

TAAIE DIJKEN KLIMAATROBUUST-DEFINIITIES

Ontwikkeling definities taaigheid en klimaatrobuustheid



Rapport: 2026.174
Dr. ir. Frank den Heijer
1 mei 2026
Subsidie RAAK-Publiek 2022, RAAK.PUB11.041

INHOUDSOPGAVE

SAMENVATTING	3
1 INLEIDING	5
1.1 Het project	5
1.2 Probleemstelling.....	6
1.3 Aanpak en leeswijzer	7
2 KADER.....	8
2.1 Ontwikkeling veiligheidsdenken	8
2.2 Praktisch veiligheidskader	9
2.3 Assetmanagement van waterkeringen.....	10
3 VOORBEELDEN GEBRUIKT BIJ DE BRAINSTORMS OVER DEFINITIES.....	12
4 WORKSHOPS	14
4.1 Kick-off Taaie Dijken - 28 juni	14
4.2 Definiëren Taaie Dijken - 26 oktober	15
4.3 Definiëren Klimaatrobuust - 26 oktober	17
5 SYNTHESE VAN DE VERZAMELDE INFORMATIE EN OPVATTINGEN.....	19
5.1 Klimaatrobuust	19
5.2 Een taaie dijk.....	20
5.3 Definitie klimaatrobuuste taaie dijk	22
6 CONCLUSIES.....	24
BIBLIOGRAPHY	25
BIJLAGE A – VERSLAGEN WORKSHOPS.....	28

SAMENVATTING

Voorliggend rapport beschrijft de zoektocht naar een werkbare definitie en afbakening van klimaatrobuuste en taaie dijken. De aanleiding voor deze studie is de enorme opgave waar Nederlandse waterbeheerders voor staan: voor 2050 moet meer dan 1300 kilometer primaire waterkering worden versterkt. Door de drang om met minimale financiële inspanningen aan de norm te voldoen, worden momenteel veelal 'brosse' dijken ontworpen. Deze bestaan vaak uit een goedkope zandkern met een relatief dunne kleilaag. Om de veiligheid te garanderen worden deze dijken steeds hoger en breder gemaakt, wat in ons dichtbebouwde land leidt tot grote ruimtelijke knelpunten. Bovendien faalt een brosse dijk relatief plotseling; zodra de kleilaag breekt, spoelt het zand snel weg.

Als oplossing wordt het concept van de 'taaie dijk' onderzocht. Uit de workshops met diverse waterschappen en experts blijkt dat de essentie van taaigheid niet uitsluitend in het materiaal (zand, klei of staal) zit, maar ook en vooral in de dijkconstructie met die materialen (zoals het formeren van een massieve kleikern of drempels door damwanden). Dat bepaalt het gedrag van de dijk ná initieel falen. Een taaie dijk kenmerkt zich door een langzaam faalproces en een sterk vertraagde en beperkte bresgroei in zowel breedte als diepte.

Dit trage bezwijkgedrag biedt twee fundamentele voordelen. Ten eerste stroomt er bij een onverhoopte doorbraak veel minder water het achterland in, wat resulteert in een sterke afname van economische schade en het aantal slachtoffers. Ten tweede 'kondigt' de dijk het falen vooraf aan door zichtbare vervormingen, wat noodzakelijke reactietijd oplevert om evacuaties en noodmaatregelen succesvol uit te voeren.

Daarnaast wordt gezocht naar de 'klimaatrobuustheid' van dit concept. Waar een adaptief dijkontwerp uitgaat van stapsgewijze, toekomstige aanpassingen, vereist een robuust ontwerp dat de constructie bestand is tegen extremen en onvoorziene risico's. Klimaatrobuustheid wordt gedefinieerd als de mate waarin de consequenties van het disfunctioneren van de constructie ongevoelig zijn voor onvoorziene klimaatveranderingen gedurende de levensduur.

Deze inzichten komen samen in de uiteindelijke samengestelde definitie: *"Een klimaatrobuuste taaie dijk is een dijk waarvan de opbouw erop is gericht om het doorbraakproces te vertragen en het overstromingsvolume te beperken, en waarvan de gevolgen van overstroming relatief ongevoelig zijn voor onvoorziene klimaatverandering".*

Hoewel het concept van taaie dijken veel voordelen biedt, belicht het rapport ook belangrijke strategische en praktische nuances. Ten eerste beperkt taaigheid zich niet tot de dijk zelf (objectniveau), maar omvat het tevens het systeemniveau, zoals zeer brede terreinen (Westzanerpolder) of achterliggende sluitbare keringen. Daarbij verschilt de uitwerking per watersysteem: zeedijken moeten kortstondige stormpieken weerstaan, terwijl rivierdijken langdurige hoogwaterbelastingen verwerken.

Strategisch vereist dit een afweging tussen adaptief ontwerpen (stapsgewijs, flexibel) en robuust ontwerpen (in één keer bestand tegen extremen voor de lange termijn). Omdat een taaie dijk ontworpen is om gecontroleerd te vervormen, treedt vaker initiële schade op. Deze toekomstige beheer- en herstelkosten moeten integraal worden afgewogen via een 'Whole Life Costing'-benadering.

Daarnaast uiten waterschappen zorgen uit de praktijk, zoals mogelijk hogere aanlegkosten, onvoorspelbaarheid van het faalgedrag, en mogelijke maatschappelijke paniek wanneer een dijk zichtbaar vervormt. Het concept is niet passief: de gewonnen (waarschuwings)tijd bij een traag

bezwijkproces moet nadrukkelijk actief worden benut voor noodmaatregelen om de bresgroei nog verder af te remmen.

Tot slot stelt het rapport een praktisch-beleidsmatige vervolgstap voor. De huidige beoordelingsmethoden (zoals het WBI) rekenen dijken vooral af op de kans op initieel falen en waarden de gevolgbeperking van taai gedrag nog niet expliciet. Omdat het daadwerkelijke overstromingsrisico (kans vermenigvuldigd met gevolg) bij een taaie dijk veel lager ligt, zouden met reductiefactoren op de veiligheidseisen taaie dijken eerder kunnen worden gedgekeurd of met kleinere dimensies worden aangelegd – en dus minder maatschappelijk ruimtebeslag –, met behoud van de vereiste veiligheid. NB. Daarbij moeten ook andere, nieuwe bedreigingen, zoals bijvoorbeeld graverij, op soortgelijke wijze worden gewaardeerd om een zorgvuldige afweging te kunnen maken over dijkconstructie en dimensies.

1 INLEIDING

1.1 Het project

De dijkwerkers in Nederland staan voor de grootste dijkversterkingsopgave sinds de deltawerken: voor 2050 moet meer dan 1300 kilometer worden versterkt, van de 3500 kilometer primaire waterkeringen (Figuur 1). De verwachting is dat klimaatverandering in de toekomst voor een nog grotere opgave zal leiden. In het project Taaie dijken klimaatrobuust (Den Heijer, Podt, & Rijke, Taaie dijken klimaatrobuust, Projectplan in het kader van RAAK-Publiek 2022, 2022) onderzoeken we de praktische mogelijkheden voor de innovatie 'taaie dijken', die goedkoper en met een kleiner ruimtebeslag aan de veiligheidsnormen voor waterkeringen voldoen (HWBP, 2019).

Het maatschappelijke belang achter de dijk wordt steeds groter door onder andere groeiende stadskernen en uitbreidende industrie. De huidige Nederlandse aanpak, waarbij dijken steeds hoger en breder worden gemaakt om de risico's te beperken, zorgt daarom op termijn voor ruimtelijke problemen (Belzen, Rienstra, & Bouma, 2021). We moeten daarom voor praktische alternatieven gaan zorgen!

Een belangrijk voordeel van taaie dijken is dat door gebruik van alternatieve dijkopbouw en materialen het ruimtebeslag kan worden beperkt. Er is echter nog geen praktische werkwijze om taaigheid van dijken te definiëren, te kwantificeren en economisch te waarderen. Ook is onbekend hoe klimaatrobuust ze zijn over de levensduur. Het doel van dit project is daarom om praktische inzicht te genereren in de ontwerpmogelijkheden en klimaatrobuustheid van taaie dijken, zodat de dijkwerkers aan het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP) een concreet beeld krijgen van deze nieuwe extra dijkversterkings-optie.

Dijkwerkers

Dijkwerkers zijn professionals die betrokken zijn bij dijkversterkingsprojecten langs de kust, rivieren, en grote wateren. Dit project richt zich specifiek op professionals die aan de opdrachtgeverszijde van dergelijke dijkversterkingsprojecten werkzaam zijn, vanwege hun invloed op ontwerpkeuzes. In het bijzonder richt het project zich op projectmanagers, technisch managers, omgevingsmanagers, experts duurzaamheid / ruimtelijke kwaliteit die werkzaam zijn bij waterschappen en Rijks-waterstaat en toeleverende ingenieursbureaus. Ook dijkwerkers aan de opdrachtnemerszijde worden betrokken vanwege hun kennis en ervaring van ontwerp en uitvoering.



Figuur 1: Opgave van in 2022 bekende benodigde dijkversterkingen tot 2050. De dijken aangegeven met de blauwe lijnen zijn in orde. De andere kleurcodes geven de mate van benodigde versterking aan. Hierin is nog geen rekening gehouden met de mogelijkheid om taaie dijken aan te leggen

Het project beantwoordt de volgende hoofdvraag: In hoeverre en op welke wijze kan de lange termijn klimaatrobuustheid van dijken worden vergroot door middel van taaie dijken? Daartoe wordt eerst de klimaatrobuustheid in onze huidige dijkontwerpen beschouwd. Daarna wordt concrete uitwerking

gegeven aan voorbeeld ontwerpen voor taaie dijken. Met een stresstest worden de huidige en nieuwe ontwerpen beoordeeld op klimaatrobustheid. De synthese van deze onderdelen geeft antwoord op hoofdvraag.

Aan het project nemen 12 partners deel, afkomstig van Rijk en Waterschappen, kennisinstellingen, adviesbureaus en de aannemerij.

1.2 Probleemstelling

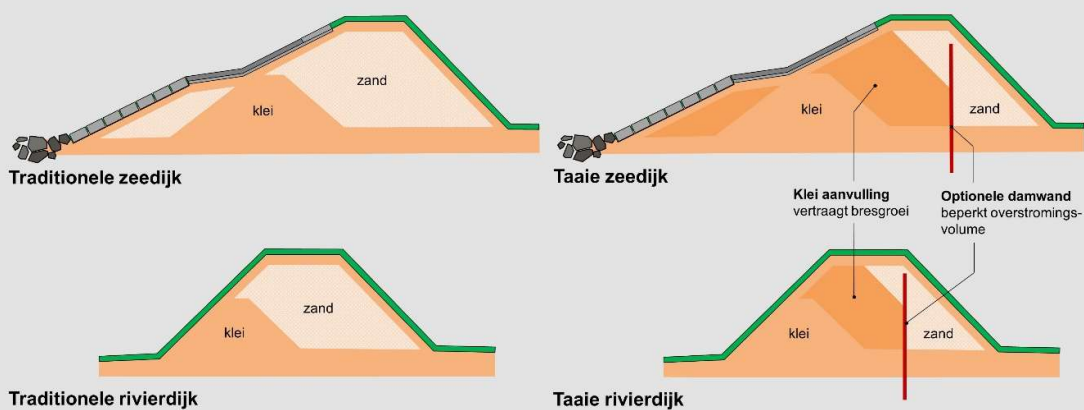
Wanneer overstromingskansen de wettelijke normen overschrijden, worden dijken doorgaans verzwaaard (hoger en breder), of belastingen verlaagd door bv. dijkverlegging (Ruimte voor de Rivier, 2018), omdat daarmee de kans op overstroom wordt gereduceerd. Of de gevolgen worden verkleind door bv. compartimentering (Nationaal Waterplan, 2016-2021; Kok, Jongejan, Nieuwjaar, & Tanczos, 2016).

De veiligheidsnormen zijn uitgedrukt als overstromingskansen voor de dijken langs de kust, rivieren en grote wateren (Waterwet, 2017). Ze zijn tot stand gekomen door te kijken naar de risico's: de kans op overstroom vermenigvuldigd met de gevolgen van overstrooming. In de praktijk van de actuele versterkingsopgave worden dijken ontworpen met het doel om met minimale financiële inspanningen aan de ontwerpnormen te voldoen. Omdat zand goedkoper is dan klei, resulteert dit in een voorkeursoplossing voor 'brosse' dijken met een zandkern of zandaanvulling.

Innovatie: Taaie dijken en dijkzones – goedkoper, duurzamer en minder ruimtebeslag

Het langzame bezwijkgedrag van een taaie dijk kondigt de doorbraak aan waardoor tijdig kan worden geëvacueerd, en daarna stroomt er veel minder water het gebied in omdat de bres niet zo groot wordt. Taaie dijken beperken zo de schade, en vooral het aantal slachtoffers, zodat de risico's met een kleinere dijk al evenveel worden beperkt als met een grotere brosse dijk.

Een veel voorkomend dijkontwerp op basis van een zandkern afgedekt met klei reageert nauwelijks taaie, maar een dijk met een kleikern of slim ontworpen damwand in veel grotere mate, zie Figuur 2. De meest goedkope en duurzame dijk is de bestaande dijk die al taaie is, maar waarvan we de taaieheid nu nog niet meerekenen.



