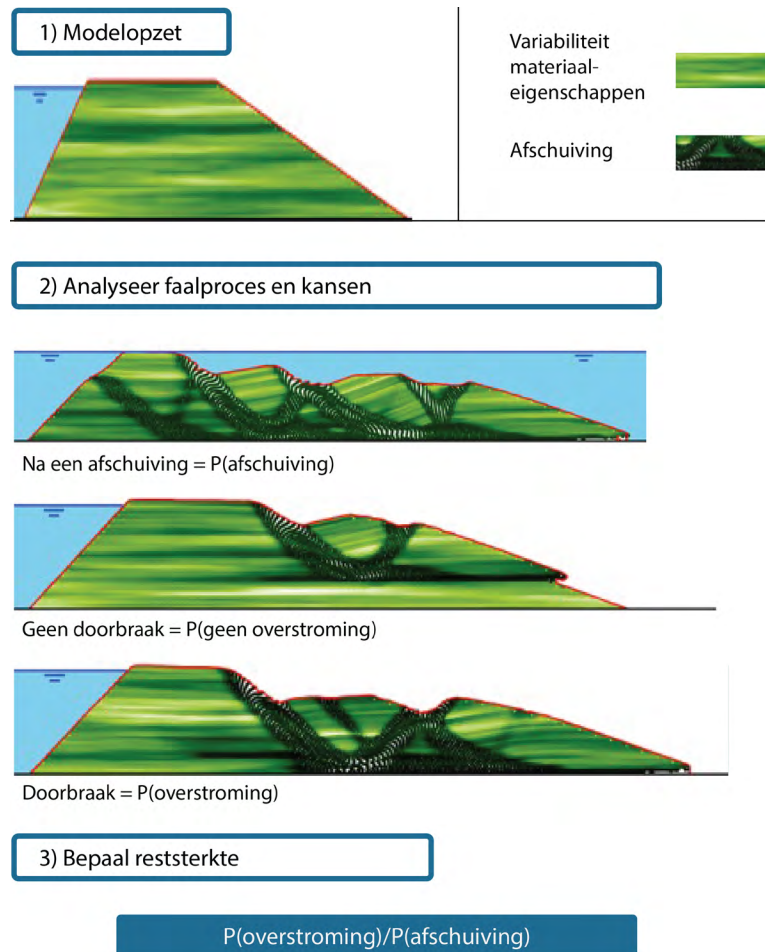
Innovatieve componenten

Om te voorspellen of een dijkdoorbraak plaatsvindt na een afschuiving heb ik de (Random) Materiaal Punten Methode ofwel (R)MPM



Figuur 2: Opeenvolging van hellingsinstabiliteiten die tot overstromingen leiden. Foto's van Grubert (2013) en schema's aangepast van Calle & Knoeff (2002).

ontwikkeld. Hiermee heb ik de reststerkte van dijken bepaald, die volgt uit het verschil tussen de kans op een afschuiving en de kans op een dijkdoorbraak. MPM is een nieuwe methode vergelijkbaar met de Eindige Element Methode, die zowel de start van het afschuiven als de daaropvolgende vervorming modelleert (**Figuur 3**).



Figuur 3: De belangrijkste componenten van het modelleren van reststerkte. Gebaseerd op schema's van Guido Remmerswaal.

Het model beschouwt de variabiliteit van de dijk en ondergrond door meerdere realisaties van materiaaleigenschappen te genereren. Elke realisatie is even waarschijnlijk, maar ze zijn niet hetzelfde. Het faalproces kan zeer variabel zijn door de variabiliteit van de dijk en ondergrond.

Daarom is de MPM uitgebreid tot een volledige probabilistische analyse (Random MPM) door de realisaties te combineren met MPM. Het huidige probabilistische kader wordt hiermee uitgebreid voor reststerkte. RMPM berekent voor elke realisatie of een afschuiving én of een dijkdoorbraak ontstaat, waarna de kans op een afschuiving en de kans op een dijkdoorbraak berekend worden. Hiermee wordt ook de reststerkte bepaald. De resultaten worden vergeleken met de huidige richtlijnen om inzicht te geven in hun toepasbaarheid.

Relevant voor wie en waar?

Dit onderzoek is relevant voor iedereen die overweegt reststerkte mee te nemen in een dijkontwerp of dijkbeoordeling, en vooral voor brede dijken of dijken hoger dan de normwaterstand.

Voortgang en toepassing

Een significante reststerkte was aanwezig in de voorbeelden die getest zijn, vooral voor brede dijken en dijken waar het waterniveau laag is in vergelijking met de kruinhoogte van de dijk. Oftewel, MPM kan de overstromingskansen reduceren ten opzichte van de kans op een afschuiving en daardoor te conservatieve berekeningen beperken.

De voorbeeld dijken die getest zijn waren relatief zwak in vergelijking met echte dijken, om een hoge eerste faalkans te garanderen en de duur van de berekening te verkleinen. Door de lage sterkte was ook de reststerkte relatief laag. Het voordeel van MPM is daarom naar verwachting groter voor echte dijken.

De analyses tonen aan dat reststerkte sterk afhangt van de geometrie, de materiaaleigenschappen, grondvariabiliteit en het waterniveau. De huidige richtlijnen voor reststerkte nemen een 'veilige' restgeometrie aan,

die na een afschuiving nooit tot overstroming leidt. Door de grote variatie in uitkomsten is een 'veilige' restgeometrie niet gevonden in de resultaten van dit onderzoek. In andere woorden: de kans op overstroming kan gereduceerd worden, maar wordt nooit nul. **Bekijk de projectresultaten hieronder** voor meer details over deze bevindingen.

Aanbevelingen voor de praktijk

- Evalueer faalprocessen tot aan overstroming om te groot conservatisme te beperken.
- Wees voorzichtig met simpele voorspellingen van het faalproces.
- Geef een gedetailleerde beschrijving van dijkafschuivingen voor de ontwikkeling van MPM.
- Gebruik MPM om het faalproces te modelleren, maar niet als een vervanging van de conventionele methodes voor eerste afschuivingen.
- Neem het effect van variabiliteit van de grond op dijkafschuivingen in acht, omdat het leidt tot efficiëntere ontwerpen (met of zonder het modelleren van het faalproces).

Belangrijkste projectresultaten



Remmerswaal, G., Vardon, P.J. & Hicks, M.A. (2021). [Evaluating residual dyke resistance using the Random Material Point Method](#). Doi: 10.1016/j.compgeo.2021.104034

González Acosta, J.L., Remmerswaal, G., Vardon, P.J. & Hicks, M.A. (2019). [An investigation of stress inaccuracies and proposed solution in the material point method](#). Doi: 10.1007/s00466-019-01783-3

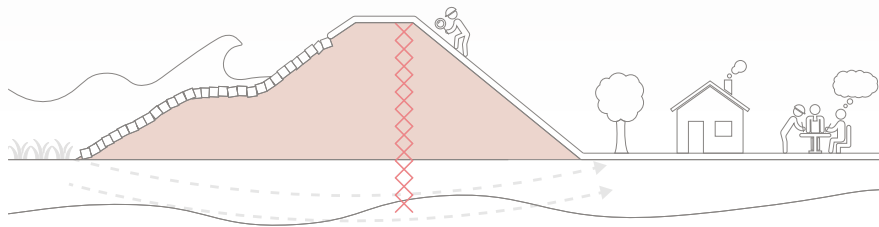


Tot dusver zijn de onderzoekscomponenten ontwikkeld voor typische dijktrajecten in Nederland zonder een specifieke casestudy of locatie op de kaart.

Projectsamenvatting

D2 - Modelleren van met damwanden versterkte dijken bij organische ondergrond

Inzichten uit de grootschalige Eemdijkproef



Uitkomst

In dit project (onderzoek) is een nieuwe methode ontwikkeld waarmee organische klei en veen beter kunnen worden geclassificeerd, alsmede correlaties voor de geotechnische parameters. Verder is er een nieuw model ontwikkeld gebaseerd op "Critical State Soil Mechanics", waarmee de ongedraineerde schijfsterkte wordt bepaald op basis van effectieve parameters. Ten slotte zijn analyses uitgevoerd van de Eemdijk-damwandproef, die drie deelproeven omvatte: (1) een (groene) gronddijk, (2) een dijk met damwand en (3) een trekproef op damwandpanelen. De evaluatie van de metingen geeft waardevol inzicht in het gedrag van damwanden in dijken tot aan en voorbij bezwijken.

Door Arny Lengkeek

Technische Universiteit Delft



Project start: 09/2017

Project einde: 09/2021

Promotoren

Dr. ir. R.B.J. Brinkgreve

Technische Universiteit Delft

Prof. dr. ir. S.N. Jonkman

Technische Universiteit Delft



Figuur 1: Eemdijkproef; met damwanden versterkte dijk voorafgaand aan bezwijken.
Foto door Arny Lengkeek.

Motivatatie en uitdagingen

Als geotechnisch adviseur met meer dan 20 jaar ervaring op het gebied van waterbouwkundige en geotechnische projecten in Nederland en het buitenland is mijn motivatie groot om de theorie goed te laten aansluiten bij de ontwerppraktijk voor dijken. Dit project bouwt verder op bestaande kennis op het gebied van dijken en damwanden, aangevuld met kennis op het gebied van parameterbepaling voor constitutieve modellen. Deze modellen worden gebruikt in analyses met eindige-elementenmethode waarin de interactie tussen dijk en damwand kan worden meegenomen. De Eemdijk-damwandproef was een uniek experiment waarin de modellen konden worden gevalideerd voor een gronddijk en een met een damwand versterkte dijk.

Doel van het onderzoek

Dit onderzoek beantwoordt de volgende onderzoeksvraag: wat is het gedrag van een dijk met damwandversterking onder hoogwatercondities en hoe kan dit worden gemodelleerd? De deelvragen zijn onderverdeeld in twee categorieën. De eerste categorie omvat de kennisvragen op het gebied van organische grond en parameterbepaling. De tweede categorie omvat de kennisvragen die volgen uit de Eemdijk-damwandproef.

Innovatieve componenten

In Nederland en andere deltagebieden zijn veel organische grondsoorten aanwezig. Er is een aanpassing op bestaande CPT-classificatie ontwikkeld om veen en organische klei beter te classificeren. Daarnaast zijn er nieuwe correlaties afgeleid, waaronder die voor het volumegewicht. Tevens is er een nieuw theoretisch model ontwikkeld (CSR-model) waarmee de ongedraineerde schuifsterkte wordt bepaald op basis van effectieve parameters. Het CSR-model kan ook worden geïmplementeerd in het "Limit Equilibrium Method" (LEM) model voor stabiliteitsanalyses.



Figuur 2: Eemdijk-damwandproef na bezwijken. Foto door Arny Lengkeek.

Ten slotte is de Eemdijkproef opgezet en geanalyseerd. Deze bestond uit de volgende deelproeven:

1. Damwandtrekproeven bestaande uit vier verschillende damwand-configuraties.
2. Een stabiliteitsproef voor een gronddijk waarbij het grondwaterpeil in de zandkern van de dijk trapsgewijs wordt verhoogd door infiltratie.
3. Een grootschalige proef op een met damwanden versterkte dijk om een realistisch belastingsscenario en bezwijkmechanisme te creëren.

Relevant voor wie en waar?

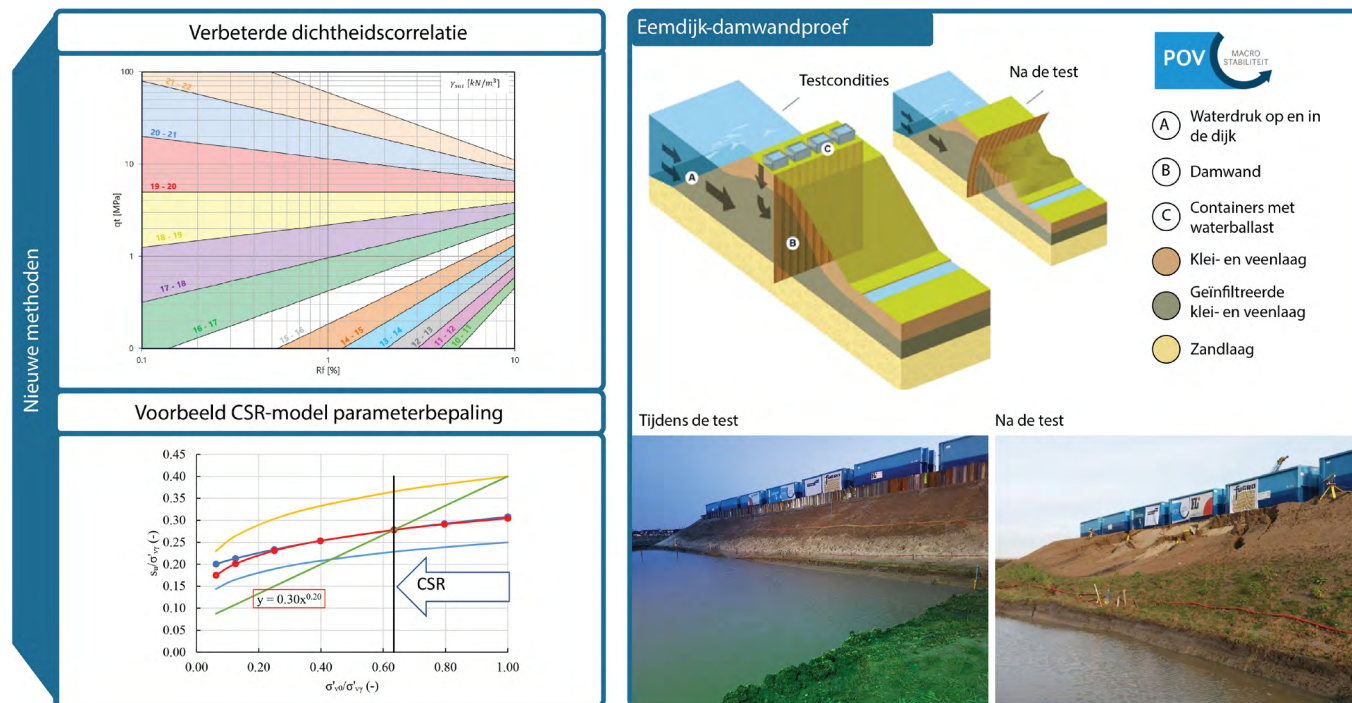
Ontwerpers van dijken die versterkt zijn met damwanden. Ontwerpers die CPT's gebruiken bij parameterbepaling van organische grondsoorten voor toepassing in civiele projecten.

Voortgang en toepassing

In dit project (onderzoek) is een aanpassing van de CPT-classificatie van organische klei en veen ontwikkeld, alsmede correlaties voor de geotechnische parameters. De correlaties zijn gebaseerd op regressiemethoden en voorzien van standaarddeviatie en betrouwbaarheidsinterval.

Het nieuwe CSR-model is gebaseerd op "Critical State Soil Mechanics" en sluit aan op de empirische methode "Stress History and Normalised Soil Engineering Properties" (SHANSEP). Het CSR-model kan worden gefit op data uit laboratoriumproeven (CAUC en K0CRS). Het model kan worden geïmplementeerd in eindige-elementenmethodes voor stabiliteitsanalyses.

De Eemdijk-damwandproef geeft inzicht in het gedrag van dijken versterkt met damwanden, onder hoogwater- en opdrijfcondities. De capaciteit van de damwanden onder deze omstandigheden blijkt te voldoen aan de Eurocode en het blijkt dat er een aanzienlijk reststerkte is na bezwijken. De continue damwand beperkt de mogelijkheid tot het ontstaan van een ongecontroleerde bres. Voor een gedetailleerde beschrijving wordt verwezen naar **de projectresultaten op de volgende pagina**.



Figuur 3: Componenten uit het onderzoek naar nieuwe methoden voor parameterbepaling en de Eemdijk-damwandproef. Bronnen: Illustratie en foto na bezwijken door POV macrostabiliteit. Foto van tijdens test door Arny Lengkeek.

Aanbevelingen voor de praktijk

- Geadviseerd wordt om bij organische grondsoorten de voorgestelde aanpassing voor CPT-classificatie toe te passen.
- Geadviseerd wordt het nieuwe CSR-model te gebruiken ter bepaling van de ongedraineerde schuifsterkte om de onzekerheid in parameterbepaling te beperken.
- De berekeningen met de EEM (eindige-elementenmodellen) sluiten goed aan op de metingen bij de Eemdijkproef. Als gevolg van 3D-effecten en anisotropie wordt de sterkte onderschat en worden de deformaties overschat. Toepassen van gereduceerde karakteristieke stijfheid wordt niet aanbevolen, aangezien dit al is verdisconteerd in de karakteristieke sterkte bij geavanceerde EEM-modellen.



Belangrijkste projectresultaten



Lengkeek, H.J., Jonkman, S.N., & Kanning, W. (2021). Application of geo-statistics and pairwise established CPT-based correlations for line infrastructure. <http://isc6.org/images/Cikkeek/Sessions/ISC2020-487.pdf>

Lengkeek, A., Naves, T., Post, M., & Bredeveld, J. (2019). Eemdijk full-scale field test programme: sheet pile pullover tests. Doi: 10.32075/17ECSMGE-2019-0456

Bredeveld, J., Zwanenburg, C., Van, M., & Lengkeek, A. (2019). Impact of the Eemdijk full-scale test programme. Doi: 10.32075/17ECSMGE-2019-0398

De componenten uit dit onderzoek zijn ontwikkeld met data uit bestaande dijkversterkingsprojecten in Nederland en uit de Eemdijk-damwandpoef.

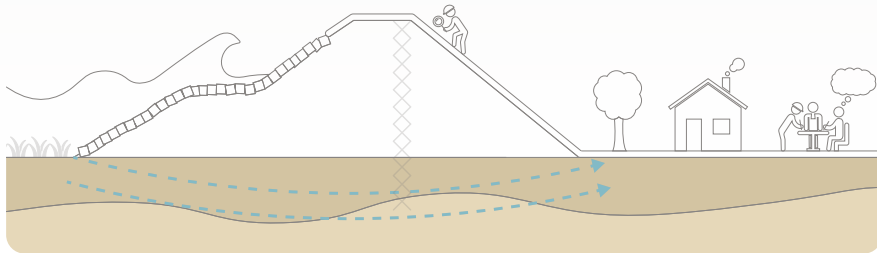
Foto © NOS / Eric Feijten.



Projectsamenvatting

D3 - Tijdsafhankelijke piping en interacties

Veiligheidsbeoordeling met tijdsafhankelijke faalprocessen



Uitkomst

Het onderzoek biedt inzicht in twee aspecten die een rol spelen bij het bepalen van een faalkans die beter aansluit op de nieuwe normen in de vorm van een overstromingskans. Het grootste deel van het onderzoek (over piping) gaat over de mate waarin de benodigde tijd voor pipegroei doorwerkt in de faalkans. Hiervoor zijn labproeven uitgevoerd, is een pipegroeimodel ontwikkeld en is deze kennis samengebracht in een tijdsafhankelijke betrouwbaarheidsanalyse. Bij relatief korte belastingduren of bij effectieve noodmaatregelen leidt tijdsafhankelijke pipegroei tot aanzienlijk lagere faalkansen. Daarnaast is verkend in welke situaties interactie tussen faalmechanismen een belangrijke rol speelt.

Door Joost Pol

Technische Universiteit Delft

Project start: 09/2017

Project einde: 03/2022



Promotoren

Ir. W. Kanning

Technische Universiteit Delft

Prof. dr. ir. S.N. Jonkman

Technische Universiteit Delft

Prof. dr. ir. M. Kok

Technische Universiteit Delft



Figuur 1: De Waal bij Beuningen tijdens de overstroming van 1993. Foto door Rijkswaterstaat, beeldbank.rws.nl / Bart van Eyck.

Motivatie en uitdagingen

De huidige beoordeling van waterkeringen leidt tot hoge faalkansen door bijvoorbeeld piping. Deze conservatieve veiligheidsinschattingen kunnen leiden tot hoge dijkversterkingskosten. Daarom is het van groot maatschappelijk belang om faalkansanalyses aan te scherpen. Het meenemen van de beperkte duur van een hoogwater (**Figuur 1**) is een van de aspecten om tot realistische faalkansen en efficiëntere ontwerpen te komen.

Falen door piping ontstaat door een grondwaterstroming onder de dijk die zand meevoert, wat leidt tot zeer kleine kanaaltjes (**Figuur 3**) die de dijk ondermijnen. Het interpreteren van pipingobservaties tijdens hoogwater is een grote uitdaging. Denk bijvoorbeeld aan de beoordeling van zandmeevoerende wellen die vaak al ontstaan tijdens relatief lage waterstanden. Om het gevaar van deze wellen in te schatten en adequate noodmaatregelen te treffen, is het van belang het faalproces beter te begrijpen door middel van laboratoriumproeven en veldobservaties.

Doel van het onderzoek

Het doel van dit project is om faalkansen te kwantificeren waarbij rekening wordt gehouden met de hoogwaterduur en tijdsafhankelijke faalprocessen. Het project richt zich met name op piping.

Innovatieve componenten

Tijdsafhankelijkheid meenemen in faalkansanalyses vereist het kunnen modelleren van het faalgedrag. Daarom bevat het project de volgende innovatieve componenten:



Figuur 2: Piping in het laboratorium. Foto's links door Toan Nguyen en foto rechts door Joost Pol.

1. Beter begrip van de ontwikkeling van het faalproces door middel van experimenten op kleine en grote schaal.
2. Modelleren van tijdsafhankelijke pipeontwikkeling als aanvulling op het statische Sellmeijer-model.
3. Een verkenning naar het belang van fysieke interacties tussen faalmechanismen.

Deze inzichten vertaal ik naar een probabilistisch model, waarin hydraulische belastingen, dijksterkte en faalmodellen worden gecombineerd om de overstromingskans tijdens een hoogwater of op langere termijn te berekenen. Hiermee kan het effect van tijdsafhankelijkheid op de berekende veiligheid worden bepaald in verschillende watersystemen. Het project richt zich op piping, maar vergelijkbare methoden zullen ook toepasbaar zijn voor andere mechanismen.

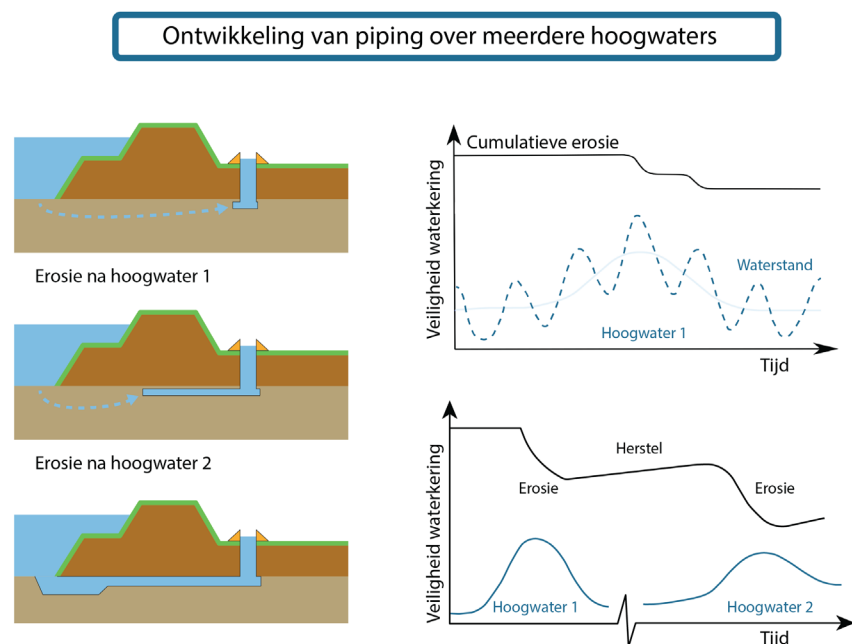
Relevant voor wie en waar?

Waterkeringbeheerders. In het bijzonder in gebieden met relatief korte belastingduren, om berekende faalkansen te reduceren. In alle gebieden is het relevant voor crisisbeheersing.

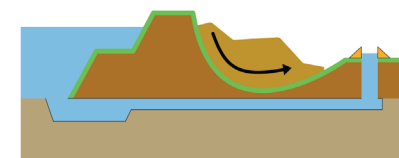
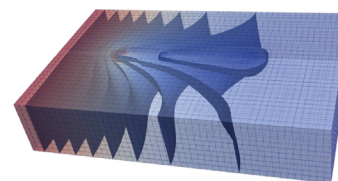
Voortgang en toepassing

Op dit moment (december 2021) is het experimentele deel afgerond. Het komende half jaar wordt de pipegroeimodellering en faalkansanalyse verder verfijnd. De voorlopige resultaten laten zien dat tijdsafhankelijke

analyse van pipegroeï voor een significante vertraging in het faalproces zorgt, en daarmee voor een reductie in faalkans en opgave. Dit geldt met name in storm-gedomineerde gebieden, maar ook bij rivierdijken is er potentie in combinatie met tijdige maatregelen zoals opkisten. Ook blijkt dat de kans groot is dat een pipingdoorbraak pas na de piek van het hoogwater optreedt, wat van belang is voor de crisisbeheersing tijdens hoogwater. De uitkomsten kunnen gebruikt worden voor maatwerk in beoordelingen en ontwerpen en om de eenvoudige toetsregels voor piping aan te scherpen.



