

TAAIE DIJKEN KLIMAATROBUUST – HANDREIKING ONTWERP EN UITVOERING



Rapport: 2026.178
MSc Adna Steinmann
Ing. Hans Uit het Broek
Dr. ir. Frank den Heijer
15 juni 2026
Subsidie RAAK-Publiek 2022, RAAK.PUB11.041

INHOUDSOPGAVE

SAMENVATTING	4
1 INLEIDING	6
1.1 Het project Taaie dijken klimaatrobuust.....	6
1.2 Probleemstelling – geen rekenmethode en nauwelijks voorbeeld cases	7
1.3 Doelstelling en aanpak op hoofdlijnen	8
1.4 Leeswijzer	8
2 FYSIEKE EIGENSCHAPPEN EN TRADITIONELE DIJKVERSTERKING	9
2.1 De fysieke opgave en faalmechanismen	9
2.2 Materiaaleigenschappen en logistieke complexiteit.....	10
2.3 Uitvoeringslogistiek en materieelinzet.....	11
2.4 Uitvoeringsmethoden: In den droge versus in den natte	12
2.5 Karakteristieken en gedrag van traditionele dijkversterking	13
3 ONTWERP EN UITVOERING VAN DIJKEN.....	16
3.1 Ontwerp van dijken	16
3.2 Uitvoering van dijken.....	18
4 METHODOLOGISCHE AANPAK.....	21
4.1 Ontwikkeling van taaie dijkconcepten (horizontale as).....	21
4.2 Ontwikkeling van een evaluatiekader (verticale as).....	21
4.3 Tabel maken en invullen	22
4.4 Afleiding van hoofdlijnen en vertaling naar praktische aandachtspunten.....	23
5 TAAIE DIJKCONCEPTEN.....	24
5.1 Varianten aan het buitentalud	25
5.2 Varianten aan het binnentalud/binnenzijde.....	27
5.3 Varianten op dijklichaamniveau	30
5.4 Constructieve varianten	33
6 HET RAMSHEËP-RAAMWERK	36
7 HOOFDLIJNEN VOOR ONTWERP EN UITVOERING VAN TAAIE DIJKEN	37
7.1 Aspecten waarin taaie dijken vaak gunstiger scoren dan traditionele versterking	37
7.2 Aspecten die een andere benadering vereisen dan traditioneel	39
7.3 Andere aspecten die extra aandacht vragen	42
8 AANDACHTSPUNTEN VOOR ONTWERP EN UITVOERING VAN TAAIE DIJKEN	44
8.1 Specifieke aandachtspunten voor het ontwerp van taaie dijken.....	44
8.2 Specifieke aandachtspunten voor de uitvoering van taaie dijken	46
9 DISCUSSIE	48
10 CONCLUSIE	50

BIJLAGE A – RAMSHEËP-CRITERIA EN EVALUATIEASPECTEN.....	52
BIJLAGE B – UITWERKING EVALUATIEKADER TAAIE DIJKCONCEPTEN.....	54
BIJLAGE C – VERSLAG WORKSHOP 4 - TAAIE DIJKEN KLIMAATROBUUST.....	60

SAMENVATTING

Nederland staat voor een omvangrijke en urgente dijkversterkingsopgave. Naar verwachting moet vóór 2050 een aanzienlijk deel van de primaire waterkeringen worden versterkt om te blijven voldoen aan de wettelijke veiligheidsnormen. Deze opgave wordt versterkt door klimaatverandering, zeespiegelstijging, bodemdaling en een toenemende economische waarde in de beschermde gebieden. In de huidige praktijk wordt deze opgave veelal ingevuld door traditionele dijkversterking, waarbij dijken hoger en breder worden gemaakt om de kans op falen te verkleinen. Hoewel deze aanpak effectief is in termen van faalkansreductie, leidt zij steeds vaker tot knelpunten op het gebied van ruimtegebruik, kosten en ruimtelijke inpassing.

Tegen deze achtergrond ontstaat toenemende aandacht voor het concept van taaie dijken. Taaie dijken vormen geen vervanging van traditionele dijkversterking, maar een aanvullende benadering waarin niet alleen het voorkomen van falen centraal staat, maar ook het beheersen en vertragen van het faalproces. Door het bezwijkgedrag van een dijk te vertragen en de bresgroei te beperken, kan de instroom van water aanzienlijk worden gereduceerd. Dit resulteert in minder schade, minder slachtoffers en meer tijd voor evacuatie en noodmaatregelen. Daarmee dragen taaie dijken bij aan een verlaging van het overstromingsrisico, niet alleen via de kans op falen, maar juist ook via het beperken van de gevolgen.

Het project *Taaie Dijken* klimaatrobuust beantwoordt de vraag in hoeverre en op welke wijze de lange termijn klimaatrobuustheid van dijken kan worden vergroot door middel van taaie dijken. Deze handreiking is opgesteld binnen het project en beantwoordt de subvraag hoe we de taaigheid van bestaande en nieuwe dijken vergroten. Het heeft als doel om dijkwerkers – waaronder ontwerpers, projectmanagers en beheerders – te ondersteunen bij het toepassen van taaigheid in dijkversterkingsprojecten, zodat we op lange termijn een meer klimaatrobuust waterkerend systeem hebben. De aanleiding voor deze handreiking ligt in het ontbreken van een praktische en toepasbare werkwijze om taaie gedrag expliciet mee te nemen in het ontwerp- en uitvoeringsproces. Hoewel de potentie van taaie dijken in eerdere studies is aangetoond, ontbreekt het in de huidige praktijk nog aan concrete handvatten om deze inzichten te vertalen naar ontwerpkeuzes en uitvoeringsstrategieën.

In dit rapport wordt daarom een overzicht gegeven van mogelijke taaie dijkconcepten en de wijze waarop deze bijdragen aan taaie bezwijkgedrag. Deze concepten variëren van aanpassingen aan het buitentalud, zoals het toepassen van erosiebestendige bekledingen of flauwere taluds, tot maatregelen aan het binnentalud en ingrepen op het niveau van het dijklichaam, zoals het toepassen van kleikernen of constructieve elementen zoals damwanden. Door deze varianten systematisch te analyseren ontstaat inzicht in de mechanismen die bijdragen aan het vertragen van faalpaden en het vergroten van de reststerkte van de dijk.

De analyse van deze concepten is gestructureerd aan de hand van het RAMSHEEP-raamwerk, waarin verschillende aspecten zoals betrouwbaarheid, beschikbaarheid, onderhoudbaarheid, veiligheid, gezondheid, milieu, economie en prestaties worden beschouwd. Hieruit blijkt dat taaie dijken op meerdere aspecten gunstig kunnen scoren ten opzichte van traditionele oplossingen. Met name op het gebied van erosiebestendigheid, reststerkte en gevolgbepanking bieden taaie dijken duidelijke voordelen. Daarnaast kan in veel gevallen het ruimtebeslag worden beperkt en ontstaan kansen voor multifunctioneel gebruik, zoals natuurontwikkeling of recreatie.

Tegelijkertijd brengt de toepassing van taaie dijken ook nieuwe aandachtspunten en uitdagingen met zich mee. De prestaties van taaie dijken zijn in sterke mate afhankelijk van factoren zoals

materiaalkeuze, constructieve opbouw en hydrologisch gedrag. Dit vraagt om een meer gedetailleerde en integrale benadering in het ontwerp, waarbij niet alleen wordt gekeken naar het optreden van initiële faalmechanismen, maar ook naar het verloop van het faalproces en de bijbehorende faalpaden. Daarnaast stelt de toepassing van taaie dijken hogere eisen aan de uitvoering, onder meer op het gebied van kwaliteitsborging, fasering en monitoring.

Op basis van de analyse van de taaie dijkconcepten zijn in deze handreiking de belangrijkste aandachtspunten voor ontwerp en uitvoering geformuleerd. Voor de ontwerpfase betekent dit onder andere dat expliciet aandacht moet worden besteed aan het sturen op gewenste (trage) faalpaden. Hiervoor zijn het vergroten van de reststerkte en het selecteren van geschikte materialen en kernconstructies van belang. In de uitvoeringsfase ligt de nadruk op het zorgvuldig realiseren van het ontwerp, waarbij monitoring en kwaliteitscontrole essentieel zijn om het beoogde gedrag van de dijk te volgen en waarborgen.

Deze handreiking biedt geen volledig uitgewerkte ontwerpmethodiek, maar is een eerste praktische stap in het operationaliseren van het concept taaie dijken. Het document maakt inzichtelijk welke aspecten relevant zijn, welke keuzes gemaakt kunnen worden en waar extra aandacht nodig is in het ontwerpen en uitvoeringsproces. Daarmee ondersteunt de handreiking dijkwerkers bij het expliciet meenemen van taaigheid als ontwerpaspect en draagt zij bij aan de verdere ontwikkeling van taaie dijken als volwaardig onderdeel van de Nederlandse waterveiligheidsaanpak.

1 INLEIDING

1.1 Het project Taaie dijken klimaatrobuust

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.

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, 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).

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 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!

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). Voor de plaats van de taaie dijk in het veiligheidsdenken wordt verwezen naar H2 en H5.2 in (den Heijer, 2024). Hierin is taaie dijkdoorbraakgedrag naast de vertraging van het fysisch proces en de beperktere gevolgen ook gekoppeld aan de extra mogelijkheden voor het tijdig nemen van effectieve noodmaatregelen.

Zowel de kans op als het gevolg van dijkdoorbraak wordt dus beperkt door een taaie dijk. Daarmee is in (den Heijer, 2024) een vergelijkingsbasis gekozen om de mate van taai gedrag te duiden: de verhouding tussen het risico van een taai en dat van een bros dijkontwerp: risico taai / risico bros.

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 taai gedrag 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 ontwerp mogelijkheden en klimaatrobuustheid van taaie dijken, zodat de dijkwerkers aan het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP) een concreet beeld krijgen van deze nieuwe extra dijkversterkings-optie.

Het project *Taaie dijken* klimaatrobuust 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 klimaatrobuustheid. De synthese van deze onderdelen geeft antwoord op hoofdvraag.