Figuur 2: Voorbeelden van traditionele en taaie dijkconstructies

Sinds een aantal jaar is er bij dijkwerkers steeds meer aandacht gekomen voor een vierde mogelijkheid voor risico-reductie: het zodanig versterken of 'vertaaien' van het dijklichaam en dijkzone zelf, dat de gevolgen van onverhoopte doorbraak relatief gering zijn (Deltares, 2022) (HWBP, 2019) (Den Heijer, 2020) (Den Heijer & Kok, 2022). In Figuur 2 zijn verschillende mogelijkheden voor taaie dijk constructies gegeven.

Taaie bezwijkgedrag is in bestaande literatuur beschreven als 'het langzame faalproces van een dijk, en een relatief langzame of dieptebeperkte groei van de bres, beide leidend tot geringere bres afmetingen en het verminderen van de gevolgen van overstromingen' (Den Heijer & Kok, 2022).

Toepassen in de praktijk wordt nog bemoeilijkt omdat in de bestaande beoordelingsmethoden voor de veiligheid, wordt nog niet expliciet rekening gehouden met het verminderen van de gevolgen van falen van de waterkering door taaie dijkgedrag. Dijken, waarvan verwacht wordt dat ze taaie gedrag vertonen, worden momenteel nog op dezelfde normen beoordeeld dan brossen.

In dit rapport worden definities van taaie dijken en klimaatrobustheid ontwikkeld. Immers, als taaieheid en klimaatrobustheid van dijken expliciet kunnen worden uitgedrukt, kunnen verschillende ontwerpen objectief met elkaar worden vergeleken.

1.3 Aanpak en leeswijzer

Voorliggende rapportage is tot stand gekomen na het doorlopen en van de volgende stappen en analyse van de daarin verzamelde informatie en opvattingen:

- De literatuurstudie die reeds is uitgevoerd bij het opstellen van het plan van aanpak;
- een open discussie tijdens de kick off meeting van het project op 28 juni 2023, aan de hand van het bewust zoeken naar de nadelen van taaie dijken en het maken van brossen dijken
- De resultaten van een rondgang langs de waterschaps partners van het project met de vraag om voorbeelden van brossen en taaie dijken
- Een gerichte discussie tijdens de eerste workshop op 26 oktober 2023 na een mentimetersessie met open en gesloten vragen, en een presentatie van de voorbeelden van de waterschappen

Voorliggend rapport is deliverable D1.1 van het project en is zelfstandig leesbaar. In Hoofdstuk 2 is het kader van de veiligheidsdenken en asset management gegeven. Hoofdstuk 3 geeft de voorbeelden die de waterschappen hebben toegeleverd met bij elk een korte motivatie waarom het juist taaie of brossen wordt geacht door het aanleverende waterschap. Hoofdstuk 4 geeft een samenvattend overzicht van de resultaten van de workshops. Hoofdstuk 5 geeft de synthese van alle informatie, hoofdstuk 6 de conclusies.

2 KADER

2.1 Ontwikkeling veiligheidsdenken

Het risico-concept is een belangrijke bouwsteen voor het veiligheids-ontwerp en -management van (onder andere) infrastructuur. Risico wordt vaak gedefinieerd als de kans op een ongewenste gebeurtenis vermenigvuldigd met de gevolgen ervan (Jonkman et al., 2016). Beperken en beheersen van het risico is van oudsher de basis geweest voor onze veiligheidsmaatregelen tegen overstromen. Concrete voorbeelden daarvan uit het verdere verleden zijn: wonen op hoger gelegen gronden en terpen (gevolgen beperken), of het verhogen van de dijken tot 1 m boven de hoogst bekende waterstand (kans op doorbraak beperken).

Na de Deltaramp 1953 is er, mede op advies van de 1^e Deltacommissie (Deltacommissie, 1960), een meer wetenschappelijke benadering ontwikkeld om de risico's te beperken. Overstromingsrisico's werden gedefinieerd als het product van de overstromingskans en het overstromingsgevolg. Een volledige risicobenadering was toen echter nog een brug te ver. Op basis van een econometrische benadering voor West-Nederland werd een optimale eis aan de kans op overstromen voorgesteld (van Dantzig, 1956). Aan de hand daarvan werden voor alle gebieden veiligheidsnormen vastgesteld voor een veilig te keren hoogwaterstand 'mede gelet op overige het waterkerend vermogen bepalende factoren'.

Werkgroep 10 van de Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (de voorloper van het huidige Expertise Netwerk Waterveiligheid, ENW) adviseerde in 1979 om de veiligheidseisen aan de waterkeringen op een meer volledige risico benadering te baseren, waarin ook de verschillende faalmechanismen van waterkeringen zouden worden betrokken die de sterkte bepalen, alsmede de gevolgen voor de verschillende beschermde gebieden (Calle et al., 1985).

Achtereenvolgens werden daarna onder de vlag van de TAW het concept ontwikkeld (Calle et al., 1985), en een zg. Marsroute opgezet (TAW, 1996) om die te implementeren. Er werden case studies uitgevoerd (TAW, 1996 & 2000) om de dimensies die zouden volgen uit de risico aanpak te vergelijken met die gebaseerd op de tot dan toe gebruikte veiligheidsaanpak. De idee was om, als tussenstap, de normen gebaseerd op de risico aanpak zo af te regelen dat de benodigde dimensies van de dijken ongeveer gelijk zouden zijn aan die op basis van de normen van na de Deltaramp. De eindstap van de Marsroute was een volledige risico benadering, waarbij de normen van na de Deltaramp geheel zouden zijn losgelaten.

Vanaf de Deltaramp in 1953 zijn veel zeedijken versterkt. Nieuwe dijken voor landaanwinning werden alleen nog rond de Flevopolders aangelegd. De hoogwaters in de rivieren in 1993 en 1995 leidden tot dijkverhoging in het rivierengebied (Deltaplan Grote Rivieren, 1995) en tot het besef in dat er ruimte aan de rivieren moest worden gegeven. Op verschillende plaatsen in het rivieren gebied werden in dat kader dijkerugleggingen uitgevoerd (Ruimte voor de Rivier, 2018).

De steeds alarmerender voorspellingen van de gevolgen van klimaatverandering van het International Panel for Climate Change IPCC (IPCC, 2007; KNMI, 2006) leidden in 2008 tot de instelling van de commissie Veerman, ook wel de 2^e Deltacommissie genoemd, die adviseerde over duurzame bescherming tegen hoogwater. De commissie adviseerde onder andere om de normen vast te stellen in de vorm van een maximaal toelaatbare overstromingskans van dijken, die bepaald wordt op basis van

overstromingsrisico's (Deltacommissie, 2008). Deze normen zijn in 2017 in de Waterwet vastgelegd (Waterwet, 2017), gebaseerd op geschatte overstromingsrisico's in 2050.¹

De nieuwe norm op basis van maximaal toelaatbare overstromingskansen leidde een ontwikkeling in van het beschouwen van het gehele faalpad, in plaats van alleen het initiële faalmechanisme. Een faalpad is de keten van opeenvolgende gebeurtenissen van initieel falen (bv. Afschuiving door macro instabiliteit) tot daadwerkelijke doorbraak van een dijk. Een kwalitatieve beschrijving van deze ketens voor alle faalmechanismen wordt ook wel 'Het verhaal van de dijk' genoemd.

2.2 Praktisch veiligheidskader

Het veiligheidsdenken ontwikkelde zich hand in hand met de praktische mogelijkheden om belastingen, sterkte en gevolgen te kunnen bepalen, en om een beheersbaar systeem op te zetten om de veiligheid te waarborgen.

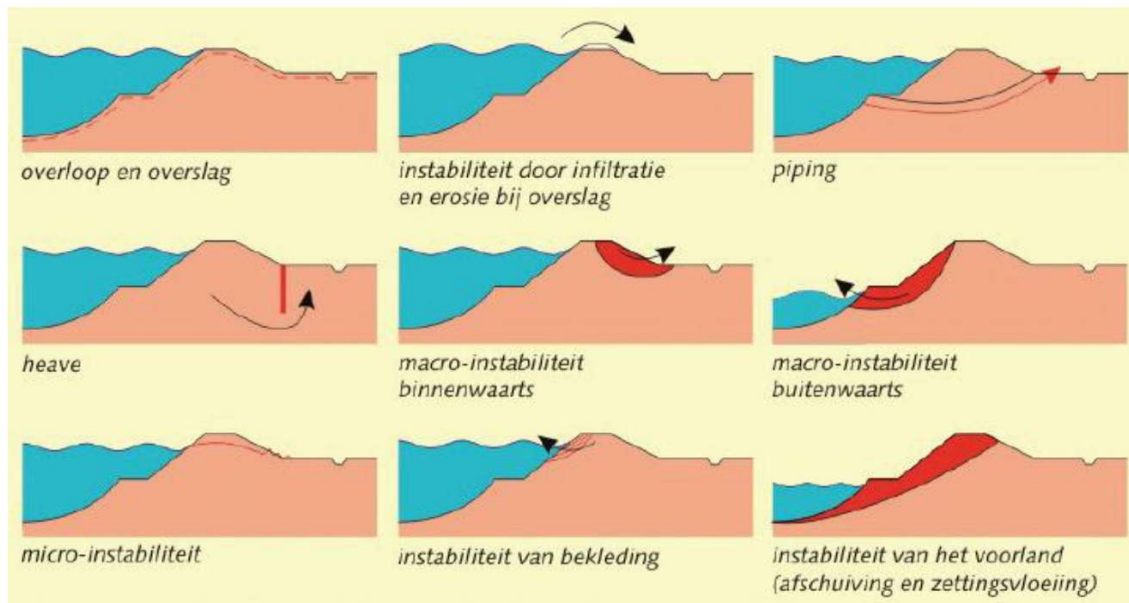
De gevolgen van overstroming komen alleen bij de normstelling aan bod, zowel bij de eerste normen zoals voorgesteld door de 1^e Deltacommissie als bij de recente normen die zijn vastgesteld in 2017. Dat is praktisch beheerbaar omdat een waterkeringbeheerder dan maatregelen kan nemen binnen de eigen invloedssfeer (aan de waterkeringen) om te voldoen aan de norm, uitgedrukt als een toelaatbare kans op overschrijden (eerst) en overstromen (heden). Het nadeel is echter tweeledig:

- De gevolgen veranderen in de loop van de tijd door economisch en demografische ontwikkelingen, zodat de norm met regelmaat moet worden aangepast.
- De beperking van de gevolgen is geen doel meer van de waterkering beheerder, wat het van oudsher wel altijd is geweest (bouwen van kleidijken op gevaarlijke plaatsen)

Voor de belastingen werden voorheen rekenwaarden afgeleid die de zg. maatgevende hydraulische belastingen op de dijken representeren. Deze Hydraulische Randvoorwaarden (HR), waterstanden en golven voor de waterkeringen, werden in 1996 voor het eerst vastgesteld, na een uitvoerige inventarisatie van de ontwerpwaarden, en in de jaren daarna geactualiseerd en aangevuld op basis van probabilistische modellen (Geerse, Slomp, & Waal, 2011; Den Heijer, Vos, Diermanse, Groeneweg, & Tönis, 2008). Onder de huidige normering worden ze gerepresenteerd met HYDRA-NL, dat afhankelijk van locatie en faalmechanisme de representatieve belastingen bepaald.

Voor het bepalen van de aanwezige weerstand tegen het optreden van een faalmechanisme werden rekenregels ontwikkeld zodat de dijken de hydraulische belastingen veilig konden keren, het Voorschrift Toetsen op Veiligheid (VTV, 2006), later hernoemd als het Wettelijk Beoordelings Instrumentarium (WBI, 2017). Dit instrumentarium bevat voor alle initiële faalmechanismen beoordelingsschema's en rekenprocedures. In Figuur 3 is een overzicht van de belangrijkste faalmechanismen gegeven. De samenstelling van de beoordeling voor alle faalmechanismen leidt tot een oordeel over de waterkering. Het Wettelijk Beoordelingskader 2023 (Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2023) biedt ook de mogelijkheid om een faalpad na initieel falen te beoordelen. Voor het ontwerpen van dijken wordt in essentie dezelfde kennis van de fysische processen gebruikt, met aangepaste veiligheidsfactoren omdat het niet om de actuele situatie gaat maar om een onzekere toekomstige situatie.

¹ N.B. Dat betekent dat de overstromingsrisico's toch zouden kunnen blijven toenemen, ook als alle waterkeringen aan de norm voldoen: bijvoorbeeld door klimaatverandering, of verandering van te beschermen economische waarden of demografie. Daarmee is de laatste stap van de Marsroute, een volledige risico benadering, niet operationeel gemaakt.