Onderzoek voor het ontwikkelen van een probabilistisch model



Figuur 3: **Links:** Pipingproces gebaseerd op [van Beek \(2015\)](#) en grafieken van dijkveiligheid in de tijd door Joost Pol. **Rechts:** Hoofdonderdelen van het onderzoeksproject. Foto links © Sam Rentmeester en foto rechts en schema's van Joost Pol.

Aanbevelingen voor de praktijk

- Overweeg bij veiligheidsbeoordelingen en dijkversterkingen of voordeel te behalen is met het kwantificeren van tijdsafhankelijke pipegroei.
- Overweeg om maatregelen zoals (opkisten) mee te nemen in faalkansanalyses; in combinatie met langzame pipegroei leiden deze namelijk tot lagere faalkansen of efficiëntere ontwerpen.
- Leid een nieuwe eenvoudige toetsregel af voor tijdsafhankelijke pipegroei.
- Blijf investeren in experimenteel onderzoek naar het pipingproces.
- Heb aandacht voor mogelijke interacties tussen faalmechanismen bij het gebruik van faalpadanalyses voor het kwantificeren van reststerkte.

Belangrijkste projectresultaten



Pol, J.C., Kanning, W. & Jonkman, S.N. (2021). Temporal Development of Backward Erosion Piping in a Large-Scale Experiment. Doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002415

Pol, J.C., van Klaveren, W., Kanning, W., van Beek, V.M., Robbins, B.A. & Jonkman, S.N. (2020). Progression Rate of Backward Erosion Piping: Small Scale Experiments. 10th International Conference on Scour and Erosion (ICSE-10) : Arlington, Virginia, USA. 18-21 October, 2021 (pp. 93-102).

Pol, J.C., van Beek, V.M., Kanning, W. & Jonkman, S.N. (2019). Progression rate of backward erosion piping in laboratory experiments and reliability analysis. Doi: 10.3850/978-981-11-2725-0_IS4-3-cd



De bevindingen van dit onderzoek zijn ontwikkeld in het laboratorium en met een veldtest, en zullen toepasbaar zijn op dijkversterkingsprojecten in Nederland.

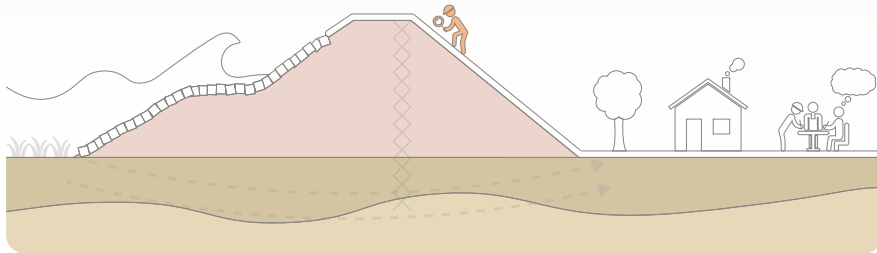
Foto door Joost Pol.



Projectsamenvatting

D4 - Verwerking van prestaties uit het verleden

Verbeterde methoden voor faalkansschattingen van dijken



Uitkomst

In dit project zijn methoden ontwikkeld om de betrouwbaarheidsschatting voor de stabiliteit van dijktafsluitingen te verbeteren door rekening te houden met prestatie-informatie. Door de informatie van overleefde (proef)belastingen en monitoring tijdens de bouw van dijken mee te nemen, worden betrouwbaarheidsschattingen geloofwaardiger, verbeteren veiligheidsbeoordelingen en kan het ontwerp van dijkversterkingen efficiënter worden gemaakt. Zelfs als het verkrijgen van prestatie-informatie geld kost of risico geeft, kan dit tot een kosteneffectieve strategie en beter overstromingsrisicobeheer leiden.

Door Mark van der Krogt

Technische Universiteit Delft

Project start: 09/2017

Project einde: 09/2021



Promotoren

Dr. ir. T. Schweckendiek

Technische Universiteit Delft

Prof. dr. ir. M. Kok

Technische Universiteit Delft



Figuur 1: Aanleg van een dijk. Bron: [HWBP \(2018, p.103\)](#), foto genomen door Pascal Ogink.

Motivatatie en uitdagingen

Sinds 2017 wordt de hoogwaterveiligheid in Nederland gebaseerd op faalkansen voor faalmechanismen. Dijken worden op veiligheid beoordeeld met behulp van (semi-)probabilistische analysemethoden. Deze faalkansschattingen worden echter (onder andere) gedomineerd door de kennis over de ondergrond, die vaak beperkt en onzeker is. Deze beperkte kennis speelt met name een rol bij macro-instabiliteit, wat al dan niet kan leiden tot overstrooming door dijkdoorbraak (**Figuur 2**).

Het meten, monitoren en toevoegen van informatie over de prestaties van dijken in het verleden kan de onzekerheid verminderen en zo leiden tot betere faalkansschattingen. Een deel van deze prestatie-informatie is beschikbaar bij het meten van de bodemeigenschappen of het monitoren van bestaande dijken. Ook tijdens dijkversterkingsprojecten (**Figuur 1**), wordt prestatie-informatie verzameld, bijvoorbeeld door waterspanningsmonitoring en zettingsmetingen tijdens de dijkaanleg. Er wordt echter niet altijd alle informatie gebruikt om de veiligheid van de dijken te beoordelen of om de schattingen van de verwachte levensduur te verbeteren.

Doel van het onderzoek

Dit onderzoek richt zich op het ontwikkelen van methoden om verschillende bronnen van prestatie-informatie efficiënt te combineren in veiligheidsbeoordelingen voor dijken.

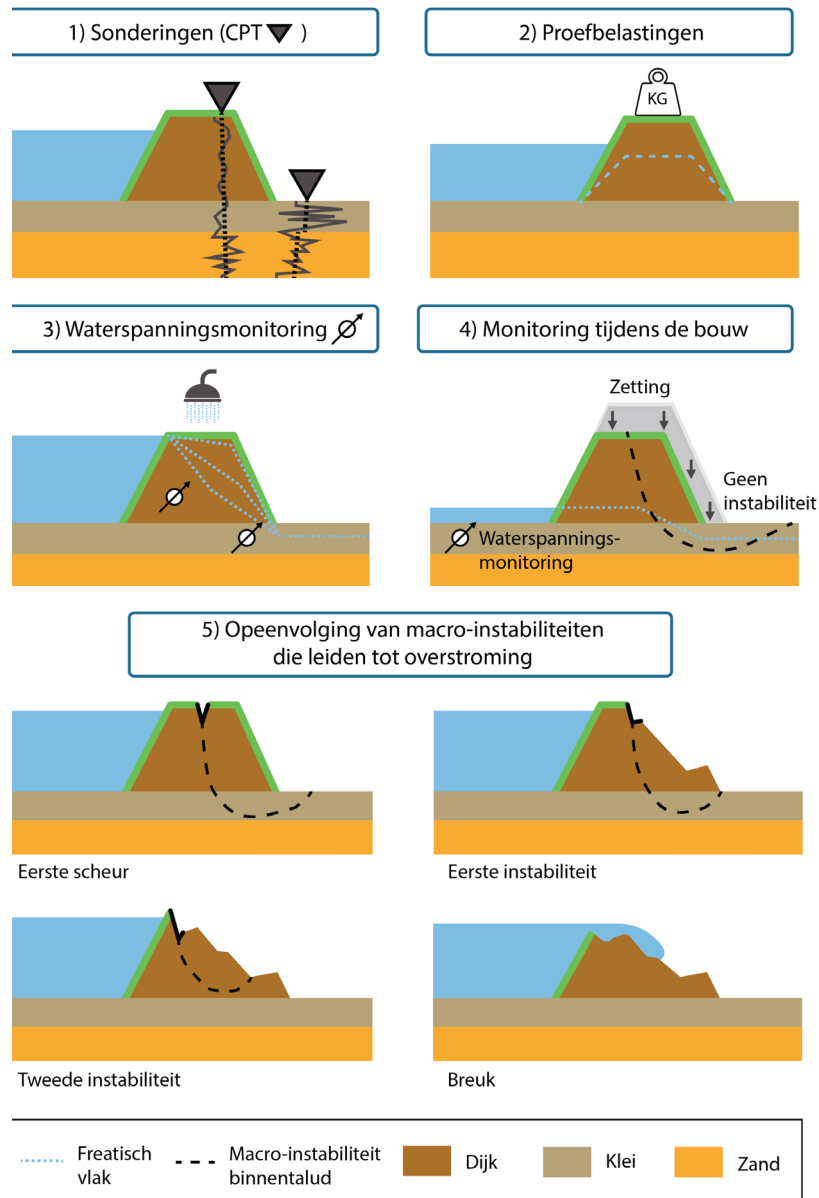
Innovatieve componenten

Ik ontwikkel verschillende manieren om de faalkansschattingen te verbeteren door verschillende soorten informatie over de prestaties in het verleden op te nemen:



Figuur 2: Voorbeelden van taludinstabiliteit aan de landzijde met en zonder overstrooming als gevolg van dijkdoorbraak. Bronnen: Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt (LHW) en Jüpner et al. (2015).

- Identificatie van de manier waarop foutbronnen bijdragen aan de totale onzekerheid in het ruimtelijk gemiddelde van bodemeigenschappen wanneer deze gemeten worden met behulp van sonderingen (CPT's in **Figuur 3.1**).
- De waarde van informatie voor proefbelastingen (**Figuur 3.2**) en waterspanningsmonitoring (**Figuur 3.3**) met behulp van een beslisboom (gezamenlijk onderdeel met project A1).
- Hoe belastingen tijdens de aanlegfase (**Figuur 3.4**), zoals het gewicht van de grond die gebruikt wordt om dijken te versterken, gebruikt kunnen worden om de betrouwbaarheidsinschatting voor een dijk bij hoogwater te verbeteren.
- Het verder reduceren van onzekerheid door het combineren van waarnemingen tijdens de bouw (**Figuur 3.4**) zoals overleving, zettingsmeting en waterdrukmonitoring.
- Ontwikkeling van gebeurtenissenbomen om de overstromingskans te schatten op basis van verschillende (**Figuur 3.5**) opeenvolgende conditionele instabiliteiten.



Figuur 3: 1 tot 5 geven het type prestatiegegevens dat in dit project in aanmerking is genomen. Gebaseerd op schema's van Mark van der Krogt. 3.5 aangepast van Calle & Knoeff (2002, Figuur 4.1).

Relevant voor wie en waar?

Onderzoekers die geïnteresseerd zijn in probabilistische analyse en organisaties die meer doelgerichte en kosteneffectieve bescherming tegen overstromingen willen.

Voortgang en toepassing

Het onderzoek heeft aangetoond dat karakteristieke waarden van bodemeigenschappen bepaald met sonderingen aanzienlijk hoger kunnen uitvallen als uitmiddeling van willekeurige fouten in aanmerking wordt genomen. Bovendien kunnen we de onzekerheid in locatiespecifieke transformatiemodellen verminderen door de afstand tussen boringen en grondonderzoeksproeven (sonderingen) te minimaliseren en de systematische afwijking (bias) in de metingen te verminderen.

De aanleg van dijken is een grote belasting voor de slappe ondergrond. Met behulp van Bayesiaanse actualisatie kan de informatie over de overlevingskansen door de aanleg worden meegenomen in de beoordeling van de betrouwbaarheid van de dijk. Dit vermindert de onzekerheid en verbetert de schattingen van de faalkans. Afhankelijk van de situatie kan de faalkans met meer dan een factor 10 afnemen. Deze reductie is vooral significant wanneer de belastingseffecten tijdens de aanleg sterk lijken op de toekomstige overstromingssituatie die wordt beoordeeld, zoals bij dijken op slappe ondergrond.

Onzekerheidsreducerende maatregelen zoals proefbelasting en waterspanningsmonitoring toegepast op typische dijktrajecten in Nederland, hebben een positieve Value of Information en zijn dus vaak de moeite van het investeren waard. Voor details over de bevindingen, **zie de projectresultaten op de volgende pagina.**

Aanbevelingen voor de praktijk

- Maak liever gebruik van meerdere boorgaten op voldoende afstand van elkaar dan van meerdere metingen binnen één boorgat voor het verminderen van de onzekerheid in locatiespecifieke transformatie-modellen voor statistisch homogene geologische afzettingen (op regionale schaal).
- Verzamel tijdens de aanleg van dijkversterkingen prestatie-informatie die de onzekerheden verkleint (zoals gegevens over het overleven van de aanlegfase en de zetting na het ophogen van de dijken) en gebruik deze om de ontwerpen tijdens de dijkversterking te optimaliseren.
- Neem prestatie-informatie mee in toekomstige dijkveiligheidsbeoordelingen omdat dit de levensduur van de dijkversterking kan verlengen, wat in het bijzonder interessant is in het licht van versnelde klimaatverandering.
- Overweeg bewust een klein risico te nemen (bijvoorbeeld een kritischer gefaseerd belastingschema of proefbelastingen) om een grotere betrouwbaarheidsupdate en een goedkoper ontwerp te verkrijgen. Zo'n betrouwbaarheidsupdate is vooral van belang op locaties waar anders dure (constructieve) oplossingen nodig zouden zijn.

Belangrijkste projectresultaten



van der Krogt, M.G., Schweckendiek, T. & Kok, M. (2018). [Uncertainty in spatial average undrained shear strength with a site-specific transformation model](https://doi.org/10.1080/17499518.2018.1554820). Doi: 10.1080/17499518.2018.1554820

van der Krogt, M.G., Schweckendiek, T. & Kok, M. (2021). [Improving dike reliability estimates by incorporating construction survival](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105937). Doi: 10.1016/j.enggeo.2020.105937

van der Krogt, M.G., Klerk, W.J., Kanning, W., Schweckendiek, T. & Kok, M. (2020). [Value of information of combinations of proof loading and pore pressure monitoring for flood defences](https://doi.org/10.1080/15732479.2020.1857794). Doi: 10.1080/15732479.2020.1857794



De componenten uit dit onderzoek zijn ontwikkeld met data uit bestaande dijkversterkingsprojecten in Nederland en uit de Eemdijk-damwandpoef en zijn toepasbaar op dijkversterkingsprojecten in Nederland.

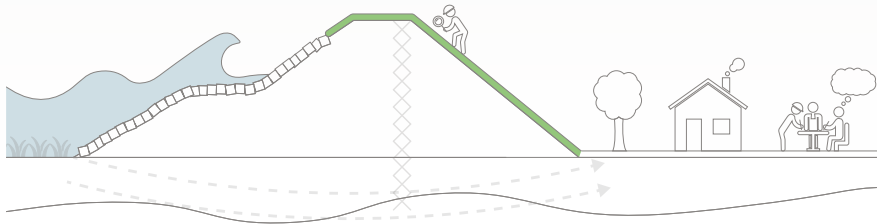
Foto © NOS / Eric Feijten.



Projectsamenvatting

D5 - Belasting en erosie door overslag

Betere modellen waarin de effecten van overgangen meegenomen kunnen worden



Uitkomst

Wij hebben verschillende methodes ontwikkeld voor de belasting van overslaande golven op de bekleding, waardoor de belasting nu langs de dijkkrui en het binnentalud berekend kan worden inclusief het effect van overgangen. Geometrische overgangen, zoals veranderingen in hoek en hoogteverschillen, hebben grote invloed op de belasting in tegenstelling tot overgangen in bekleding die relatief weinig effect hebben op de belasting.

De ontwikkelde methodes kunnen gebruikt worden om de effecten van overgangen op belasting en de bijhorende erosie van de grasmat mee te nemen bij het ontwerp van dijken om de beste locatie en het beste ontwerp van overgangen te bepalen.

Door Vera van Bergeijk

Universiteit Twente

Project start: 10/2017

Project einde: 10/2021



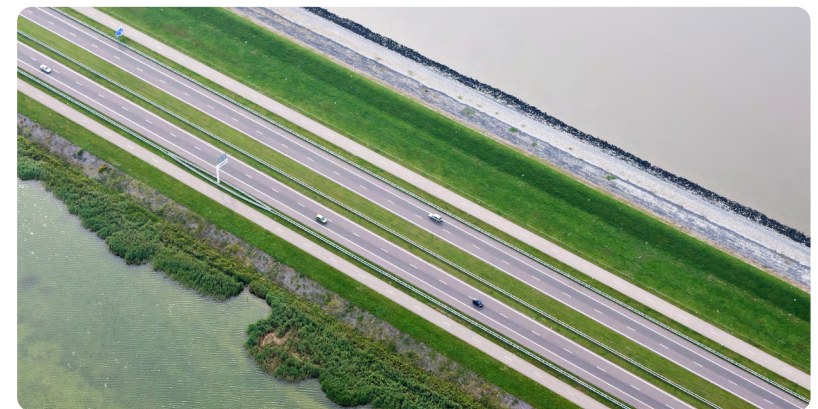
Promotoren

Prof. dr. S.J.M.H. Hulscher

Universiteit Twente

Dr. J.J. Warmink

Universiteit Twente



Figuur 1: Overgangen in bekleding en geometrie op de Afsluitdijk. Foto door Rijkswaterstaat, beeldbank.rws.nl / Joop van Houdt.

Motivatatie en uitdagingen

De introductie van multifunctionele dijken in Nederland heeft geleid tot een toename van het aantal overgangen op dijken. Een voorbeeld van zulke overgangen zijn wegen op een dijk met een grasmat (**Figuur 2, boven**) en geometrische veranderingen zoals een berm, trap of een boom. Hoge golven tijdens een storm zorgen ervoor dat de golven over de dijk heen slaan en langs het binnentalud naar beneden stromen. Deze overslaande golven oefenen een grote kracht uit op de bekleding en kunnen leiden tot erosie van de grasmat (**Figuur 2, linksonder**). Na erosie van de bekleding begint de dijk kern te eroderen, wat leidt tot verzwakking van de dijk en uiteindelijk tot een dijkdoorbraak. Erosie door golfoverslag was een van de oorzaken die leidde tot de dijkdoorbraken tijdens de Waterloodsrampp in 1953. Recente experimenten en numerieke studies hebben aangetoond dat overgangen zwakke plekken zijn langs het profiel waar de erosie van de dijk bekleding begint (**Figuur 2, rechtsonder**). Het was echter onduidelijk hoe deze overgangen de stroming van en erosie door overslaande golven beïnvloeden, waardoor het lastig is om overgangen mee te nemen in bestaande rekenmethodes.

Doel van het onderzoek

Het doel van dit onderzoek is om de belasting van overslaande golven op de kruin en het binnentalud te kwantificeren voor dijken met verschillende overgangen. Wij gebruiken een numeriek model om de belangrijke processen bij overgangen te bestuderen en de belasting te kwantificeren. Hierdoor kunnen de effecten van overgangen meegenomen worden in de bestaande rekenmethodes om het ontwerp van overgangen op dijken te verbeteren.

Innovatieve componenten

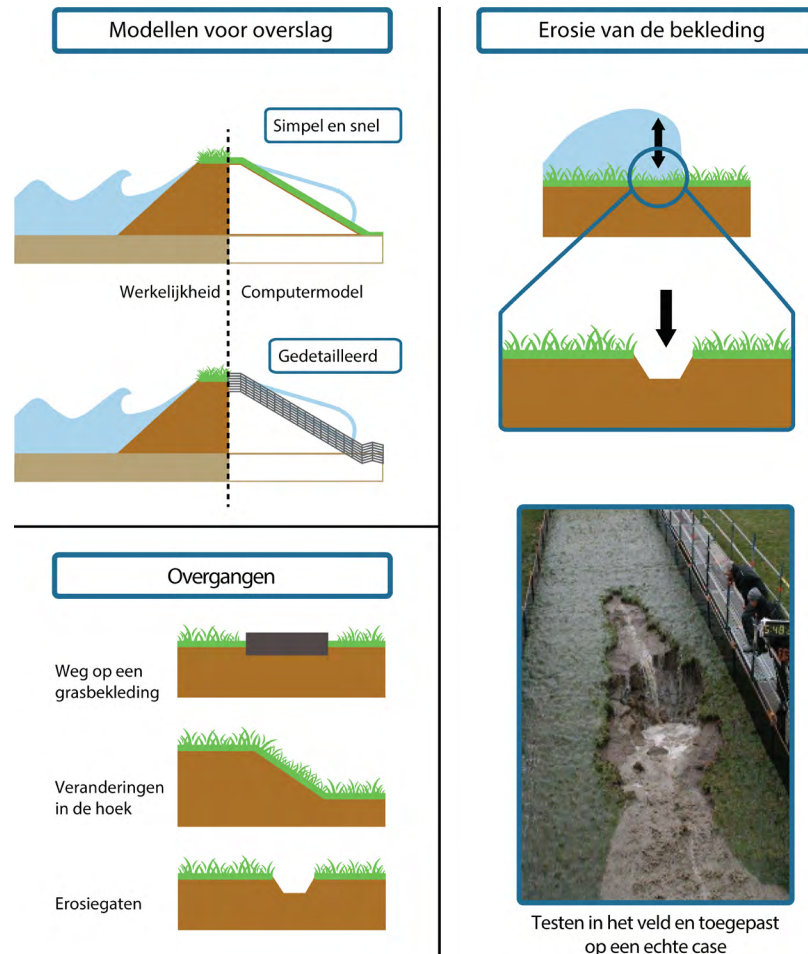
In dit onderzoek hebben we twee modellen ontwikkeld. Het eerste model is simpel en snel en geschikt voor probabilistische berekeningen. Het tweede



Figuur 2: **Boven:** Een weg op een zeedijk met grasbekleding. Foto door Vera van Bergeijk. **Linksonder:** Overslag over een dijk met een weg op de kruin. Bron: <https://coastalpartners.org.uk/>. **Rechtsonder:** Erosie van de grasbekleding bij de binnenteen tijdens een overslagexperiment. Bron: Hoffmans (2014).

numerieke model simuleert in detail de krachten die op de bekleding uitgeoefend worden (**Figuur 3, linksboven**). Deze modellen bepalen de plekken waar de krachten het grootst zijn, wat kan leiden tot erosie van de grasmat en het falen van de dijk. **Figuur 3 rechts bovenin** illustreert een locatie langs het talud waar de golf hard aan de grasmat trekt en waardoor de grasmat erodeert.

Bestaande rekenmethodes kunnen slechts op één locatie langs het profiel worden toegepast. Deze nieuwe modellen berekenen de krachten langs het gehele profiel, zodat het effect van overgangen op de stroming



Figuur 3: Innovatieve componenten van het onderzoek. Gebaseerd op schema's van Vera van Bergeijk. Foto door Juan Pablo Aguilar Lopez.

zowel bovenstrooms als benedenstrooms wordt meegenomen. De kennis over overgangen uit het gedetailleerde model proberen we te simplifieren en toe te voegen aan het snelle model. Daarbij bestuderen we drie typen overgangen (**Figuur 3, linksonder**):

- Bekledingstype: bijvoorbeeld een weg op een met gras beklede dijk.
- Geometrie: veranderingen in hoek, zoals een horizontale berm.
- Hoogteverschillen: onregelmatigheden in het profiel, zoals erosiegaten of eerdere afschuivingen.

De modellen zijn toegepast op een rivierdijk met grasbekleding en een weg op de kruin bij Millingen a/d Rijn waar veldtesten uitgevoerd zijn in 2013. Ook zijn de modellen toegepast op het nieuwe groene ontwerp van de Afsluitdijk om zwakke plekken in de grasmat te bepalen (**zie de kaart op de volgende pagina**).

Relevant voor wie en waar?

Vakmensen en organisaties die zich bezig houden met ontwerp, toetsing of onderhoud van overgangen op dijken. De methodes ontwikkeld in deze studie kunnen gebruikt worden om mogelijke zwakke plekken te identificeren en de faalkans van golfoverslag te berekenen voor complexe dijken met verschillende combinaties van overgangen.

Voortgang en toepassing

In dit project zijn verschillende methodes ontwikkeld die voor iedereen beschikbaar en breed toepasbaar zijn. Deze methodes zijn potentieel nauwkeuriger dan bestaande rekenmethodes en kunnen toegepast worden op dijken met meerdere overgangen. Een modelstudie van het nieuwe ontwerp van de Afsluitdijk laat zien dat overgangen leiden tot een maximaal toelaatbaar overslagdebiet dat tien keer kleiner is dan dijken zonder overgangen. Daarbij is de binnentoeen de zwakste plek langs het talud door de hoge snelheden. Een andere geometrische overgang is de kruinlijn bij het binnentalud. De golf kan hier loslaten van de kruin in het geval van een steil binnentalud, wat leidt tot hoge krachten op de landingslocatie. Hetzelfde proces treedt op bij overgangen in hoogte zoals

beschadigingen in de grasmat. De berekeningen met het snelle model laten ook zien dat de faalkans behoorlijk toeneemt als de dijk beschadigd is door erosie van de grasmat of een afschuiving. Voor een uitgebreidere beschrijving van het onderzoek, **bekijk de projectresultaten hieronder**. De modellen gebruiken de metingen van experimenten op een rivierdijk bij Millingen en zijn verder toegepast op de Afsluitdijk.

Aanbevelingen voor de praktijk

- Bereken de belasting van overslaande golven en de erosie langs het dijk-profiel om zwakke plekken te vinden voor het falen van de grasbekleding.
- Neem overgangen en andere onregelmatigheden mee in de rekenmethodes voor het ontwerp en de beoordeling van dijken.
- Overgangen in hoogte hebben een grote invloed op de belasting en kunnen daardoor tot veel erosie leiden. Beperk daarom het aantal overgangen in hoogte zodat dijken beter beschermd zijn tegen overslag.
- Bepaal de werkelijke sterkte van de deklaag en de kern van dijken zodat er realistische faaldefinities ontwikkeld kunnen worden.