Het project wordt uitgevoerd in 3 werkpakketten:

WP1 – Taai gedrag huidige dijken: ontwikkelen van een praktische werkwijze om taai gedrag en klimaatrobuustheid uit te drukken; potentieel taai gedrag van huidige dijken en dijkzones wordt geïnventariseerd.

WP2 – Taaie ontwerpen van dijken: verkennen hoe taai gedrag kan worden bereikt door aanpassingen op de bestaande dijken, of het maken van nieuwe dijken; schetsontwerpen en cases.

WP3 – Stresstest en synthese: de ontwerpen voor de cases uit WP2 worden onderworpen aan de belastingen volgend uit enkele klimaatscenarios; synthese om de resultaten te interpreteren en wegen.

Voorliggend rapport is onderdeel van WP2 uit (Den Heijer, Podt, & Rijke, 2022), deliverable D2.3: Handreiking voor ontwerp en uitvoering taaie dijken voor bestaande en nieuwe dijken.

1.2 Probleemstelling – geen rekenmethode en nauwelijks voorbeeld cases

In de huidige praktijk is er geen incentive voor de dijkenbouwer om taaie dijken te bouwen. De normen zijn wettelijk vastgelegd en de dijken worden (veelal) ontworpen om met minimale financiële inspanningen aan die norm te voldoen. Dat resulteert vaak in 'brosse' dijken met een zandkern die simpelweg hoger en breder worden gemaakt. Taaie dijken kan een oplossing zijn voor een aantal problemen die de traditionele dijkversterking met zich meebrengt: door ruimtelijke knelpunten door oprukkende bebouwing in ons dichtbevolkte land, door industrie en landbouw direct achter de dijk, door graverij (bevers) en door klimaatverandering. Maar voor het concept 'taai dijken' moet het ontwerp worden gestuurd op trage faalpaden. Daarmee heeft zowel de ontwerpende als de uitvoerende dijkwerker geen ervaring. Er is momenteel nog geen structurele, praktische werkwijze beschikbaar voor de dijkwerker om taaiheid in een ontwerp te definiëren, te kwantificeren of adequaat te herkennen, te waarderen en uit te voeren. Het ontbreekt in de ontwerp praktijk aan concrete voorbeelden en richtlijnen om bestaande dijktypen effectief te 'vertaaien' of om nieuwe keringen specifiek op taai gedrag te

ontwerpen. Zonder deze praktische doorvertaling blijft het lastig om taaie dijken als volwaardig, klimaatrobuust alternatief mee te nemen in de afwegingen voor dijkversterkingsprojecten.

Veel oude dijken lijken taaier te zijn dan de meer recente keringen. Dat heeft te maken met materiaalgebruik en de gevolgde ontwerpfilosofie. Dit betekent in de praktijk dat klassieke dijken, zoals bijvoorbeeld kleidijken langs de rivieren mogelijk zelfs (inclusief de verborgen veiligheid door taaigheid) meer veiligheid bieden dan “modernere” zanddijken. De huidige richtlijnen voorkomen niet dat bestaande taaigheid bij een versterking wordt verwijderd.

1.3 Doelstelling en aanpak op hoofdlijnen

Het doel van dit rapport is om ontwerpers, projectmanagers, aannemers en beheerders binnen het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP) een praktisch perspectief te bieden voor het ontwerpen en uitvoeren van taaie dijken, en het bouwen ervan, of van het versterken van bestaande dijken. Daartoe worden ontwerpvarianten verbeeld en ontwerp- en uitvoeringsaspecten geïnventariseerd. De handreiking geeft inzicht in de belangrijkste aspecten om gerichte aanpassingen te doen aan bestaande dijken of nieuwe taaie dijken te ontwerpen en bouwen.

1.4 Leeswijzer

Voorliggend rapport is deliverable D2.3 van het project. In Hoofdstuk 2 wordt de fysieke ontwerpogave van dijken en wat een traditionele dijkversterking inhoudt beschreven, die als referentiekader dienen voor de verdere analyse. Hoofdstuk 3 gaat vervolgens in op het huidige ontwerp- en uitvoeringsproces van dijkversterkingen binnen het MIRT-proces. In Hoofdstuk 4 wordt de methodologische aanpak uitgewerkt, waarbij de opzet van een evaluatiekader wordt beschreven om taaie concepten met traditionele dijkversterking te vergelijken. Vervolgens worden in Hoofdstuk 5 de verschillende taaie dijkconcepten gepresenteerd. In Hoofdstuk 6 wordt het RAMSHEEP-raamwerk toegelicht, dat is gebruikt om de aspecten te structureren. In Hoofdstuk 7 worden de belangrijkste hoofdlijnen en patronen uit de analyse beschreven. Deze worden in Hoofdstuk 8 vertaald naar praktische aandachtspunten voor ontwerp en uitvoering. Het rapport sluit af met een discussie in Hoofdstuk 9 en de conclusies in Hoofdstuk 10.

2 FYSIEKE EIGENSCHAPPEN EN TRADITIONELE DIJKVERSTERKING

De beschrijving van de fysieke ontwerpogave en de traditionele dijkversterking in dit hoofdstuk vormt een belangrijk referentiekader voor de verdere uitwerking van ontwerp- en uitvoeringsaspecten voor het versterkingsconcept 'taaie dijken' in dit rapport. Door inzicht te geven in de fysieke kenmerken, uitvoeringslogistiek en het resulterende gedrag van deze traditionele dijkontwerpen, wordt duidelijk welke aannames en ontwerpprincipes momenteel meestal worden gehanteerd. Dit maakt het mogelijk om in de volgende hoofdstukken de verschillen met en de meerwaarde van taaie dijken expliciet te duiden. Voor onderstaande teksten is geput uit het Handboek Dijkenbouw en het HBO lesboek Waterkeringen (hoofdstuk 'Uitvoering') en uit de ervaring van enkele experts.

2.1 De fysieke opgave en faalmechanismen

Er zijn verschillende oorzaken die noodzaken om een dijk te versterken, of zelfs op een andere locatie opnieuw aan te leggen. De belangrijkste aanleidingen hiervoor zijn een verandering van de wettelijke veiligheidsnormen, of nieuwe kennis en inzichten over faalmechanismen en hydraulische belastingen. Ook dijkveroudering, zoals zetting en materiaaldegradatie vormt een directe aanleiding. Ook worden bij dijkversterkingen constructiefouten of nieuwe inzichten meegenomen (een voorbeeld hiervan zijn de zandscheggen bij rivierdijken, die destijds zijn aangebracht voor taludverflauwing, maar die nu toch een veiligheidsrisico blijken te zijn). Nieuwe inzichten over klimaatverandering zijn meestal niet de directe aanleiding voor dijkversterkingen, maar bepalen wel mede het uiteindelijke ontwerp en het materiaalgebruik in de uitvoering.

NB. Verbeteringen of aanpassingen en dijkverlegging gaan wezenlijk verder dan reparaties of herstel aan de bestaande dijk, die door de schouw of monitoring aan het licht zijn gekomen bij de jaarlijkse inspecties van waterschappen. Reparaties en herstel zijn activiteiten die op korte termijn, veelal voor het volgende stormseizoen, kunnen worden uitgevoerd en die geen verandering aanbrengen aan het oorspronkelijke dwarsprofiel. Hierbij valt te denken aan het verbeteren van graszones, het opnieuw profileren van de bekleding of opnieuw asfalteren, waarbij als uitgangspunt geldt dat de kwaliteit van het dijkonderdeel niet achteruit mag gaan.

Wanneer een formele aanpassing of verbetering nodig is, worden de maatregelen specifiek afgestemd op een of meerdere faalmechanismen waarop het dijktraject moet worden verbeterd. Voor deze aanpassingen zijn in de ontwerppraktijk vaak een aantal fysieke oplossingsalternatieven voorhanden:

- Overloop en golfoverslag: Fysieke oplossingen bestaan uit het ophogen van de kruin en/of het uitbouwen van het profiel aan de binnen- of buitendijkse zijde. Daarnaast kan het erosiebestendig maken van het binnentalud een oplossing bieden.
- Erosie buitentalud: Dit wordt tegengegaan door het versterken van het buitentalud met een andere, zwaardere bekleding en/of het aanpassen van de taludhelling.
- Macro-instabiliteit buiten- en binnentalud: Gevaar voor afschuiving wordt gemitigeerd door grondverbetering toe te passen, de buitenteen op te hogen of te verbreden, of door een constructieve damwand in het profiel te integreren.

- Piping: Om te voorkomen dat water onder de dijk doorstroomt, kiest men traditioneel voor de aanleg van een berm aan de binnentoe, het inbrengen van een damwand, de aanleg van een grindkoffer, het toepassen van verticaal zanddicht geotextiel of andere innovaties.
- Micro-instabiliteit binnentalud: Dit wordt verholpen door de aanleg van een grindkoffer of het toepassen van een andere bekleding.
- Instabiliteit vooroever: Dit vereist veelal het constructief vastleggen van de teenconstructie.

Naast deze strikt waterbouwkundige maatregelen weegt het ontwerp tevens talloze ruimtelijke en maatschappelijke belangen mee. Zo wordt getoetst of er voldoende ruimte is voor de benodigde dijkdimensies en of de dijk naast waterveiligheid nog andere functies moet krijgen waardoor zogenoemde meekoppelkansen ontstaan. Er moet nadrukkelijk rekening gehouden worden met milieu-, landschappelijke, cultuurhistorische en natuurwaarden. Tevens spelen de beschikbaarheid van materiaal, de noodzaak voor grondverbetering, en de wensen voor de toekomstige wijze van beheer en onderhoud een sturende rol in het fysieke ontwerp.