Figuur 3: Overzicht van faalmechanismen in dijklichamen (VTV, 2006)

2.3 Assetmanagement van waterkeringen

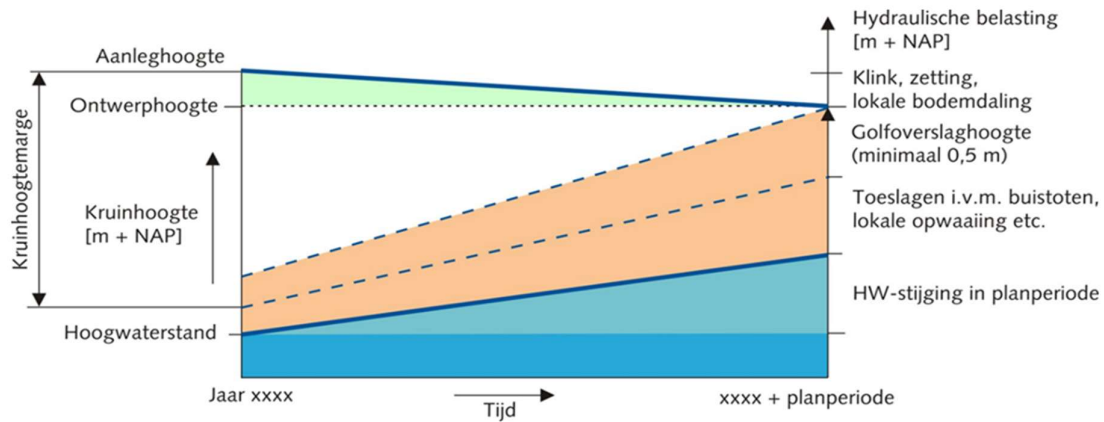
Assetmanagement in de publieke infrastructuur is in (den Heijer, 2020) gedefinieerd als ‘Systematische en gecoördineerde activiteiten waarmee een organisatie optimaal haar areaal aan infrastructuur zo beheert, dat de functie in stand blijft, ook bij veranderende omstandigheden’.

Afwegingen voor investeringskosten voor infrastructurele projecten worden in Nederland meer en meer gedaan volgens een life cycle cost (LCC) benadering waarin naast de aanleg ook naar andere directe operationele kosten gedurende de levensduur worden betrokken. Vanuit het in standhouden van de functie moet deze afweging worden uitgebreid naar een integrale life cycle benadering waarin naast LCC ook life cycle performance en life cycle risk wordt beschouwd (Tigchelaar, et al., 2021; Fuchs, Keuning, Mante, & Bakker, 2014).

De belangrijkste performance (prestatie) voor waterkeringen is juist om het risico op overstromen te beperken. De normen voor waterveiligheid zijn daarom afgeleid op basis van zowel investeringen als risico's (Kind, 2014). In (Den Heijer & Kok, 2022) is deze afweging verder uitgebreid op basis van Whole Life Costing (Boussabaine & Kirkham, 2004), waarin naast de directe kosten gerelateerd aan de waterkering, ook naar de indirecte kosten en opbrengsten wordt gekeken, zoals de risico's van falen en het landgebruik op en achter de waterkering.

Een whole life benadering is nodig als er omstandigheden in de loop van de levensduur van de infrastructuur veranderen. Dat is bij waterkeringen zeker het geval: zowel de belastingen (klimaatverandering), de sterkte (zetting en zinking, ander gebruik), als de gevolgen (economische ontwikkeling, demografie) veranderen in de loop van de tijd.

Een verhoging van de waterkering wordt bepaald door de afmetingen voor een stabiel grondlichaam om de belastingen aan het einde van de planperiode te weerstaan. Daar mag nog extra hoogte bovenop gerekend worden vanwege bodemdaling en bij veengronden ook de inklinking door lage grondwaterstanden (droogte, bemaling), zie Figuur 4.



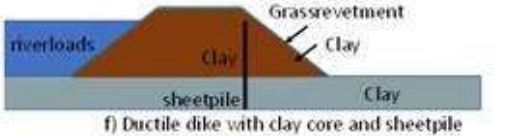
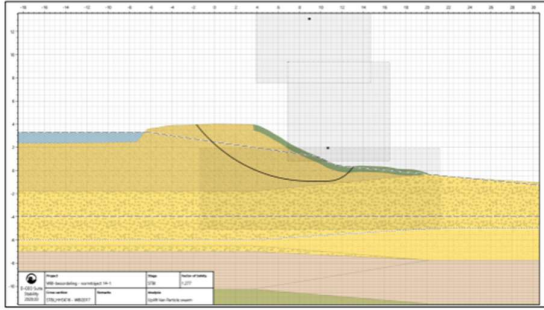
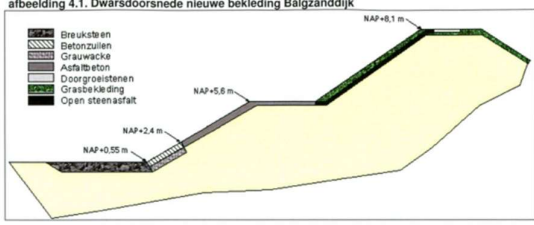

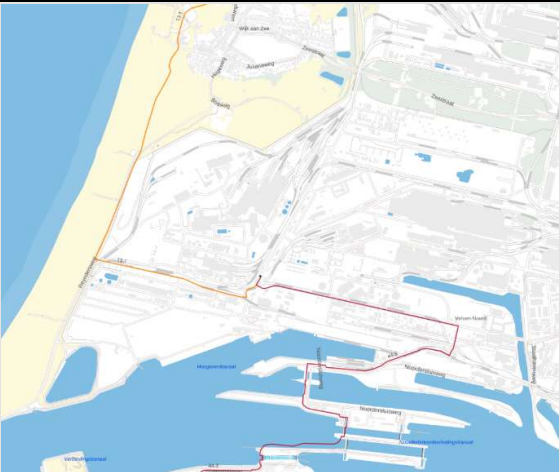
Figuur 4: Voor het verhogen wordt gerekend met waterhoogte, kruinhoogte en aanleghoogte. Gebaseerd op (Leidraad Rivieren, 2007)

Specifiek voor taaie dijken is van belang, dat de dijken tijdens de oneindige levensduur meermaals zodanig worden belast dat ze vervormen, maar niet breken. De herstelkosten daarvoor moeten een goede plek in de afweging krijgen. Dat geldt ook voor verouderingsmechanismen zoals het veranderen van klei-eigenschappen gedurende de levensduur.

3 VOORBEELDEN GEBRUIKT BIJ DE BRAINSTORMS OVER DEFINITIES

Onderstaand worden de verschillende door de waterschappen aangeleverde voorbeelden van brossen en taai dijken aangegeven, samen met een korte toelichting:

Voorbeeld en toelichting	
<p>Pleijdijk (Rijn en IJssel) Aangeleverd als taai dijk vanwege het vrij robuuste kleilichaam aan de buitenzijde. Heeft een mixed in place midwand die bescherming moet bieden tegen piping. De midwand wordt redelijk taai geacht.</p>	<p>Figuur 2.2 Doorsnede van de Pleijdijk</p>
<p>Liudgersdijk (Rijn en IJssel) Als brossen dijk aangeleverd. Gebouwd op een zandige ondergrond met dunne kleilagen van 1,5m. Met zijn zandlichaam met kleiafdekking is dit een traditioneel dijklichaam. Bij een bres is de dijk snel weg. Aangelegd tussen eind '50 en begin '60 en daarna niet meer versterkt. De Liudgersdijk is momenteel in versterking. Hij moet ten minste 70 tot 80 cm omhoog, en waarschijnlijk komt er een berm. Een hele dikke kleilaag aanbrengen is geen optie omdat de dijk dan niet meer kan draineren.</p>	
<p>Traject 47-1 (Rijn en IJssel) Aangeleverd als taai traject omdat hier over het algemeen massieve kleidijken liggen</p>	<p>Scenario 4 Klein g/utak Onderkant deklaag op NAP +0,5 m deklaag siltige klei</p>
<p>Wolferen-Sprok (Rivierenland) Aangeleverd als taai traject. Kleidijk op zand. Op dit traject zijn brossen zanddijken in de minderheid. De kleidijken hadden een grote zandflens aan de binnenzijde. Die zijn er bij dit project uitgehaald en vervangen met klei i.v.m. overslagbestendigheid.</p>	<p>Sectie 6a STBU T600 NEN8707_fr karakteristiek kruin</p> <p>S.F. = 0.92</p>

<p>Uitdam (Hollands Noorderkwartier) Aangeleverd als taaie dijk. Een massieve kleidijk met damwand maakt deze dijk flink taaie.</p>	 <p>f) Ductile dike with clay core and sheetpile</p>
<p>Traject 14-1 (Schieland & Krimpenerwaard) Aangeleverd als taaie traject. Een kleidijk met sporadische plekje zand op -10 tot -15m. Hoofdzakelijk een kleikern ingepakt met klei.</p>	 <p>Figuur 2-8 - normcirkel voor dijkvak STBI_HHSK16 bij signaleringswaarde (SF = 1,27)</p>
<p>Balgzanddijk (Hollands Noorderkwartier) Aangeleverd als taaie zeedijk. De dijk is breed en van zand. De taaigheid zit waarschijnlijk in de dikte van de bekleding en is vooral golf- en stormgerelateerd, niet sec hoogwatergerelateerd. Stabiliteit en piping faalmechanismen speelt bij zeedijken minder.</p>	<p>afbeelding 4.1. Dwarsdoorsnede nieuwe bekleding Balgzanddijk</p> 
<p>Westzanerpolder (Hollands Noorderkwartier) Aangedragen als taaie dijk. Het is feitelijk hoge grond van voornamelijk zand, maar door zijn breedte en massa is een doorbraak evenals piping zeer onwaarschijnlijk.</p>	
<p>Wijk aan Zee (het Tata Steel terrein) geldt hetzelfde voor. Hier loopt de kering over het terrein en is er dus een groot voorland,</p>	

4 WORKSHOPS

Op partnerbijeenkomsten op 28 juni en 26 oktober 2023 zijn twee workshops over taaie dijken georganiseerd. Op 26 oktober 2023 is ook een deel van de workshop besteed aan klimaatrobustheid. Onderstaand worden de bevindingen en gedachten per workshop samengevat. De verslagen zijn bijgevoegd in Bijlage A.

4.1 Kick-off Taaie Dijken - 28 juni

Om een idee te krijgen van de initiële beelden van de partners in het project bij 'taaie dijken' werden in een groepsonderzoek aan iedere deelnemer twee vragen voorgelegd:

- Waarom zijn taaie dijken geen goed idee?
- Hoe maken we brosse dijken?

De antwoorden zijn vervolgens geclusterd in thema's, zie onderstaand overzicht.

Waarom zijn taaie dijken geen goed idee?	Hoe maken we brosse dijken?
<p>Kosten</p> <ul style="list-style-type: none"> - Duurder door hoge eisen aan materiaal - Duurder door hoge uitvoeringskosten - Elk traject vraagt om een unieke benadering. Is daar capaciteit voor? - Taaie dijken zijn geen goed idee, want als aannemer verdien ik dan minder - Geen geld voor Duitse aanpak <p>Faalmechanismen</p> <ul style="list-style-type: none"> - Uitdrogende werking net als taaitaal in een trommel <p>Onzeker en onbekend</p> <ul style="list-style-type: none"> - Taaigheid gewenst voor alle faalmechanismen? - Taaigheid zorgt voor een onzekerheid zonder onderbouwning - In hoeverre kunnen we langzame bresgroei aantoonbaar maken? Vraagt om nieuwe berekeningen - Hoe omgaan met de periode na (langzame) bres? - Gedragsonvoorspelbaarheid. Moelijk om mee te rekenen en daar evacuatieplannen aan te binden - Dijken zijn al ingewikkeld, hiermee wordt het ingewikkelder <p>Tijdens crisis</p> <ul style="list-style-type: none"> - Onbeheersbaar tijdens kritieke omstandigheden (3x) - Evacuatietijd moet een plek krijgen in proces <p>Duurzaamheid</p> <ul style="list-style-type: none"> - Materiaal komt van ver - Tegengesteld aan gebiedseigen grond (2x) - In lijn met gebiedseigen grond (2x) - Taaigheid in volume kost meer en is minder duurzaam <p>Juridisch</p>	<p>Constructie</p> <ul style="list-style-type: none"> - Zandkern - Kern van perspex - Constructieve elementen (L-wand, beton) die wegschuiven - Dijken van één constructieve materiaalsoort (behalve klei) - Steile dijktaluds - Smalle dijk, smalle kruin - Zanddijken en uitgedroogde veendijken zonder erosiebestendige laag - Afgraven van binnenberm <p>Faalmechanismen</p> <ul style="list-style-type: none"> - Faalmechanismen die snel gebeuren - Oppervlakte erosie <p>Doorbraakproces</p> <ul style="list-style-type: none"> - Dijken bouwen die na doorbraak direct bezwijken - Een 'Bros' chocoladereep breekt altijd op een andere plek door, in tegenstelling tot een 'Twix' - Instabiele flood walls in New Orleans <p>Optimalisatie</p> <ul style="list-style-type: none"> - Te ver optimaliseren, zowel technisch als maatschappelijk

- Complexere verantwoordelijkheden in beheer
- Weet de bewoner dat de dijk deels mag afschuiven? Een bres in de dijk leidt tot paniecreacties, volgens hen is het een brosse dijk
- Met krappe ontwerpen bestaat de kans dat je later terug moet komen in de ruimte

Imago

- Negatieve beeldvorming: Lekdijk vs. Taaie Waaldijk
- Leidt tot discussie over wateroverlast en overstroming, willen we die wel? Leidt vervolgens tot discussie over financiering en dus discussie over de norm
- Ander gedachtepatroon verandert publieke opinie
- Wat is het verschil tussen een taaie dijk en een overslagbestendige dijk?