Belangrijkste projectresultaten



van Bergeijk, V.M., Warmink, J.J. & Hulscher, S.J.M.H. (2022). [The wave overtopping load on landward slopes of grass-covered flood defences: Deriving practical formulations using a numerical model](#). Doi: 10.1016/j.coastaleng.2021.104047

van Bergeijk, V.M., Verdonk, V.A., Warmink, J.J. & Hulscher, S.J.M.H. (2021). [The Cross-Dike Failure Probability by Wave Overtopping over Grass-Covered and Damaged Dikes](#). Doi: 10.3390/w13050690

van Bergeijk, V.M., Warmink, J.J., van Gent, M.R.A. & Hulscher, S.J.M.H. (2019). [An analytical model of wave overtopping flow velocities on dike crests and landward slopes](#). Doi: 10.1016/j.coastaleng.2019.03.001



De modellen gebruiken de metingen van experimenten op een rivierdijk bij Millingen en zijn verder toegepast op de Afsluitdijk.

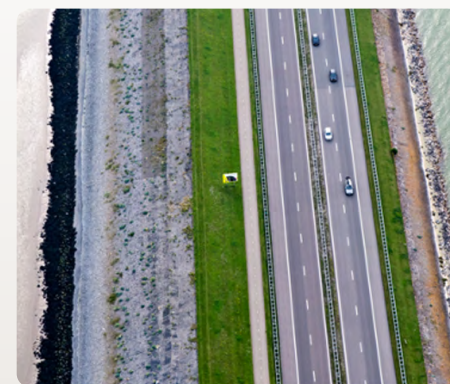
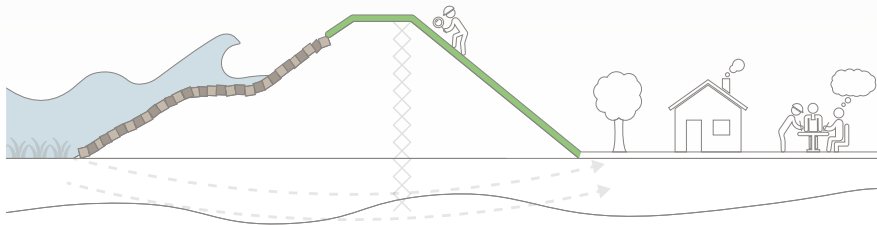


Foto door Rijkswaterstaat, beeldbank.rws.nl / Joop van Houdt.

Projectsamenvatting

D6 - Bermen en ruwheidselementen

Betere methoden voor het schatten van de invloed op de golfoverslagafvoer



Uitkomst

In dit project hebben we nieuwe empirische vergelijkingen en numerieke modellen ontwikkeld voor het voorspellen van de effecten van bermen, ruwheid en schuine golven op golfoverslag bij dijken. Betere schattingen van deze effecten kunnen leiden tot nauwkeurigere voorspellingen van golfoverslag, wat belangrijk is voor dijkontwerp en versterking. Experimenten in het Pacific Basin bij Deltares hebben laten zien dat ruwheidselementen op het bovenste deel van het buitentalud effectiever zijn in het verminderen van het overslagdebiet dan op het midden en onderste deel van het buitentalud. De nieuw ontwikkelde numerieke modellen zijn in staat om nauwkeurig de overslagdebieten en golfoverslagkarakteristieken (snelheid en laagdikte) te voorspellen. In combinatie met empirische vergelijkingen kan dit een aanvullend instrument opleveren voor het voorspellen van golfoverslag bij dijken.

Door Weiqiu Chen

Universiteit Twente



Project start: 09/2017

Project einde: 09/2021

Promotoren

Prof. dr. S.J.M.H. Hulscher

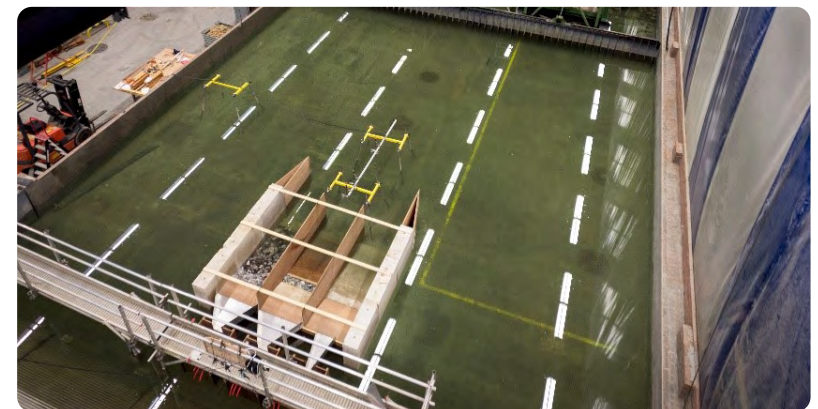
Universiteit Twente

Dr. J.J. Warmink

Universiteit Twente

Prof. dr. M.R.A. van Gent

Deltares, Technische Universiteit Delft



Figuur 1: Fysische modeltesten in het Pacific Basin bij Deltares. Foto door Deltares.

Motivatie en uitdagingen

Als gevolg van de klimaatverandering, de stijging van de zeespiegel en de bodemdaling neemt het risico van overstromingsrampen aan de kust overal ter wereld toe, vooral in laaggelegen landen zoals Nederland en dichtbevolkte landen zoals mijn vaderland China. Tegen deze achtergrond is het mogelijk dat sommige bestaande waterkeringen, zoals kust- en rivierdijken, in de toekomst niet meer aan de veiligheidsnorm voldoen en derhalve versterkt dienen te worden. Om het gemiddelde overslagdebiet bij dijken te verminderen, worden steenbekledingen op het buitentalud aangelegd. Het buitentalud bestaat vaak uit een combinatie van bermen en ruwe steenbekleding (**Figuur 2, boven**). De doorlatende en ondoorlatende blokken waaruit de ruwe steenbekleding bestaat, absorberen de energie van oplopende golven (**Figuur 2, onder**). De aanwezigheid, afwezigheid of combinatie van deze elementen leidt tot de hoofdvraag van dit onderzoek: in welke mate kunnen verschillende combinaties van deze elementen de overstromingskansen verminderen? Verbeterde voorspellingsmethoden zijn noodzakelijk voor een efficiënter ontwerp bij een dijkversterking.

Doel van het onderzoek

Op de foto's in **Figuur 2** is te zien dat bijna horizontale bermen en verschillende soorten ruwheidselementen langs het talud aan de waterkant gecombineerd zijn. Wat zijn de effecten van deze elementen op het gemiddelde overslagdebiet bij dijken?

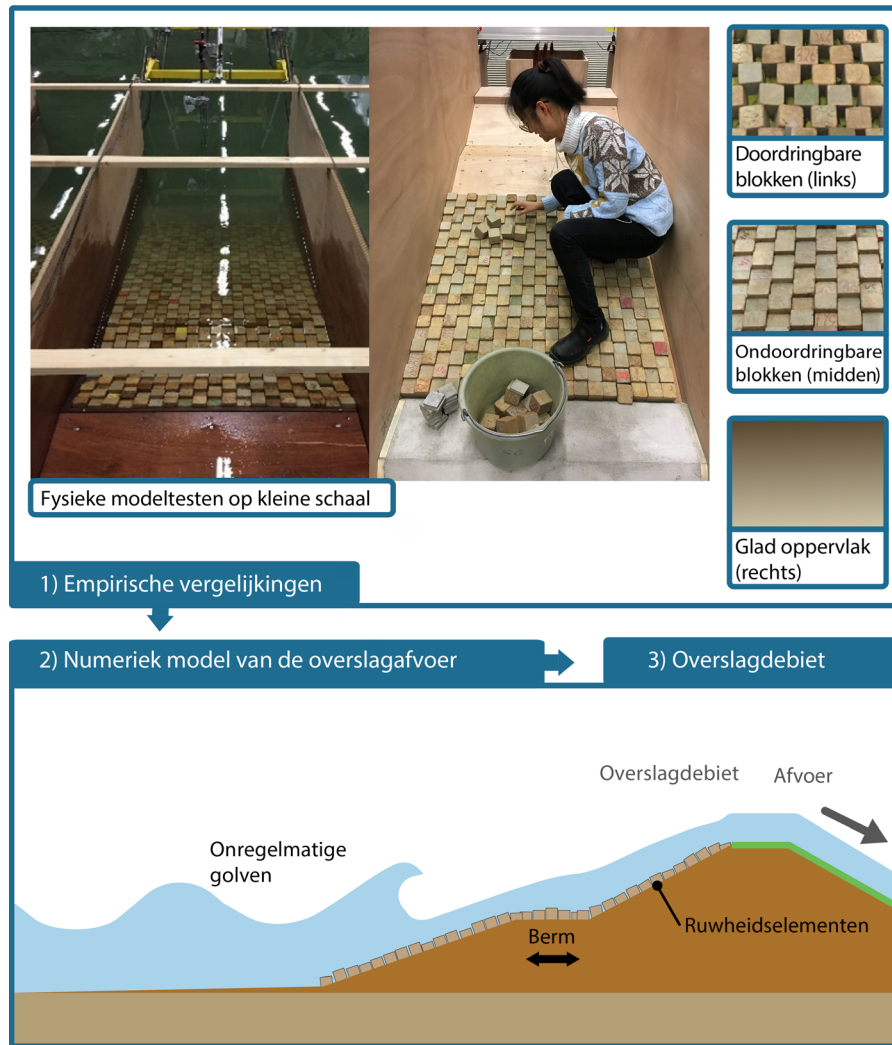
Innovatieve componenten

Dit project geeft betere inzichten in de invloed van bermen en ruwheidselementen op golfoverslag, om nauwkeuriger richtlijnen te definiëren voor de ontwerp- en veiligheidsbeoordeling van dijken. De belangrijkste onderdelen van het onderzoek zijn:



Figuur 2: **Boven:** Verschillende soorten ruwheidselementen en een berm aangebracht bij een dijk. Bron: [EurOtop \(2018, p. 103\)](#). **Onder:** Golfoploop en golfoverslag bij dijken in Nederland (links) en in Italië. Bron: [EurOtop \(2018, p.103 en p. 51\)](#).

1. **Nieuwe empirische vergelijkingen voor het schatten van de invloed van bermen en ruwheid.** Deze nieuwe vergelijkingen zijn afgeleid op basis van experimenten voor een combinatie van doorlatende, ondoorlatende en gladde bekleding op buitentaluds met en zonder een berm. De vergelijkingen zijn verder gevalideerd aan de



Figuur 3: Belangrijkste onderdelen van het onderzoek. Foto's beschikbaar gesteld door Weiqiu Chen and schema aangepast van [EurOtop \(2018\)](#).

hand van een numeriek model dat het gemiddelde overslagdebiet bij dijken simuleert.

2. **Numeriek model voor overslagdebiet.** We hebben OpenFOAM-software gebruikt om de golfoverslag bij dijken te modelleren, en daarmee het gemiddelde overslagdebiet bij dijken met een combinatie van berm en ruwheidselementen nauwkeurig te voorspellen. Dit model is ook uitgebreid naar 3D om de effecten van de schuine golven mee te nemen.
3. **Numeriek model voor golfoverslagkarakteristieken.** We hebben het 2D-OpenFOAM-model uitgebreid om de invloed van bermen en ruwheid op de stroomsnelheid en laagdikte van de individuele overslaande golven op de dijkkruij en binnentalud te bestuderen. Deze stromingsparameters kunnen worden gebruikt als invoer voor erosiemodellen.

Relevant voor wie en waar?

Ontwerpers en adviseurs die zich bezighouden met de vermindering van overstromingsrisico's door de toepassing van bermen en/of ruwheidselementen bij dijken.

Voortgang en toepassing

We hebben laboratoriumexperimenten uitgevoerd met vier configuraties van doorlaatbare, ondoorlaatbare en gladde blokkenbekleding in de experimentele faciliteiten van Deltares. Op basis van de analyse van de experimentele data hebben we nieuwe empirische vergelijkingen afgeleid voor de schatting van de invloed van bermen en ruwheid op het gemiddelde overslagdebiet. De nieuwe ruwheidsvergelijking kan omgaan met variërende ruwheid langs taluds met een berm. We ontdekten dat de ruwheidselementen op de bovenste helling veruit het meest bijdragen aan de vermindering van het overslagdebiet. De resultaten tonen aan dat de nieuwe vergelijkingen de voorspelling van de overslagafvoer

aanzienlijk verbeteren ten opzichte van bestaande empirische vergelijkingen in bestaande technische richtlijnen ([TAW, 2002](#); [EurOtop, 2018](#)). We hebben ook een OpenFOAM-numeriek model ontwikkeld waarin het eenvoudig is om de dijkconfiguratie te veranderen en om het gemiddeld overslagdebiet en de stromingsparameters in te schatten voor condities die niet in de experimenten zijn getest.

Aanbevelingen voor de praktijk

- Houd er bij de schattingen van overslagdebieten rekening mee dat de ruwheidsfactor niet constant is, maar varieert met de golfeigenschappen en hoogte van de kruin t.o.v. de waterstand.
- Overweeg om ruwheidselementen toe te passen op het bovenste deel van de buitentaluds.
- Voer verder onderzoek uit naar de afhankelijkheid van de bermbreedte bij schuin invallende golven om een nauwkeuriger voorspelling te kunnen doen van de overslagdebieten wanneer schuine golven en een berm tegelijkertijd aanwezig zijn.

Belangrijkste projectresultaten



Chen, W., Van Gent, M.R.A., Warmink, J.J. & Hulscher, S.J.M.H. (2019). [The influence of a berm and roughness on the wave overtopping at dikes](#). Doi: 10.1016/j.coastaleng.2019.103613

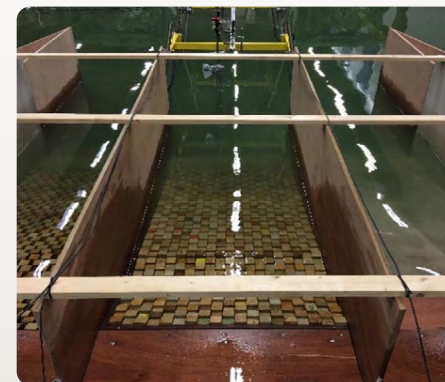
Chen, W., Marconi, A., van Gent, M.R.A., Warmink, J.J. & Hulscher, S.J.M.H. (2020). [Experimental Study on the Influence of Berms and Roughness on Wave Overtopping at Rock-Armoured Dikes](#). Doi: 10.3390/jmse8060446

Chen, W., Warmink, J.J., van Gent, M.R.A. & Hulscher, S.J.M.H. (2021). [Numerical investigation of the effects of roughness, a berm and oblique waves on wave overtopping processes at dikes](#). Doi: 10.1016/j.apor.2021.102971



Bevindingen uit dit project zijn ontwikkeld in een experimenteel lab, maar zijn toepasbaar op dijklocaties waar bermen en gecombineerde ruwheidselementen worden toegepast.

Foto door Weiqiu Chen.



Storyline

Kleinere faalkans door tijdsafhankelijke pipegroei

De veiligheidsbeoordeling van dijken kan worden aangescherpt door rekening te houden met de tijd die nodig is voor erosie door piping.

Door Joost Pol

Technische Universiteit Delft

Piping, oftewel het erosieproces in de dijkondergrond, neemt tijd in beslag en leidt daardoor tijdens een hoogwatergebeurtenis niet altijd tot een dijkdoorbraak en overstroming. Het kwantificeren van de tijdsafhankelijke aspecten van piping helpt de dijkbeheerder om de omvang van de versterking te beperken en zo sneller en goedkoper aan de veiligheidsnormen te voldoen.

Piping is een geleidelijk erosieproces. Het begint als kwelwater zoveel zand erodeert dat er een klein kanaaltje of 'pipe' (enkele mm groot) ontstaat dat kan doorgroeien tot deze verbinding maakt met de rivierzijde. Bij beoordelingen en ontwerpen van dijken wordt geen re-

kening gehouden met de tijd die piping nodig heeft om zich te ontwikkelen. Hierdoor kunnen deze berekeningen te conservatief zijn, vooral als:

- hoogwaters relatief kort duren, of
- piping wordt gestopt door tijdige noodmaatregelen.

Piping draagt bij aan een groot deel van de Nederlandse dijkversterkingskosten

Grote delen van de Nederlandse dijken moeten mogelijk versterkt worden op het gebied van piping om te voldoen aan de

Omslagfoto: Grootschalig experiment bij de Flood Proof Holland testfaciliteit om de weerstand tegen piping na meerdere overstromingen te meten. Foto door Joost Pol.

veiligheidsnormen (maximale overstromingskans weergegeven in de kaart).

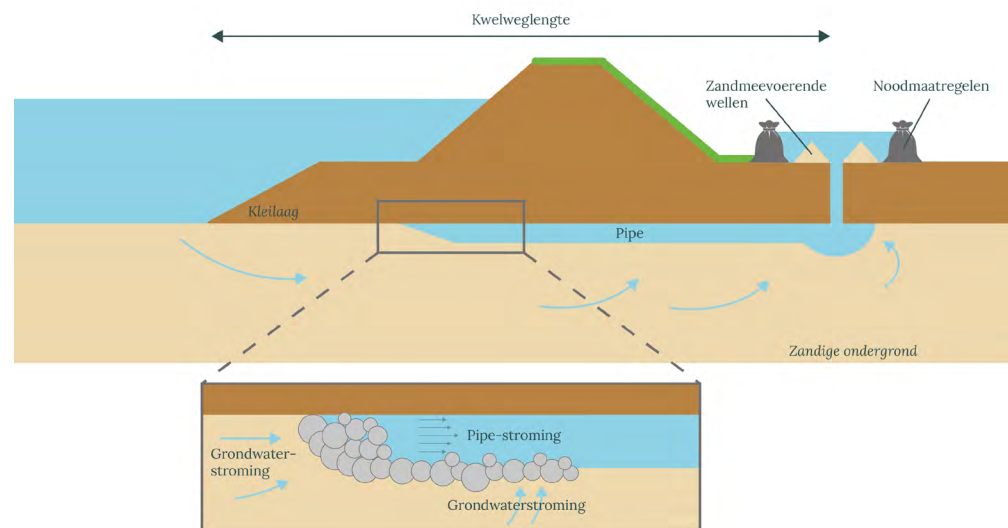
Historisch gezien komen zandmeevoerende wellen (blauwe stippen op de kaart) vooral voor in het rivierengebied (zie de indeling stormopzet - rivieroverstromingsgebied op de kaart), waardoor het de vraag is of piping een risico vormt langs de kust. Hoewel het aantal waarnemingen van zandmeevoerende wellen langs de kust lager is, ligt één van de twee Nederlandse dijkdoorbraken (rode sterren op de kaart) die aan piping wordt toegeschreven aan de kust (doorbraak Strijensham bij Tholen).

Hoogwaterduur rivier/kust

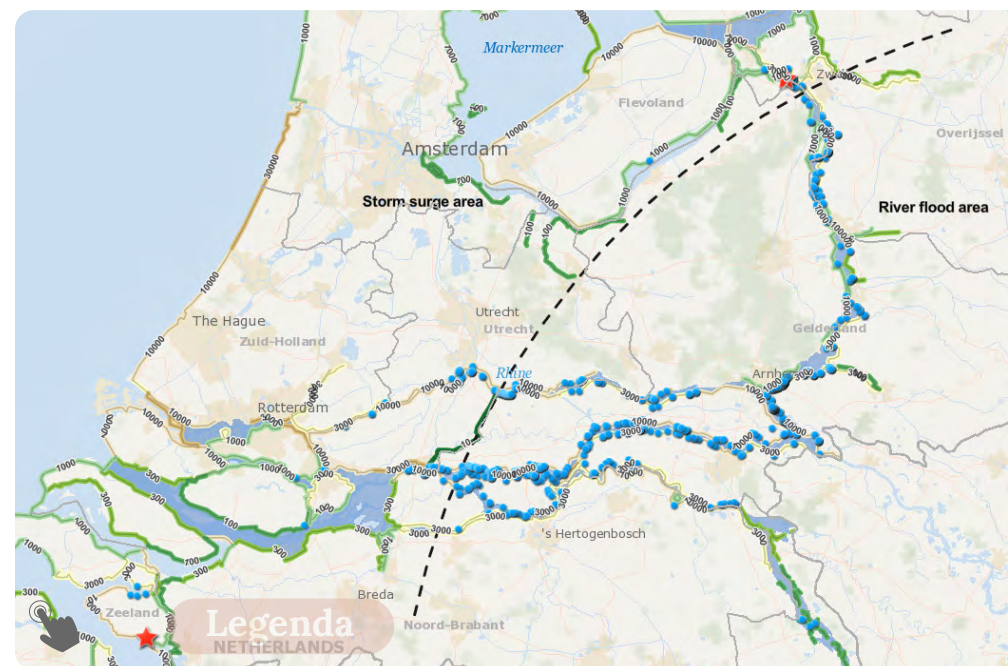
De hoogwaterduur heeft veel invloed op piping. Rivierhoogwater wordt gekenmerkt door langdurige hoge waterstanden (weken). Stormopzet bij meren en aan de kust daarentegen is meestal van korte duur (dagen). In kustgebieden wordt de ontwikkeling van piping beperkt door de korte hoogwaterduur. Bij de rivieren is er meer tijd beschikbaar voor pipe-ontwikkeling, wat anderzijds weer extra tijd geeft voor noodmaatregelen door bijvoorbeeld zandzakken te plaatsen.

Als we weten hoe snel piping zich ontwikkelt, kunnen we dijkversterkingen optimaliseren en crisismanagement tijdens hoogwater beter ondersteunen. De invloed van de factor tijd op beoordeling en ontwerp kan echter van geval tot geval verschillen. Daarom onderzoek ik de volgende vraag in het kader van mijn promotieonderzoek bij de TU Delft en het All-Risk-programma (zie project D3):

"In welke mate neemt de dijkveiligheid van rivier- en kustdijken toe wanneer rekening wordt gehouden met de tijd die nodig is voor de ontwikkeling van piping?"



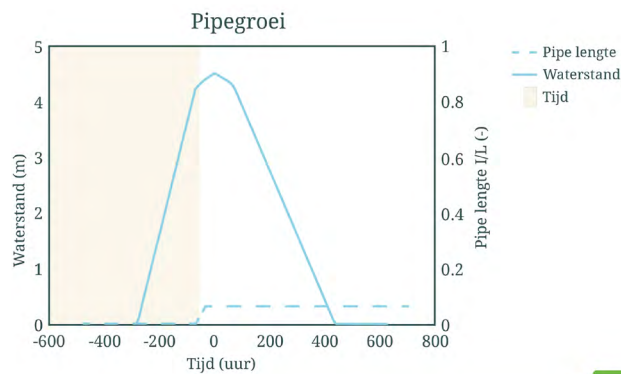
Illustratie van de pipingprocessen. Gebaseerd op Robbins & Sharp (2016, Figure 1).



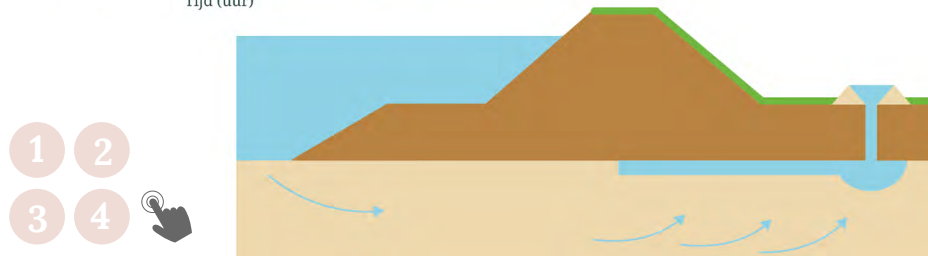
Kaartdata van Esri, (IHO-IOC) GEBCO, DeLorme, NaturalVue, NGS. Primaire waterkeringen van Nationaal Georegister, observaties zandmeevoerende wellen via <https://wellocaties.app>.



Piping-experimenten. **Linksboven:** proef op grote schaal in de Flood Proof Holland proefpolder bij de TU Delft. **Rechtsboven:** metingen tijdens de proef op grote schaal. **Rechtsonder:** zandmeevoerende wel in de proef op grote schaal. **Linksonder:** experimenten op kleine schaal. Foto © Sam Rentmeester.



4/5



De ontwikkeling van de pipelengte tijdens een hoogwater. Gebaseerd op schema's van Joost Pol.

Onderzoek naar pipeontwikkeling bij verschillende hoogwaterduren en tijdige noodmaatregelen

De tijdsafhankelijke aspecten van piping heb ik onderzocht met drie methoden:

- Laboratoriumexperimenten op kleine (50 cm) en grote (10 m) schaal vergroten onze kennis van de erosieprocessen in de pipe, laten zien welke factoren de erosiesnelheid beïnvloeden en helpen bij het valideren van pipegroeimodellen.
- Een eenvoudig pipegroeimodel helpt bij het voorspellen van pipegroei bij dikeigenschappen en waterstanden buiten het bereik van de experimenten.
- Met probabilistische methoden worden onzekerheden in bijvoorbeeld hoogwaterduur, dikeigenschappen en de kwelweglengte expliciet meegenomen om te bepalen in hoeverre een bepaalde dijk aan de veiligheidsnormen voldoet.