2.2 Materiaaleigenschappen en logistieke complexiteit

De structurele integriteit van de dijk wordt primair bepaald door de gekozen grondstoffen. Van oudsher zijn zand, klei en veen de belangrijkste componenten in de dijkenbouw (zie Figuur 2). Veen, een zeer samendrukbaar organisch materiaal dat onder extreme belastingen sterk vervormt en slecht waterdoorlatend is, werd in het verleden veelvuldig in dijken verwerkt. Tegenwoordig wordt dit materiaal, vanwege de geotechnische risico's, niet meer toegepast en waar mogelijk volledig verwijderd of structureel samengedrukt. Zand daarentegen vormt vaak de fundering en de robuuste kern van de versterking. Het is in overvloed voorradig, relatief goedkoop, uitstekend te verdichten en eenvoudig in bulk aan te voeren via schepen, as (vrachtwagens) of persleidingen. Omdat zand echter uit losse, grofkorrelige deeltjes bestaat en sterk waterdoorlatend en erosiegevoelig is, vereist het altijd een beschermende schil.

Deze beschermende schil wordt veelal gevormd door klei. Klei is chemisch gevormd en bezit een polaire structuur (positief en negatief geladen zijden), waardoor het materiaal sterk cohesief is, aan elkaar plakt, water vasthoudt en nagenoeg ondoorlatend is. Deze eigenschappen maken het uitermate geschikt als erosiebestendige dijkbekleding. De verwerking van klei is echter een van de grootste logistieke uitdagingen in de dijkenbouw. Klei wordt vaak gewonnen in uiterwaarden en/of van ver aangevoerd, waarna het ter plekke in speciaal ingerichte depots moet rijpen of ontwateren. De erosiebestendigheid hangt nauw samen met de precieze samenstelling. Te natte klei is onverwerkbaar en het ontwateringsproces kan enorm lang duren, terwijl te droge klei zich niet laat kneden of verdichten. Zelfs als het vochtgehalte in het depot perfect is, kunnen plotselinge natte weersomstandigheden op de bouwplaats het materiaal direct ongeschikt maken voor verdichting, wat resulteert in onvermijdelijk verlet en kwaliteitsverlies van de bekledingslaag.

Naast zand en klei worden ook specifieke, harde materialen geïntegreerd in de dijk: beton en breuksteen om zware golfslag en de bijbehorende erosie te weerstaan, stalen damwanden voor het rigoureuze afsnijden van kwelwegen (piping) en het verhogen van de stabiliteit, en asfalt voor de integratie van rij- en onderhoudswegen op de kruin of bermen. Ter afronding wordt vrijwel altijd een laag teelaarde aangebracht, zodat diepwortelende grassen en kruiden zich kunnen ontwikkelen, resulterend in een erosiebestendige, groene en natuurvriendelijke dijk.

	<p>Zand kennen we allemaal en is het makkelijkst te omschrijven als korrels die met het blote oog waarneembaar zijn. Het is een van de meest voorkomende materialen op aarde en bestaat uit zeer kleine stukjes steen. In droge vorm zal puur zand altijd als losse korrels uiteen vallen. Zand is sterk waterdoorlatend.</p>
	<p>Klei kennen we van jongs af vanwege de eigenschap dat het aan elkaar plakt. Je kunt het kneden en in een vorm boetseren. Dit heeft te maken met de vorm van de deeltjes waaruit klei bestaat. Kleiplaatjes zijn chemisch gevormd en polair, dat wil zeggen met een positief en negatief geladen zijde waardoor het water vasthoudt en slecht waterdoorlatend is.</p>
	<p>Veen is ontstaan als gevolg van het samenpersen van afgestorven planten. Deze grondsoort is bewaard gebleven onder natte, zuurstofarme omstandigheden. Veen is een slecht water-doorlatend materiaal.</p>

Figuur 2: Overzicht van meest voorkomende grondsoorten en hun fysische eigenschappen in de dijkenbouw (Jorissen et al., 2021).

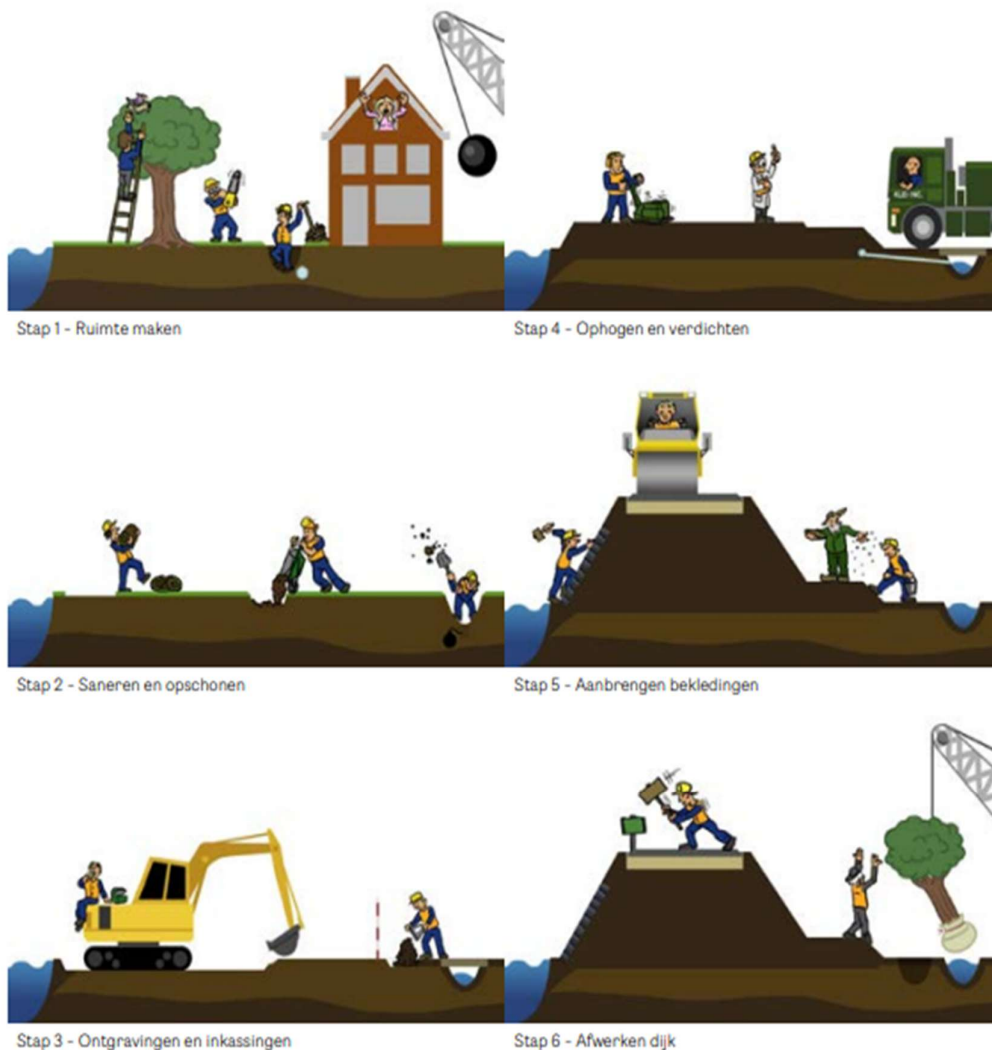
Naast bovengenoemde grondsoorten komen ook andere gebiedseigen materialen voor, welke steeds vaker worden toegepast vanuit oogpunt van duurzaamheid. Denk daarbij aan leemhoudende grond of keileem. Deze materialen zijn bruikbaar maar vereisen speciale aandacht.

2.3 Uitvoeringslogistiek en materieelinzet

De daadwerkelijke aanleg van een nieuwe dijk of dijkversterking is een ruimtelijk en logistiek ingrijpend proces. Dit uitvoeringsproces kent een duidelijke fasering van voorbereiding tot afwerking (zie Figuur 3). Als alle voorbereidingen zoals vergunningen, grondverwerving en de Milieueffectrapportage geregeld zijn, zal voordat daadwerkelijk met bouwen kan worden begonnen, eerst ruimte gemaakt moeten worden in het veld. Dit kan betekenen dat er gebouwen of bomen geamoveerd moeten worden om te zorgen voor een goede en naadloze aansluiting van de nieuwe dijk op de ondergrond, het zogenoemde cunet. Soms moet er grondverbetering worden toegepast om de draagkracht te vergroten, of dienen vervuilde grond, explosieven, en storende kabels en leidingen uit de ondergrond te worden verwijderd.

Wat betreft de aanvoer van materialen wordt bij voorkeur het materiaal direct vanaf het schip verwerkt in de dijk; dat scheelt immers opslag en extra overslag. Het is echter vaak verstandig en noodzakelijk om ook materiaaldepots aan te leggen. Is de ondergrond eenmaal geschikt gemaakt, zijn de materialen

voorhanden en staat het materieel stand-by, dan kan daadwerkelijk worden begonnen met de opbouw. De kern van het dijklichaam wordt in lagen aangebracht en zwaar verdicht, waarna de taluds van binnen naar buiten worden afgewerkt met een kleideklaag. Is de dijk eenmaal op voldoende hoogte gebracht, dan kan hij definitief worden afgewerkt met een beschermende bekleding, een laag teelaarde voor de grasmat en eventuele wegverhardingen op de kruin.



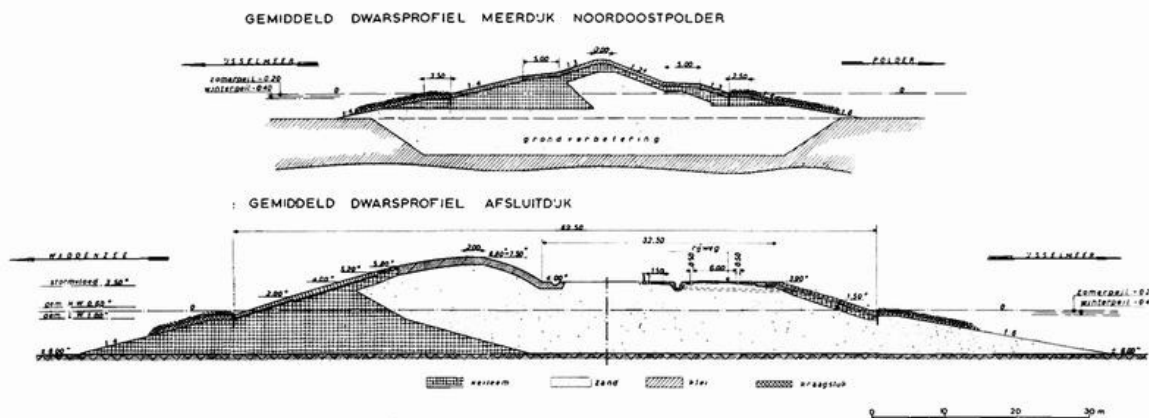
Figuur 3: Fasering van de aanleg en versterking van een dijk. Bron (Deltares, 2012, PAO-cursus "Uitvoeringsaspecten van Dijkversterkingen").