Uit de brainstormsessie komen de volgende aandachtspunten naar voren:

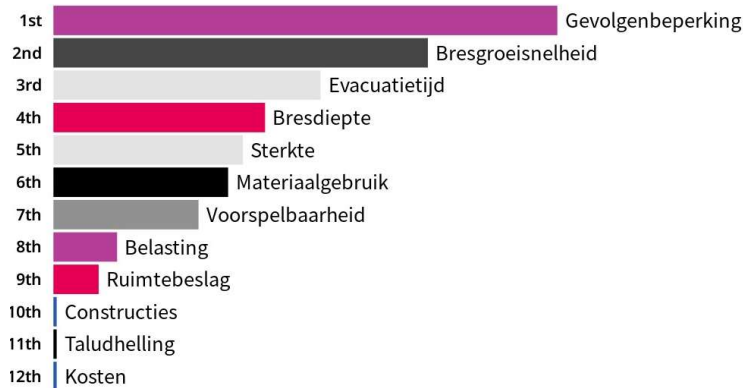
- Er is een sterke behoefte voor een gedeelde definitie van taaieheid in dijken.
- Er is overeenstemming dat een taaie dijk per definitie niet eerder bezwijkt dan een brosse dijk.
- Een taaie dijk blijft een overstroombare dijk, maar het is een dijk waar je niet achter verdrinkt.
- Gegeven dat beiden tegelijk bezwijken, moet de (reactie)tijdswinst van een taaie dijk bekend zijn. Daar zit de crux.
- Wat doet een taaie dijk bij halfhoog water? Wanneer wil je taaieheid benutten en wanneer niet? Dit heeft ook relatie tot het onderhoud van de taaie dijk.
- Een veel voorkomend dijkontwerp op basis van een zandkern afgedekt met klei reageert nauwelijks taaie, maar een dijk met een kleikern of slim ontworpen damwand in veel grotere mate.
- De meest goedkope en duurzame dijk is de bestaande dijk die al taaie is, maar waarvan we de taaieheid nu nog niet meerekenen.
- Bij Schieland en de Krimpenerwaard worden door verandering in beoordelingsregels een aantal dijken afgekeurd met daarin nieuwe damwanden. Mocht nadere analyse uitwijzen dat deze waterkeringen toch voldoende veiligheid bieden, dan zou zo'n situatie wellicht kunnen worden benoemd als een brosse proces.

4.2 Definiëren Taaie Dijken - 26 oktober

Het doel van de tweede workshop was om tot een gedeelde definitie van taaieheid in dijken te komen. Allereerst werd het concept taaieheid gedefinieerd door de belangrijkste bouwstenen van taaieheid te identificeren aan de hand van een Mentimeter. Vervolgens werden de acht door de waterschappen aangeleverde voorbeelden uit hoofdstuk 3 bediscussieerd.

De bouwstenen van taaieheid in dijken (Mentimeter)

Om tot een definitie van klimaatrobuustheid te komen werden de partners via een Mentimeter met twaalf vooraf gedefinieerde bouwstenen van taaieheid gevraagd de drie belangrijkste te selecteren (**Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.**). Gevolgenbeperking, bresgroeisnelheid en evacuatietijd worden gezien als belangrijkste bouwstenen. Opvallend is dat dit bouwstenen zijn die niet zozeer met de omvang en opbouw van de kering te maken hebben, maar met het tijdsaspect tijdens initieel falen.



Figuur 5: Mentimetersessie: Wat zijn de belangrijkste bouwstenen van taaieid in dijken?

Vervolgens werden de aangeleverde voorbeelden van zeven taaie dijken en één brossse dijk bediscussieerd, resulterend in onderstaande discussiepunten:

- **Waterkerend terrein:** Enkele waterschappen geven aan dat zij hoge gronden in beheer hebben, vaak gepaard met industrieterrein zoals de Westzanerpolder (Figuur 6). Er is overeenstemming dat een dergelijk terrein zeer taaie is, waarin taaieid wordt behaald door de omvang van de kering. Waterschap Rijn en IJssel beheert een dergelijk “waterkerend” industrieterrein met een zeer brede zandlaag met damwand. Desondanks het waterkerend vermogen moest er onder de bebouwing van het industrieterrein een kleinschalig dijklichaam van klei worden aangebracht. Mogelijk vanwege juridische redenen zodat het wettelijk beschouwd wordt als een waterkering. Er is discussie of dergelijke terreinen wel beschouwd kunnen worden als dijken. Als breedte een indicator is van taaieid, dan zijn volgens die logica duinen ook taaie.
- **Taaie systeem:** Als de Hollandse IJsselkering (HHSK) sluit in geval van een bres in een achtergelegen dijk, kan slechts een beperkte hoeveelheid water in het gebied stromen vanwege een ‘lege’ Hollandse IJssel. De discussie is of we zo’n situatie zouden kunnen beschouwen als een taaie systeem.
- **Bestand tegen alle faalmechanismen:** Het merendeel van de zeven voorbeelden hebben geen piping-beschermende maatregelen. Het discussiepunt is of dijken pas volledig taaie zijn als ze tegen alle initiële faalmechanismen beschermd zijn.



Figuur 6: Waterkerend industrieterrein in de Westzanerpolder.

- **Taaigheid aan rivier & zee:** Het concept van taaigheid is voor rivier- en zeedijken is in principe gelijk, maar de methode om taaigheid te bereiken verschilt mogelijk. Dit heeft te maken met het verschil tussen taaigheid tegen langdurige belasting of piekbelasting, respectievelijk een rivierdijk tijdens hoogwater en een zeedijk tijdens storm.
- **Initieel falen & volledig falen:** Taaigheid begint effectief pas een rol te spelen na initieel falen. De stap daarvoor is initiële schade. Tussen initiële schade en volledig falen ligt reactietijd die nu nog niet wordt benut bij het ontwerp.
- **Beloning van taaigheid:** Als we dat wel zouden doen dan zou het effect van taaigheid een reductie op de benodigde dijkdimensies kunnen zijn. NB dit zou gezien kunnen worden als de 'beloning' voor het boven normatief beperken van gevolgen.
- **HWBP:** Is het mogelijk om de druk op de hoogwaterbeschermingsopgave te verminderen door meer taaigheid te creëren?

De discussie werd afgesloten met een zevental stellingen uit Tabel 1: Stellingen over taaigheid a.d.h.v. de zeven aangeleverde voorbeelden. Tabel 1.

Tabel 1: Stellingen over taaigheid a.d.h.v. de zeven aangeleverde voorbeelden.

Stelling	Ja	Nee
Is zand zowel bros als taaï?	7	3
Zijn zandmeevoerende wellen een teken van brosheid?	0	11
Is hoge grond nog wel een waterkering?	10	1
Zegt de beoordeling iets over taaigheid?	4	7
Zijn constructies nodig voor taaigheid?	0	11
Betekent taaigheid hetzelfde voor een rivierdijk als een zeedijk?	8	3

4.3 Definiëren Klimaatrobuust - 26 oktober

Het thema klimaatrobuust is onafscheidelijk verbonden met klimaatverandering. De workshop start daarom met een blik op de 2023 KNMI klimaatscenario's voor Nederland. Dit zijn de wereldwijde klimaatvoorspellingen van het IPCC vertaald naar de Nederlandse situatie. Het KNMI heeft op basis van de laatste voorspellingen een viertal klimaatscenario's voor Nederland gedefinieerd:

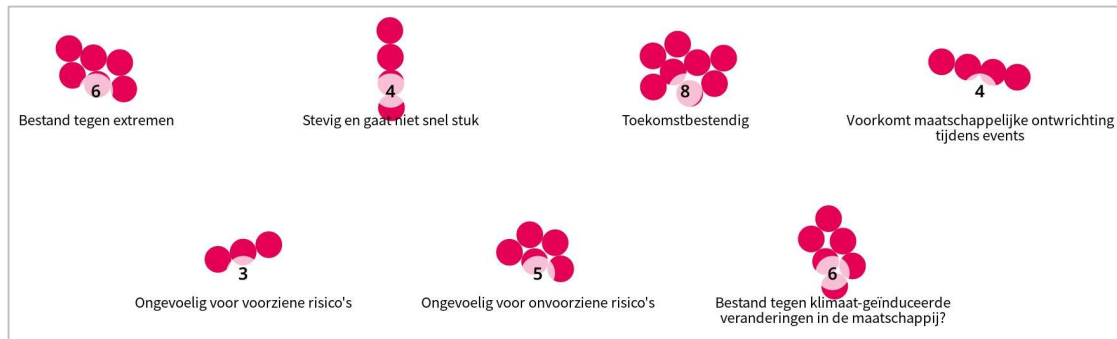
1. Hoge uitstoot met verdroging, Hd
2. Hoge uitstoot met vernatting, Hn
3. Lage uitstoot met verdroging, Ld
4. Lage uitstoot met vernatting, Ln

Als het klimaatakkoord van Parijs wordt nageleefd beland Nederland in de lage uitstoot scenario's. Deze lage scenario's is de minimaal te verwachten klimaatverandering. In alle scenario's stijgen de zeespiegel en temperatuur hoe dan ook door, met drogere zomers en nattere winters als gevolg. Er kan geen waarschijnlijkheid aan individuele klimaatscenario's worden toegekend. Het is daarom nog onzeker of Nederland in een droog of nat scenario terecht komt.

Definiëren klimaatrobuustheid

Om tot een gedeelde definitie van klimaatrobuustheid te komen werden de partners via een Mentimeter met zeven vooraf gedefinieerde bouwstenen van klimaatrobuustheid gevraagd de drie belangrijkste te selecteren (Figuur 7). Toekomstbestendig wordt aangemerkt als belangrijkste bouwsteen van

klimaatrobustheid. Bestandheid tegen extremen, zowel klimatologisch als maatschappelijk, spannen samen plek twee. Ongevoeligheid voor onvoorziene risico's wordt ook aangemerkt als belangrijke bouwsteen. Zijn tegenhanger, ongevoeligheid voor voorziene risico's, scoort het laagste.



Figuur 7: Mentimetersessie: Wat zijn de belangrijkste bouwstenen van klimaatrobustheid?

Met deze basis wordt discussie over de definitie van klimaatrobustheid gevoerd, resulterend in onderstaande discussiepunten:

- **Adaptief vs. robuust:** adaptief betekend een zo beperkt mogelijke ingreep bij aanvang en daarna vaker monitoren en ingrijpen. Dit is goedkoper in aanleg en opties blijven open, maar vaker terugkomen brengt kosten en overlast met zich mee. Robuust betekend meer initieel werk (in één keer goed) voor een langere periode. In aanleg is dit duurder, maar dit bespaar je omdat minder of kleinere toekomstige ingrepen nodig zijn.
- **Ongevoelig zijn voor onvoorziene risico's** is essentieel voor robuustheid. Op het voorziene kan namelijk worden gerekend. Terugkijkend naar de Watersnoodramp (en dit geldt voor veel rampen), de onvoorziene risico's en bijbehorende kettingreacties leidden tot de ramp.
- **Klimaten van nu en de toekomst:** Klimaatrobust heeft niet alleen met weer en water te maken, maar kan ook gaan over andere soorten klimaten. Denk bijvoorbeeld aan het maatschappelijke klimaat. Bij klimaatverandering gaat het vaak over de verre toekomst, maar het moet ook gaan over het klimaat van vandaag.
- **Robuuste reactietijd:** Een ontbrekende bouwsteen voor klimaatrobustheid is de tijd voor reactie. Creëer robuustheid door tijd om de gevolgen te beperken. De discussie beweegt zich richting taaie dijken.

5 SYNTHESE VAN DE VERZAMELDE INFORMATIE EN OPVATTINGEN

De verzamelde informatie die is gegeven in de hoofdstukken 3 en 4 wordt in het volgende eerst uitgebreid met vigerende gedachten over klimaatrobustheid (par. 5.1) en verder uitgewerkt voor wat betreft eigenschappen en beheer van taaie dijken (par. 5.2). Daarna wordt een bondige definitie gekozen voor een klimaatrobuste taaie dijk (par. 5.3).

5.1 Klimaatrobust

Robuustheid en sterkte worden veel door elkaar gebruikt. Definities van sterkte zijn:

- Statische sterkte: het vermogen om gedurende een beperkte periode een kracht te weerstaan. (<https://www.studeersnel.nl/nl/document/radboud-universiteit-nijmegen/functie-en-functieherstel-2/mechanische-eigenschappen/11200861>)
- Sterkte: wordt bepaald door de maximum toelaatbare belastbaarheid van materiaal voordat er blijvende vervorming optreedt. (<https://richtlijnbevestigingenondersteuning.nl/>)

Definities van robuustheid zijn:

- In hoeverre is een systeem of een applicatie gevoelig voor storingen van buitenaf. (Aquo.nl)
- De mate waarin een component of systeem correct kan functioneren tijdens ongeldige invoer of onder belastende omgevingsfactoren (kennisconsult.nl)

Belangrijk is om de beide begrippen van elkaar te onderscheiden: een component kan erg sterk zijn voor omstandigheden waar het voor ontworpen is, maar niet robuust tegen andere omstandigheden.

De Europese commissie definieert robuustheid als 'the ability of a structure to withstand events like fire, explosions, impact or the consequences of human error, without being damaged to an extent disproportionate to the original cause' (European Committee for Standardization, 2006). Een maat die in de literatuur wel gebruikt wordt voor 'structural robustness' om deze definitie handen en voeten te geven is de verhouding tussen directe gevolgen van een situatie en het totaal van directe en indirecte gevolgen (Baker et al., 2008). Ook daarbij gaat het niet om de sterkte als zodanig, maar over de weerstand tegen (disproportionele) indirecte gevolgen.