De factor tijd in het pipingproces

De figuur links illustreert de ontwikkeling van de pipelengte tijdens een hoogwater. Belangrijke factoren die bepalen of een pipe zich tijdens een hoogwater ontwikkelt tot een bres zijn:

- De pipelengte die al aanwezig is voor een hoogwater.
- Het moment in het hoogwater waarop de groei van de pipe begint. Dit hangt samen met de timing van scheurvorming (opbarsten) en zandtransport (heave).
- De pipegroeisnelheid, die toeneemt met korrelgrootte en waterstand.
- De hoogwaterduur (korte stormopzet vs. lange rivierafvoer), die bepaalt hoeveel tijd beschikbaar is voor erosie.
- De effectiviteit van noodmaatregelen, uitgedrukt in kans op detectie en de benodigde tijd voor plaatsing van zandzakken.

Zes hypothetische cases

Om na te gaan hoeveel effect de tijdsafhankelijke ontwikkeling van piping op de dijkveiligheid heeft, heb ik zes cases doorerekend met variatie in de parameters die naar verwachting een significante invloed hebben op de berekende faalkans en daarmee op de benodigde dijkversterking.

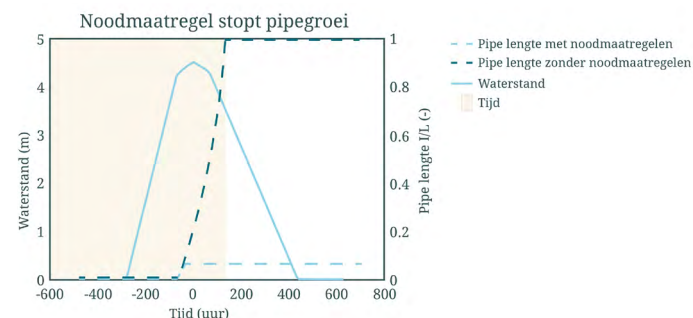
De zes cases zijn hypothetische dijken, vier rivierdijken en twee kustdijken. In alle gevallen is de kwelweglengte 50 m, met de conservatieve aanname dat er al een pipe aanwezig is tot de helft van de kwelweglengte.

- Voor zowel de kust- als rivierdijk is de korrelgrootte gevarieerd van fijn zand (0,180 mm) tot middelfijn zand (0,350 mm).
- De hoogwaterduur varieert tussen de extreme gevallen van stormopzet (dagen) en rivierafvoer van de Rijn (weken).
- Voor de rivier beschouw ik twee scenario's voor de effectiviteit van de noodmaatregel met zandzakken (detectiekans 50% of 90%). Bij de kustdijk zijn noodmaatregelen niet beschouwd, omdat deze tijdens een storm lastig uitvoerbaar zijn.

Wanneer maakt het een verschil?

Voor elk geval heb ik de faalkans berekend met en zonder rekening te houden met de tijdsafhankelijke pipeontwikkeling. De verhouding tussen deze kansen geeft aan hoe groot het verschil is tussen het wel en niet meenemen van de benodigde tijd voor pipeontwikkeling. Hoe groter deze verhouding, hoe groter de toename van de dijkveiligheid.

De resultaten geven aan dat de duur van hoogwater de grootste invloed heeft. Bij de rivierdijken is er nauwelijks een verandering in faalkans omdat het hoogwater langer duurt dan de tijd die nodig is voor pipegroei, maar bij de kustdijken is het zeer onwaarschijnlijk dat piping leidt tot een doorbraak tijdens één enkele storm. De cases van de kustdijken laten zien dat



Noodmaatregelen



Doorbraak



Rivierdijk



Kustdijk



Legenda

Fijn zand Middelfijn zand Noodmaatregelen (plaatsing 10 uur) Detectie Factor toename veiligheidsniveau

de langzamere erosie in fijn zand vergeleken met middelfijn zand een groot verschil kan maken. Wat de riviercases betreft, tonen de resultaten aan dat er wel een aanzienlijk lagere faalkans kan worden bereikt bij effectieve noodmaatregelen (90% succesvolle detectie, 10 uur plaatsingstijd).

Geleerde lessen

Rekening houden met de tijd die nodig is voor de ontwikkeling van piping kan de faalkans aanzienlijk verkleinen. Niet alleen in kustgebieden met korte stormen, maar onder bepaalde voorwaarden, zoals effectieve noodmaatregelen, ook in riviergebieden.

De zes hypothetische cases, waarin nog enkele conservatieve aannames zitten, geven al een goed inzicht in de omstandigheden waarin de benodigde tijd voor pipegroei een relevante factor is en in welke mate dit de faalkans beïnvloedt.

Ten slotte vraagt het rekenen met de factor tijd voor piping een ander manier van denken: niet alleen een kritische waterstand, maar ook combinaties van piekwaterstand en hoogwaterduur kunnen geleidelijk tot falen leiden.

Vervolgstappen

Dit onderzoek is op het moment van schrijven nog gaande. Ik gebruik momenteel de experimentele gegevens om de fysische basis van het eenvoudige pipeontwikkelingsmodel te verbeteren. Verder bestudeer ik de effecten van pipeontwikkeling onder meerdere hoogwatergebeurtenissen. Deze bevindingen kunnen het mogelijk maken de conservatieve aanname dat er al tot 1/2 van de kwellingte een pipe aanwezig is, los te laten.

Een nuttige stap voor de praktijk zou zijn om de onderzoeksresultaten te gebruiken om vereenvoudigde regels af te leiden om de effecten van tijd mee te nemen in dijkveiligheidsbeoordelingen. Bijvoorbeeld een reductiefactor op de berekende faalkans, afhankelijk van de heersende hoogwaterduur, kwellingte en funderingsbodem.

Omdat hoogwaterbestrijding een belangrijke factor blijkt te zijn in het rivierengebied, is een discussie nodig wanneer we die informatie willen gebruiken in het dijkontwerp. Als we dit willen meenemen, moet de effectiviteit (detectienauwkeurigheid en benodigde tijd) van ingrepen verder worden gekwantificeerd en verbeterd.

Meer weten?

Scan de QR code of klik erop om de storyline online te bekijken. Of bekijk:



- [Progression rate of backward erosion piping in laboratory experiments and reliability analysis](#) (Publicatie over een eerdere versie van de faalkansanalyse)
- [Temporal Development of Backward Erosion Piping in a Large-Scale Experiment](#) (Publicatie over grote schaal proef)

Dankwoord

Dit onderzoek is onderdeel van het Perspectief-programma All-Risk met projectnummer P15-21, welke (gedeeltelijk) is gefinancierd door NWO-TTW, in samenwerking met de volgende private en publieke partners: Rijkswaterstaat, Deltares, STOWA, HKV, Natuurmonumenten, Waterschap Noorderzijlvest, Waterschap Vechtstromen, It Fryske Gea en Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier. We danken Ludolph Wentholt (STOWA), Anouk te Nijenhuis (HWBP), Lieke Lokin (HKV), Pien Buter (ontwerper) en Juliette Cortes (All-Risk-redactie) voor hun input bij het ontwikkelen van deze storyline.



Overslag over een dijk met een weg op de kruin. Foto via <https://coastalpartners.org.uk/>.



Falende dijkbekleding tijdens een experiment op een dijk bij Millingen. Photo by Juan Pablo Aguilar Lopez.

Het thema:

Golfoverslag zorgt voor een hoge belasting op de dijkbekleding en kan leiden tot erosie van de grasmat. Het onderzoek naar overslag binnen het All-Risk-project heeft zich gefocust op twee aspecten: maatregelen op het buitentalud en maatregelen op het binnentalud.

Wilt u de presentaties van de onderzoekers terugzien? Dat kan door op **de QR code te klikken of deze te scannen**.



Reflectie

Naar een realistische inschatting van weerstand tegen golfoverslag

Webinar team

Moderator



Jord Warmink
Universiteit Twente

Sprekers



Weiqiu Chen
Universiteit Twente

Introductie

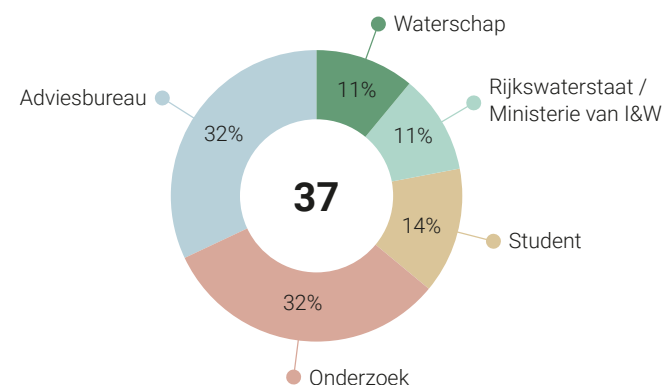


Aroen Mughal
Hillblock



Vera van Bergeijk
Universiteit Twente

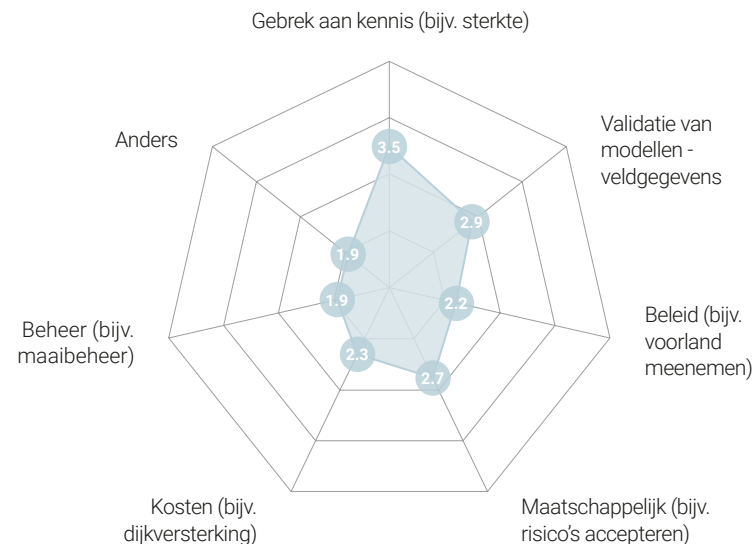
Deelnemers



versterken hangt af van de situatie, zo is er voor rivierdijken weinig winst te behalen met een ruwer buitentalud. Zwakke punten versterken en de kwaliteit van de grasmat verbeteren worden als interessante opties gezien als er weinig ruimte is om de dijk te versterken. Het effect van de bovengenoemde opties blijft echter onzeker, terwijl het verhogen van een dijk altijd werkt om de hoeveelheid overslag te reduceren, maar tegen welke kosten?

Kennisontwikkeling en inspectie/monitoring worden vooral genoemd om de risico's en kennisonzekerheden af te dekken. Er zijn weinig observaties van overslag over het binnentalud, naast experimenten met de golfoverslagsimulator, maar kennis over de sterkte van de grasmat kan wel bij golfoploop worden bestudeerd. De kwaliteit en beschadigingen van de grasmat zijn bovendien makkelijker te inspecteren op het moment dat er geen overslag plaatsvindt. De overslagsimulator is een nuttige manier om kennis te ontwikkelen tijdens maatgevende condities.

De grootste onzekerheden worden gezien m.b.t. overgangen en waterstanden en deze kunnen daardoor een bedreiging vormen voor de toekomst. Droogte lijkt een minder grote bedreiging: afgelopen zomer is gezien dat de grasmat bruin kleurde door de droogte, maar de wortelstructuur die voor de meeste weerstand zorgt was niet aangetast. Andere uitdagingen zijn kennis over erosieprocessen zoals reststerkte, head-cut en het beheer van overgangen en de grasmat. Ook zijn er maatschappelijke uitdagingen m.b.t. de multifunctionaliteit van dijken, over het gebruik van ruimte en de omgang met de verschillende belangen.



Waar liggen de grootste uitdagingen?

Naar een realistische inschatting van weerstand tegen golfoverslag?

De dijkbekleding faalt volgens de huidige definitie als er meer dan 20 cm erosie plaatsvindt ondanks het feit dat de dijk dan nog steeds zijn functie vervult. De faaldefinitie kan realistischer en minder conservatief worden door de sterkte van de onderliggende kleilagen mee te nemen. Echter, er is nog veel onzeker over de erosieprocessen nadat de bovenste 20 cm is geërodeerd en daarbij is de sterkte van de overige grondlagen voor overslag niet bekend. Meer kennis op deze twee punten is nodig voordat de faaldefinitie kan worden uitgebreid. Dit werd ook duidelijk in het webinar waar men aangaf dat het essentieel is om meer kennis te krijgen over de gehele dijkbekleding (grasbekleding en onderliggende kleilaag) om de dijken toekomstbestendiger te maken. Ook meer kennis over de sterkte van de kern is wenselijk, omdat het op dit moment nog niet bekend is

wat er met de kern van de dijk gebeurt tijdens overslag en in hoeverre de kern van de dijk bijdraagt aan de reststerkte. Dit geldt specifiek voor rivierdijken, waar de sterkte van de kern essentieel is bij het beperken van het aantal verstevigingen. Er valt dus de meeste winst te halen als we de sterkte van de kern mee kunnen nemen in de beoordeling.

Over experimenten en numerieke modellen

Golfoverslagexperimenten geven veel inzicht in de belasting die de grasmat kan hebben. Deze experimenten zijn echter duur en het is vaak niet mogelijk om de dijkgeometrie aan te passen. Dit betekent dat de resultaten vaak alleen toepasbaar zijn voor de omstandigheden die getest zijn. Daarnaast is uit overslagexperimenten gebleken dat de dijkbekleding vaak faalt bij anomalieën (bijv. muizengaten, mollengangen of overgangen). In die gevallen is het lastig de sterkte van de dijkbekleding te bepalen. Modellen kunnen helpen om de resultaten, zoals formules en rekenmethodes, uit te breiden voor andere condities en/of dijkgeometrieën. Ook kunnen modellen ingezet worden om het faalproces van de dijkbekleding beter te begrijpen. Een voorbeeld hiervan is het uitbreiden van de overslagformules, zodat het effect van een berm en ruwheidselementen op het buitentalud nauwkeuriger kunnen worden berekend. Daarnaast zijn modellen nuttig om de processen te bestuderen en inzicht te krijgen in de belasting op de bekleding die vaak lastig te meten is in experimenten. In een model kan elk proces afzonderlijk bestudeerd worden om inzicht te krijgen in het dominante proces bij overgangen. Een voorbeeld hiervan is het effect van turbulentie dat zeer lastig te meten is onder overslaande golfcondities. Het doorrekenen van experimenten met numerieke modellen biedt de mogelijkheid om de turbulentie-intensiteit te bepalen en zo meer inzicht te krijgen in de belasting en sterkte van de grasbekleding.

Tijdens dit webinar is duidelijk geworden dat men openstaat voor het toelaten van meer overslag en dat er een sterke wens is om reststerkte beter mee te nemen in de huidige beoordeling. Hiervoor mist echter nog wel de kennis over het erosieproces bij zowel overgangen als beschadigingen in het dijkprofiel en de sterkte van de kleilaag onder de grasbekleding.

All-Risk-aanbevelingen:

- Gebruik numerieke modellen om rekenmethodes uit te breiden buiten het getoetste gebied en om inzicht te krijgen in de belangrijke processen.
- Overweeg een combinatie van berm en ruwheidselementen op het buitentalud om de hoeveelheid overslag te verminderen. Dit effect kan nauwkeuriger worden berekend met de nieuwe formules.
- Bereken de belasting en erosie langs de kruin en het binnentalud: van tevoren is niet altijd duidelijk wat de zwakste plek langs het dijkprofiel is en overgangen hebben ook een effect op de stroming benedenstrooms.
- Voer meer onderzoek uit naar de sterkte van het gras, de onderliggende kleilaag en de kern; dat kan helpen om de faaldefinitie aan te passen en de beoordeling realistischer en minder conservatief te maken.
- Verdiep de kennis over het erosieproces van overslaande golven, zoals het effect van overgangen en de erosiemechanismen bij grotere erosiedieptes.



Dijkdoorbraak door instabiliteit binnentalud. Foto door Weichel (2013).

Het thema:

Binnenwaartse macro-instabiliteit is een belangrijk faalmechanisme dat een grote invloed heeft op de kosten en ruimtelijke impact van dijkversterkingen. Er zijn echter diverse onzekerheden, bijvoorbeeld in de sterkteparameters en modellen. Er zijn verschillende knoppen om aan te draaien om aan de eisen te voldoen: een betere parameterbepaling, betere modellen of daadwerkelijk een dure dijkversterking. Aan welke knoppen kunnen we het best draaien voor een efficiënte omgang met de stabiliteitsopgave?

Wilt u de presentaties van de onderzoekers terugzien? Dat kan door op **de QR code te klikken of deze te scannen**.



Reflectie

Macrostabiliteit – betere parameters, betere modellen of dijkversterking?

Webinar team



Moderator

Bas Jonkman

Technische Universiteit Delft



Sprekers

Arny Lengkeek

*Technische Universiteit Delft,
Witteveen +Bos*



Introductie

Martin Schepers

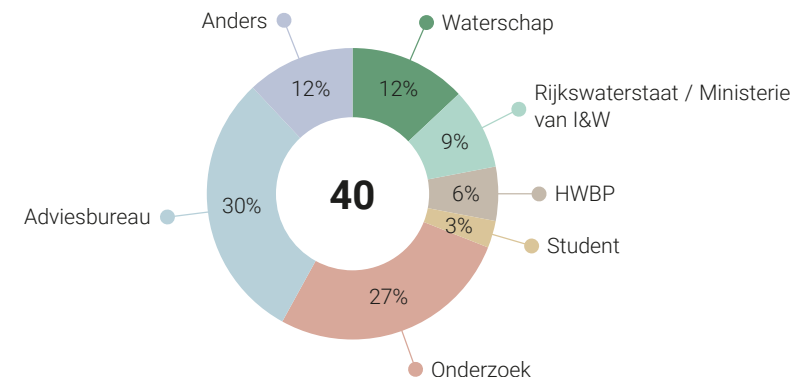
Aveco de Bondt



Guido Remmerswaal

Technische Universiteit Delft

Deelnemers



Deze reflectie komt voort uit de discussie tussen All-Risk-onderzoekers en deelnemers aan het gelijknamige All-Risk-webinar van 14 juni 2021.

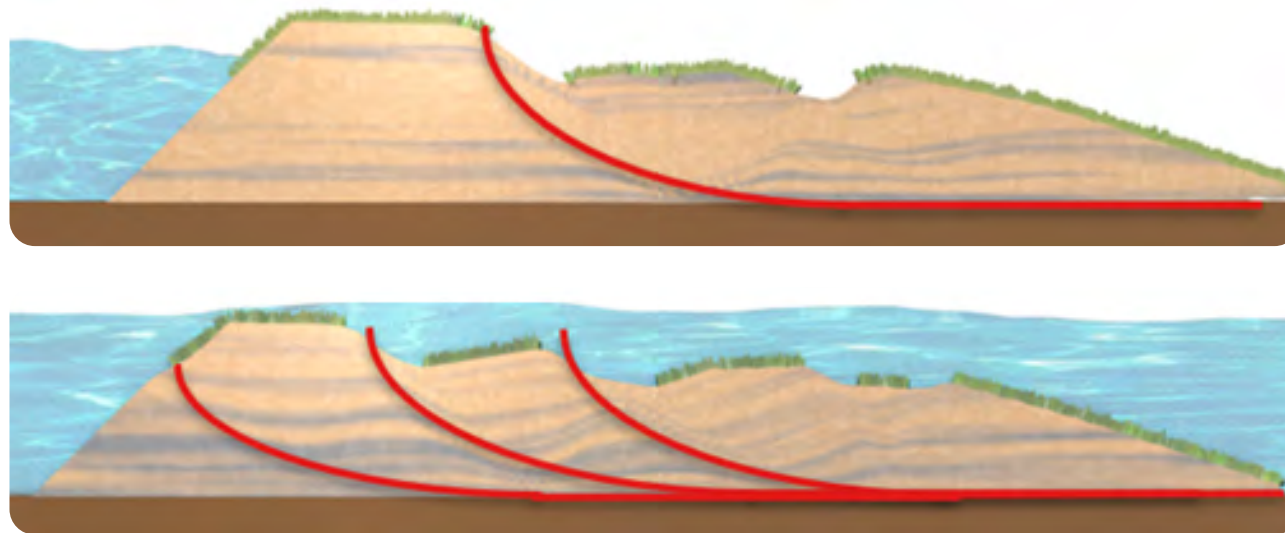
Bijdragen, discussie en reflectie

Tijdens de inleidende presentatie ging Martin Schepers in op de uitdagingen in dit werkveld. Hij constateerde dat er nog veel onzekerheden in de kennis en informatie zitten en dat kennis in dit werkveld nog niet gelijk verdeeld is tussen organisaties en bureaus. Ook benoemde hij het gat tussen theorie en praktijk. Arny Lengkeek gaf een samenvatting van zijn onderzoek (D2) in het kader van All-Risk, mede gekoppeld aan de Eemdijkproef. Hij presenteerde nieuwe inzichten in grondclassificatie die vooral voor parameterschattingen van slappe gronden – die in Nederland vaak voorkomen – betere resultaten geven. Deze kunnen bijdragen aan een betere schatting van de veiligheid van de dijk en gerichtere versterking.

Guido Remmerswaal presenteerde zijn onderzoek (D1) naar MPM (Material Point Method). De methode – die nog in ontwikkeling is (“in tienerschoenen”) – geeft de mogelijkheid om meerdere opeenvolgende afschuivingen te analyseren en geeft daarmee meer inzicht in “reststerkte”. Hieruit blijkt dat reststerkte zeer afhankelijk is van de heterogeniteit van grondsterkte. Vervolgafschuivingen kunnen door correlatie waarschijnlijk zijn in slappe lagen.

In de discussie werd stilgestaan bij meerdere onderwerpen.

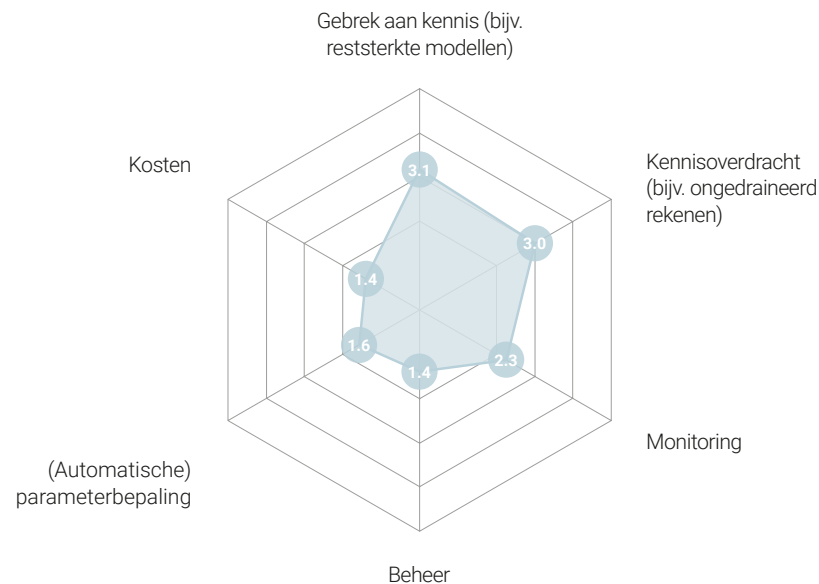
Er leek overeenstemming onder de aanwezigen dat een van de belangrijkste uitdagingen in dit werkveld het gebrek aan kennis betreft. Daarbij gaat het niet om één soort kennis, maar juist om een combinatie van meerdere soorten kennis zoals praktijk en projectervaring, expertkennis op diverse velden (geotechniek, modellen, probabilisme). De aanwezigen



Enkele afschuiving, **of** vervolgafschuivingen met óók overstroming? Illustratie door Coco Man en Guido Remmerswaal gebaseerd op [Remmerswaal et al. \(2021\)](#) and [Man \(2021\)](#).

onderkennen de noodzaak tot kennisdeling en kennisoverdracht. Hierbij was er niet één “succesformule”, maar werden als belangrijke ingrediënten genoemd het delen van kennis tussen partijen (met name tussen ingenieursbureaus) en het creëren van een open omgeving om juist ook kennis over gevoelige onderwerpen te delen zoals afschuivingen in projecten. Webinars lijken hiervoor een geschikte vorm. Kennis van deskundigen uit andere vakgebieden, zoals archeologen of bodemdeskundigen, moet ook niet vergeten worden. Kennis van andere domeinen zoals archeologie of fysische geografie moet ook betrokken worden.

Om een betere inschatting en analyse van macrostabiliteit te kunnen maken bleken volgens de aanwezigen naast het delen van kennis verschillende zaken van belang: *meer grondonderzoek en betere grondclassificatiemethoden (“correlaties”)*. Ook het meenemen van reststerkte werd vaak genoemd, maar hierover bleken de meningen tussen de aanwezigen verdeeld. Dit bleek ook uit een voorgelegde casus waarin werd gevraagd welke schade aan het dijkprofiel aanvaardbaar zou zijn. De opvattingen waren verdeeld: sommigen zouden veel schade accepteren zolang overstroming wordt voorkomen, gaven anderen aan juist zo min mogelijk schade te willen zien. Hierbij werd genoemd dat vanuit beheersperspectief, andere functies (bv. wegverkeer) en veiligheidsbeleving het ongewenst zou zijn om regelmatig kleinere afschuivingen mee te maken.



Wat is de belangrijkste uitdaging rond macrostabiliteit?