2.4 Uitvoeringsmethoden: In den droge versus in den natte

Op het eerste gezicht lijken de bovenstaande werkzaamheden prima te plannen als de mensen en het materiaal beschikbaar zijn en de productie van het materieel per uur bekend is, maar dat is in de waterbouw niet altijd het geval. Uitvoeringsmethodieken zijn sterk afhankelijk van de locatie, de weersomstandigheden en de gesteldheid van de ondergrond (Figuur 4).

De meeste reguliere dijkversterkingen worden 'in den droge' uitgevoerd. Hierbij wordt het dijkprofiel veelal horizontaal uitgebouwd vanuit het land, waarbij grond per as (met dumpers en vrachtwagens) wordt aangevoerd en vervolgens door bulldozers en kranen nauwkeurig in profiel wordt gebracht. Deze methode is sterk afhankelijk van de draagkracht van de ondergrond; bij natte omstandigheden kan het tracé snel onberijdbaar worden.

Een aanzienlijk complexere opgave is de uitvoering 'in den natte', waarbij direct vanaf of in het water wordt gebouwd (zoals historisch toegepast bij de Afsluitdijk). Dit vereist de inzet van zwaar drijvend materieel, zoals pontons en kraanschepen, en een totaal andere logistieke fasering. Bij deze natte uitvoering is het cruciaal om de bodem en de nieuw te vormen dijkteen direct te fixeren en te beschermen tegen hevige stroming en uitspoeling. Hiervoor worden traditioneel zink- en kraagstukken ingezet die gecontroleerd worden afgezonken. Vaak is een gecombineerde aanpak nodig: het onderwaterprofiel en de eerste aanzet worden met nat materieel gerealiseerd totdat het dijklichaam zich ver genoeg boven de waterlijn bevindt, waarna de verdere afwerking van taluds en wegconstructies met conventioneel droog materieel kan worden voltooid.

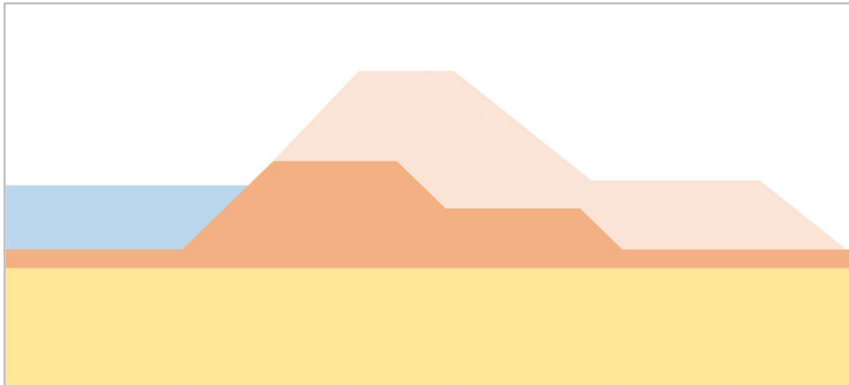


Figuur 4: Uitvoeringsmethoden voor dijkversterking: in den droge versus in den natte. Bron (Rijkswaterstaat, Tekening Dwarsprofiel Afsluitdijk (beeldnummer 404633), Rijkswaterstaat Beeldbank).

2.5 Karakteristieken en gedrag van traditionele dijkversterking

De hierboven beschreven fysieke aspecten leiden in de praktijk veelal tot het concept van de traditionele dijkversterking. Bij een traditionele dijkversterking wordt de veiligheid voornamelijk vergroot door de dijk simpelweg hoger en of breder te maken met zand, vaak gecombineerd met een relatief dunne bekledingslaag van bijvoorbeeld klei, gras, asphalt of steen (zie Figuur 5).

Het uitgangspunt is dat de dijk sterk genoeg moet zijn om de maatgevende belasting zoals waterstand en golfaanval direct te weerstaan. Dit betekent dat het ontwerp primair is gericht op het voorkomen van falen onder extreme omstandigheden. Er wordt in beperkte mate rekening gehouden met het verloop van een mogelijk faalproces of met de reststerkte van de dijk nadat initiële schade is opgetreden. Hierdoor is het gedrag van de dijk in sterke mate afhankelijk van de integriteit van de buitenste bescherm lagen.



Figuur 5: Schematische doorsnede van een traditionele dijkversterking met zandophoging (lichtoranje weergegeven).

Dit type ontwerp kenmerkt zich door een aantal specifieke eigenschappen:

- De stabiliteit wordt vooral bereikt door de dijkdimensies, vaak met meer massa en dus aanzienlijk meer zand in het dijklichaam.
- De weerstand tegen erosie wordt voornamelijk geleverd door de relatief dunne beschermlaag van klei en gras aan de buitenzijde.
- De verschillende functies, zoals water keren, stabiliteit en erosiebestendigheid, zijn in het ontwerp vaak strikt gescheiden in afzonderlijke lagen.
- Het ontwerp is er primair op gericht om direct met deze dijkdimensies en buitenste beschermlagen te voldoen aan normcondities, en is aanzienlijk minder gericht op het beheersen van het faalproces na het optreden van initiële faalmechanismen die de dijk beschadigen.
- De drainage van de dijk is zeer belangrijk voor de stabiliteit.

Wanneer bij een traditioneel ontworpen dijk de beschermlaag faalt, bijvoorbeeld door zware golfslag, golfoverslag of erosie, kan het onderliggende zand zeer snel wegspoelen. Hierdoor kan een traditionele dijk uiterst abrupt falen: zodra de beschermlaag beschadigd raakt, kan erosie zich in het zandlichaam snel ontwikkelen en kan het totale faalproces zich onomkeerbaar en versneld voortzetten.

Dit specifieke type faalgedrag wordt in de waterbouw veelal als relatief 'bros' beschouwd: er is bij deze dijken sprake van een zeer beperkte reststerkte en een extreem snelle overgang van een ogenschijnlijk veilige situatie naar volledig falen en doorbraak. Vanuit het perspectief van risicobeheersing betekent dit brosse gedrag dat er tijdens een calamiteit weinig tijd beschikbaar is om adequaat in te grijpen met noodmaatregelen wanneer er eenmaal schade optreedt.

Tegelijkertijd hebben deze traditionele dijkversterkingen belangrijke en bewezen voordelen. De ontwerpprincipes achter de zandkern met kleibekleding zijn door de jaren heen uitstekend ontwikkeld, breed geaccepteerd en gebaseerd op een enorme hoeveelheid praktijkervaring in de Nederlandse polders. Hierdoor zijn ze uitermate goed inpasbaar binnen het formele ontwerp- en uitvoeringsproces (zoals het MIRT-proces, zie volgend hoofdstuk) en sluiten ze naadloos aan bij de huidige rekenmethoden, de wettelijke toetsingskaders en de standaard contractvormen van de waterschappen.

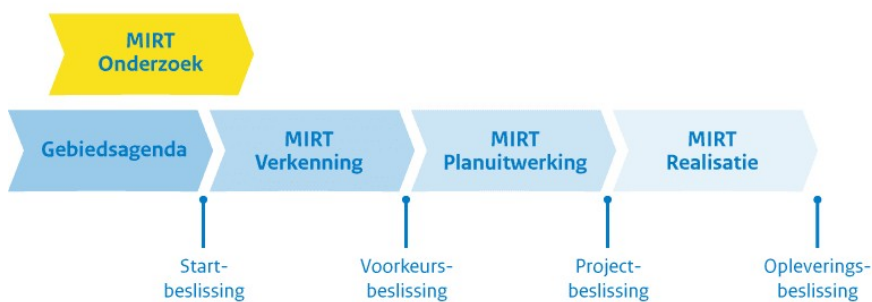
Een belangrijk nadeel van deze traditionele benadering is echter dat het continu vergroten van de veiligheid, door de dijken te verbreden en te verhogen, onlosmakelijk gepaard gaat met een enorme toename van ruimtebeslag en materiaalgebruik. In een omgeving waar de fysieke ruimte zeer schaars is en waar de maatschappelijke belangen en bebouwing dicht achter de dijk toenemen, wordt naar kostbare (ruimtebesparende) oplossingen gezocht. Daarnaast wordt het potentieel om in het ontwerp het faalproces zélf te beïnvloeden, en daarmee de instroom van water en de catastrofale gevolgen van een eventuele doorbraak te beperken, in deze benadering slechts zeer beperkt benut.

De hierboven beschreven fysieke eigenschappen en de beperkingen van traditionele dijken en kostbare ruimtebesparende oplossingen vormen het belangrijke vertrekpunt voor het verkennen van alternatieve ontwerpbenaderingen in deze handreiking. In de volgende hoofdstukken worden de concepten voor 'taaie dijken' geïntroduceerd, waarbij in het ontwerp niet alleen expliciet wordt gestuurd op het voorkomen van falen, maar juist ook nadrukkelijk op het beheersen en vertragen van het faalproces en het structureel vergroten van de reststerkte van de waterkering.

3 ONTWERP EN UITVOERING VAN DIJKEN

3.1 Ontwerp van dijken

In Nederland vindt het ontwerp van dijken doorgaans plaats binnen dijkversterkingsprojecten die worden uitgevoerd in het kader van het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP). Deze projecten volgen in grote lijnen het MIRT-proces (zie Figuur 6), waarin verschillende fasen worden onderscheiden van verkenning tot realisatie. Binnen deze projecten wordt het ontwerp voornamelijk ontwikkeld in twee projectfasen: de verkenningfase en de planuitwerkingsfase.