Omdat ook in de context van waterveiligheid beide termen door elkaar worden gebruikt worden ze voor het project expliciet gedefinieerd. In de workshop (zie Bijlage A, verslag workshop 1 van 26 oktober 2023) kozen de deelnemers in de Mentimetersessie voor klimaatrobustheid de volgende termen als belangrijke bouwstenen voor de definitie:

- Toekomstbestendig - robuustheid tegen toekomstig klimaat van (o.a. hydraulische) belastingen
- Bestand tegen klimaat extremen (zowel de hydraulische belastingen als droogte)
- Bestand tegen andere veranderingen zoals gebruik en beheer
- Ongevoelig voor onvoorziene (klimaat) risico's

NB. De eerste twee bullets kunnen ook al een rol spelen in een ontwerp, en zouden daarmee onderdeel uitmaken van de sterkte. Worden beide opgevat als 'bestand de *onzekerheid* in toekomstig klimaat/klimaat extremen', dan past het beter bij de eerder gegeven definities van robuustheid.

We beschouwen een constructie dus als klimaatrobust als zij gedurende de levensduur relatief ongevoelig functioneert voor veranderingen in extreme ontwerpbelastingen of andere klimaateffecten, en tegen onvoorziene belastingen en effecten. De levensduur wordt niet genoemd in relatie tot robuustheid. Verondersteld wordt dat het als logisch wordt gezien dat we onze blik richten op de levensduur, de periode waarin een constructie zijn functie moet vervullen.

Het geheel kort samengevat: de klimaatrobuustheid kan worden gedefinieerd als de mate waarin de consequenties van disfunctioneren van een constructie tijdens de levensduur ongevoelig is voor onvoorziene klimaatverandering.

Voorbeeld: een dijk is ontworpen voor het weerstaan van de voorziene hydraulische belastingen in de levensduur van 50 jaar. Halverwege de levensduur wordt bekend dat de waterstanden 20cm meer stijgen in de levensduur dan waar tijdens het ontwerp op was gerekend. Situatie 1: de risico's nemen sterk toe: de dijk wordt direct (ruim voor het einde van de levensduur) afgekeurd en moet integraal worden verbeterd. Deze dijk is niet klimaatrobuust. Situatie 2: de risico's nemen toe, maar met verbetering op onderdelen kunnen deze worden gemitigeerd: de dijk wordt weliswaar afgekeurd maar de verbeterinspanning is beperkt. Deze dijk is enigszins klimaatrobuust. Situatie 3: de risico's nemen nauwelijks toe: de dijk wordt niet afgekeurd. Deze dijk is klimaatrobuust.

In de workshop (Bijlage A) zijn ook een aantal aspecten als belangrijk benoemd, die samen te vatten zijn als: voorbereid en flexibel zijn, tijd tussen begin van falen en volledig falen, gevolgen beperken of voorkomen, en adaptiviteit. Deze hebben betrekking op de constructie zelf en komen in de volgende paragraaf aan bod.

5.2 Een taaie dijk

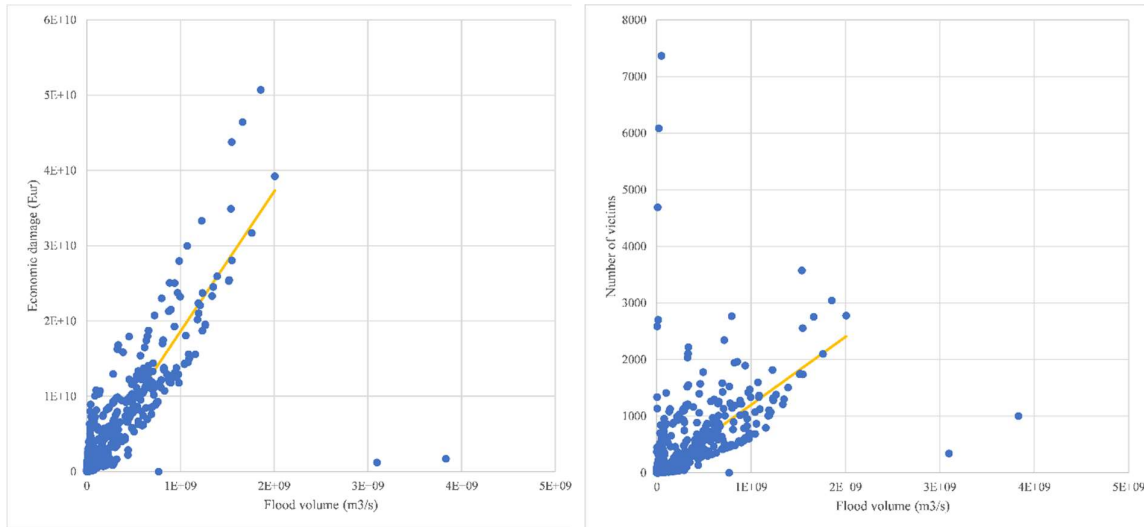
Een dijk is een door mensen aangelegde waterkering die het achterliggende land beschermt tegen schade als gevolg van hoogwater en overstromingen. De gevolgen van een overstroming zijn relatief groot in een vlak land zoals Nederland waarvan het overgrote deel van de geïnvesteerde waarde onder het niveau ligt van het buitenwater.

Taaie bezwijkgedrag van een dijk is in bestaande literatuur beschreven als 'het langzame faalproces van een dijk, en een relatief langzame of dieptebeperkte groei van de bres, beide leidend tot geringere bres afmetingen en het verminderen van de gevolgen van overstromingen' (Den Heijer & Kok, 2022).

De deelnemers in de workshops en de Mentimetersessie (Figuur 7) duiden taaigheid als onafhankelijk van de belasting, het belastingsysteem (zee of rivier) en van initieel falen. Dat duidt erop dat taaigheid geassocieerd wordt met het proces na initieel falen. Materiaal is weliswaar van belang, zand wordt als brosser gezien dan klei, maar een constructie is geen noodzakelijk onderdeel om een dijk taaie te maken. Gevolgbeperking en tijd voor herstel, noodmaatregelen en/of evacuatie zijn belangrijke aspecten. Hieronder een compilatie van literatuur en de belangrijkste opmerkingen bij de genoemde aspecten:

Een taaie dijk beperkt de gevolgen:

- In de LIWO database zijn bresuitgangspunten genomen die passen bij brosse breuken (relatief plotseling optredende en grote bressen, tijdens de hoogste waterstanden).
- De gevolgen van een onverhoopte doorbraak van een taaie dijk zijn relatief geringer, als gevolg van de kleinere volumes die het achterliggende gebied instromen. Die geringere instroom wordt veroorzaakt doordat de bres pas relatief laat tijdens een event optreedt, en/of in de diepte en breedte wordt beperkt, en/of niet snel in breedte groeit. Figuur 8 laat zien dat zowel de schade als het aantal slachtoffers een duidelijke relatie heeft met dit instromend volume.



Figuur 8: Schade en slachtoffers afhankelijk van instromend volume, voor alle rivieroverstromingen in de LIWO database (Den Heijer & Kok, 2022).

Een brossse breuk ontstaat relatief plotseling. Een taaie dijk biedt tijd voor actie:

- De dijk waarschuwt voordat een bres ontstaat. Een taaie breuk kan bijvoorbeeld worden aangekondigd door vervormingen, verkleuringen, etc.
- Een belangrijk voordeel van taaie dijken is dat er door een vertraagde en geringere instroom bij dijkdoorbraak, meer tijd is voor reparatie/herstel, noodmaatregelen en evacuatie.

Daardoor zullen er bovenop het gevolgbeperkende effect van het geringere overstromingsvolume in Figuur 8 nóg minder slachtoffers vallen, omdat de evacuatiepercentages hoger kunnen zijn.

Materiaal

Materiaal en opbouw worden vooral gezien als de manier om deze voordelen van een dijk te realiseren. Klei erodeert minder snel dan zand. Dat lijkt niet alleen een logisch ervaringsgegeven, maar het wordt ook onderbouwd uit proeven en literatuur: denk aan de terugschrijdende erosie na initiële schade aan het binnentalud door golfoverslag, en aan de snelheid van bresgroei na een doorbraak (Den Heijer & Kok, 2022), (Verheij, 2003). De opbouw van de dijk draagt dus bij aan de weerstand tegen snelle erosie van de dijk. Op dezelfde manier zou grondverbetering kunnen bijdragen, door klonteren of plakken. Keerzijde van dergelijke methoden is dat er ook andere klimaatextremen een rol kunnen spelen, bijvoorbeeld temperatuur en droogte, die in andere jaargetijden dan het storm of hoogwaterseizoen, tot scheuren en minikanalen kan leiden.

Veiligheid en risicoreductie

Onze veiligheidsnormen zijn gebaseerd op het voldoende beperken van de risico's, zowel qua schade als slachtoffers. Daarbij is uitgegaan van de overstromingsgegevens in de LIWO database. Door de beperking van de gevolgen kunnen de risico's met een taaie dijk al evenveel worden beperkt als met een (qua omvang grotere) brossse dijk.

Een taaie dijk verliest zijn functie per definitie niet eerder dan een brossse dijk met dezelfde afmetingen, maar een taaie dijk blijft een dijk die ook kan breken. Echter, het is een dijk waarachter je door het trage doorbraak- en bresgroeiproces minder snel verdrinkt. In ultimo zou dat impliceren dat op locaties waar de huidige veiligheidsnormen op het criterium voor het Lokaal Individueel Risico (LIR, slachtoffers) zijn

gebaseerd, het economisch optimale risico een betere basis is voor de veiligheidseis als daar een taaie dijk zou worden gemaakt.

Als de veiligheidseis (overstromingskans) gebaseerd wordt op het economisch optimale risico, dat weer mede wordt bepaald door de verwachte schade, ontstaat daarmee de bijzondere situatie dat de constructie van de dijk mede invloed heeft op de hoogte van de veiligheidseis. Uitgaande van de functie van de dijk (beperken van de risico's) zouden voor taaiere dijken dus aangepaste (lagere) veiligheidsniveaus kunnen worden gebruikt.

Beheer en Ontwerp

Als er gedurende de levensduur, die bij dijken vaak vele malen langer is dan die van een constructie, meerdere malen een begin van schade en vervorming optreedt, dan is herstel nodig. Dit herstel kan van dezelfde orde van grootte zijn als een dijkversterking. Uitgaande van de ervaring dat dijken elke 30-50 jaar wel worden verbeterd, en dat een dijkschade-event dit wat vervroegd, heeft dit op de levensduurkosten niet zoveel invloed. Mogelijk belangrijker is dat als er in de opbouw van een taaiere variant elementen worden opgenomen die snel kunnen verouderen, moeten die in voldoende functionele toestand worden gehouden in het dagelijks beheer.

Om maximaal te profiteren van taaigheid wordt het in het ontwerp zo opgenomen dat de initiële faalmechanismen die snel tot grote bressen zouden kunnen leiden, substantieel worden vertraagd.

Onder de conditie dat verschillende varianten de beoogde risico reductie kunnen bieden, moeten materiaalkosten, ruimtebeslag, beheer, risico's en aanpasbaarheid/toekomstbestendigheid moeten voor verschillende ontwerpen worden afgewogen om te kijken of een taaiere variant maatschappelijke voordelen heeft ten opzichte van een brosser ontwerp. In feite is dit qua proces niet anders dan bij een conventionele verkenning. Het belangrijkste verschil is dat taaiere dijken een reductie op de veiligheidseis zouden kunnen krijgen, als rendement van het beperken van de gevolgen.

5.3 Definitie klimaatrobuuste taaie dijk

Een dijk voldoet in Nederland aan de eisen als de kans op falen kleiner is dan de wettelijke norm, uitgedrukt in de kans op overstroming. De dijk is dan sterk genoeg. De achterliggende basis van de wettelijke norm is een risicoberekening. De basis daarvan zijn kansen en gevolgen. De gevolgen zijn bepaald met overstromingsberekeningen waarbij veelal brossse dijkbreuken zijn aangenomen. Een dijk voldoet aan de achterliggende basis van de wettelijke norm als de risico's kleiner zijn dan de risico's die gebruikt zijn voor het bepalen van die norm. Het gebruik van taaigheid in het ontwerp wordt niet geëist of gesuggereerd in de wettelijke voorschriften (BOI) omdat de verdere beperking van de gevolgen geen effect heeft op het al dan niet voldoen aan de norm.

Het lijkt praktisch om de mate van taaigheid te verbinden aan het risico wat als basis heeft gediend voor de norm. De mate van taaigheid is de mate waarin de risico's kleiner zijn dan die waarop de norm is gebaseerd. De mate van taaigheid kan dan worden uitgedrukt als: de verhouding tussen het risico behorend bij een dijkontwerp en het risico behorend bij de norm. Als we ervan uitgaan dat de norm is afgeleid voor een brossse dijk, geeft deze maat een waarde van precies 1 voor een dijk die resulteert in het risico dat als uitgangspunt diende voor bij de normering, en een waarde >1 voor een taaiere dijk.

Bij gelijke afmetingen beperkt een taaie dijk de risico's meer dan een brossse. Als zo'n brossse dijk al aan de in Nederland geldende wettelijke norm op de overstromingskans voldoet, dan geeft zo'n taaie dijk een boven normatieve bescherming. Een taaie dijk biedt dus de normatieve risico reductie met

geringere afmetingen dan een brossie. Praktische uitwerking zou ertoe kunnen leiden dat de taaigheid wordt verwerkt in reductiefactoren in het BOI.