De aanwezigen benadrukken dat de positieve effecten van reststerkte enkel in een ontwerp meegenomen kunnen worden wanneer ook alle negatieve effecten geïncorporeerd zijn (bijvoorbeeld restbelastingen en/of genegeerde faaloorzaken). Bij het modelleren van reststerkte is het daarom belangrijk om het gehele faalpad te berekenen. Daarnaast moet er ook rekening gehouden worden met nevenfuncties (bv. wegfunctie) waarvoor weer verschillende aanvaardbare kansen gelden. In de discussie is ook stilgestaan bij de benaderingen die kunnen bijdragen aan een betere grondparameterbepaling. De meerderheid leek een benadering te ondersteunen waarin expertkennis wordt gecombineerd met slimme methoden voor automatische parameterbepaling. Ook nieuwe



Hoe krijgen we de benodigde kennis op voldoende niveau?

technieken als Artificial Intelligence bieden mogelijkheden om verder te verkennen. Het gebruik van slimme methodes (zoals Artificial Intelligence) kan bijdragen om alle verzamelde data te benutten. Het is bij deze nieuwe technieken noodzakelijk dat de expert aan zet blijft (geen blackbox). Het gebruik van automatische methodes verlegt mogelijk ongewild de focus van kwalitatief goede berekeningen (met begrip van een expert) naar automatisering en kwantiteit van berekeningen. Als laatste blijkt uit de stelling dat ervaringstabellen niet meer in de (toekomstige) parameterbepaling passen, maar deze tabellen zijn nog wel essentieel voor eerste inschattingen.

All-Risk-aanbevelingen:

- Zet in op het delen van kennis en ervaring door webinars en expertise-communities. Dan kan het gaan om het delen van academische kennis, maar juist ook het delen van praktijk-ervaring met dijkversterkingsprojecten en onverwachte afschuivingen en incidenten.
- Benut nieuw ontwikkelde classificatiemethoden voor de slappe gronden.
- Het versterken van dijken met damwanden kan bijdragen aan robuuster faalgedrag (meer reststerkte en minder vervormingen en bressen) en reduceert de gevoeligheid voor lokale slappe grondlagen.
- Ontwikkel MPM met een bredere toepasbaarheid (stabiele berekeningen voor meerdere grondsoorten en dijkgeometrie) om meer inzicht te krijgen in reststerkte.
- Ontwikkel de hiervoor essentiële kennis over parameters en grondgedrag bij grote verplaatsingen.
- Verken de mogelijkheden om huidige methodes voor afschuivingskansen te combineren met MPM om meer inzicht te krijgen in de (waarschijnlijkheid van) vervolgafschuivingen en het faalproces.
- Definieer criteria voor deformaties voor dijken (mogelijk aan de hand van de Eurocode), waardoor duidelijk is welke schade acceptabel is en hoe vaak deze mag optreden.



Professionals en geïnteresseerden ontvangen informatie over een dijkversterkingsproject bij de Lauwersmeerdijk tijdens 'Dijkwerkers on Tour'. Foto door HWBP.

Hoofdstuk 6

Juridische en governance-aspecten bij de uitvoering

Introductie

Door Willemijn van Doorn-Hoekveld en Marleen van Rijswijk

Alhoewel het leeuwendeel van het onderzoek binnen All-Risk technisch van aard is, is het innovatieve van dit onderzoek dat er tevens aandacht is voor de niet-technische juridisch-bestuurlijke vragen. Deze bredere benadering is relevant om de technische innovaties en onderzoeken ook daadwerkelijk in de praktijk te brengen. Technisch gezien kan alles gemaakt worden, maar hoogwaterbescherming vindt niet plaats in een afgeschermd laboratorium, maar in de fysieke leefomgeving, waar ook rekening gehouden moet worden met mensen, eigendom en andere belangen, zoals natuurbescherming, ruimtelijke ordening of recreatie.



Binnen het governance deel van All-Risk heeft project [E1](#) zich gefocust op juridische vragen vanuit de praktijk. De onderzoekers hebben geadviseerd over de omzetting van de veiligheidsnormering uit de Waterwet naar de Omgevingswet, de uitzonderingen voor het behalen van de resultaatsverplichting om aan de nieuwe veiligheidsnormen te voldoen onder de Omgevingswet, de verantwoordelijkheidsverdeling bij het project de Dubbele Dijk en hoe juridisch om te gaan met voorlanden. Met de eindgebruikers zijn verschillende workshops georganiseerd, met de kansen en uitdagingen van het natuurbeschermingsrecht bij waterveiligheidsprojecten als uitgangspunt.

De resultaten van het onderzoek van Emma Avoyan (project [E2](#)) laten zien dat ondanks de juridische complexiteit, de samenwerking binnen dijkversterkingsprojecten over het algemeen succesvol is. In de verkenningsfase bleken twee factoren cruciaal: de aanwezigheid van projectmanagers met vaardigheden om te verbinden en de bereidheid van samenwerkende partijen om financieel bij te dragen. Andere factoren die bijdroegen aan succes waren betrokkenheid en een gedeelde motivatie van de samenwerkende partijen en de aanwezigheid van relevante expertise of kennis. Beleidsrelevante vraag is hoe deze condities voor een succesvolle samenwerking verder kunnen worden ontwikkeld of bevorderd.

Last but not least onderzocht Martijn van Staveren (project [E3](#)) waarom en hoe verschillende vormen van kennis kunnen worden samengebracht bij het ontwerpen van effectieve en breed gedragen overstromingsinterventies. Martijn erkent de uitdagingen van het bereiken en waarderen van verschillende vormen van kennis die nog niet zijn geoperationaliseerd of gestandaardiseerd, voor hun bijdrage aan overstromingsrisicobeheer.

Centraal in de governance-projecten stonden de workshops die met, door en voor de gebruikers werden georganiseerd. Uit de workshops bleek dat er grote behoefte is aan duidelijkheid over verantwoordelijkheden, taken en de botsende sectorale belangen op verschillende beleidsterreinen. Ook bleek dat de wet niet altijd goed is toegerust om te worden toegepast op innovaties. Veel succesvolle projecten hebben deze uitdagingen echter overwonnen door betere samenwerking. Aangezien de grootste uitdaging, klimaatverandering, de behoefte aan innovaties alleen maar zal doen toenemen, zal het ook nodig blijven deze innovaties goed in het rechtssysteem in te passen en succesvolle samenwerking tot een gevestigde praktijk te maken. **Hiertoe doen wij de volgende aanbevelingen.**

Ten eerste: betrek juristen vroegtijdig bij dijkversterkingsprojecten, zodat al in een vroeg stadium kan worden nagedacht over kansen en randvoorwaarden die de wet biedt. Hoewel uit de wetgeving onduidelijkheden en knelpunten kunnen voortvloeien, kunnen deze belemmeringen in de praktijk vaak worden opgelost, zodat innovaties doorgang kunnen vinden.

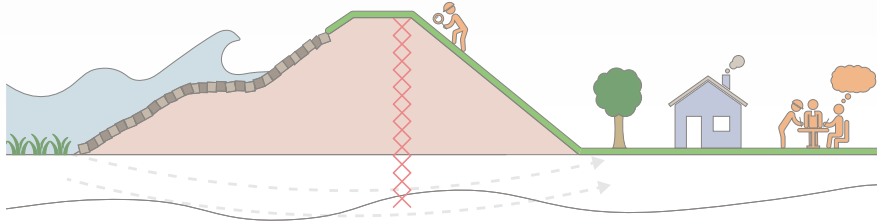
Ten tweede: om de kans op succesvolle samenwerking te vergroten, moeten waterschappen projectmanagers aantrekken die vaardigheden hebben om te verbinden, partijen stimuleren om met middelen bij te dragen en een samenwerkingsproces faciliteren dat partijen motiveert om samen te werken en de benodigde kennis en expertise te genereren.

Ten derde: vaak zijn verschillende – soms relatief onbekende – vormen van kennis aanwezig die een waardevolle bijdrage kunnen leveren aan dijkversterkingsprojecten. Laat je inspireren en ga met een open houding op zoek naar deze kennis en kijk welke kennis bruikbaar is, en wees creatief in het zoeken naar nieuwe samenwerkingsmogelijkheden.

Projectsamenvatting

E1 - Juridische aspecten van implementatie

Juridisch kader en advies met betrekking tot de nieuwe normering van waterveiligheid



Uitkomst

De juridische implicaties van de nieuwe risicobenadering variëren naar gelang de omstandigheden in het individuele geval, maar het evenwicht tussen een rechtmatige, efficiënte, effectieve en aanvaardbare benadering moet worden gewaarborgd. Dit project adviseerde over de transitie van de veiligheidsnormen in de Omgevingswet en het wettelijk kader om een rechtmatig, efficiënt, effectief en acceptabel waterbeheer te beoordelen. Verschillende academische en andere professionele papers over de juridische implementatie van de nieuwe overstromingsrisiconormen tonen de bijdrage aan het algehele All-Risk-project, zoals de Handreiking Voorlanden (Roode et al., 2019) dat zich richt op juridische implementatie. Ten slotte is al deze kennis via workshops en webinars gedeeld met de eindgebruikers, onder meer gericht op waterveiligheid in relatie tot andere beleidsterreinen, zoals natuurbehoud.

Door Monica Lanz
Universiteit Utrecht



Project start: 11/2017

Bijdragen

Dr. mr. H.K. Gilissen
Universiteit Utrecht

Dr. mr. F.A.G. Groothuijse
Universiteit Utrecht

en Willemijn van Doorn-Hoekveld
Universiteit Utrecht



Project einde: 03/2023

Prof. mr. H.F.M.W. van Rijswijk
Universiteit Utrecht



Figuur 1: Vrouwe Justitia. Foto door Openbaar Ministerie.

Motivatatie en uitdagingen

Als team pakken we vragen aan die ontstaan rondom de 'Waterwet' en de toekomstige 'Omgevingswet'. In deze wetgeving worden het bestuur en beheer van water geregeld, en in het bijzonder de implementatie van de nieuwe – op de risicobenadering gebaseerde – normering van waterveiligheid. Wij zijn geïnteresseerd in de wijze waarop de overheid vorm geeft aan de daarmee samenhangende publieke taken en de manier waarop wet- en regelgeving verschillende belangen beschermt. De juridische uitdagingen die ontstaan bij de implementatie van de nieuwe normering vloeien vaak voort uit tegenstrijdige belangen en verantwoordelijkheden van stakeholders. Daarnaast is er behoefte aan integratie van waterveiligheid met andere belangen zodat een evenwicht gevonden wordt tussen rechtmatigheid, effectiviteit, efficiëntie en aanvaardbaarheid. Het onderzoek voor All-Risk heeft voor ons dan ook een bijzondere betekenis omdat het gaat om de veiligheid van alle Nederlanders achter dijken. We zijn vereerd om hieraan bij te dragen!

Doel van het onderzoek

Vanuit deze gedachte richt ons onderzoek zich op wat de wettelijk verplichte normen voor waterveiligheid betekenen voor de Nederlandse waterschappen. Welke juridische strategieën kunnen ze toepassen om bij te dragen aan de implementatie daarvan?

Innovatieve componenten

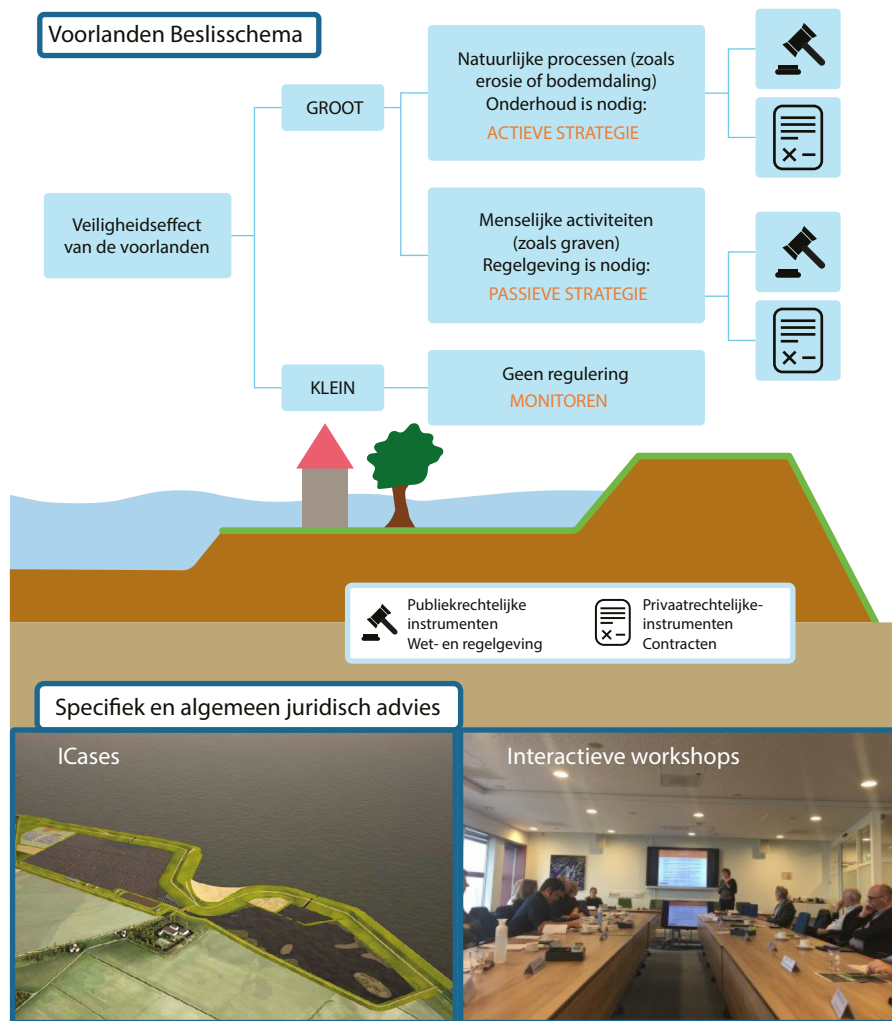
We hebben een beslisschema ontwikkeld met verschillende juridische strategieën waarmee waterschappen de gebieden die grenzen aan dijken – de voorlanden – kunnen laten bijdragen aan de bescherming tegen overstromingen (**Figuur 3, boven**). De keuze tussen een actieve of passieve reguleringsstrategie of helemaal geen reguleringsstrategie hangt in hoge mate af van: (1) het effect van de vooroever op de waterveiligheid



Figuur 2: Leden van het team (van links naar rechts): Herman Kasper Gilissen, Frank Groothuijse, Willemijn van Doorn-Hoekveld en Marleen van Rijswijk, Monica Lanz (niet in foto).

en (2) de ontwikkelingen van deze gebieden die het overstromingsrisico kunnen vergroten, zoals natuurlijke fysieke processen en menselijke activiteiten. De keuze kan, afhankelijk van de omstandigheden van het geval, via publiekrecht (regelgeving) of via civiel recht (contracten) geïmplementeerd worden.

In de casus 'Dubbele Dijk' (**Figuur 3, linksonder**) hebben we Waterschap Noorderzijlvest geadviseerd over de verdeling van wettelijke verantwoordelijkheden. Dit innovatieve dijkconcept is onderdeel van een dijkversterking in het Waddenzeegebied. De Dubbele Dijk draagt niet alleen



Figuur 3: Onderdelen van ons onderzoek. Het bovenste schema is overgenomen uit het document *Handreiking Voorlanden* (Roode et al. 2019, p. 89). Afbeelding links door <https://eemsdollar2050.nl/> en foto rechts door Marleen van Rijswijk.

bij aan waterveiligheid maar is ook geschikt voor natuur, landbouw en recreatie. Via interactieve workshops (**Figuur 3, rechtsonder**) geven we verder algemeen advies samen met andere juridische specialisten van ons programma (Soppe Gundelach Advocaten en Element Advocaten) aan cases die voortkomen uit de All-Risk-projecten (A t/m D).

Relevant voor wie en waar?

Ons onderzoek is relevant voor alle stakeholders met verantwoordelijkheden in de hoogwaterbescherming (zoals waterschappen, provincies en het ministerie van I&W). Zij kunnen onze bevindingen gebruiken om hun verantwoordelijkheden op een rechtmatige manier in te vullen.

Voortgang en toepassing

Er is een verschil tussen de resultaatsverplichting en de inspanningsverplichting om de nieuwe normen voor waterveiligheid te realiseren. Ons onderzoek naar de (nieuwe) wetgeving toont aan dat er een resultaatsverplichting geldt ten aanzien van de hoogwaterbescherming. De Omgevingswet voorziet maar in een paar gelimiteerde uitzonderingen. Dat de overheid verplicht is om de normen te realiseren zorgt voor rechtszekerheid (en helderheid over aansprakelijkheid).

Wij hebben een framework ontwikkeld dat voortbouwt op bestaande assessmentmethoden en designprincipes voor een veerkrachtig, efficiënt en legitiem overstromingsrisicobeheer. Tot dusver heeft het advies voor de Projectoverstijgende Verkenning Voorlanden (POV Voorlanden) geresulteerd in een juridisch achtergronddocument (*Juridisch Achtergronddocument Voorlanden*) en een bijdrage aan de *Handreiking Voorlanden*. Als u geïnteresseerd bent in de juridische aspecten van de implementatie van de nieuwe risicobenadering, nodigen we u uit om **de projectresultaten op de volgende pagina te bekijken**.

Aanbevelingen voor de praktijk

- Zoek een goede balans tussen rechtszekerheid en flexibiliteit om innovaties op het gebied van waterveiligheid te stimuleren.
- Identificeer voor concrete projecten het doel (hoe aan de normen te voldoen), maak de wettelijke verantwoordelijkheden van overheden duidelijk en maak inzichtelijk welke beleidsinstrumenten beschikbaar zijn en hoe overheden deze het beste in kunnen zetten.
- Wees niet bang voor de wet: deze biedt voldoende manoeuvreerruimte om een diversiteit aan innovatieve projecten te realiseren.



Belangrijkste projectresultaten



Gilissen H.K., Groothuijse F.A.G., van Doorn-Hoekveld, W.J. & van Rijswijk, H.F.M.W. (2017). 'De nieuwe systematiek van veiligheidsnormering voor primaire waterkeringen: niet eenvoudiger, wel beter'. Tijdschrift voor Bouwrecht 2017(9), pp. 946-657.

van Doorn-Hoekveld, W.J., Gilissen, H.K., Groothuijse, F.A.G., Kok, M. & van Rijswijk, H.F.M.W. (2019). Meer zoden aan de dijk met resultaatgerichte normering van waterveiligheid in de Omgevingswet. Tijdschrift voor Bouwrecht 2019(12), pp. 1021-1035.

Hartmann, T., van Doorn-Hoekveld, W.J., van Rijswijk, H.F.M.W. & Spit, T.J.M. (2019). Editorial: Special Issue: Flood resilience of private properties. Doi: 10.1080/02508060.2019.1671464

Locaties van een aantal cases waarin wij hebben geadviseerd.

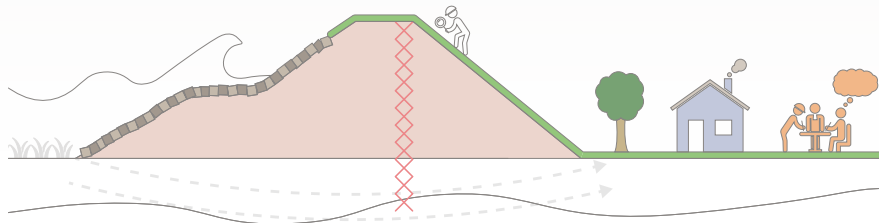


Foto door Waterschap Noorderzijlvest.

Projectsamenvatting

E2 - Sectoroverschrijdende samenwerking

Uitdagingen bij en voordelen van dijkversterkingsprojecten



Uitkomst

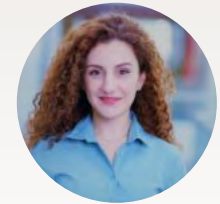
Dit project geeft een beter inzicht in de sectoroverschrijdende samenwerking tijdens verkenningsfasen van dijkversterkingsprojecten. Ondanks de groeiende onderlinge afhankelijkheid worden de bestaande machtsverhoudingen tussen de sectoren gekenmerkt door de dominantie van de watersector. Sectoroverschrijdende samenwerking kan ontstaan zolang deze de veiligheid tegen overstromingen niet in gevaar brengt. Deze configuratie leidde meestal tot goede prestaties van samenwerkingsprojecten die worden gekenmerkt door integrale en innovatieve oplossingen. In dit project is een aantal factoren geïdentificeerd die belangrijk zijn voor goede prestaties: de rol van verbindende projectmanagers, de bereidheid van samenwerkende partijen om financieel bij te dragen samen met een goede

Door Emma Avoyan

Radboud Universiteit

Project start: 05/2017

Project einde: 05/2021



Promotoren

Prof. dr. S.V. Meijerink

Radboud Universiteit

Prof. P.M. Ache

Radboud Universiteit



Figuur 1: De Ooijpolder tijdens hoogwater. Foto door Emma Avoyan.

betrokkenheid tijdens het proces, een hoge motivatie, innovatie die institutioneel ontwerp mogelijk maakt en de benodigde expertise en kennis.

Motivatie en uitdagingen

In Nederland, maar ook daarbuiten leidt de uitvoering van grootschalige infrastructuurprojecten voor waterveiligheid vaak tot complexe interacties tussen verschillende actoren en organisaties die samenwerken. Ze brengen verschillende belangen en oplossingen voor het waterveiligheidsprobleem in het proces. Tijdens de verkenningsfase van projecten kunnen deze actoren intensief samenwerken. Het doel is bijvoorbeeld het verkennen en identificeren van kansen om waterveiligheid te koppelen aan ruimtelijke en milieuoplossingen op en rond dijken. De tijd en middelen die in deze verkenningsfase worden geïnvesteerd, impliceren dat de gekozen samenwerkingsaanpak hoogstwaarschijnlijk een verschil zal maken. Toch zijn er zorgen over de efficiëntie en effectiviteit van de intensieve samenwerkingsprocessen die zijn georganiseerd tijdens de projecten. Lokale overheidsorganisaties zouden in staat moeten zijn om prioriteit te geven aan sectoroverschrijdende samenwerking wanneer en indien nodig. Dit is de reden waarom ik als onderzoeker en voormalig milieuplanner geïntrigeerd ben door het fenomeen van samenwerking.

Onderzoeksdoel

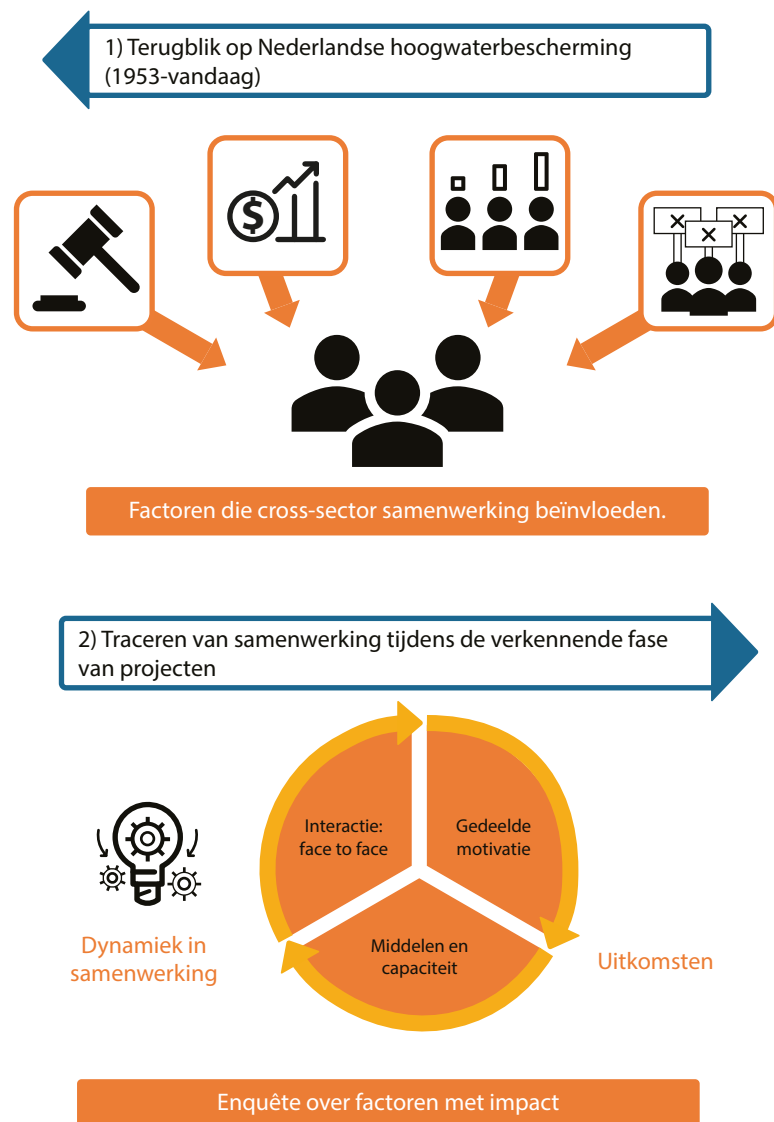
Om de uitdagingen en voordelen van sectoroverschrijdende samenwerking te begrijpen, onderzoek ik hoe en in hoeverre deze samenwerkingen leiden tot integrale, innovatieve en legitieme oplossingen voor het realiseren van integrale dijkversterkingsprojecten.

Innovatieve componenten

Mijn onderzoek maakt gebruik van een nieuwe benadering van het combineren van verschillende onderzoeksmethoden om de effectiviteit en efficiëntie van sectoroverschrijdende samenwerking beter te begrijpen.