Figuur 6: Overzicht van de vier fasen in het MIRT-proces. Bron (RWS Economische Expertise, Werkwijzer MKBA bij MIRT).

Onderstaand worden de verschillende fasen voor dijkversterkingsprojecten beschreven. Per fase is aangegeven hoe deze fase van invloed is op de taaigheid van de dijkversterking.

Verkenningfase: Opzetten voorkeursalternatief

De verkenningfase vormt de eerste belangrijke stap in het ontwerpproces van een dijkversterking (zie Figuur 6). In deze fase wordt onderzocht hoe een waterkering kan worden versterkt zodat deze weer voldoet aan de geldende veiligheidsnormen. Het belangrijkste doel van de verkenningfase is het ontwikkelen en vergelijken van verschillende oplossingsrichtingen en het uiteindelijk selecteren van één voorkeursalternatief dat in de volgende fase verder wordt uitgewerkt (HWBP, 2017).

Voor het uitvoeren van de benodigde analyses en het opstellen van het ontwerp schakelen waterschappen in veel gevallen een extern adviesbureau in. Dit gebeurt via een aanbestedingsprocedure, waarbij één of meerdere adviesbureaus worden geselecteerd op basis van hun expertise op het gebied van waterveiligheid, geotechniek, hydraulica en ruimtelijke inpassing.

Een belangrijk uitgangspunt hierbij zijn de wettelijke veiligheidsnormen voor primaire waterkeringen. Sinds 2017 zijn deze normen gebaseerd op de overstromingskansbenadering. Daarbij wordt niet alleen gekeken naar de belasting op de dijk, maar vooral naar de kans dat een waterkering faalt en naar de mogelijke gevolgen van een overstroming. Voor elk dijktraject geldt een specifieke normklasse, die onder andere afhankelijk is van het aantal inwoners en de economische waarde van het gebied dat door de dijk wordt beschermd.

Om te bepalen welke versterkingsmaatregelen nodig zijn om aan de normen te voldoen, wordt in de verkenningsfase eerst een analyse uitgevoerd van de huidige veiligheid van de waterkering (ingangstoets). Hierbij wordt gekeken naar verschillende mogelijke faalmechanismen van dijken. Dit zijn processen waardoor een waterkering zijn waterkerende functie kan verliezen. Voorbeelden hiervan zijn piping, waarbij water onder de dijk door stroomt en zand meevoert, stabiliteitsproblemen van het talud en erosie van de dijkbekleding door golfbelasting. Door deze mechanismen te analyseren ontstaat inzicht in welke onderdelen van de dijk onvoldoende veilig zijn en waar versterking nodig is. Ten behoeve van deze analyse van faalmechanismen wordt in deze fase ook aanvullende informatie verzameld over de fysieke omstandigheden van het dijktraject. Hierbij worden onder andere de hydraulische randvoorwaarden bepaald, zoals waterstanden en golfcondities, en wordt geotechnische informatie over de bodemopbouw en de huidige staat van de waterkering onderzocht. Deze gegevens vormen ook de basis voor het ontwikkelen van mogelijke versterkingsmaatregelen.

Op basis van deze analyses worden verschillende oplossingsrichtingen ontwikkeld. Dit kunnen bijvoorbeeld maatregelen zijn zoals het verhogen van de kruin, het verbreden van het dijklichaam, het aanpassen van het dijkprofiel of het versterken van de dijkbekleding. De verschillende alternatieven worden vervolgens geëvalueerd op onder andere waterveiligheid, kosten en ruimtelijke inpassing. Het resultaat van de verkenningsfase is de keuze voor een voorkeursalternatief (zie Figuur 7, voorkeursbeslissing in Figuur 6). Dit alternatief vormt de beste balans tussen veiligheid, kosten, technische haalbaarheid en inpassing in de omgeving.

Deze fase is zeer belangrijk voor het hanteren van het concept van taaie dijken:

- Door in de scope bepaling (gebaseerd op een veiligheidsanalyse) ook rekening te houden met de taaigheid van de huidige dijk, kunnen mogelijk aanzienlijke besparingen worden gerealiseerd. Dit past op dit moment echter nog niet in het normeringskader. Het is echter wel mogelijk om de taaigheid te laten meewegen in de prioritering van versterkingen.
- Voor de afweging van alternatieven zou de taaigheid van de dijk ook een plaats moeten krijgen. De realisatie van een taaie dijk maakt dat de levensduur van de dijk mogelijk groter is dan van alternatieven.

Planuitwerkingsfase: Van voorkeursalternatief naar projectplan

In de planuitwerkingsfase wordt het voorkeursalternatief uit de verkenningsfase verder uitgewerkt tot een concreet en uitvoerbaar ontwerp. Het doel van deze fase is om voldoende informatie te verzamelen om een publiekrechtelijk besluit te kunnen nemen, meestal het vaststellen van een projectplan Waterwet (HWBP, 2014).

Varianten binnen het voorkeursalternatief worden uitgewerkt en met elkaar vergeleken om tot een optimale oplossing te komen (zie Figuur 7). Er worden aanvullende onderzoeken uitgevoerd om het ontwerp verder te onderbouwen. Dit kan bijvoorbeeld bestaan uit extra geotechnisch onderzoek naar de bodemopbouw, hydraulische analyses naar waterstanden en golfbelasting en verschillende technische proeven.

In veel projecten wordt het ontwerpproces georganiseerd in meerdere ontwerploops. In een eerste ontwerploop worden mogelijke optimalisaties van het voorkeursalternatief onderzocht en afgewogen op aspecten zoals haalbaarheid, duurzaamheid, beheer en onderhoud, kosten en ruimtelijke inpassing. In volgende ontwerploops wordt het ontwerp verder uitgewerkt tot een integraal ontwerp en wordt bepaald

welke onderdelen van het ontwerp nog door de aannemer kunnen worden geoptimaliseerd in de realisatiefase.

Binnen het Hoogwaterbeschermingsprogramma wordt daarbij gestreefd naar een zogenoemd sober en doelmatig ontwerp. Dit betekent dat de gekozen maatregelen voldoende moeten bijdragen aan het behalen van de veiligheidsnorm, maar tegelijkertijd efficiënt moeten zijn in termen van kosten en uitvoerbaarheid. Het eindresultaat van de planuitwerkingsfase is een referentieontwerp en een vastgesteld projectplan (zie Figuur 7, projectbeslissing in Figuur 6) dat als basis dient voor de realisatie van de dijkversterking.



Figuur 7: Selectieproces van alternatieven tot een projectplan. Bron (HWBP, Handreiking Planuitwerking, 2014).

Deze fase is zeer belangrijk voor het ontwerp van taaie dijken:

- Door in de variantkeuze (gebaseerd op een veiligheidsanalyse) ook rekening te houden met de taatheid van de huidige dijk en ook de materiaalkeuze, kunnen mogelijk aanzienlijke besparingen worden gerealiseerd. Dit past op dit moment echter nog niet in het normeringskader.
- Voor de afweging van varianten zou de taatheid van de dijk ook een plaats moeten krijgen. De realisatie van een taaie dijk maakt dat de levensduur van de dijk mogelijk groter is dan van varianten.
- Deze fase vormt de voorbereiding voor de contractvorming. Keuzes ten aanzien van taatheid kunnen zo geborgd worden voor de uitvoering.

3.2 Uitvoering van dijken

De uitvoeringsfase volgt op de verkennings- en planuitwerkingsfase en sluit aan op de realisatiefase binnen het MIRT-proces (zie Figuur 6). Deze fase omvat verschillende technische, organisatorische en logistieke activiteiten. In deze fase wordt het ontwerp daadwerkelijk gerealiseerd in het veld. De uitvoering van een dijkproject is vaak complex omdat verschillende disciplines samenkomen. Naast civieltechnische aspecten spelen ook factoren zoals planning, veiligheid, contractvorming, risicomanagement en omgevingsmanagement een belangrijke rol.

Uitvoeringsfase: Van projectplan naar uitvoering en oplevering

Tijdens de uitvoering wordt het ontwerp door de uitvoerende partijen, de aannemer, vertaald naar concrete werkzaamheden in de vorm van een uitvoeringsplan (opleveringsbeslissing in Figuur 6). Het doel is om het project zo efficiënt mogelijk te realiseren, terwijl tegelijkertijd rekening wordt gehouden met technische eisen, veiligheid en de omgeving (Halter, Groenouwe, & Tonneijck, 2018).

Voordat met de uitvoering kan worden begonnen, moet eerst een aannemer worden geselecteerd die verantwoordelijk wordt voor het uitvoeren van de werkzaamheden. Dit gebeurt via een

aanbestedingsprocedure waarbij de opdrachtgever een geschikte opdrachtnemer kiest. Zodra de aannemer is geselecteerd, wordt bepaald hoe de samenwerking tussen opdrachtgever en opdrachtnemer wordt georganiseerd. Dit gebeurt door middel van een contractvorm waarin verantwoordelijkheden, taken en risico's worden vastgelegd. In sommige projecten kiest de opdrachtgever voor een traditionele contractvorm, waarbij het ontwerp door de opdrachtgever wordt gemaakt en de aannemer verantwoordelijk is voor de uitvoering. In andere gevallen wordt gekozen voor een geïntegreerde contractvorm, waarbij de aannemer ook een rol heeft in het ontwerp. Daarnaast bestaan er contractvormen waarbij de opdrachtnemer ook verantwoordelijk is voor het onderhoud van de waterkering gedurende een langere periode. De keuze voor een contractvorm heeft invloed op de manier waarop het project wordt georganiseerd en uitgevoerd.