Voor het opstellen van de definitie van een klimaatrobuuste taaie dijk laten we de specifiek Nederlandse situatie met een norm op de overstromingskans buiten beschouwing. Bovenstaande synthese van zowel klimaatrobuustheid als taaigheid leiden tot de volgende kernwaarden voor een klimaatrobuuste taaie dijk:

- Een taaie dijk heeft als belangrijke eigenschap het langzame faalproces, en een relatief langzame en/of beperkte groei van de bres in breedte en diepte, beide leidend tot beperkte gevolgen van overstromingen. Het vertraagde proces geeft extra tijd voor noodmaatregelen (en daarmee voor het verder beperken van de kans op overstroming of verdere vertraging) en voor evacuatie (en daarmee voor het nog verder beperken van slachtoffers).
- De gevolgen van disfunctioneren van de dijk tijdens de levensduur zijn slechts beperkt gevoelig voor onvoorziene klimaatverandering.

Daarmee wordt een klimaatrobuuste taaie dijk in dit project gedefinieerd als:

Een dijk waarvan de opbouw erop gericht is om het doorbraakproces te vertragen en het overstromingsvolume te beperken, en waarvan de gevolgen van overstroming relatief ongevoelig zijn voor onvoorziene klimaatverandering.

6 CONCLUSIES

De huidige wettelijke veiligheidsnormen zijn veelal gebaseerd op risico's van 'brosse' dijkbreuken, waarbij een snelle doorbraak met grote instroom plaatsvindt. Om de meerwaarde van alternatieven goed te kunnen wegen, komt het rapport tot een heldere definitie van klimaatrobuuste taaie dijken:

Een klimaatrobuuste taaie dijk is een dijk waarvan de opbouw erop is gericht om het doorbraakproces te vertragen en het overstromingsvolume te beperken, en waarvan de overstromingsgevolgen relatief ongevoelig zijn voor onvoorziene klimaatverandering.

De belangrijkste eigenschappen zijn:

- **Tijdswinst en gevolgbepanking:** Een taaie dijk kenmerkt zich door een trage faalpaden en trage en beperkte bresgroei in breedte en diepte. Een taaie dijk (in tegenstelling tot een brosse dijk) 'kondigt' een naderende breuk 'aan' door zichtbare vervormingen of verkleuringen. Dit is essentieel voor de reactietijd. Dit vermindert niet alleen de hoeveelheid instromend water, maar levert vooral cruciale tijd op voor noodmaatregelen en evacuaties, wat maatschappelijke gevolgen sterk beperkt.
- **Bestand tegen extremen:** De dijk is zodanig ontworpen dat de gevolgen bij onverhoopt falen gedurende de levensduur relatief ongevoelig zijn voor onvoorziene klimaatveranderingen. De specifieke fysieke eigenschappen om taaigheid te bereiken zijn het gebruik van een massieve kleikern of damwanden in plaats van zand. De kanttekening is dat kleidijken kwetsbaar kunnen zijn voor klimaatextremen, zoals scheurvorming door langdurige droogte.
- **Omdat een taaie dijk is ontworpen om extreme belastingen op te vangen door gecontroleerd te vervormen zonder direct te breken, zal er vaker sprake zijn van initiële schade. Dit brengt onderhouds- en herstelkosten (life-cycle costs) met zich mee in de beheerfase.**

Een taaie dijk levert bij gelijke afmetingen aanzienlijk meer veiligheid op dan een brosse dijk. Taaigheid kan meetbaar worden gemaakt, bijvoorbeeld als de verhouding tussen de overstromingsrisico's behorende bij verschillende dijk constructies, zoals dat van een brosse dijk en een taaie dijk.

BIBLIOGRAPHY

- Belzen, J. v., Rienstra, G., & Bouma, T. (2021). *Dubbele dijken als robuuste waterkerende landschappen voor een welvarende Zuidwestelijke Delta*. NIOZ Royal Netherlands Institute for Sea Research. doi:<https://doi.org/10.25850/nioz/7b.b.kb>
- Boussabaine, H., & Kirkham, R. (2004, Januari). Whole Life-Cycle Costing: Risk and Risk Responses. doi:10.1002/9780470759172
- Deltacommissie. (2008). *Samen werken met water. Een land dat leeft, bouwt aan zijn toekomst*. Deltacommissie. Opgehaald van <https://zoek.officielebekendmakingen.nl/kst-31710-1-b1.pdf>
- Deltaplan Grote Rivieren. (1995). *Deltaplan Grote Rivieren*. Den Haag: Ministerie van Verkeer en Waterstaat & Rijkswaterstaat. Opgehaald van https://puc.overheid.nl/rijkswaterstaat/doc/PUC_80414_31/
- Deltares. (2022, Januari 25). *Waterveiligheidslandschappen: gebiedsgerichte ontwikkeling met meerwaarde*. Opgehaald van Deltares: <https://www.deltares.nl/nl/issues/gebiedsgerichte-oplossing-met-meerwaarde-voor-maatschappij-en-veiligheid/>
- Den Heijer, F. (2020). Adaptive flood defence management with ductile dikes. *Seventh International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering - innovation, theories and practice*. Shanghai, China: CRC Press and Taylor & Francis Group.
- Den Heijer, F., & Kok, M. (2022). Assessment of ductile dike behavior as a novel flood risk reduction measure. *Journal of Risk Analysis*, 16. doi:10.1111/risa.14071
- Den Heijer, F., Podt, M., & Rijke, J. (2022). *Taaie dijken klimaatrobust, Projectplan in het kader van RAAK-Publiek 2022*. HAN University of Applied Science.
- Den Heijer, F., Vos, R., Diermanse, F., Groeneweg, J., & Tönis, R. (2008). *Achtergrondrapport HR 2006 voor de Zee en Estuaria*. Rijkswaterstaat.
- Fuchs, G. H., Keuning, I., Mante, B. R., & Bakker, J. D. (2014). A business case of the estimated profit of Life Cycle Management principles. (H. Furuta, D. M. Frangopol, & M. Akiyama, Red.) *Life-Cycle of Structural Systems: Design, Assessment, Maintenance and Management*.
- Geerse, C., Slomp, R., & Waal, J. d. (2011). *Hydra-Zoet for the fresh water systems in the Netherlands. Probabilistic model for the assessment of dike heights*. HKV Consultants.
- HWBP. (2019). *Kennis- en innovatieagenda Hoogwaterbeschermingsprogramma*. HWBP. Opgehaald van <https://www.hwbp.nl/documenten/publicaties/2019/11/19/kennis--en-innovatieagenda>
- IPCC. (2007). *Het IPCC-rapport en de betekenis voor Nederland*. De Bilt, Wageningen: PCCC.
- Kind, J. M. (2014). Economically efficient flood protection standards for the Netherland. *Journal of Flood Risk Management*, 7(2), 103-117. doi:10.1111/jfr3.12026
- KNMI. (2006). *Klimaat in de 21e eeuw, 4 scenario's voor Nederland*. De Bilt: KNMI.
- Kok, M., Jongejan, R., Nieuwjaar, M., & Tanczos, I. (2016). *Grondslagen voor hoogwaterbescherming*. Delft: Ministerie van Infrastructuur en Milieu en het Expertise Netwerk Waterveiligheid.
- Leidraad Rivieren. (2007). *Leidraad Rivieren*. Utrecht: Rijkswaterstaat. Opgehaald van https://puc.overheid.nl/rijkswaterstaat/doc/PUC_128125_31/

- Nationaal Waterplan. (2016-2021). *Nationaal Waterplan 2016-2021*. Den Haag: Ministerie van Infrastructuur en Milieu & Ministerie van Economische Zaken.
- Ruimte voor de Rivier. (2018, December 12). *Infographics van alle Ruimte voor de Rivierprojecten : alle projecten uitgelegd in een overzicht*. Opgeroepen op September 21, 2022, van Rijkswaterstaat Rapportendatabank: https://puc.overheid.nl/rijkswaterstaat/doc/PUC_162887_31/
- TAW. (1996). *Veiligheid van waterkeringen : de nieuwe visie volgens het onderzoekprogramma TAW Marsroute*. Delft: Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde.
doi:https://puc.overheid.nl/rijkswaterstaat/doc/PUC_69493_31/1/
- Tigchelaar, J., Zethof, M., Bake, D. d., Weijers, H., Heijn, K., Slot, C., & Broeze, L. (2021). *Toepassing LCC bij ontwerp*. Lelystad: HWBP & HKV.
- Van Dantzig, D. (1956, July). Economic Decision Problems for Flood Prevention. *Econometrics*, 24(3), 276-287. doi:10.2307/1911632
- VTV. (2006). *Voorschrift toetsen op Veiligheid Primaire Waterkeringen (VTV2006)*. Rijkswaterstaat.
- Waterwet. (2017, Januari 1). *Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017*. Opgehaald van Wettenbank Overheid: <https://wetten.overheid.nl/BWBR0039040/2017-01-01>
- WBI. (2017). *Beoordelingsinstrumentarium (WBI2017)*. Opgehaald van Helpdeskwater Rijksoverheid: <https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/waterveiligheid/primaire/beoordelen/beoordelingsinstrumentarium-wbi2017-0/>
- Jonkman, S. N., Steenbergen, R. D. J. M., Morales-Nápoles, O., Vrouwenvelder, A. C. W. M., & Vrijling, J. K. (2016). Probabilistic Design: Risk and Reliability Analysis in Civil Engineering. *Collegedictaat CIE4130*.
- Baker, J. W., Schubert, M., & Faber, M. H. (2008). On the assessment of robustness. *Structural Safety*, 30(3), 253–267. <https://doi.org/10.1016/J.STRUSAFE.2006.11.004>
- Calle, E. O. F., Dillingh, D., Meermans, W., Vrouwenvelder, A. C. W. M., Vrijling, J. K., de Quelerij, L., & Wubs, A. J. (1985). *Probabilistisch ontwerpen van waterkeringen, Interimrapport TAW 10*.
- Deltacommissie. (1960). *Rapport Deltacommissie deel 1 - Eindverslag en interimadviezen*.
- den Heijer, F. (2020). *ROBAMCI-Eindrapport. Risk and Opportunity Based Asset Management for Critical Infrastructures*.
- European Committee for Standardization. (2006). *Actions on structures - Part 1-7: General actions - Accidental actions*.
- Jonkman, S. N., Steenbergen, R. D. J. M., Morales-Nápoles, O., Vrouwenvelder, A. C. W. M., & Vrijling, J. K. (2016). Probabilistic Design: Risk and Reliability Analysis in Civil Engineering. *Collegedictaat CIE4130*.
- Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. (2023). *Regeling van de Minister van Infrastructuur en Waterstaat, van 12 april 2023, nr. IENW/BSK-2023/94660, houdende vaststelling van regels inzake de beoordeling van de veiligheid van primaire waterkeringen (Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2023)*. <https://zoek.officielebekendmakingen.nl/stcrt-2023-11307.html>
- TAW. (2000). *Van overschrijdingskans naar overstromingskans*.

van Dantzig, D. (1956). Economic Decision Problems for Flood Prevention. *Econometrica*, 24(3), 276.

<https://doi.org/10.2307/1911632>

Verheij, H. (2003). *Aanpassen van het bresgroeimodel in HIS-OM*.

BIJLAGE A – VERSLAGEN WORKSHOPS

De verslagen van de workshops zijn op enkele punten bewerkt en/of geanonimiseerd in verband met AVG. De lijst van aanwezigen, actielijsten en operationele opmerkingen zijn verwijderd.

Verslag kick-off – Taaie Dijken Klimaatrobuust

Vergadersoort : Kick-off Taaie Dijken Klimaatrobuust bij het Waterschapshuis
 Datum meeting : 28 juni 2023
 Datum rapportage : 28 juni 2023
 Notulist : Maarten Podt

Agenda

12:30 Inloop en lunch, inclusief kennismakingsronde
 13:15 Vragen/opmerkingen over het contract
 13:20 Brainstorm
 13:50 Presentatie intro Taaie Dijken Klimaatrobuust
 14:15 Discussie over het hele project: doelen, cases, kansen, verwachtingen
 14:50 Korte pauze
 15:05 Brainstorm Workshop 1 (definiëren van taaieheid en klimaatrobuustheid)
 15:50 Afspraken (planning en adviescommissie)
 16:00 Sluiting

Brainstorm Taaie dijken

Waarom zijn taaie dijken geen goed idee?	Hoe maken we brosse dijken?
<p>Kosten</p> <ul style="list-style-type: none"> - Duurder door hoge eisen aan materiaal - Duurder door hoge uitvoeringskosten - Elk traject vraagt om een unieke benadering. Is daar capaciteit voor? - Taaie dijken zijn geen goed idee, want als aannemer verdien ik dan minder - Geen geld voor Duitse aanpak <p>Faalmecanismen</p> <ul style="list-style-type: none"> - Uitdrogende werking net als taaitaaie in een trommel <p>Onzeker en onbekend</p> <ul style="list-style-type: none"> - Taaieheid gewenst voor alle faalmecanismen? - Taaieheid zorgt voor een onzekerheid zonder onderbouwing - In hoeverre kunnen we langzame bresgroei aantoonbaar maken? Vraagt om nieuwe berekeningen - Hoe omgaan met de periode na (langzame) bres? - Gedragsonvoorspelbaarheid. Moeilijk om mee te rekenen en daar evacuatieplannen aan te binden - Dijken zijn al ingewikkeld, hiermee wordt het ingewikkelder 	<p>Constructie</p> <ul style="list-style-type: none"> - Zandkern - Kern van perspex - Constructieve elementen (L-wand, beton) die wegschuiven - Dijken van één constructieve materiaalsoort (behalve klei) - Steile dijktaluds - Smalle dijk, smalle kruin - Zanddijken en uitgedroogde veendijken zonder erosiebestendige laag - Afgraven van binnenberm <p>Faalmecanismen</p> <ul style="list-style-type: none"> - Faalmecanismen die snel gebeuren - Oppervlakte erosie <p>Doorbraakproces</p> <ul style="list-style-type: none"> - Dijken bouwen die na doorbraak direct bezwijken - Een 'Bros' chocoladereep breekt altijd op een andere plek door, in tegenstelling tot een 'Twix' - Instabiele flood walls in New Orleans

Tijdens crisis

- Onbeheersbaar tijdens kritieke omstandigheden (3x)
- Evacuatietijd moet een plek krijgen in proces

Duurzaamheid

- Materiaal komt van ver
- Tegengesteld aan gebiedseigen grond (2x)
- In lijn met gebiedseigen grond (2x)
- Taatheid in volume kost meer en is minder duurzaam

Juridisch

- Complexere verantwoordelijkheden in beheer
- Weet de bewoner dat de dijk deels mag afschuiven? Een bres in de dijk leidt tot paniekreacties, volgens hen is het een brosse dijk
- Met krappe ontwerpen bestaat de kans dat je later terug moet komen in de ruimte

Imago

- Negatieve beeldvorming: Lekdijk vs. Taaie Waaldijk
- Leidt tot discussie over wateroverlast en overstroming, willen we die wel? Leidt vervolgens tot discussie over financiering en dus discussie over de norm
- Ander gedachtepatroon verandert publieke opinie
- Wat is het verschil tussen een taaie dijk en een overslagbestendige dijk?