Figuur 2: **Boven:** Gebiedsontwikkeling Grebbedijk; **Midden:** 'Dijkdenkers' bespreken ambities voor de dijkversterking; **Onder:** sectie Grebbedijk voor recreatie en economische activiteiten (Foto's project Grebbedijk en Waterschap Vallei en Veluwe).



Figuur 3: Overzicht van de innovatieve onderdelen van het onderzoek. Gebaseerd op schema's van Emma Avoyan.

Ik heb eerst de literatuur over het Nederlandse overstromingsrisicobeheer geanalyseerd om sectoroverschrijdende samenwerkingen vanaf de overstromingsramp van 1953 tot de recente ontwikkelingen nader te bekijken. Vervolgens heb ik belangrijke factoren en mechanismen van samenwerkingsprocessen kwalitatief onderzocht op basis van een diepgaande casestudie van een dijkversterkingsproject: het Grebbedijkproject. Tot slot heb ik meerdere projecten vergeleken, ook uit het buitenland, om verschillende combinaties van factoren te identificeren binnen succesvolle grootschalige infrastructuurprojecten: paden naar succes. Hiervoor heb ik de methode van kwalitatieve configuratieanalyse (QCA) gebruikt, wat een veelbelovende benadering is bij het onderzoeken van de complexe fenomenen van sectoroverschrijdende samenwerking.

Relevant voor wie en waar?

Beleidsmakers, adviesorganisaties en wetenschappers die geïnteresseerd zijn in beoordelingen van projectresultaten, sectoroverschrijdende samenwerking en gezamenlijk beheer van grootschalige infrastructuurprojecten waarbij meerdere gebiedsfuncties betrokken zijn, evenals private en publieke organisaties.

Voortgang en toepassing

Samenwerking tussen organisaties creëert kansen voor het ontwikkelen van integratieve, innovatieve en legitieme oplossingen. Aangezien machtsverhoudingen en politiek-bestuurlijke omstandigheden over het algemeen doorslaggevend zijn in ontwerp en beslissingen, is de kwaliteit van de oplossingen afhankelijk van de manier waarop sectoroverschrijdende samenwerking zich ontwikkelt tijdens de verkenningsfase; in de verkenningsfase wordt immers de oplossingsrichting bepaald. Er kunnen verschillende combinaties van factoren zijn: paden naar succes. Hoewel er niet één recept voor succes is, kunnen de factoren die in dit onderzoek

zijn geïdentificeerd (goed betrokkenheidsproces, gedeelde motivatie, verbindende manager, bereidheid tot bijdragen van middelen, kennis en expertise en institutioneel ontwerp voor innovatie) worden gebruikt als evaluatiekader. Regelmatige reflectie op de aan- of afwezigheid van succesfactoren kan projectmanagers helpen om meer te weten te komen over factoren die verbeterd zouden moeten worden. Voor een uitgebreidere beschrijving van het onderzoek, **bekijk de projectresultaten hieronder**.

Aanbevelingen voor de praktijk

- Gebruik genoemde succesfactoren als evaluatiekader voor het beoordelen van samenwerkingsinspanningen binnen dijkversterking of gebiedsontwikkelingsprojecten.
- Werf projectmanagers met verbindende kwaliteiten en met ervaring met het ontwerp en de implementatie van grote, geïntegreerde multidisciplinaire en complexe infrastructuurprojecten.
- Ga zo vroeg mogelijk in gesprek met gebiedspartners in de verkenningsfase.
- Ontwikkel samen innovatieve oplossingen via specifieke procedurele/institutionele regelingen (bijv. ontwerpapak).

Belangrijkste projectresultaten



Avoyan, E. & Meijerink, S.V. (2019). [Cross-sector collaboration within Dutch flood risk governance: historical analysis of external triggers](#). Doi: 10.1080/07900627.2019.1707070

Avoyan, E. (2021). [Inside the black box of collaboration: a process-tracing study of collaborative flood risk governance in the Netherlands](#). Doi: 10.1080/1523908X.2021.2000380

Avoyan, E., Lagendijk, A., Meijerink, S.V. & Kaufmann, M. (Aanstaand). Examining necessary and sufficient collaborative conditions for achieving output performance of the Dutch flood protection program.



Op de kaart project Grebbedijk in Wageningen, een van de lopende projecten van het Hoogwaterbeschermingsprogramma die binnen dit project (E2) worden onderzocht.

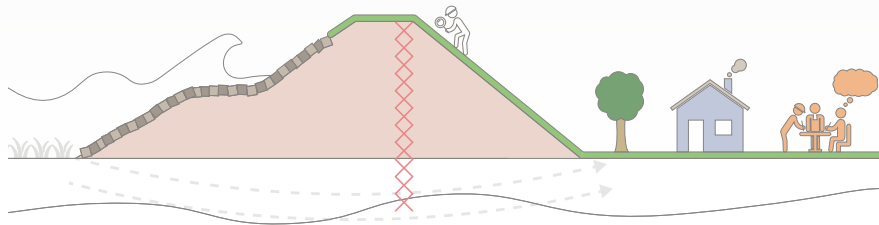


Foto door HWBP.

Projectsamenvatting

E3 - Inzicht in kennisarrangementen

Inzicht verkrijgen in waarom en hoe verschillende vormen van kennis bij kunnen dragen aan overstromingsmaatregelen



Uitkomst

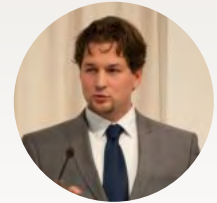
Het project heeft inzichten opgeleverd in waarom en hoe verschillende vormen van kennis bijeengebracht kunnen worden bij het ontwerpen van effectieve en breed gedragen overstromingsmaatregelen. Een voorbeeld zijn bewoners langs de Grebbedijk, die op basis van eigen ervaringen konden aangeven waar pipingrisico's aanwezig zijn. Het gericht op zoek gaan naar en waarderen van verschillende vormen van kennis heeft de potentie om tot beter overstromingsbeheer en projectontwerp te komen. Tegelijkertijd liggen er uitdagingen op het vlak van werkprocedures en projectmanagement, die vaak gebaseerd zijn op een vaste routine of aanpak. Daarom de oproep aan projectmanagers en beleidsmakers om creatief te zijn, nieuwe samenwerkingsverbanden op te zoeken en om actief op zoek te gaan naar inhoudelijke inspiratie.

Door Martijn van Staveren

Wageningen Universiteit

Project start: 08/2018

Project einde: 08/2021



Bijdragen

Prof. dr. ir. M. Kok

Technische Universiteit Delft



Figuur 1: Grebbeberg vanaf de Grebbedijk. Foto door Michiel Verbeek van Wikimedia Commons, [CC BY-SA 4.0](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Grebbeberg_vanaf_de_Grebbedijk.jpg).

Motivatatie en uitdagingen

Het omgaan met overstromingsrisico's in dichtbevolkte en laaggelegen gebieden is een van de uitdagingen voor een duurzame toekomst. Uit eerdere onderzoeksprojecten heb ik geleerd dat er verschillende vormen van kennis bestaan die bij kunnen dragen aan het ontwerpen van maatregelen voor het reduceren van overstromingsrisico's. Dit omvat bijvoorbeeld overheidsrichtlijnen en normeringen, civieltechnische kennis, maar ook lokale ideeën en landschappelijke ontwerpen. Hoewel deze vormen van kennis soms strijdig met elkaar zijn, hebben verschillende inzichten de potentie om elkaar aan te vullen en daardoor tot betere ingrepen te komen. Het blijft een uitdaging hoever je hierin kunt gaan, als het gaat om efficiëntie, verantwoordelijkheden en het managen van verwachtingen. Ook moeten belanghebbenden duidelijk hebben hoe formele rollen en verantwoordelijkheden samen kunnen gaan met een constructief participatietraject in bijvoorbeeld dijkversterkingsprojecten.

Onderzoeksdoel

De grootste uitdaging is om te onderzoeken welke kennisarrangementen, gericht op het meenemen van verschillende vormen van kennis in overstromingsbeheer, er bestaan. Daarnaast suggesties voor hoe deze kennis geïntegreerd zou kunnen worden.

Innovatieve componenten

Een innovatieve benadering is te kijken naar bestaande kennisarrangementen en te analyseren hoe deze helpen bij het betrekken van belanghebbenden bij de dijkversterkingsprojecten. Het is belangrijk om te vermelden dat dit onderzoeksproject niet bedoeld is als een evaluatiestudie.



Figuur 2: De Grebbedijk is een HWBP dijkversterkingsproject tussen Rhenen en Wageningen. Het waterschap werkt samen met verschillende belanghebbenden om te besluiten over welk dijkversterkingsalternatief gekozen zal worden. Foto door Martijn van Staveren.

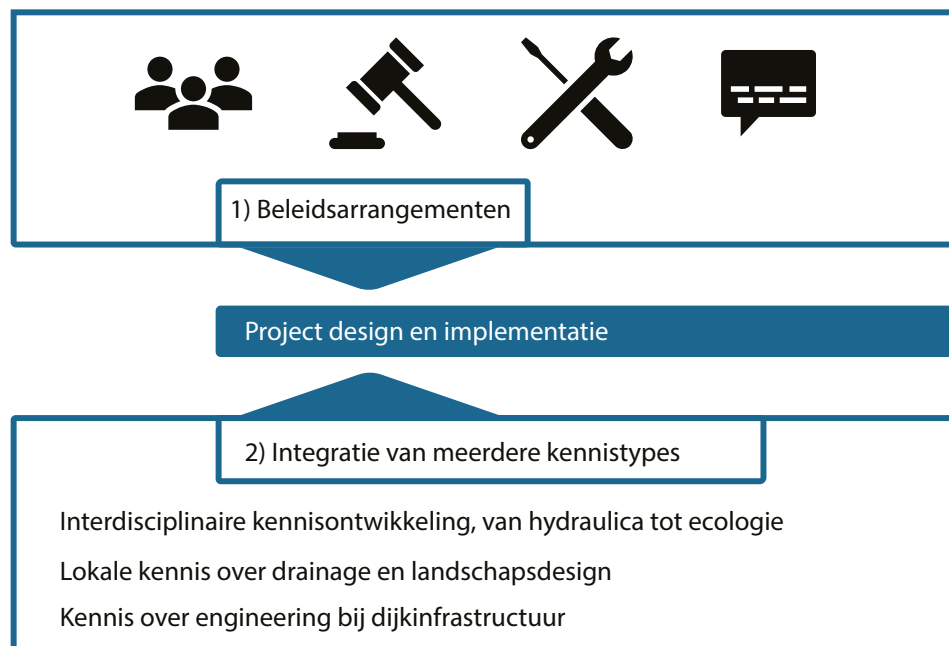
Het doel is inzichten en adviezen te delen, bijvoorbeeld op basis van casestudieonderzoek, en deze kennis ook weer bij andere projecten in te brengen. Voor het casestudieonderzoek is voor een langere periode onderzoek gedaan naar een dijkversterkingsproject: vanaf de eerste verkennende studies tot aan het vaststellen van het voorkeursalternatief en vervolgstappen.

Relevant voor wie en waar?

Aanbevelingen zijn relevant voor projectmanagers maar ook voor het bredere netwerk van belanghebbenden bij dijkversterkingsprojecten, van professionals tot gebiedsbewoners.

Voortgang en toepassing

Inzicht in lokale kennis is verzameld via participatief onderzoek en procesanalyse. Ook de rol van ruimtelijk ontwerp en planning is niet vergeten als belangrijk visueel middel om plannen zichtbaar te maken.



Figuur 3: Overzicht van innovatieve componenten zijn (1) beleidsarrangementen zoals actorcoalities, wet- en regelgeving, capaciteiten en verhaallijnen, en (2) het toepassen van verschillende vormen van kennis. Gebaseerd op schema's van Martijn van Staveren. Bron van het VKA: [Provincie Gelderland \(2019\)](#).

Aanbevelingen voor de praktijk

- Ga gericht op zoek naar verschillende vormen van kennis en reflecteer op de mogelijke bruikbaarheid in dijkversterkingsprojecten.
- Wees creatief en zoek naar nieuwe samenwerkingsmogelijkheden en inhoudelijke inspiratie.

Belangrijkste projectresultaten



van Staveren M.F. (2019) Commentary: [Dike Relocation from an Environmental Policy Perspective](#). In: Hartmann T., Slaviková L., McCarthy S. (eds) Nature-Based Flood Risk Management on Private Land. Doi: 10.1007/978-3-030-23842-1_19

van Staveren M.F. (2019). [We moeten de delta niet helemaal dicht-timmeren](#). NRC [Dagblad] 22 mei 2019.



De versterking van de Grebbedijk tussen Rhenen en Wageningen is de belangrijkste projectlocatie.

Foto door HWBP.





Storyline

Nieuwe waterveiligheidsnormering: een juridische invalshoek

Door vragen uit de praktijk te onderzoeken, lichten wij de bouwstenen toe die de wet biedt om de waterveiligheid te verbeteren

Door Willemijn van Doorn-Hoekveld en Monica Lanz
Universiteit Utrecht

Hoe het allemaal begon. Lulea (Zweden), 2015, midzomer. Een mail van Matthijs Kok, nu de coördinator van het All-Risk-onderzoeksprogramma, tijdens een consortiumbijeenkomst van een Europees project (STARFLOOD). Of wij naar de wijziging van de Waterwet wilden kijken. Een gezamenlijke reactie volgde, welke in grote lijnen werd opgenomen in een gewijzigd voorstel van de wet. De nieuwe veiligheidsnormering werd vervolgens in 2017 van kracht, met massa's vragen en onduidelijkheden voor de praktijk tot gevolg. Dat wij vervolgens ook zouden proberen ons (zij het geringe) steentje bij te dragen aan de implementatie van deze normering leek ons niet meer dan logisch! In deze storyline komt een aantal juridische vragen en aspecten aan bod die voorkomen bij

de implementatie van de nieuwe normen voor waterveiligheid, aansprakelijkheid en innovaties in de hoogwaterbescherming.

Wat wordt er genormeerd?

Een basisvraag, maar niet onbelangrijk. De Waterwet geeft veiligheidsnormen voor de primaire waterkeringen. Het merendeel van deze keringen zijn dijken die ons beschermen tegen overstromingen vanuit de Noordzee, de grote meren en rivieren.

In Nederland worden watersystemen beheerd door het Rijk en 21 waterschappen (**zie nummers op de kaart**). Het Rijk beheert

Omslagfoto: Detail van de dijkbekleding van de Lauwersmeerdijk aan de Waddenzee.
Foto door Monica Lanz.

de Noordzee, de Waddenzee, de grote meren, de grote rivieren en kanalen, een enkele primaire waterkering en een aantal grote constructies die automatisch sluiten als de zeespiegel extreem hoog is. De waterschappen beheren de overige keringen (meer dan 95% van de circa 3.000 km dijken in Nederland, **zwarte lijnen op de kaart**) en de overige wateren (**grijze vlakken op de kaart**).

Hierdoor zijn de nieuwe veiligheidsnormen de zorg van zowel het Rijk als de waterschappen, die hun inspanningen moeten coördineren om de toestand van de watersystemen en primaire waterkeringen beter te borgen en regelmatig te beoordelen.

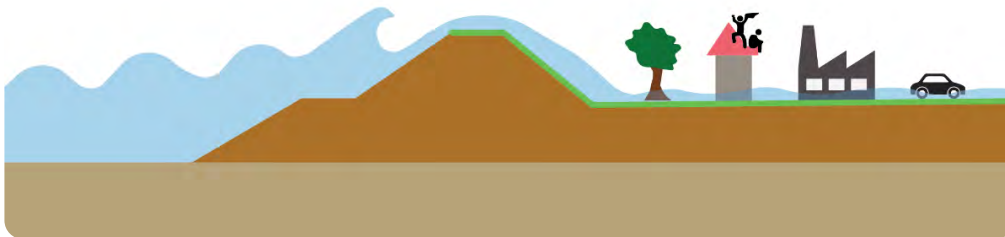
Wat houdt de nieuwe normering in?

De Europese Richtlijn Overstromingsrisicobeheer verplicht lidstaten om het overstromingsrisico te beoordelen, de omvang van het veiligheidsrisico en economisch risico in kaart te brengen en deze risico's te reduceren door adequate en gecoördineerde maatregelen te nemen. De richtlijn schrijft geen specifieke normen voor, daarom is Nederland (net als alle andere lidstaten) vrij om zijn eigen normen voor overstromingsrisicobeheer op te stellen.

Sinds 2017 staan concrete veiligheidsnormen per dijksegment in de Nederlandse wet (in de bijlagen II en III van de Waterwet). De gevolgen in het geval van een overstroming verschillen nogal van plaats tot plaats. Daarom houden deze normen rekening met verschillende factoren, zoals de maximale waterdiepte van het overstroomde gebied, de snelheid waarmee het water stijgt, het vermogen om uit een specifiek gebied te evacueren en andere relevante kenmerken van het gebied. Globaal genomen zijn de normen gericht op: (a) het bieden van een basisbeschermingsniveau voor iedereen achter de dijk (kans op overlijden door een overstroming maximaal 1 op 100.000 jaar), (b) het beperken van het totale aantal slachtoffers en (c) het voorkomen van substantiële economische



Kaartgegevens: Esri, HERE, Garmin, NOAA FAO, USGS. Kaartlagen: National Georegister, Unie van Waterschappen.



Vereenvoudigd schema van een overstroming en de consequenties daarvan. Aangepast van [STOWA \(2017, Figuur 3\)](#).



Een bezoek aan de Lauwersmeerdijk aan de Waddenzee; deze dijk wordt op het moment versterkt om aan de nieuwe normering te voldoen. Foto door Monica Lanz.

schade. Hoe ernstiger de gevolgen van een overstroming, hoe lager de kans op een dijkdoorbraak moet zijn (**zie legenda kaart**).

Tussen 2017 en 2023 beoordelen de verantwoordelijke autoriteiten alle dijksegmenten op bovenstaande normen. Waar nodig wordt met ondersteuning van het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP) een dijkversterking gepland zodat in 2050 alle dijken aan de wettelijke eisen voldoen. Ondertussen geeft het portaal Waterveiligheid jaarlijks een overzicht op basis van de beschikbare beoordelingsresultaten en de lopende versterkingsprojecten per dijksegment.

Hoe kan aan de normering worden voldaan?

De dijksegmenten moeten periodiek geïnspecteerd en beoordeeld worden. Voor deze beoordeling moeten de meest recente technische richtlijnen voor de berekening van de faalkans van dijken worden toegepast. Daarbij moeten ook steeds de meest recente hydraulische randvoorwaarden, zoals (verwachte) zeespiegelstijging, rivierafvoeren en verdeling daarvan over de riviertakken, worden meegenomen. Iedere 12 jaar moet de beheerder aan de minister verslag uitbrengen van de resultaten van deze toetsing. Ook de doeltreffendheid van de veiligheidsnormen zelf moeten eens in de 12 jaar tegen het licht worden gehouden. Dat zorgt ervoor dat uiteindelijk aan het basisbeschermingsniveau kan worden voldaan.

En straks? De Omgevingswet.

De nieuwe Omgevingswet – waarin de Waterwet wordt opgenomen – ziet toe op het verbeteren van de fysieke leefomgeving en de afstemming tussen verschillende overheden. De nieuwe wet integreert de verspreide wetgeving op het gebied van onder andere water, milieu en ruimtelijke ordening (zie infographic volgende pagina). Een opvallende verandering is onder meer dat de waterveiligheidsnormen nu onderdeel gaan uitmaken van een omgevingswaarde, een ijkpunt voor de toestand of kwaliteit van

een bepaald aspect in de leefomgeving. Om dat te visualiseren hebben we de infographic van de Omgevingswet van het ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties (aangepast) opgenomen. Dit ministerie werkt nauw samen met het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat om de regels over verschillende aspecten van de leefomgeving te vereenvoudigen en te verminderen door ze in één wet op te nemen.

De regering bepaalt bij Algemene Maatregel van Bestuur (in het Besluit kwaliteit leefomgeving) op welke terreinen de omgevingswaarde van toepassing is. In dat besluit komen resultaatsverplichtingen voor de verantwoordelijke autoriteiten te staan (binnen een bepaalde termijn aan de normen voldoen) en eenmaal behaald mag de norm niet meer overschreden worden.

Gelimiteerd aantal uitzonderingen

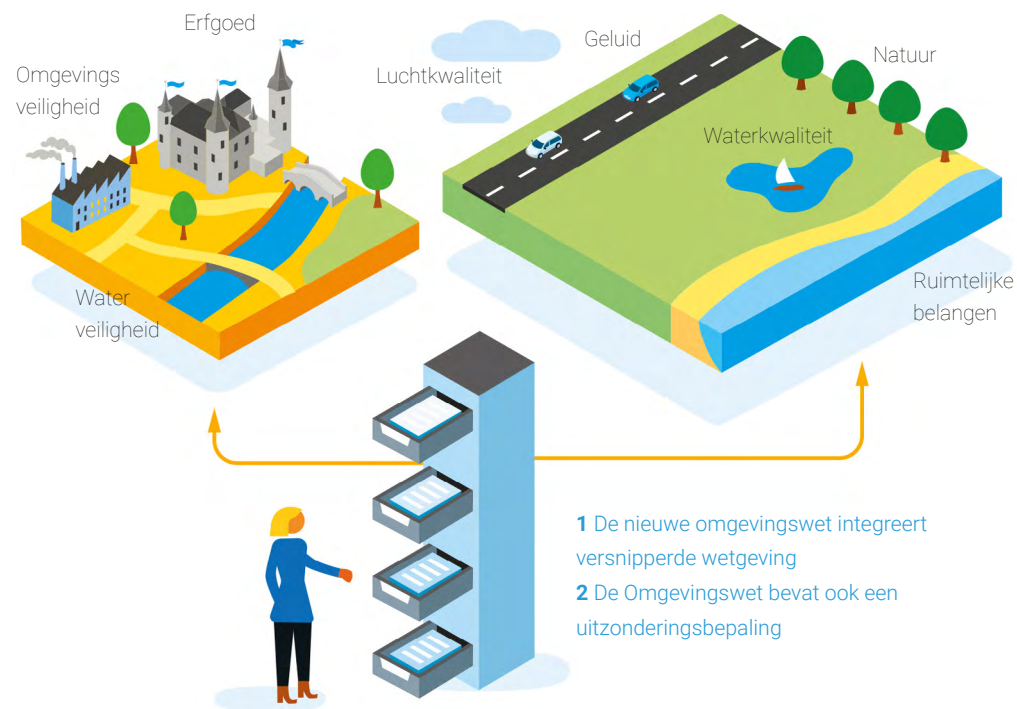
De wetgever heeft ervoor gekozen een uitzondering te maken als sprake is van: (1) veranderingen in normerings- of beoordelingssystematiek, (2) onevenredig kostbare maatregelen, (3) gewijzigde omstandigheden buiten de invloedssfeer beheerder en (4) lange doorlooptijd van maatregelen. De waterbeheerder moet hoe dan ook alles binnen zijn macht doen om aan de normering te voldoen.

Als de waterbeheerder een beroep kan doen op een van deze uitzonderingen, kan uitstel worden verleend voor het resultaat van de verplichting.

WAT ALS ER IETS MIS GAAT?

Aansprakelijkheid en verantwoordelijkheid

Zelfs als de waterkeringen voldoen aan de normen voor het basisbeschermingsniveau, is 100% bescherming nooit gegarandeerd. Gelukkig



Bron: overgenomen uit de infographic van het ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties.



Na een plotselinge dijkverschuiving in augustus 2003, ontstond een gat in de dijk van 60 meter en overstroomde Wilnis. Foto © ANP.

zijn er in Nederland slechts enkele overstromingsrampen geweest. De laatste keer dat een dijk het begaf was in 2003: de Wilnis-dijkdoorbraak. Hoewel deze veendijk geen onderdeel uitmaakte van een primaire waterkering (zwart omlijnd op de kaart), veroorzaakte de verschuiving grote schade voor de gemeente Wilnis, maar wie moest deze schade betalen en wie was verantwoordelijk? Het antwoord op deze vraag was niet triviaal, dus werd deze voorgelegd aan en uiteindelijk beantwoord door de Hoge Raad.

Aansprakelijkheid voor een gebrekkige dijk

De Hoge Raad oordeelde dat de dijk een opstal (een aangelegd onroerend goed) van het waterschap was. Daarmee was de risicoaansprakelijkheid van artikel 6:174 BW van toepassing. De vraag die de Hoge Raad in dat geval moest beantwoorden met toepassing van artikel 6:174 BW was: “in hoeverre de dijk voldeed aan de eisen die men daaraan in de gegeven omstandigheden mocht stellen”.

Aangezien de veendijk door verdroging is bezweken, stelde het waterschap in 2003 dat dit toentertijd een zogenoemde ‘objectief onkenbare risicofactor’ was en dat de betreffende kering daarom niet als gebrekkig kon worden aangemerkt. De Hoge Raad was het daarmee eens: vanwege onder meer de stand van de wetenschap en techniek en de financiële draagkracht van het waterschap, kon de dijk niet als gebrekkig worden aangemerkt en werd het waterschap niet aansprakelijk gesteld.

Een dergelijk argument zal waarschijnlijk minder succesvol zijn als in de toekomst een dijk door droogte bezwijkt. Het voorkomen van verdroging van dijken is tegenwoordig een vast onderdeel van de takenpakket en de beheerpraktijk van waterschappen.

Wordt de aansprakelijkheid groter met de nieuwe normering?