Bij de uitvoering van dijkversterkingen vormen verschillende eisen en randvoorwaarden een belangrijk uitgangspunt. Het belangrijkste uitgangspunt is het waarborgen van de waterveiligheid. Tijdens de uitvoeringsfase kunnen werkzaamheden zoals ontgravingen, het aanbrengen van grond of het tijdelijk verwijderen van bekleding namelijk invloed hebben op de stabiliteit en het waterkerend vermogen van de dijk. Daarom moet gedurende de uitvoering worden gecontroleerd of de veiligheid van het achterland voldoende gewaarborgd blijft. Daarnaast gelden er eisen met betrekking tot de kwaliteit van de gebruikte materialen en de uitvoering van het grondwerk. Zo moet bijvoorbeeld worden gecontroleerd of de toegepaste grond voldoet aan de gestelde kwaliteitseisen en of de werkzaamheden volgens het ontwerp worden uitgevoerd. Ook gelden er eisen voor het uiteindelijke profiel van de dijk, zoals tolerantie-eisen voor hoogte en vorm. Verder moet bij de uitvoering rekening worden gehouden met zettingen die kunnen optreden na het ophogen van de dijk. Door bijvoorbeeld een beperkte overhoogte aan te brengen kan worden gecompenseerd voor deze zettingen, zodat de dijk na verloop van tijd het gewenste profiel behoudt.

Nadat de aannemer is geselecteerd en het contract is vastgesteld, kan worden gestart met de verdere voorbereiding van de werkzaamheden. In de voorbereidingsfase verzamelt en bestudeert de aannemer alle beschikbare projectinformatie om het werk goed te kunnen organiseren. Voor de uitvoerende partijen is op dat moment een groot aantal documenten beschikbaar waarin de randvoorwaarden voor het project zijn vastgelegd. Deze documenten bevatten onder andere ontwerptekeningen, technische rapportages en resultaten van uitgevoerde onderzoeken. Daarnaast zijn ook milieueffectrapportages, vergunningen en informatie over kabels en leidingen beschikbaar. Verder wordt informatie aangeleverd over grondverwerving, eigendomssituaties en betrokken partijen in de omgeving. Op basis van deze informatie en eventueel aanvullend onderzoek stelt de aannemer een uitvoeringsplan op (Projectbeslissing in Figuur 6).

Wanneer de voorbereiding is afgerond en alle benodigde maatregelen zijn getroffen, kan worden gestart met de daadwerkelijke uitvoering van de werkzaamheden. Een groot deel van deze werkzaamheden bestaat uit grondwerk, omdat dijkversterking vaak gepaard gaat met het aanpassen van het dijkprofiel. Dit kan bijvoorbeeld gebeuren door het verhogen van de dijk, het verbreden van het talud of het aanbrengen van stabiliteitsmaatregelen. Tijdens het grondwerk wordt gebruikgemaakt van verschillende soorten materieel, zoals graafmachines, bulldozers en walsen. De grond wordt meestal in lagen aangebracht en vervolgens verdicht om de gewenste sterkte en stabiliteit te bereiken. Omdat grond een natuurlijk materiaal is, kunnen de eigenschappen ervan variëren afhankelijk van factoren zoals samenstelling, vochtgehalte en verdichting. Hierdoor moet tijdens de uitvoering zorgvuldig worden gecontroleerd of de aangebrachte grond voldoet aan de gestelde kwaliteitseisen.

Tijdens de uitvoering van dijkprojecten kunnen verschillende risico's optreden. Deze risico's kunnen bijvoorbeeld betrekking hebben op de bodemopbouw, de stabiliteit van de dijk, de planning of de invloed

van werkzaamheden op de omgeving. Daarom wordt binnen dijkprojecten gebruikgemaakt van risicomanagement. Bij risicomanagement worden mogelijke risico's geïdentificeerd, geanalyseerd en beheerst. Door risico's vroegtijdig in kaart te brengen kunnen maatregelen worden genomen om problemen tijdens de uitvoering te voorkomen of te beperken. Dit proces wordt gedurende het gehele project herhaald en aangepast wanneer nieuwe informatie beschikbaar komt.

Wanneer de technische werkzaamheden zijn afgerond, worden de uitgevoerde werkzaamheden gecontroleerd om te bepalen of deze voldoen aan de gestelde eisen. Hierbij wordt gekeken naar de kwaliteit van het grondwerk, de stabiliteit van de constructie en de correcte uitvoering van technische maatregelen. Na deze controles kan het project formeel worden opgeleverd aan de opdrachtgever en kan de waterkering in gebruik worden genomen.

Ook deze fase is belangrijk voor de realisatie van taaie dijken. Hoewel de ontwerpkeuzes al vastliggen heeft de uitvoering veel invloed op de werkelijke taatheid van de dijk. Met name in het grondwerk bepaalt de kwaliteit van uitvoering in sterke mate de erosiebestendigheid van klei.

4 METHODOLOGISCHE AANPAK

In dit hoofdstuk wordt de aanpak beschreven die is gebruikt om de verschillende concepten voor taaie dijken systematisch te analyseren. Dit evaluatiekader vormt de kern van dit rapport, en wordt gepresenteerd in de vorm van een tabel. De verschillen tussen taaie dijken en traditionele dijken worden daarin voor verschillende taaie dijkconcepten (horizontale as) geïnventariseerd voor een uitgebreide set aspecten (verticale as).

4.1 Ontwikkeling van taaie dijkconcepten (horizontale as)

Om het concept van taaie dijken concreet te maken, is het nodig om inzicht te krijgen in hoe een taaie dijk eruit kan zien. Tijdens een workshop is samen met een deelgroep van betrokken dijkprofessionals en onderzoekers verkend hoe een 'taaaie' dijk vorm kan krijgen (zie in bijlage C).

In deze sessie zijn, op basis van hun ervaring en kennis, in totaal 11 verschillende concepten en maatregelen geïdentificeerd die kunnen bijdragen aan het vertragen van faalprocessen, het vergroten van de reststerkte en het beperken van de gevolgen van een doorbraak. Vervolgens zijn nog vijf aanvullende concepten ontwikkeld.

Om structuur aan te brengen, zijn de concepten in dit rapport geclusterd in vier hoofdgroepen. Deze worden geïntroduceerd en volledig weergegeven in hoofdstuk 5.

4.2 Ontwikkeling van een evaluatiekader (verticale as)

Het is niet voldoende om alleen te weten hoe een taaie dijk eruit kan zien. Voor professionals is het vooral van belang om te begrijpen hoe het realiseren van taaie dijken en/of het vertaaien van bestaande dijken verschilt van een traditionele dijkversterking, zowel in het ontwerp als in de uitvoering.

Om dit te bereiken, zijn in eerste instantie ontwerp- en uitvoeringsaspecten opgesteld op basis van de kennis en ervaring binnen het projectteam van de HAN. Deze eerste selectie is vervolgens tijdens een online werksessie met een deelgroep van betrokken dijkprofessionals kritisch doorgenomen en er zijn al discussies gestart over hoe taaie dijken er kunnen verschillen van traditionele dijken. Tijdens een tweede sessie zijn dan de bestaande aspecten verder aangescherpt door ze te herformuleren, zijn nieuwe aspecten toegevoegd en zijn overlappende aspecten samengevoegd. Er is toen ook gekeken naar een eerste indeling van de aspecten in categorieën.

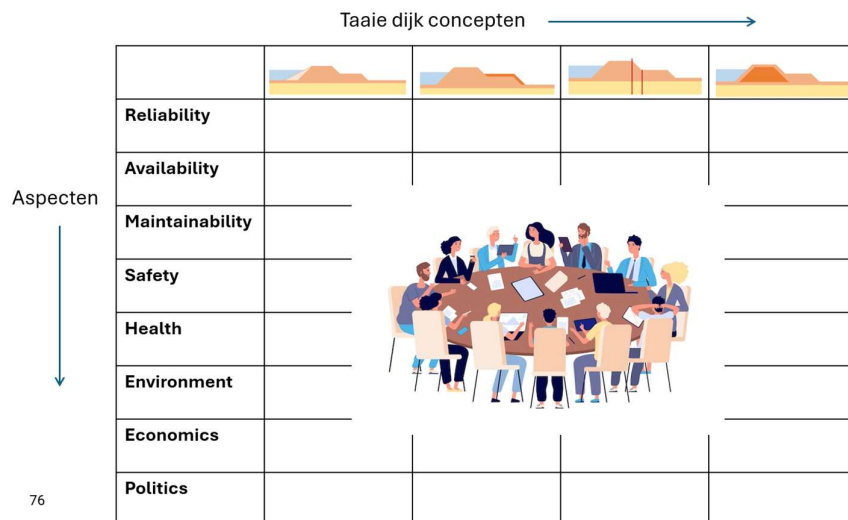
Op deze manier is een samenhangende en gedragen set van criteria ontstaan, die aansluit bij zowel praktijkervaring als inhoudelijke expertise. Voorbeelden van dergelijke aspecten zijn onder andere technische robuustheid, beheerbaarheid en ruimtelijke inpassing.

Om deze set van aspecten verder te structureren en te verankeren in een bestaand en breed toegepast kader, is gezocht naar een geschikt raamwerk dat aansluit bij de dagelijkse praktijk binnen de sector. Hierbij is gekozen voor het RAMSHEEP-raamwerk. De eerder geïdentificeerde aspecten zijn vervolgens ondergebracht binnen de verschillende categorieën van dit raamwerk, waardoor een consistente en systematische indeling is ontstaan.

Voor een volledig overzicht van alle aspecten en hun indeling binnen het RAMSHEEP-raamwerk wordt verwezen naar bijlage A.

4.3 Tabel maken en invullen

De laatste stap in de ontwikkeling van het evaluatiekader was het opstellen van een tabel, waarin de 16 geïdentificeerde taaie dijkconcepten op de horizontale as zijn geplaatst en de ontwerp- en uitvoeringsaspecten ingedeeld in het RAMSHEEP raamwerk op de verticale as (zie een schematische opzet in Figuur 8). Deze opzet vormde de basis voor de verdere uitwerking en toetsing van de methodiek. Het doel was om per taaie dijkconcept inzichtelijk te maken hoe dit per aspect verschilt van een traditionele dijkversterking.



Figuur 8: Schematische opzet van het evaluatiekader voor taaie dijkconcepten.