Optimalisatie

- Te ver optimaliseren, zowel technisch als maatschappelijk

- Uit de brainstormsessie komt de behoefte voor het definiëren van taatheid naar boven. Ideeën:
 - o Een taaie dijk bezwijkt per definitie niet eerder dan een brosse dijk.
 - o Een taaie dijk blijft een overstroombare dijk, maar het is een dijk waar je niet achter verdrinkt.
 - o Gegeven dat beiden tegelijk bezwijken, moeten we weten hoeveel tijd we winnen. Daar zit de crux.
 - o Wat doet een taaie dijk bij halfhoog water? Wanneer wil je taatheid benutten en wanneer niet? Ook in relatie tot onderhoud.
 - o Bij Schieland en de Krimpenerwaard worden door verandering in regels een aantal dijken met nieuwe damwanden afgekeurd. Is de damwandconstructie dan brosser, of is het een brosser proces?
 - o Er zit een businessmodel in het aanscherpen van de faalkans want dit leidt tot financiering van onderzoek. Dit stimuleert aanleg van brossere keringen.

Intro Taaie Dijken Klimaatrobuust

- Onze grote dijkversterkingsopgave neemt toe door klimaatverandering. Hierdoor zijn er nieuwe, alternatieve dijkversterkingsmethoden nodig. In dit project worden taaie dijken gekwantificeerd/gedefinieerd en worden hier ook concrete voorbeelden aan gehangen.

- Studenten van de minor Sustainable River Engineering onderzochten voor Waterschap Rivierenland de overstromingsgevolgen van een brossse zanddijk versus de gevolgen van een taaie kleidijk met damwand. Dit onderzoek laat zien dat de overstromingsgevolgen van een taaie dijk van véél kleinere schaal zijn.
- Een brossse breuk ontstaat plotseling. Een taaie breuk wordt aangekondigd door vervormingen, verkleuringen, etc. Dit geeft reactietijd.
- Beschouw naast tijd voor het evacueren ook tijd voor het repareren.
- De koppeling maken met evacuatie lijkt lastig. Met nauwkeurige voorspellingen van aankomende omstandigheden weten we al of het gebied geëvacueerd moet zijn.
- Reststerkte, hier gedefinieerd als sterkte waar we (nog) niet aan kunnen rekenen, wordt niet meegenomen in huidige modelleringen, terwijl deze wel aanwezig is.
- Ideeën voor het vergroten van cohesie: airbag, zelfplakkende fietsband, bentoniet in dijk.
- Taaie Dijken Klimaatrobuust richt zich in principe op primaire keringen (genoeg werk in 2 jaar tijd), maar het concept is ook toepasbaar op regionale keringen.
- Je wilt dat de dijk waarschuwt voordat die breekt. De waarschuwing geeft andere scenario's.
- Tijd is multidimensionaal. Onderscheid maken in actie, reactie, vervorming, evacuatie, en meer.
- In de kansbepaling voor de normering is alleen het faalmechanisme hoogte meegenomen, in de versterkingskosten van dijkversterkingen zitten ook andere faalmechanismen verstopt.
- Bij Waterschap Rijn en IJssel loopt nu de discussie over 10l/s/m overslag bij de huidige dijken. Met deze overslag raakt het achterland al te vol. Dijken dus niet alleen taaier maar ook hoger.

Projectaanpak

- **Doel:** inzicht genereren in de klimaatrobuustheid van taaie dijken. Klimaatrobuustheid is het 'wat', een effect. Taaie dijken is de 'hoe'.
- **WP1:** markeren actuele aanpak, vergelijken met alternatieven mogelijk maken: wat doen we nu?
- **WP2:** Verkennen hoe taaie gedrag kan worden bereikt. 5 cases uit verschillende gebieden.
- **WP3:** stresstest klimaatrobuustheid

- Een randvoorwaarde die we moeten stellen is dat de versterkingsopgave niet mag toenemen door reststerkte. In andere woorden, de versterkingsopgave mag niet toenemen door taaie dijken.
- Er wordt opgemerkt om de boven- en benedenrivier te onderscheiden. In het oosten van NL zit het risico in de ondergrond, dus de 'Duitse methode' heeft hier geen zin. Dit onderwerp gaat worden behandeld in workshop 1.
- Is deze verkenning kwalitatief of kwantitatief van aard? De ambitie is om kwantitatief te onderbouwen. Een nieuw WBI is een utopie, maar wel willen we zodanig onderbouwen om een goed gevoel van kansrijkheid te krijgen.
- Taaigheid is breed te interpreteren. Taaigheid zit bijvoorbeeld ook in mechanische schuiven in de dijk voor het gecontroleerd inlaten van water in het achterland. Tot hoever mogen we denken? Systeemniveau kijken, of materiaalniveau? Technische kant/juridische kant?
- In het najaar zijn minorstudenten en afstudeerders beschikbaar. Bij voorkeur gaan deze aan de slag bij de organisaties, bijv. TAUW.
- Een aanvullend idee is om junioren van verschillende bureaus eens bij elkaar te zetten op een taaie dijken vraagstuk.
- Studentbegeleiding kost tijd. De partners hebben behoefte aan een planning wanneer en hoeveel studenten beschikbaar zijn.
- Naast praktijkstudenten ook TUD studenten voor het theoretische deel van taaie dijken. Flood Proof Holland bevat mogelijk zinvolle proeven, met name over erosiebestendigheid. Echter, beperkt in omvang en duur dus een uitdaging om daar studentproeven voor te bedenken.

Planning en afspraken

- Er is een openbare projectwebsite (<https://www.han.nl/projecten/2023/taai-dijken-klimaatrobuust/>) met algemene informatie ingericht, en er wordt een gedeelde omgeving voor projectpartners aangemaakt.
- Verspreidt over twee jaar worden acht workshops en een symposium georganiseerd. Het idee is om de acht workshops bij de deelnemende partijen te organiseren: op bezoek bij de cases.
- Ter voorbereiding van workshop 1 wordt aan de partners gevraagd om (ontwerp)rapporten te verzamelen van voorbeelden van taaie en klimaatrobuuste dijken en dijkzones. Denk aan voorbeelden van dijken waar elementen die taaigheid of juist geen taaigheid bieden.
- De deliverables zijn rapportages, een film, wetenschappelijke publicatie en een symposium.
- Er wordt een adviescommissie opgezet die 2 à 3 keer per jaar bij elkaar komt. Het voornemen is om de volgende personen te betrekken:

- Directeur HWBP
 - Directeur waterschap (van WSRL en een niet-deelnemend waterschap, bijv. V&V, WDOD)
 - Topadviseur RWS
 - Directeur Ministerie I&M
 - Directeur Marktpartij / Topsector Water
- Het doel van de adviescommissie is draagvlak creëren zodat kennis in projecten landt. Het projectteam is voor de inhoud.
- Er kan worden overwogen om een technische counterpart (eenmalig) te betrekken om deelvragen en doelstellingen betreffende aantoonbaarheid van taaie dijken te toetsen.
- De partners noemen de volgende organisaties als relevant voor de adviescommissie:
- ENW
 - Raad voor de veiligheid
 - Ambtelijke opdrachtgevers voor projecten
 - ADO, innovatieversneller
 - Unie van Waterschappen
 - Landschapsarchitecten (waterveilige landschappen)
 - Bestaande adviescommissies

Verslag workshop 1 – Taaie Dijken Klimaatrobuust

Vergadersoort : Partnerbijeenkomst voor Workshop 1 bij Aveco de Bondt
Datum meeting : 26 oktober 2023
Datum rapportage : 26 oktober 2023
Notulist : Maarten Podt

Agenda

9:30 Opening
9:45 Intro's klimaatrobuust & discussie
10:45 Korte pauze
10:55 Intro toegeleverde voorbeelden taaie dijken & discussie
11:55 Aanpak taaigheid bestaande dijken, beheerinspanning en risico's
12:15 Afspraken en wvttk
12:30 Sluiting en lunch

Opening

De focus van deze workshop ligt op Werkpakket 1. Dit werkpakket behandelt twee deelvragen:

- D1. Hoe kunnen taaigheid en klimaatrobuustheid van dijken worden uitgedrukt, zodat verschillende ontwerpen objectief kunnen worden vergeleken?
- D2. Welke taaigheid hebben onze huidige dijken, en welke beheerinspanningen, versterkingskosten en risico's aanvaarden we (klaarblijkelijk) bij de wettelijk vastgelegde normen?

En drie taken:

- T1 Ontwikkelen van een praktische werkwijze om taaigheid en klimaatrobuustheid uit te drukken.
- T2 Inventariseren van de taaigheid van huidige dijken en dijkzones.
- T3 Bepalen van benodigde beheerinspanningen, ruimtelijke effecten, risico's en kosten.

Klimaatrobuust

Het KNMI heeft op basis van de laatste IPCC voorspellingen een viertal klimaatscenario's voor Nederland gedefinieerd.

- 5. Hoge uitstoot met verdroging, Hd
 - 6. Hoge uitstoot met vernatting, Hn
 - 7. Lage uitstoot met verdroging, Ld
 - 8. Lage uitstoot met vernatting, Ln
- Als het klimaatakkoord wordt nageleefd beland Nederland in de lage uitstoot scenario's. Laag kan worden beschouwd als de minimaal te verwachten klimaatverandering.
- Er is hoe dan ook zeespiegel- en temperatuurstijging, drogere zomers en nattere winters.

- De wintertemperatuur stijgt flink. In lage scenario's gemiddeld 4 ijsdagen per jaar in 2100. In de hoge scenario's maximaal 1 dag.
- Uitstoot door dooiende permafrost niet volledig meegenomen in de klimaatmodellen.

Discussie:

- In opdracht van het KNMI rekent Rijkswaterstaat nog een midden-scenario door.
- Er kan geen waarschijnlijkheid aan individuele klimaatscenario's worden toegekend. Het is daarom nog onzeker of Nederland in een droog of nat scenario terecht komt.
- Voor de bovenrivieren zijn de neerslag geïnduceerde afvoeren belangrijker dan de zeespiegelstijging. Rijkswaterstaat probeert hier binnen een half jaar duidelijkheid over te geven.

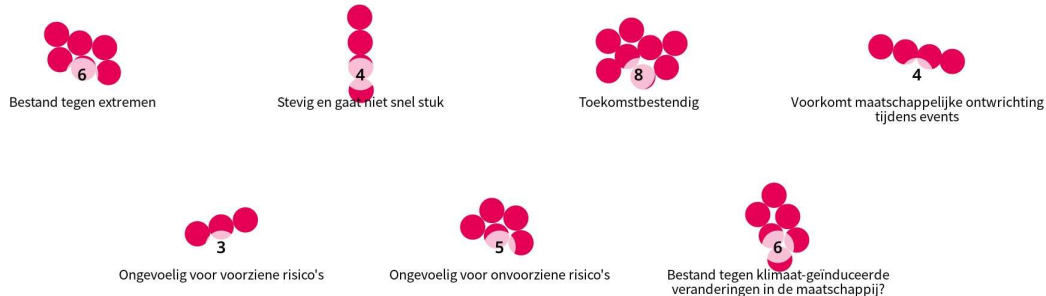
Adaptief versus robuust

Adaptief doe je nu weinig, maar vaker monitoring en ingrijpen. In aanleg goedkoper, maar vaker terugkomen. Makkelijk aanpasbaar, van grond.