De wettelijke verantwoordelijkheid van waterschappen kan groter worden doordat de mogelijke uitzonderingen nu beperkt zijn in de Omgevingswet. Bij eventuele toekomstige dijkdoorbraken moeten de verantwoordelijke waterschappen aantonen dat ze voldoen aan de nieuwe risiconormen of zich kunnen beroepen op een van de wettelijke uitzonderingsgronden, anders zouden ze aansprakelijk kunnen worden gesteld voor eventuele schade.

In geval van een overstroming biedt de Wet tegemoetkoming schade bij rampen in sommige gevallen een oplossing voor de vergoeding van schade. Als sprake is van omstandigheden die opgenomen zijn in de wet, kan voor een overstroming een specifieke regeling voor het vergoeden van schade worden opgesteld. Die regeling kan alleen worden ingezet als de schade is veroorzaakt door een calamiteit waarvoor een verzekering of andere vergoeding niet mogelijk is. Overstromingsschade valt onder de werkingssfeer van deze wet, aangezien zoetwateroverstromingen als ramp worden aangemerkt en het verzekeren van overstromingsschade nog niet (op grote schaal) mogelijk is. De wet bepaalt de kring van gedupeerden en welke schade voor gedeeltelijke vergoeding in aanmerking komt. Voor elke (overstromings)ramp moet dus een specifieke regeling worden vastgesteld waarin de details voor de compensatie worden uitgewerkt. Wordt er geen regeling opgesteld, dan is compensatie niet mogelijk.

Wat te doen met innovatieve projecten?

In de Omgevingswet wordt de noodzaak erkend om waterveiligheid in evenwicht te brengen met andere maatschappelijke behoeften. Dit perspectief van geïntegreerd overstromingsrisicobeheer vereist vaak innovatieve oplossingen en pilotprojecten. Enkele van deze projecten worden ook bestudeerd in het All-Risk-programma, zoals de Dubbele Dijk en de

Brede Groene Dijk. Het huidige recht geeft niet altijd duidelijk antwoord op vragen die in de praktijk bestaan, maar dit staat de realisatie van een dergelijke innovatie meestal niet in de weg.

Vragen die bij dergelijke projecten ontstaan zijn bijvoorbeeld welke instantie verantwoordelijk is bij de aanleg van een kering of wie verantwoordelijk is voor beheer en onderhoud en wie eventuele aansprakelijkheid draagt (Dubbele Dijk). Ook integratie met andere wetgeving, zoals natuurbeschermingswetgeving, speelt een rol (Brede Groene Dijk).

Resterende uitdagingen

Ondanks ons enthousiasme zien we dat vaak met angst naar juristen worden gekeken – achteraf gezien meestal onnodig. De wet- en regelgeving wordt gezien als een belemmering terwijl bij nader inzien veel meer mogelijk is, zoals ook blijkt uit het project Dubbele Dijk voor de vragen met betrekking tot verantwoordelijkheden van verschillende overheidspartijen en uit het project Brede Groene Dijk, waar de wet flexibeler bleek dan verwacht. Onder de Omgevingswet zal dat niet anders zijn. Wij hopen bij veel innovaties betrokken te blijven, zodat we de mogelijkheden en randvoorwaarden die de wet biedt kunnen blijven benadrukken om op die manier waterschappen te helpen bij hun innovaties op het gebied van waterveiligheid.

In ons vakgebied, en zeker op het gebied van innovatieve waterprojecten, blijkt dat de vragen uit de praktijk niet op voorhand te achterhalen zijn, maar zich, zoals het geval was bij All-Risk, zich tijdens het (onderzoeks)traject aandienen. Voor ons werk en de ontwikkeling van ons rechtsgebied zijn we afhankelijk van praktische vragen. Binnen All-Risk hebben we een bijdrage kunnen leveren aan verschillende projecten (**zie enkele publicaties hierna**) en we hopen dat deze manier van samenwerken tot veel goede resultaten zal leiden.

Meer lezen?

Scan de QR code of klik erop om de storyline online te bekijken.



Deze storyline is gebaseerd op de volgende open access publicaties:

- W.J. van Doorn-Hoekveld, H.K. Gilissen, F.A.G. Groothuijse & J. Kevelam, 'Kroniek aansprakelijkheid en schadevergoeding in het waterbeheer', *Overheid en Aansprakelijkheid* 2020/5, p. 11-25. <https://envir-advocaten.com/nl/publicaties/kroniek-aansprakelijkheid-en-schadevergoeding-in-het-waterbeheer/>
- W.J. van Doorn-Hoekveld, H.K. Gilissen, F.A.G. Groothuijse, H.F.M.W. van Rijswijk, 'Meer zoden aan de dijk met de resultaatgerichte normering van waterveiligheid in de Omgevingswet', *Tijdschrift voor Bouwrecht* 2019/165. <https://dspace.library.uu.nl/handle/1874/390196>
- W.J. van Doorn-Hoekveld, H.K. Gilissen, F.A.G. Groothuijse & H.F.M.W. van Rijswijk (18-02-2019), 'Advies: Beheer 'tussengebied' van het project Dubbele Dijk', Utrecht Centre for Water, Oceans and Sustainability Law, Utrecht University.
- H.K. Gilissen, W.J. van Doorn-Hoekveld & H.F.M.W. van Rijswijk. *Handreiking voorlanden* (2019) en *Juridische aandachtspunten* (2018). <https://www.stowa.nl/sites/default/files/assets/PUBLICATIES/Publicaties%202019/STOWA%202019-09%20Voorland%20spreads.pdf>
- H.K. Gilissen, F.A.G. Groothuijse, W.J. van Doorn-Hoekveld & H.F.M.W. van Rijswijk, 'De nieuwe systematiek van veiligheidsnormering voor primaire waterkeringen: niet eenvoudiger, wel beter'. *Tijdschrift voor Bouwrecht* 2017/142. <https://dspace.library.uu.nl/handle/1874/361613>
- Portaal Waterveiligheid: <https://waterveiligheidsportaal.nl/#/home>

Dankwoord

Dit werk maakt deel uit van het Perspectief-programma All-Risk met projectnummer P15-21, dat wordt gefinancierd door NWO-domein Toegepaste en Technische Wetenschappen. Wij danken Arjan Dane van het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, Irina Mak van het communicatiebureau van de Faculteit Recht, Economie en Bestuur van de Universiteit Utrecht, Wim Kanning en Juliette Cortes van de All-Risk-redactie en Marleen van Rijswijk van het Utrecht Centre for Water, Oceans and Sustainability Law (Universiteit Utrecht) en All-Risk voor hun inbreng bij deze storyline.



Storyline

Wat maakt samenwerking succesvol?

Om te komen tot integrale oplossingen moeten de succesfactoren van dijkversterkingsprojecten onderdeel worden van de vaste praktijk.

Door Emma Avoyan
Radboud Universiteit

In veel HWBP-projecten werken overheden met elkaar en belanghebbenden samen om oplossingen voor waterveiligheid te ontwikkelen die verschillende maatschappelijke waarden meekoppelen of integreren. Om de kansen op een succesvolle samenwerking te vergroten, dienen waterschappen daarvoor projectmanagers te werven met vaardigheden om te verbinden, partijen te stimuleren om middelen bij te dragen en een samenwerkingsproces te faciliteren dat partijen motiveert om samen te werken en de benodigde kennis en expertise te genereren.

Ik vind Nederland een voorbeeldland als het gaat om samenwerken voor integrale ruimtelijke ontwikkelingen. Maar dan fascineert het me dat de overheid en publieke organisaties het nog beter willen doen, uiteraard vanwege de beperkte fysieke ruimte voor concurrerende maatschappelijke waarden en de alarmerende scenario's voor klimaatverandering. Als PhD-onderzoeker in het All-Risk-programma (zie project [E2](#)) onderzoek ik hoe de al goed doordachte samenwerkingspraktijken nog verder kunnen worden verbeterd en doe ik aanbevelingen voor nog betere resultaten. Deze aanbevelingen komen nu op een mooi moment gezien de lopende discussies rond de samenwerkingsverplichtingen in de Omgevingswet en de doelstelling

Omslagfoto: De Ooijpolder tijdens hoogwater. Foto door Emma Avoyan.

van het kabinet om de samenhang tussen verschillende projecten en activiteiten op het gebied van ruimtelijke ordening, milieu en natuur te verbeteren.

WAAROM IS SAMENWERKING NODIG?

Het uitvoeren van dijkversterkingsprojecten vereist vroegtijdige betrokkenheid van vele belanghebbenden, zoals publieke en private organisaties. Door samen te werken verkennen zij 'slimme combinaties' van oplossingen die het mogelijk maken om waterveiligheidsoplossingen te integreren met andere maatschappelijke waarden, zoals ruimtelijke kwaliteit en duurzaamheid. Deze integrale strategie was aanvankelijk onduidelijk omdat het HWBP alleen subsidie kan bieden voor dat deel van een ontwerp dat voldoet aan de criteria van "sober en doelmatig". Het sobere deel impliceert middelen voor alleen de dijkversterking en inpassing. Er zouden dan veel meekoppelkansen kunnen worden gemist om het gebied zodanig te ontwikkelen dat er rekening wordt gehouden met meerdere maatschappelijke en ecologische waarden, die gezamenlijk door het meekoppelen van waterveiligheid kunnen worden verwezenlijkt.

Als onderzoeker werd ik uitgedaagd om de combinaties van factoren te identificeren die zorgen voor succesvolle gezamenlijke dijkversterkingsprojecten: paden naar succes.

MAAR EERST: WAT IS EEN SUCCESVOLLE SAMENWERKING?

Wanneer concluderen we dat een projectsamenwerking succesvol was? Is dat het geval wanneer actoren consensus bereiken? Of is het wanneer de afgesproken doelen bereikt worden? Of wanneer alle betrokken actoren delen in de baten/voordelen van de samenwerking? Zoals gebruikelijk is er geen eenvoudig antwoord op de vraag wanneer, hoe en voor wie samenwerking

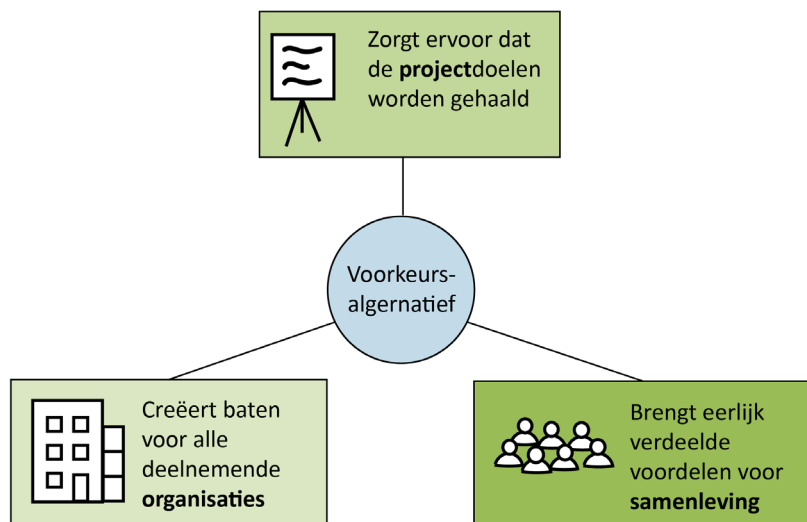
Hoogwaterbeschermingsprogramma

Projecten 2021 - 2025

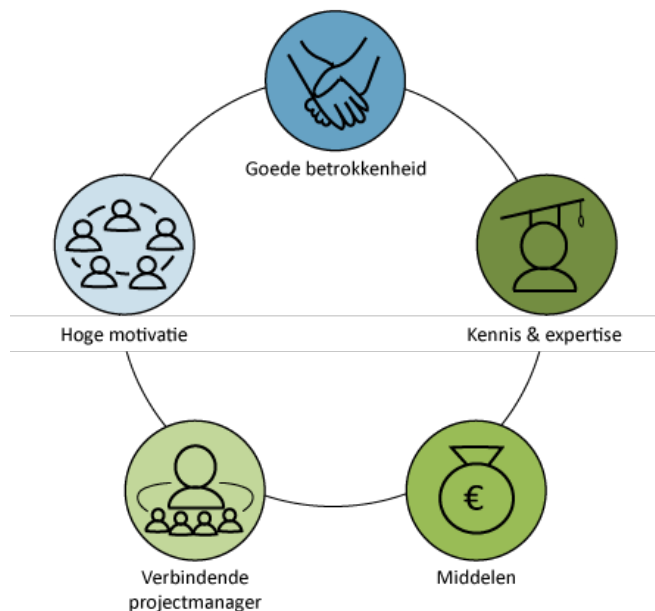
- Dijkversterkingsprojecten 2020
- Dijkversterkingstrajecten
- Primaire waterkeringen
- Overstromingsrisicogebied



De projectlocaties van het Hoogwaterbeschermingsprogramma. Bron: Aangepast van de Hoogwaterbeschermingsprogrammakaart. Kaartlagen van National Georegister en HWBP. Illustratie door Juliette Cortes Arevalo and Martijn Vos.



De drie criteria om succesvolle samenwerkingsprojecten te identificeren in de context van dit onderzoek. Gebaseerd op schema's van Emma Avoyan.



De factoren van succesvolle samenwerkingen. Gebaseerd op schema's van Emma Avoyan.

succesvol is. Het is inderdaad een uitdaging om het succes van de samenwerking te beoordelen, evenals de factoren die dit succes beïnvloeden. Daarom heb ik voor dit onderzoek drie criteria gecombineerd om het succes te meten van samenwerking in de verkenningsfasen van dijkversterkingprojecten die leiden tot de (implementatie van) een voorkeursalternatief dat:

- baten creëert voor samenwerkende organisaties.
- ervoor zorgt dat de gezamenlijk overeengekomen projectdoelen worden gehaald.
- baten eerlijk verdeeld worden onder de samenleving als geheel.

SURVEY-ONDERZOEK

Ik heb een survey-onderzoek uitgevoerd waarbij ik eerst de succesvolle projecten heb geïdentificeerd op basis van de bovenstaande drie criteria, om vervolgens vast te stellen welke succesfactoren bepalend waren voor het succesvol zijn van de projecten. De enquête is verspreid tussen september en november in 2020 en had ongeveer **350 respondenten** die bij **26 lopende dijkversterkingsprojecten** betrokken waren. In de enquête heb ik verschillende vragen gesteld over het samenwerkingsproces en de resultaten. De respondenten vertegenwoordigden verschillende groepen belanghebbenden, hoewel de meesten werkzaam waren in overheidsorganisaties: rijksoverheid, provincies en gemeentelijke overheden en waterschappen. 47% van de respondenten was werkzaam bij de waterschappen, wat kan worden verklaard door hun belangrijke rol als grootste beheerder van de primaire waterkeringen. Vervolgens heb ik een kwalitatieve vergelijkende analyse (QCA) uitgevoerd om de projecten systematisch te vergelijken en de relaties tussen verschillende factoren en de resultaten van deze projecten te onderzoeken. Uit enquêteresultaten blijkt dat vijf factoren belangrijk zijn voor succesvolle samenwerking, hoewel in verschillende mate en combinaties (paden).

WAT ZIJN DE FACTOREN VAN SUCCESVOLLE SAMENWERKINGEN?

Goede betrokkenheid

Het samenwerkingsproces biedt actoren voldoende mogelijkheden en mechanismen om het gezamenlijke voorkeursalternatief te identificeren, te overleggen en afspraken te maken.

Kennis en expertise

Bij samenwerking delen actoren kennis en huren ze de benodigde kennis en expertise in.

Middelen

De actoren zijn bereid financiële middelen te verwerven en te delen om het voorkeursalternatief te ontwikkelen en te implementeren.

Verbindende projectmanager

Projectmanagers met verbindende managementstijlen of vaardigheden die de actoren kunnen verbinden en het project kunnen aanpassen aan veranderende externe omstandigheden.

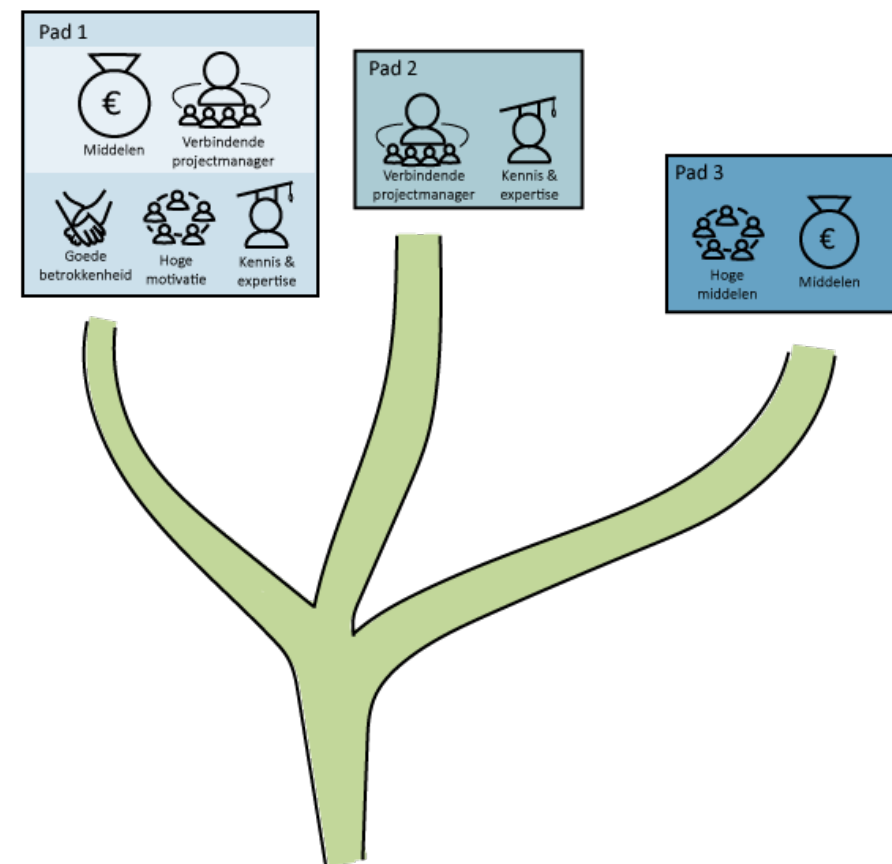
Hoge motivatie

De mate waarin actoren betrokken zijn bij activiteiten om vertrouwen op te bouwen, een gevoel van tevredenheid over samenwerking te ontwikkelen en betrokkenheid bij samenwerking op te bouwen.

PADEN NAAR SUCCES

Pad 1: verbindende projectmanager en middelen

Uit het eerste pad bleek dat veel projecten (11 van de 26) succesvol waren door een combinatie van een verbindende projectmanager en door partijen ter beschikking gestelde middelen. Deze combinatie wordt vervolgens



Paden naar succes in samenwerkingsprojecten. Gebaseerd op schema's van Emma Avoyan.

aangevuld met een goede betrokkenheid, hoge motivatie of beschikbaarheid van relevante kennis en expertise.

Pad 2: beperkte middelen maar een verbindende manager en benodigde kennis en expertise

Het tweede pad geeft aan dat een gebrek aan middelen kan worden opgevangen door de gelijktijdige aanwezigheid van een verbindende projectmanager en de nodige kennis en expertise. Hoewel dit geen gemeenschappelijk pad is, hebben ten minste vier van de 26 projecten deze configuratie van factoren die hebben geleid tot succesvolle samenwerking.

Pad 3: hoge motivatie van partijen om middelen te verzamelen

Het derde pad is een uitzondering, want slechts 2 van de 26 projecten hadden deze weg naar succes. De afwezigheid van een projectmanager met een verbindende managementstijl en het ontbreken van de benodigde kennis en expertise kan worden gecompenseerd door de hoge motivatie van partijen om middelen te verzamelen en in te brengen om de projectdoelen te behalen.

GELEERDE LESSEN

Over het algemeen zijn er volgens de respondenten van de enquête al veel voorbeelden van succesvol meekoppelen en samenwerkingsprojecten binnen het HWBP. De rol van projectmanagers met verbindende vaardigheden is essentieel om dit succes in het samenwerkingsproces te bereiken. Opdrachtgevers zouden op strategische wijze managers kunnen werven met uitgebreide ervaring in het managen van grootschalige integrale projecten. Ook de bereidheid van samenwerkende partijen om financieel bij te dragen is een belangrijk succesfactor voor de projecten. Deze twee factoren worden in de meest succesvolle projecten echter aangevuld met een goede betrokkenheid van partijen, een hoge motivatie

en de nodige expertise en kennis. De vraag is nu hoe we deze succesfactoren voor toekomstige gebiedsontwikkelingsprojecten verder kunnen ontwikkelen en bevorderen. Niet alle succesfactoren hoeven aanwezig te zijn om succesvolle integrale projecten te realiseren. De aanwezigheid van sommige factoren kan de afwezigheid van andere factoren compenseren. Daarom moeten opdrachtgevers niet worden ontmoedigd als genoemde succesfactoren in eerste instantie niet aanwezig zijn. Ze zouden zich in plaats daarvan moeten concentreren op mechanismen om te behouden wat ze hebben en de ontbrekende factoren te versterken en promoten.

Meer lezen?

Scan de QR code of klik erop om de storyline online te bekijken.



Dit verhaal is gebaseerd op de volgende Engelstalige/vrije toegankelijke publicaties:

- Avoyan, E., Lagendijk, A., Meijerink, S.V. & Kaufmann, M. (Aanstaand). Examining necessary and sufficient collaborative conditions for achieving output performance of the Dutch flood protection program, *Journal of Public Administration Research and Theory*.
- Avoyan, E. (2021). Inside the black box of collaboration: A process-tracing study of collaborative flood risk governance in the Netherlands. *Journal of Environmental Policy & Planning*, 0(0), 1–15. Doi: [10.1080/1523908X.2021.2000380](https://doi.org/10.1080/1523908X.2021.2000380)
- Avoyan, E. & Meijerink, S.V. (2021). Cross-sector collaboration within Dutch flood risk governance: historical analysis of external triggers. *International Journal of Water Resources Development*, 37(1), 24–47, Doi: [10.1080/07900627.2019.1707070](https://doi.org/10.1080/07900627.2019.1707070)

Dankwoord

Dit onderzoek is onderdeel van het Perspectief-programma All-Risk met projectnummer P15-21, dat (gedeeltelijk) is gefinancierd door NWO-TTW. Ik dank Josan Tielen (programmabegeleider), Anouk te Nijenhuis (innovatiecoördinator) en andere collega's van het Hoogwaterbeschermingsprogramma, collega's bij de Radboud Universiteit en in het bijzonder professor Sander Meijerink evenals Marije Pott en Juliette Cortes van de All-Risk-redactie voor hun input bij het ontwikkelen van deze storyline.



Foto van een sessie over gebiedsontwikkeling op de Grebbedijk. Foto door HWBP.

Het thema:

De uitvoering van grootschalige infrastructuurprojecten voor waterveiligheid vraagt om een goed samenspel tussen waterbeheerders, gemeenten, grondeigenaren en maatschappelijke organisaties.

Wilt u de presentaties van de onderzoekers terugzien? Dat kan door op **de QR code te klikken of deze te scannen**.



Reflectie

Verder kijken dan versterken

Webinar team

Moderator



Sander Meijerink
Radboud Universiteit

Sprekers



Monica Lanz
Universiteit Utrecht

Introductie

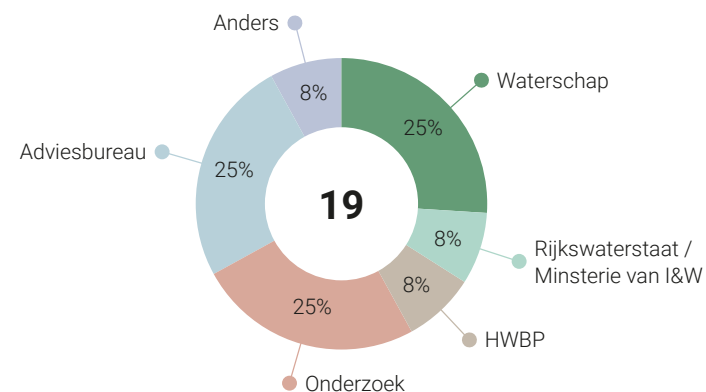


Emma Avoyan
Radboud Universiteit



Annelies Freriks
Element Advocaten

Deelnemers





Antwoorden van de deelnemers op de vraag wat, naast versterking, belangrijke onderwerpen zijn.

Deze reflectie komt voort uit de discussie tussen All-Risk-onderzoekers en deelnemers aan het gelijknamige All-Risk-webinar van 13 oktober 2021.

Een van de doelen van het HWBP is het zo mogelijk meekoppelen van andere belangen en opgaven met de waterveiligheidsopgave. Om dit mogelijk te maken zijn veel samenwerkingsprocessen begonnen waarin partijen gezamenlijk mogelijkheden verkennen en een voorkeursalternatief ontwikkelen. Wat kunnen we leren van deze samenwerking in HWBP-projecten? Wat zijn belangrijke voorwaarden voor de samenwerking om tot een effectief en maatschappelijk gedragen voorkeursalternatief te komen? En wat zijn de juridische mogelijkheden en belemmeringen (bijv. betrekking tot Natura 2000) om zo'n voorkeursalternatief te realiseren? In dit webinar willen we ingaan op deze en andere governancevraagstukken.