Vervolgens is één taaie dijkconcept geselecteerd (één kolom), waarvoor alle aspecten systematisch zijn ingevuld. Dit diende als eerste verkenning om te toetsen of de gekozen aanpak werkbaar was en om een eerste inzicht te verkrijgen in de verschillen tussen taaie dijken en traditionele dijkversterking.

In de tweede sessie met de deelgroep (zie par. 4.2) is de aanpak verder verdiept door voor een tweede taaie dijkconcept alle aspecten uit te werken. Daarnaast is één aspect geselecteerd en voor alle taaie dijkconcepten beschreven hoe deze zich op dat specifieke aspect onderscheiden van een traditionele dijkversterking.

Op basis van de tot dan toe ingevulde cellen, twee volledige kolommen en één rij, zijn eerste patronen en overeenkomsten tussen de concepten geïdentificeerd. Hieruit bleek dat de 16 concepten konden worden geclusterd in vier hoofdgroepen. Deze clustering maakte het mogelijk om er een overzichtelijk tabel te maken, waarin de belangrijkste verschillen geïdentificeerd konden worden.

Om de verschillen tussen taaie dijkconcepten en traditionele dijkversterking expliciet en inzichtelijk te maken voor de lezer, is daarnaast een aparte kolom voor traditionele dijkversterking toegevoegd. In

deze kolom is per aspect beschreven hoe een traditionele dijkversterking zich hiertoe verhoudt. Hiermee wordt een referentiekader geboden waartegen de taaie dijkconcepten kunnen worden afgezet. Voor een nadere toelichting op traditionele dijkversterking wordt verwezen naar hoofdstuk 2.

Ten slotte is de volledige tabel ingevuld op basis van de vier onderscheiden groepen van taaie dijkconcepten. De uiteindelijke resultaten van deze analyse zijn opgenomen in tabel 2 (zie in bijlage B).

4.4 Afleiding van hoofdlijnen en vertaling naar praktische aandachtspunten

Op basis van de ingevulde overzichtstabel zijn in deze stap de belangrijkste hoofdlijnen en aandachtspunten afgeleid. De tabel, waarin de taaie dijkconcepten systematisch zijn vergeleken met traditionele dijkversterking vormt hierbij het analytisch fundament. Door de ingevulde cellen onderling te vergelijken, zijn patronen, overeenkomsten en onderscheidende kenmerken geïdentificeerd.

Om tot deze hoofdlijnen te komen, zijn alle aspecten, die via het RAMSHEEP-raamwerk ingedeeld zijn, systematisch doorgenomen. Daarbij is per aspect gekeken naar de grote lijnen en overeenkomsten tussen de verschillende groepen taaie dijkvarianten. Op deze manier konden generieke patronen worden onderscheiden die niet alleen voor individuele varianten gelden, maar breder toepasbaar zijn op het concept van taaie dijken als geheel.

Vervolgens zijn deze hoofdlijnen samengevat en geclusterd. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen aspecten waarin taaie dijken gunstiger scoren dan traditionele dijkversterkingen, aspecten die een andere benadering vereisen, en aspecten die extra aandacht vragen of nog onzekerheden bevatten. Deze indeling heeft geholpen om structuur aan te brengen in de grote hoeveelheid informatie en om de belangrijkste inzichten op een overzichtelijke manier samen te vatten.

De resultaten van deze stap zijn uitgewerkt in hoofdstuk 7, waarin de hoofdlijnen en generieke patronen worden beschreven. Dit hoofdstuk heeft daarmee een beschrijvend en analyserend karakter en vormt de brug tussen de gedetailleerde tabelanalyse en de toepassing in de praktijk.

Vervolgens zijn de inzichten uit hoofdstuk 7 vertaald naar praktische aandachtspunten, zoals opgenomen in hoofdstuk 8. In deze stap zijn de geïdentificeerde aandachtspunten geconcretiseerd tot toepasbare richtlijnen en tips voor professionals. Daarbij is onderscheid gemaakt tussen aandachtspunten voor het ontwerp en voor de uitvoering van taaie dijken. Hiermee wordt de stap gemaakt van analyse naar handelingsperspectief, zodat de opgedane kennis daadwerkelijk toepasbaar wordt in dijkversterkingsprojecten.

5 TAAIE DIJKCONCEPTEN

Zoals beschreven in hoofdstuk 4 worden in dit hoofdstuk verschillende concepten voor taaie dijken uitgewerkt. Deze concepten vormen de horizontale as van tabel 2 (zie in bijlage B). De concepten zijn geclusterd in vier hoofdgroepen. Deze indeling is gebaseerd op de locatie in het dijkprofiel waar de maatregel aangrijpt en het type mechanisme waarmee het gedrag van de dijk wordt beïnvloed.

De vier onderscheiden groepen zijn:

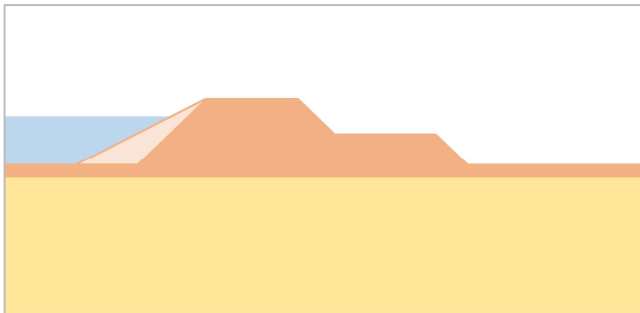
- aanpassingen aan het buitentalud
- aanpassingen aan het binnentalud
- varianten op dijklichaamniveau
- constructieve varianten

Opgemerkt wordt dat deze indeling niet strikt is. In de praktijk hebben de varianten effect op meerdere faalmechanismen tegelijk en kunnen zij daardoor passen bij verschillende categorieën. De indeling is daarom bedoeld als hulpmiddel om de varianten systematisch te beschrijven.

5.1 Varianten aan het buitentalud

Varianten in deze categorie zijn gericht op het verminderen van de hydraulische belasting op de dijk. Door golfbelasting en erosie te beperken, wordt de kans op schade aan de bekleding verkleind, en bevat het dijklichaam meer materiaal en daardoor meer erosiebestendige capaciteit.

Variant: Verflauwen buitentalud



Bij deze variant wordt het buitentalud flauwer gemaakt, bijvoorbeeld door een steile helling te vervangen door een meer geleidelijke helling.

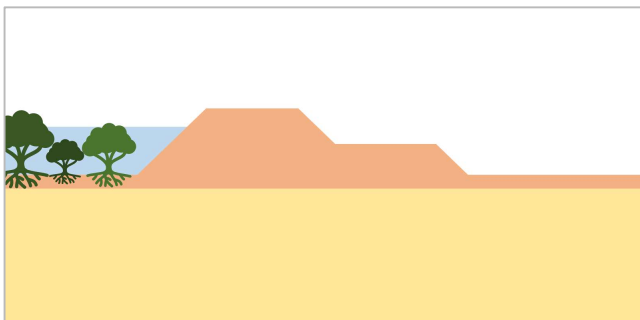
Effecten:

- Golven breken eerder en geleidelijker op het talud.
- De golfenergie per oppervlak wordt kleiner.
- De kans op erosie van klei en gras neemt af.

Waarom dit taaier is:

- De belasting op de dijk wordt gespreid over een groter oppervlak.
- Eventuele schade ontwikkelt zich geleidelijker.
- Het systeem heeft meer reststerkte wanneer lokale erosie optreedt.

Variant: Drempeel buitendijks door middel van voorland of vegetatie



Bij deze variant wordt vóór de dijk een drempel, voorland of vegetatiezone aangelegd, bijvoorbeeld met struiken of bomen.

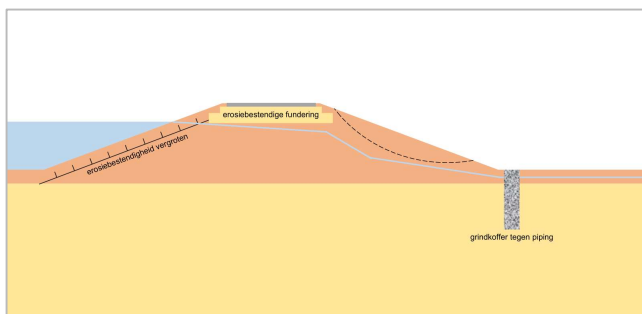
Effecten:

- Vegetatie zorgt voor extra weerstand tegen golven en stroming.
- Golven worden afgeremd en deels gebroken voordat ze het talud bereiken.
- Sediment kan worden vastgehouden, waardoor het voorland stabiel wordt.

Waarom dit taaier is:

- De belasting op de dijk wordt al vóór het talud verminderd, waardoor de relatieve erosiebestendigheid toeneemt.

Variant: Erosiebestendigheid buitenzijde opwaarderen



Bij deze variant wordt de buitenzijde van de dijk op meerdere niveaus versterkt. Dit gebeurt door het vergroten van de erosiebestendigheid van het buitentalud, het aanbrengen van een erosiebestendige weg-fundering en het toepassen van een grindkoffer als filterconstructie tegen piping aan de binnenzijde.

Effecten:

- De weerstand tegen erosie van het buitentalud neemt toe.
- De kans op uitspoeling aan de kruin van de dijk wordt verkleind door de weg-fundering.
- De kans op piping wordt beperkt door de aanwezigheid van de grindkoffer.

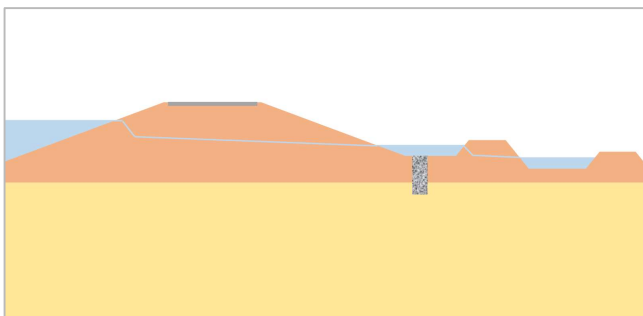
Waarom dit taaier is:

- Meerdere faalmechanismen worden gelijktijdig vertraagd.
- Schade aan de buitenzijde leidt minder snel tot interne instabiliteit.
- Het faalproces verloopt geleidelijker door de combinatie van maatregelen.