Bouwstenen robuust

- Klimaatrobuust heeft niet alleen met weer en water te maken, maar gaat ook over andere soorten klimaten, o.a. maatschappelijk klimaat.
- We hebben het bij klimaatverandering vaak over de verre toekomst, maar het moet ook gaan over het klimaat van vandaag. Daar moet je robuust op zijn.
- Bestand tegen klimaat-geïnduceerde veranderingen in de maatschappij is een moeilijke zin. Zit dit al (deels) in de normering? Discussie over of de norm verandert wanneer de populatie achter de dijk toeneemt. Proces hoeft niet verandert te worden van normering.
- Ongevoeligheid voor onvoorziene risico's is essentieel voor robuustheid. Het voorziene kan je namelijk opsommen. Terugkijken naar de Watersnoodramp, dit onvoorziene risico en bijbehorende kettingreacties waren daar rampzalig.
- Een ontbrekende bouwsteen voor klimaatrobuustheid is de tijd voor reactie. Creëer robuustheid voor tijd om de gevolgen te beperken. De discussie beweegt zich richting taaie dijken.
- Wordt er rekening gehouden met de werkelijk draagbare maatschappelijke kosten? We hebben het vaak over extremen, terwijl ook al bij vrij hoogwater schade kan ontstaan bij taaie dijken. Dat kan behoorlijk oplopen in de kosten, is dat financieel draagbaar?

Wat zijn volgens jou de 3 belangrijkste bouwstenen van klimaatrobustheid?



'Toekomstbestendig' wordt aangemerkt als belangrijkste bouwsteen van klimaatrobustheid in dit lijstje. Bestandheid tegen extremen, zowel klimatologisch als maatschappelijk, spannen samen plek twee. Ongevoeligheid voor onvoorziene risico's wordt ook aangemerkt als belangrijke bouwsteen. Zijn tegenhanger, ongevoeligheid voor voorziene risico's, scoort het laagste.

Welke bouwstenen van klimaatrobustheid miste je?

- Adaptief
- Beperking van gevolgschade bij overstroming
- Acceptabele gevolgschade tijdens beheerfase (beheerkosten acceptabel)
- Voorkomen volledig falen dijk bij initiële schade
- Extreme scenario's doordenken
- Proportionaliteit.
- Reservedijk
- Gebiedsdenken
- Compartimentering
- Ontwerpen op resistente restprofielen
- Wisselwerking met andere gebiedsaspecten
- Waarschuwingstijd voordat bezwijken plaatsvindt
- Effecten van onvoorzien beleid
- Vertraging van de gebeurtenissen bij doorbraak. Taaiheid
- Voorspelbaarheid
- Sociale veiligheid, veiligheidsbeleving en imagoschade van bestuurders bij falen/grote schade in gebruiksfase

Aangeleverde voorbeelden taaie dijken

De waterschappen hebben 7 voorbeelden van taaie dijken en 1 voorbeeld van een brosse dijk gedeeld.

- **Liudgersdijk** is door Rijn en IJssel als brosse dijk aangeleverd. Gebouwd op een zandige ondergrond met dunne kleilagen van 1,5m. Met zijn zandlichaam met kleiafdekking is dit een traditioneel dijklichaam. Bij een bres is de dijk snel weg. Aangelegd tussen eind '50 en begin '60 en daarna niet meer versterkt. De Liudgersdijk is momenteel in versterking. Hij moet tenminste 70 tot 80 cm omhoog, en waarschijnlijk komt er een berm. Een hele dikke kleilaag aanbrengen is geen optie omdat de dijk dan niet meer kan draineren.
- **Pleijdijk** is door Rijn en IJssel aangeleverd als taaie dijk vanwege het vrij robuust kleilichaam aan de buitenzijde. Aangelegd in het jaar 2000 als dijkverlegging door RWS en vervolgens overgedragen aan WRIJ. Heeft een mixed in place midwand die bescherming moet bieden tegen piping. Toch zien we nog steeds veel zandmeevoerende wellen achter de kering. De dijk is meer dan veilig blijkt uit beoordeling, maar gevoelsmatig voelt hij minder veilig. De midwand wordt redelijk taai geacht. Ook is een aanvullende steunberm aangebracht tegen de wellen, maar nog steeds grofweg hetzelfde aantal wellen, alleen een stukje verder. Hoe taai de Pleijdijk is, is nog de vraag. In ieder geval behoorlijk taaier dan het eerste voorbeeld.
- **Traject 47-1** is door Rijn en IJssel aangeleverd als taai traject omdat hier over het algemeen massieve kleidijken liggen. Taaigheid is hier aanwezig in de vorm van kleigebruik.
- **Wolferen-Sprok** is door Rivierenland aangeleverd als taai traject. Zanddijk met kleikap. Op dit traject zijn brosse zanddijken in de minderheid. De kleidijken hadden een grote zandflens aan de binnenzijde. Die zijn er bij dit project uitgehaald en vervangen met klei i.v.m. overslagbestendigheid. Er was angst dat de zandflens bij overslag te verzadigd zou raken. De kleidijken waren dus al redelijk taai, maar nu nog taaier. Op dit traject vaak ook damwanden in de teen en de taluds naar 1:3. Vanuit de taaigheid gedachte was de damwand misschien in de binnenkruin geplaatst. Dit zou het overslagprobleem misschien ook hebben aangepakt.
- **Traject 14-1** is door Schieland en de Krimpenerwaard aangeleverd als taai traject. Een kleidijk (geel is klei) met sporadische plekjes zand op -10 tot -15m. Hoofdzakelijk een kleikern ingepakt met klei. Als de Hollandse IJsselkering/Algerakering sluit en er in geval van bresgroei daarachter een beperkte hoeveelheid water is om in het gebied te stromen (= lege IJssel), dan hebben we het over een taai systeem.
- **Balgzanddijk** is door Hollands Noorderkwartier aangeleverd als taaie zeedijk. De dijk is breed en van zand. De taaigheid zit waarschijnlijk in de dikte van de bekleding en is vooral golf- en stormgerelateerd, niet sec hoogwatergerelateerd. Stabiliteit en piping faalmechanismen speelt niet zo bij zeedijken.
- **Uitdam** is door Hollands Noorderkwartier aangeleverd als taaie dijk. Een massieve kleidijk met damwand maakt deze dijk flink taai. De damwand is geplaatst om vervorming van de dijk met nabij huizen te voorkomen. Voor deze dijk veel varianten zijn doorgerekend, ook varianten met erosie. De damwanden zijn geperforeerd (gebrande gaten) t.b.v. water instandhouding.

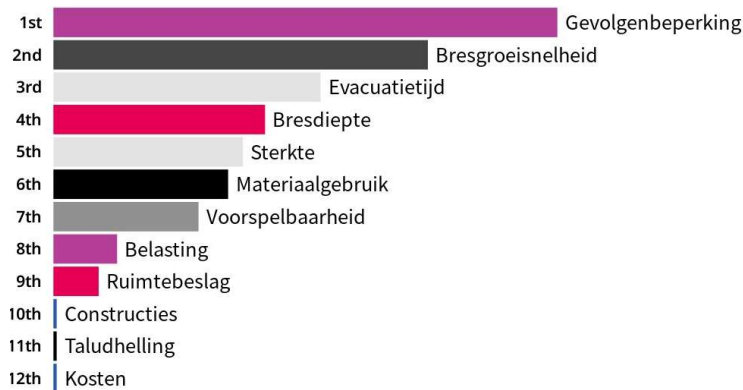
- **Westzanerpolder** is door Hollands Noorderkwartier aangedragen als taaie dijk. Het is feitelijk hoge grond van voornamelijk zand, maar door zijn breedte en massa is een doorbraak evenals piping zeer onwaarschijnlijk. Het is een waterkering, maar geen dijk.

Discussie

- Schieland en de Krimpenerwaard hebben ook proeven gedaan met geperforeerde damwanden in een kleidijk. De waterhuishouding in klei veranderd echt met damwandvariaties, en de damwandlengte en mate van perforatie doen er echt toe blijkt uit berekeningen. De drainerende effecten waren groter dan vooraf gedacht. Een damwand zet je om huizen te besparen, maar zonder perforatie creëer je schade door verdroging.
- Is een hoge brede dijk nog wel een dijk? In ieder geval wel een waterkering. "Dit is toch hartstikke taaï".
- Waterschap Rijn en IJssel beheert een "waterkerend" industrieterrein met een hele brede zandlaag en damwand. Toch moest er onder de bebouwing van het industrieterrein een dijklichaampje van klei komen. Juridische redenen? Leidingen spelen hier ook een rol. Uitspoeling rondom funderingen.
- Het is heel erg taaï omdat het breed is. Zijn duinen dan ook taaï?
- Heb je in zo'n gebied als waterschap nog het mandaat om waterveiligheid te garanderen? Of taak voor bv. Tatasteel?
- Veel van de voorbeelden van taaie dijken geven geen bescherming tegen piping. Taaïheid is toch tegen alle initiële faalmechanismen?
- Zegt beoordeling iets over taaïheid? Soms wel en soms niet. Van alles wat het niet haalt in de beoordeling zul je moeten bekijken hoe taaï het is. Uitsluitcriterium?
- Als we het hebben we het over verticale elementen of over constructies: wat is een constructie? Is het geen gradatie van hard naar zacht/flexibel?

Vraag	Ja	Nee
Is zand zowel bros als taaï?	7	3
Zijn zandmeevoerende wellen een teken van brosheid?	0	11
Is hoge grond nog wel een waterkering?	10	1
Zegt de beoordeling iets over taaïheid?	4	7
Zijn constructies nodig voor taaïheid?	0	11
Betekent taaïheid hetzelfde voor een rivierdijk als een zeedijk?	8	3

Wat zijn volgens jou de 3 belangrijkste bouwstenen van taaïheid?



Welke bouwstenen van taaigheid miste je?

- Circulariteit
- Levensduur
- Grondverbetering
- Andere klimaatextremen, bijv. droogte
- Erosiesnelheid
- Aanpasbaarheid
- Meerlaagsveiligheid
- Tijd van bezwijken
- Eenvoudige inzet van noodmaatregelen
- Toekomstbestendig
- Reparatiemogelijkheden bij calamiteit
- Als je vanuit een gebied denkt: andere aspecten en functies zoals biodiversiteit
- Mogelijkheid van ingrijpen met noodmaatregelen
- Afhankelijkheden tussen stenen
- Eenvoudige en snelle herstelmogelijkheden

Assenstelsel

- Welke assen zou de groep gebruiken voor een 2D assenstelsel van taaigheid?
 - o Tijd vanaf eerste verschijning van iets tot doorbraak. Na een bres is tijd ook relevant.
 - o Mate van wateroverlast
 - o Tijd na initieel faalmechanisme
 - o Gevolgen
- Als je hem aan gevolgen hangt moeten we één situatie beschouwen. De situatie is zeer bepalend en verschillend voor bovenrivier en kust.
- Kan je de impact verminderen van de hoogwaterbeschermingsopgave door meer taaigheid te creëren? Elk van die dijken hoort normaal gesproken te voldoen.
- Gevolgen van de Deltadijk hangen ontzettend van de situatie af. Een langdurige belasting is prima, maar een piekbelasting wordt tricky.

- Met een dijk in duin, gebeurt nooit wat. Heel veel tijd en heel weinig gevolgen. Je hebt eigenlijk geen falen, waardoor die niet op een assensysteem met 'gevolgen' past.
- Tijd na initiële schade is een mogelijke als as. Denk bv. aan een duin waar afkalving mag. Dat is geen falen maar schade wat bij het systeem hoort.
- Er zit verschil in de taaigheid van zeedijken en rivierdijken. Het concept van taaigheid is in principe gelijk, maar de methode om taaigheid te bereiken is heel verschillend. Dit is niet in één veld te plaatsen (veld = 2D assensysteem zoals behandeld in de workshop).

Aanpak cases en landelijke aanpak

- In de rest van de studie zetten we een aantal cases centraal. Traditionele ontwerpen versus taaie ontwerpen op bepaalde locaties bij waterschappen. Daarmee willen we een stap maken om taaigheid rekenkundig te maken. Een idee is om een dijk te onderzoeken die nog niet op de aanpak van het HWBP staat.
- Daarnaast moeten we van locatiecasses naar een landelijk beeld toe: hoe taaai zijn onze dijken nu?
- Definieer het effect van taaigheid op de benodigde dijkdimensies als de beloning voor het beperken van gevolgen.
- Onderzoek de taaigheid in de functie van de dijk versus taaigheid in de functie van het systeem. Interessante locaties voor onderzoek zijn plekken waar overloop eerder plaats vindt dan falen.
- Erosie en bresgroei + inflow zeggen iets over taaigheid.
- Taaigheid begint effectief pas een rol te spelen na initieel falen. Een stapje eerder is initiële schade. Tussen initiële schade en volledig falen ligt tijd waar we nu nog niks mee doen.
- Tijdens het definiëren van taaigheid en klimaatrobustheid werden noodmaatregelen meerdere keren genoemd. In de tijd tussen initiële schade en volledig falen kunnen we ingrijpen en dat vertraagd het proces en heeft dus verband met de totale inflow. Neem dit mee in de taaigheid/risicoberekeningen.
- Voor het inschatten van een landelijk beeld van huidige taaigheid zijn we op zoek naar alle geotechnische profielen die gebruikt zijn in het WBI.
- Workshop 2: 'Praktisch toepasbare definities dijktaaigheid en klimaatrobustheid' staat gepland op 10 januari 2024.

OPEN UP
NEW HAN_ UNIVERSITY
HORIZONS. OF APPLIED SCIENCES