Discussie

Hoewel het rechtssysteem een aantal uitdagingen met zich meebrengt voor integraal overstromingsrisicobeheer en het gezamenlijk bestuur dat daarvoor nodig is, werd tijdens het webinar duidelijk dat er een groot aantal succesvolle projecten is die ondanks de juridische knelpunten een succesvolle samenwerking tussen de betrokken partijen hebben weten te organiseren. Toch zijn er zorgen over de efficiëntie en effectiviteit van de intensieve samenwerkingsprocessen die zijn georganiseerd tijdens de verkenningsfase van HWBP-projecten.

Om zowel de efficiëntie als de effectiviteit van de inspanningen te vergroten, is het van belang om na te gaan of het gezamenlijk ontwikkelde voorkeursalternatief voordelen oplevert voor samenwerkende partijen, een roadmap bevat voor het bereiken van gezamenlijk overeengekomen projectdoelen en een rechtvaardige verdeling van de kosten en baten van de implementatie ervan onder de begunstigden (de samenleving) garandeert. De kans op het behalen van deze prestatieniveaus is groot wanneer de projecten managers hebben met een verbindende managementstijl en er voldoende (financiële) middelen beschikbaar worden gesteld door de betrokken partijen. Andere succesfactoren zijn productieve betrokkenheid, gedeelde motivatie en het genereren of delen van relevante kennis en expertise.

Tijdens de discussie voegden de deelnemers andere relevante succesfactoren toe voor het realiseren van integrale projecten, zoals duidelijkheid over doelstellingen en financiering, een langetermijnvisie, urgentiebesef, gedeelde verantwoordelijkheden en een relatief kleine projectschaal. Het is belangrijk om te beseffen dat niet al deze succesfactoren aanwezig hoeven te zijn om succesvolle integrale projecten te realiseren. De afwezigheid van dezelfde factoren kan worden gecompenseerd door de aanwezigheid van andere. Daarom moeten projecteigenaren niet ontmoedigd worden als ze de meeste van deze succesfactoren niet verwerven. Ze moeten zich liever concentreren op de omstandigheden die ze hebben, deze bevorderen en verder stabiliseren. Zoals een van de beoefenaars zei: "We concentreren ons vaak op wat we zouden hebben bereikt of zouden kunnen bereiken in plaats van op wat we hebben en hebben bereikt".

Hoe kunnen partijen dan gestimuleerd worden om hun sectorale doelen te koppelen aan HWBP-projecten?

De meeste deelnemers gaven aan dat het van cruciaal belang is om andere beleidssectoren vroeg in het proces te betrekken, zodat ze voldoende tijd hebben om ideeën te ontwikkelen over het koppelen van kansen. Anderen noemden ook creatief denken, een ontwerpbenadering en een specifiek gebied en concrete problemen als uitgangspunt nemen. Waar beleidsdoelstellingen vaak abstract of vaag zijn, zijn problemen en belangen in specifieke gevallen dat niet.



Antwoorden van de deelnemers op de vraag: welke factoren vindt u belangrijk voor het succes van integrale HWBP-projecten (anders dan in Emma's presentatie)?

Binnen het HWBP zijn er ook projecten die er niet in zijn geslaagd om productieve samenwerkingsprocessen te organiseren, ofwel omdat er geen samenwerkingsproces is gestart ofwel omdat er niets van is gekomen. Tijdens het webinar was er een levendige discussie over de knelpunten die integrale HWBP-projecten in de weg staan. Sommige deelnemers gaven aan dat er geen capaciteit of tijd is om een integrale oplossing te ontwikkelen. Anderen zeiden dat een strakke planning en tijdsdruk de ontwikkeling van integrale projecten zouden belemmeren. Andere deelnemers wezen op de langzamere doorloop- en verwerkingstijd die samenwerking aan integrale oplossingen kan veroorzaken en zelfs op angst bij het programmteam van het HWBP over deze punten. Er was discussie over de vraag of de ambitie om integrale projecten te realiseren ten koste mag gaan van de snelheid waarmee een project wordt gerealiseerd. Hoewel een meerderheid de voorkeur gaf aan integrale

oplossingen boven snelheid, waarschuwden sommigen dat het HWBP daar voorzichtig mee moet zijn: Enige flexibiliteit is acceptabel, maar vertraging in de uitvoering van projecten gaat ten koste van de waterveiligheid. Tot slot waren er ook deelnemers die stelden dat stakeholderparticipatie, te grote ambities van sommige sectoren of beperkte budgetten van gemeenten een productieve samenwerking in de weg staan.

Al met al bevestigen de in de discussie genoemde succesfactoren en knelpunten de resultaten van het onderzoek naar HWBP-projecten. Een van de interessante onderzoeksresultaten is dat ondanks de kritiek op het HWBP vanwege de 'sobere en doelmatige aanpak', het HWBP toch een groot aantal succesvolle integrale projecten heeft weten te realiseren. Over het algemeen is de strategie van meekoppelen succesvol gebleken.

All-Risk-aanbevelingen:

- Gebruik genoemde succesfactoren als evaluatiekader voor het beoordelen van samenwerkingsinspanningen binnen HWBP-projecten. Door op deze factoren te focussen, kan worden beoordeeld of ze met elkaar samenhangen en/of kunnen worden gecompenseerd als ze worden gemist.
- De vaardigheden van projectmanagers verdienen aandacht. Selecteer bij het werven van projectmanagers niet alleen op de conventionele vereisten (het kunnen halen van deadlines enz.), maar ook op uitgebreide ervaring met het ontwerp en de implementatie van grote, geïntegreerde multidisciplinaire en complexe infrastructuurprojecten en op de competenties die gevraagd worden van stakeholdermanagers (vermogen om belanghebbenden te identificeren en te verbinden, enz.).
- Ga zo vroeg mogelijk in gesprek met gebiedspartners (vanaf de lancering, het begin van de verkenningsfase of tijdens de pre-verkenningsfase) zodat ze zich gestimuleerd voelen om hun middelen (mensen, financiën, logistiek enz.) te investeren in de gezamenlijke ontwikkeling van de optimale oplossing en voldoende tijd hebben om procedures binnen de eigen organisatie uit te werken.

Bibliografie

Hoofdstuk 1

- Expertise Netwerk Waterveiligheid [ENW] (2020). *Naar geloofwaardige overstromingskansen*. <https://www.enwinform.nl/publish/pages/183270/enw-20-01b-achtergrondrapportage-naar-geloofwaardige-overstromingskansen-dv.pdf>
- Jonkman, S. N., Slager, K., Moll, R., van den Hurk, B., Rongen, G., Strijker, B., Pol, J.C., Kok, M., Kolen, B., Rikkert, S.J.H., Schlumberger, J., van Haren, M. & Wüthrich, D. (2021). *Hoogwater 2021: Feiten en Duiding*. Expertise Netwerk Waterveiligheid. Doi: [10.4233/uuid:06b03772-ebe0-4949-9c4d-7c1593fb094e](https://doi.org/10.4233/uuid:06b03772-ebe0-4949-9c4d-7c1593fb094e)
- Klijn, F., ten Brinke, W., Asselman, N. & Mosselman, E. (n.d.). *Het Verhaal van de Rivier: een eerste versie*. Deltares/Rijkswaterstaat. <https://edepot.wur.nl/460187>
- Slager, K., de Moel, H., & de Jong, J.. (2021). Maximum flood extents Limburg floods July 2021 (Version 1). 4TU.ResearchData. Doi: [10.4121/16817389.v1](https://doi.org/10.4121/16817389.v1)
- Rijkswaterstaat (2019). *Programmaplan BOI 2020-2023*. https://www.helpdeskwater.nl/publish/pages/178471/programmaplan_boi_1.pdf

Hoofdstuk 2

- Interagency Performance Evaluation Task Force (U.S.) & United States (Eds.) (2006). *Performance evaluation of the New Orleans and Southeast Louisiana hurricane protection system: Draft final report of the Interagency Performance Evaluation Task Force [Electronic resource]*. US Army Corps of Engineers. <https://ipet.wes.army.mil>

- Kok, M., Jongejan, R., Nieuwjaar, M., Tanczos, I. (2017). *Fundamentals of Flood Protection*. Expertise Network for Flood Protection (ENW). <https://www.enwinform.nl/publicaties>
- Pol, J.C., Kanning, W., & Jonkman, S.N. (2021). Temporal Development of Backward Erosion Piping in a Large-Scale Experiment. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 147(2). Doi: [10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002415](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002415)
- TU Delft. (2021, December 18). *SAFELevee*. <https://www.tudelft.nl/citg/over-faculteit/afdelingen/hydraulic-engineering/sections/hydraulic-structures-and-flood-risk/research/safelevee-project>
- van Beek, V.M. (2015). *Backward erosion piping: Initiation and progression* [Doctoral thesis, Delft University of Technology]. Doi: [10.4233/uuid:4b3ff166-b487-4f55-a710-2a2e00307311](https://doi.org/10.4233/uuid:4b3ff166-b487-4f55-a710-2a2e00307311)
- van der Krogt, M.G., Klerk, W.J., Kanning, W., Schweckendiek, T. & Kok, M. (2020). Value of information of combinations of proof loading and pore pressure monitoring for flood defences. *Structure and Infrastructure Engineering*, 18(4), 505-520. Doi: [10.1080/15732479.2020.1857794](https://doi.org/10.1080/15732479.2020.1857794)
- VNK Project Office [Rijkswaterstaat] (2015). *The national Flood Risk Analysis for the Netherlands*. <https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/wa-terveiligheid/programma-projecten/veiligheid-nederland/publicaties/>
- Weichel, T. (2013). "Failure of the Breitenhagen levee (2013)." Drone Film Breitenhagen: Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt.

Hoofdstuk 3

- Möller, I., Kudella, M., Rupprecht, F. et al. (2014). Wave attenuation over coastal salt marshes under storm surge conditions. *Nature Geosci* 7, 727–731. Doi: [10.1038/ngeo2251](https://doi.org/10.1038/ngeo2251)
- Rondags, drs. E.J.N. (RAAP) (2019): *Lent zones K en L, archeologisch dijk-onderzoek, gemeente Nijmegen*. DANS. Doi: [10.17026/dans-ze9-ars8](https://doi.org/10.17026/dans-ze9-ars8)
- Silvis, F. (1991). *Verificatie Piping Model; Proeven in de Deltagoot*. Evaluatierapport. Rapport Grondmechanica Delft, CO317710/7.
- Temmink, R.J.M., Angelini, C., Fivash, G.S., Swart, L., Nouta, R., Teunis, M., Lengkeek, W., Didderen, K., Lamers, L.P.M., Bouma, T.J. & van der Heide, T. (2021). Life cycle informed restoration: Engineering settlement substrate material characteristics and structural complexity for reef formation. *Journal of Applied Ecology*, 58(10), 2158-2170. Doi: [10.1111/1365-2664.13968](https://doi.org/10.1111/1365-2664.13968)
- Vuik, V., Jonkman, S. N., Borsje, B. W., & Suzuki, T. (2016). Nature-based flood protection: The efficiency of vegetated foreshores for reducing wave loads on coastal dikes. *Coastal Engineering*, 116, 42–56. Doi: [10.1016/j.coastaleng.2016.06.001](https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2016.06.001)
- Willemsen, P. W. J. M., Borsje, B. W., Vuik, V., Bouma, T. J., & Hulscher, S. J. M. H. (2020). Field-based decadal wave attenuating capacity of combined tidal flats and salt marshes. *Coastal Engineering*, 156, 103628. Doi: [10.1016/j.coastaleng.2019.103628](https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2019.103628)
- Zhu Z., Vuik, V., Visser, P.J., Soens, T., van Wesenbeeck, B., van de Koppel, J., Jonkman, S.N., Temmerman, S. & Bouma, T.J. (2020). Historic storms and the hidden value of coastal wetlands for nature-based flood defence. *Nature Sustainability* 3, 853-862. Doi: [10.1038/s41893-020-0556-z](https://doi.org/10.1038/s41893-020-0556-z)

Hoofdstuk 4

- van Beek, V.M. (2015). *Backward erosion piping: Initiation and progression* [Doctoral thesis, Delft University of Technology]. Doi: [10.4233/uuid:4b3ff166-b487-4f55-a710-2a2e00307311](https://doi.org/10.4233/uuid:4b3ff166-b487-4f55-a710-2a2e00307311)
- Gouw, M.J.P. (2017). Alluvial architecture of fluvio-deltaic successions: a review with special reference to Holocene settings. *Netherlands Journal of Geosciences*, 86(3), 211-227. Doi: [10.1017/S0016774600077817](https://doi.org/10.1017/S0016774600077817)
- Huismans, Y., Van Velzen, G., Mahoney, T.S.D.O., Hoffmans, G. & Wiersma, A.P. (2016). Scour hole development in river beds with mixed sand-clay-peat stratigraphy. In: ICSE 2016, 8th Int. Conf. on Scour and Erosion, 12-15 September 2016, Oxford, UK.
- Knaake, S.M., Straatsma, M.W., Huismans, Y., Cohen, K.M., Stouthamer, E. & Middelkoop, H. (2019). The influence of subsurface heterogeneity on scour hole development in the Rhine-Meuse delta, the Netherlands. NCR Abstract.
- Rijkswaterstaat (2017). *Beoordelingsinstrumentarium (WBI2017)*. <https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/waterveiligheid/primaire/beoordelen/beoordelingsinstrumentarium-wbi2017-0/>

Hoofdstuk 5

- Calle, E.O.F. & Knoeff, J.G. (2002). *Dijkdoorbraakprocessen: Beschrijving, doorbraakprocessen en reststerkte* (GeoDelft-report 720201/39). Delft Cluster. <http://resolver.tudelft.nl/uuid:d3a25bfd-afd3-4519-9b07-68140932cafc>

EurOtop, 2018. *Manual on wave overtopping of sea defences and related structures. An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application*. Van der Meer, J.W., Allsop, N.W.H., Bruce, T., De Rouck, J., Kortenhaus, A., Pullen, T., Schüttrumpf, H., Troch, P. & Zanuttigh, B., www.overtopping-manual.com.

Grubert, P. (2013). *Saaledaich bei Breitenhagen, Geotechnische Untersuchungen der Bruchstelle, Empfehlungen zur Sanierung*. Gesellschaft für Grundbau und Umwelttechnik mbH, Magdeburg

Hoffmans, G.J.C.M. (2014). *Erosiebestendigheid Overgangen: Validatie Engineering Tools* (Deltares report 1209437-003). Deltares. <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3Ac77cec99-4c56-4412-86de-458c3ddc9e50>

Jüpner, R., Brauneck, J. & Pohl, R. (2015). Einsatz von Drohnen im Hochwasserfall – Erfahrungen und Ideen. *WasserWirtschaft* 9(2015), 49-54.

Man, C. (2021). *Visualization of the Random Material Point Method for macro-instability* [Master Thesis, Delft University of Technology]. <http://resolver.tudelft.nl/uuid:9d24b208-9d5a-4bff-bfca-9ebb87347ee0>

Remmerswaal, G., Vardon, P.J., Hicks, M.A. (2021). Evaluating residual dyke resistance using the Random Material Point Method. *Computers and Geotechnics* 133(2021), 104034. Doi: [10.1016/j.compgeo.2021.104034](https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2021.104034)

Robbins, B.A. & Sharp M.K. (2016). Incorporating Uncertainty into Backward Erosion Piping Risk Assessments. *E3S Web Conf.*, 7 (2016) 03007. Doi: [10.1051/e3sconf/20160703007](https://doi.org/10.1051/e3sconf/20160703007)

TAW, (2002). *Wave Run-up and Wave Overtopping at Dikes* (Technical Report). Written by Van der Meer, J.W. The Technical Advisory Committee on Flood Defence. <http://www.overtopping-manual.com/assets/downloads/TRRunupOvertopping.pdf>

Weichel, T. (2013). "Failure of the Breitenhagen levee (2013)." Drone Film Breitenhagen: Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt.

Hoofdstuk 6

Provincie Gelderland (2019). *Ga voor de Grebbedijk Nota Voorkeursalternatief*. https://www.grebbedijk.com/kennisbank/200416_grebbedijk_adviesnota-vka_incl_bijlagen_v3.pdf

Roode, N., Maaskant, B., Boon, M. (2019). *Handreiking Voorlanden*. Projectoverstijgende Verkenning Voorlanden.

STOWA (2017). *DeltaFacts: Meerlaagsveiligheid in de praktijk*. Retrieved April 11, 2022, from <https://www.stowa.nl/deltafacts/waterveiligheid/innovatieve-dijkconcepten/meerlaagsveiligheid-de-praktijk>

Lijst van All-Risk-dissertaties

- Avoyan, E. (2022). *Collaborative governance in environmental management: Analyzing conditions for integrative, innovative and performing flood risk management in the Netherlands*. Radboud University. Aanstaand **(E2)**
- van Bergeijk, V.M. (2022). *Over the dike top: modelling the hydraulic load of overtopping waves including transitions for dike cover erosion*.
Doi: [10.3990/1.9789036553414](https://doi.org/10.3990/1.9789036553414) **(D5)**
- Chavez Olalla, J. (2022). *Geophysical inputs in the geotechnical schematisation of dikes*. Delft University of Technology. Aanstaand **(C3)**
- Chen, W. (2021). *The influence of berms, roughness and oblique waves on wave overtopping at dikes*. University of Twente.
Doi: [10.3990/1.9789036553001](https://doi.org/10.3990/1.9789036553001) **(D6)**
- Gensen, M.R.A. (2021). *Discharge and water level uncertainty in bifurcating rivers*. University of Twente.
Doi: [10.3990/1.9789036553056](https://doi.org/10.3990/1.9789036553056) **(B3)**
- Klerk, W.J. (2022). *Decisions on life-cycle reliability of flood defence systems*. Delft University of Technology. Doi: [10.4233/uuid:877bed45-d775-40bb-bde2-d2322cb334f0](https://doi.org/10.4233/uuid:877bed45-d775-40bb-bde2-d2322cb334f0) **(A1)**
- Knaake, S.M. (2022). *Fluvio-deltaic subsurface characteristics: implications for flood safety*. Utrecht University. Aanstaand **(C1)**
- van der Krogt, M.G. (2022). *Reliability updating for slope stability. Improving dike safety assessments using performance information*. Delft University of Technology. Doi: [10.4233/uuid:2af85b15-9208-47bc-851d-9313d65cefcfb](https://doi.org/10.4233/uuid:2af85b15-9208-47bc-851d-9313d65cefcfb) **(D4)**
- Lashley, C.H. (2021). *The Influence of Infragravity Waves on Overtopping at Coastal Structures with Shallow Foreshores*. Delft University of Technology. Doi: [10.4233/uuid:f93143bc-0214-41ad-af4a-4ad2168a42a5](https://doi.org/10.4233/uuid:f93143bc-0214-41ad-af4a-4ad2168a42a5) **(B2)**
- Lengkeek, A.J. (2022). *Testing and modelling of sheet pile reinforced dikes on organic soils – insights from the Eemdijk full-scale failure test*. Delft University of Technology. ISBN: 978-94-6384-340-9 **(D2)**
- Marijnissen, R.J.C. (2021). *Shared-use of flood defences*. Wageningen University. Doi: [10.18174/549897](https://doi.org/10.18174/549897) **(A2)**
- Marin-Diaz, B. (2022). *Unravelling foreshore ecosystem dynamics: applications for ecosystem-based coastal defence*. University of Groningen. Doi: [10.33612/diss.203591434](https://doi.org/10.33612/diss.203591434) **(B1)**
- Pol, J.C. (2022). *Temporal evolution of Backward Erosion Piping in the Context of Levee Reliability*. Delft University of Technology. Aanstaand **(D3)**
- Remmerswaal, G. (2022). *The random material point method for assessment of residual dyke resistance*. Delft University of Technology. Aanstaand **(D1)**
- van Woerkom, T.A.A. (2022). *Improving dike slope failure assessments related to groundwater hydrology*. Utrecht University. Aanstaand **(C2)**

Colofon

Op weg naar verbeterde keringen – Vijf jaar All-Risk-onderzoek naar nieuwe veiligheidsnormen

Redactie: Matthijs Kok¹, Juliette Cortes Arevalo² & Martijn Vos³

¹Delft University of Technology, Matthijs.Kok@tudelft.nl,  0000-0002-9148-0411

²Delft University of Technology, V.J.CortesArevalo@tudelft.nl,  0000-0003-2551-1942

³Brût Design, vos@brutdesignstudio.com

Trefwoorden: waterkeringen, veiligheidsnormen, dijken, risicobenadering, waterveiligheid

Vormgeving en omslag: Martijn Vos / Brût Design

Redactionele ondersteuning: Arjen Zagema

Illustraties projectsamenvattingen: Rik Wolterink

Illustraties Storylines: Pien Buter, Tjerk Westerduin, Marije Pott

Overige illustraties zonder auteur: Martijn Vos / Brût Design

Omslagfoto: Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP)

Kaart binnenzijde omslag: Samengesteld en aangepast door Martijn Vos / Brût Design. Kaartdata uit het Kadaster, Basisregistratie Topografie

Illustraties start hoofdstukken: Stephan Timmers

Publicatie van dit boek maakt deel uit van het Perspectief-programma All-Risk met projectnummer P15-21, dat wordt gefinancierd door NWO-domein Toegepaste en Technische Wetenschappen.

Auteursrechteninformatie

Dit boek is gepubliceerd met een [Creative Commons Naamsvermelding 4.0 Internationaal](#) licentie. Al het materiaal in dit boek valt onder deze licentie, tenzij anders aangegeven.

© 2022 gepubliceerd door TU Delft OPEN
namens de auteurs.



Wij hebben ons uiterste best gedaan om de bronnen van de werken in dit boek te achterhalen en hebben waar nodig toestemming gevraagd en verkregen voor het gebruiken van deze werken. Als u vermoedt dat een deel van het materiaal inbreuk maakt op auteursrechten, neem dan contact op met TU Delft OPEN.

Uitgever: TU Delft OPEN Publishing

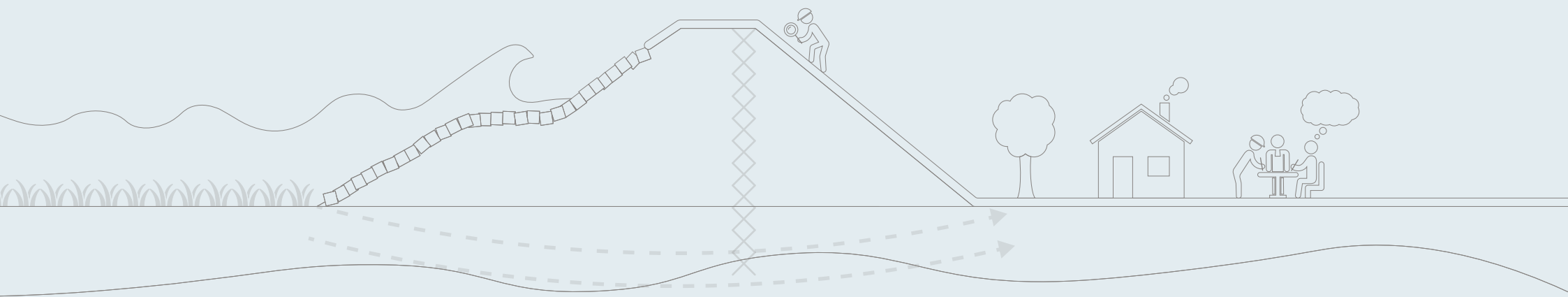
Publicatiedatum: 12 mei 2022

Drukwerk: Quantes

ISBN: 978-94-6366-549-0

DOI (Engelse versie): <https://doi.org/10.34641/mg.31>

Website onderzoeksprogramma: <https://www.all-risk-program.nl/>



Oosterhout



Noord

Over-Betuwe

Oosterhoutsche Waarden

Over-Betuwe

Oosterhoutsche Waarden

Over-Betuwe

Oosterhoutsche Waarden

Over-Betuwe

Oosterhoutsche Waarden
Over-Betuwe

Rijk van Nijmegen





Op weg naar verbeterde keringen – Vijf jaar All-Risk-onderzoek naar nieuwe veiligheidsnormen

Het beperken van overstromingsrisico's is een grote maatschappelijke uitdaging, met name voor landen waar de dreiging van het water altijd dichtbij is. De groei van de economische activiteiten en het aantal inwoners van Nederland hebben aan de basis gestaan van het vaststellen van nieuwe overstromingsnormen. De ambitie is aan deze nieuwe veiligheidsnormen te voldoen door de komende 30 jaar zo'n twee derde van de 3.500 kilometer aan primaire waterkeringen te versterken, onder de vlag van het hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP). Het onderzoeksprogramma All-Risk, dat tussen 2017 en 2021 is uitgevoerd, heeft als doel bij te dragen aan de implementatie van de nieuwe risicobenadering.

Na vijf jaar onderzoek presenteren we in dit boek de All-Risk-resultaten voor dijkprofessionals en alle anderen die geïnteresseerd zijn in waterveiligheid. Het boek begint met de kansen en uitdagingen van de technische en juridische implementatie van de nieuwe Nederlandse risicogebaseerde benadering. Daarna behandelt elk hoofdstuk één van de vijf All-Risk-onderzoekthema's. Hierin staan de belangrijkste uitkomsten van 15 PhD-projecten, uitgevoerd aan vijf universiteiten samen met meer dan 30 partners van de overheid, onderzoeksinstituten, NGO's en de private sector. Elk hoofdstuk bevat verder verhaallijnen (*storylines*) over toepassingen in casestudies en wordt afgesloten met reflecties uit webinar-discussies met vertegenwoordigers uit onderzoek en praktijk.

<https://www.all-risk-program.nl>