5.2 Varianten aan het binnentalud/binnenzijde

Deze varianten richten zich op de stabiliteit van het binnentalud en het gedrag van de dijk bij hoge waterstanden. Ze beïnvloeden met name faalmechanismen zoals macro-instabiliteit.

Variant: Freatische lijn getrapt maken



Bij deze variant wordt het binnentalud zodanig ingericht dat de freatische lijn trapsgewijs verloopt. Dit kan worden bereikt door lagen met verschillende doorlatendheid of door drainageconstructies.

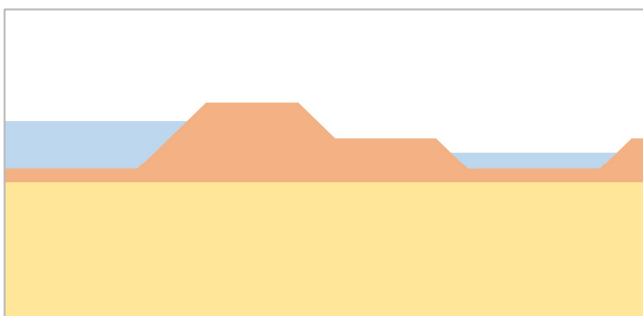
Effecten:

- De freatische lijn in de dijk ligt hoger.
- De tegendruk in het eerste compartiment biedt extra tegendruk.

Waarom dit taaier is:

- Er ligt een drempel in het systeem waardoor (mits stabiel) de instroomcapaciteit wordt beperkt.

Variant: Gecontroleerde waterberging met nooddijk



Bij deze variant wordt bij extreme omstandigheden bewust een hogere waterstand achter de dijk toegestaan, gecombineerd met het aanleggen van een nooddijk of secundaire kering aan de binnenzijde.

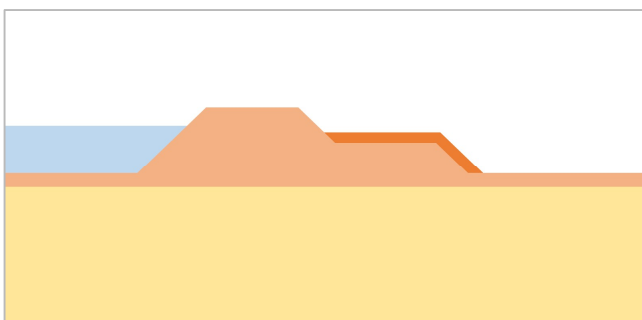
Effecten:

- Water wordt tijdelijk vastgehouden of gecontroleerd verspreid over een groter gebied.
- De tegendruk in het compartiment biedt extra tegendruk.

Waarom dit taaier is:

- Er ligt een hoge drempel in het systeem waardoor (mits stabiel) de instroomcapaciteit sterk wordt beperkt.
- De gevolgen van een doorbraak worden beperkt en gecontroleerd.

Variant: Binnenzijde verhogen met klei



Bij deze variant wordt het binnentalud en/of de berm aan de binnenzijde van de dijk versterkt met een kleilaag.

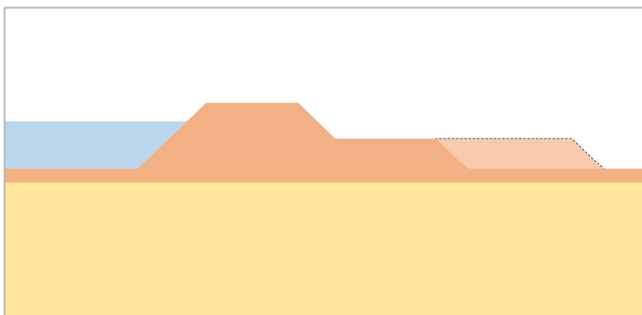
Effecten:

- Het binnentalud wordt beter beschermd tegen erosie, het fungeert als erosiebestendige drempel.

Waarom dit taaier is:

- De kleilaag vertraagt erosieprocessen.
- Schade ontwikkelt zich minder snel tot een doorbraak.

Variant: Berm aanleggen



Bij deze variant wordt aan de binnenzijde van de dijk een berm van grond aangebracht, meestal ter hoogte van de teen van het binnentalud.

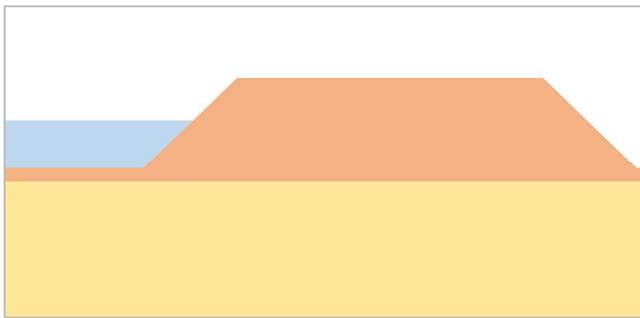
Effecten:

- Extra gewicht en steun aan de landzijde van het talud.
- Toename van de stabiliteit.
- Minder gevoeligheid voor afschuiving en piping.

Waarom dit taaier is:

- De berm blijft, zelfs bij beperkte erosiebestendigheid, langer fungeren als drempel.

Variant: Deltadijk



Bij deze variant wordt de dijk sterk verbreed.

Effecten:

- De faalpaden worden veel belangrijker ten opzichte van de faalmechanismen.
- Er ontstaat extra ruimte voor het opvangen van vervormingen en zettingen.

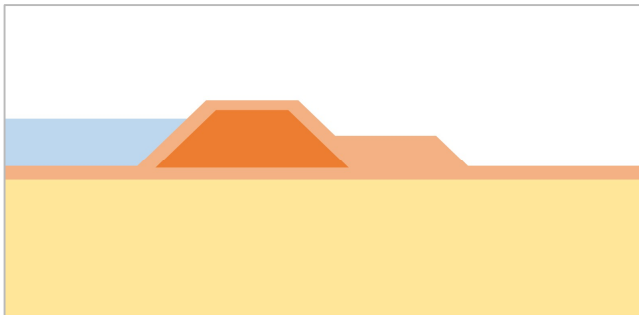
Waarom dit taaier is:

- De grotere massa vergroot de reststerkte en erosie bestendigheid van de dijk.
- Faalpaden ontwikkelen zich langzamer en minder abrupt.
- Lokale verzwakkingen leiden minder snel tot een doorbraak.

5.3 Varianten op dijklichaamniveau

Deze categorie omvat varianten die het gedrag van de dijk als geheel beïnvloeden. Dit gebeurt door aanpassingen in massa, opbouw of doorlatendheid van het dijklichaam. In tegenstelling tot lokale maatregelen grijpen deze varianten in op het geotechnisch functioneren van de dijk.

Variant: Kern van klei



Bij deze variant wordt de kern van de dijk opgebouwd uit klei of vervangen door klei.

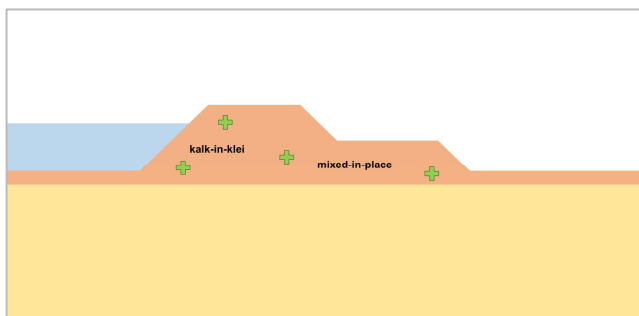
Effecten:

- Lagere doorlatendheid.
- Minder kans op interne erosie.

Waarom dit taaier is:

- De erosiebestendigheid van het dijklichaam wordt sterk vergroot.

Variant: Bestaande grond opwaarderen



Bij deze variant wordt de bestaande grond verbeterd zodat deze betere geotechnische eigenschappen krijgt.

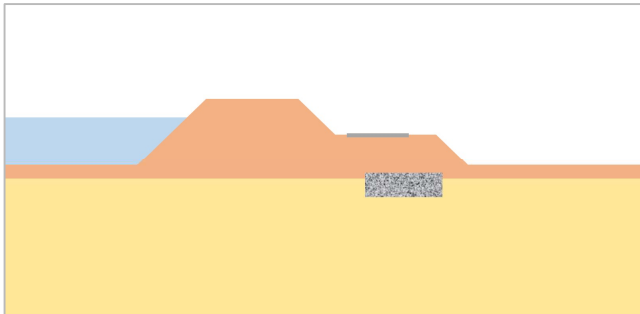
Effecten:

- Hogere erosie bestendigheid en stabiliteit.

Waarom dit taaier is:

- Grotere belastbaarheid van het materiaal.
- Langzamere ontwikkeling van schade.

Variant: Belastingsverhoging met verkeersweg en grindkoffer



Bij deze variant wordt een verkeersweg op de dijkberm aangelegd, gecombineerd met een grindkoffer in de ondergrond. De grindkoffer zorgt voor drainage en verlaagt daarmee de freatische lijn in de dijk.

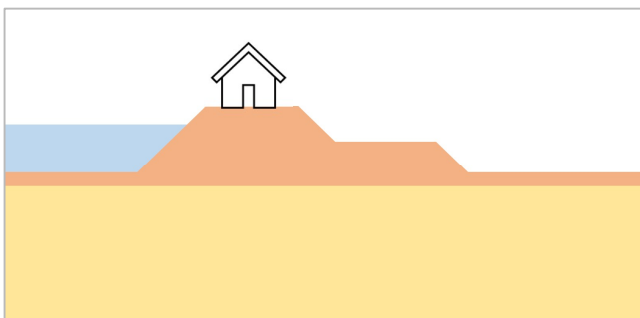
Effecten:

- De grindkoffer bevordert drainage en verlaagt de freatische lijn en dus de waterspanning in de ondergrond.
- De combinatie vermindert de kans op piping en stabiliteitsproblemen.

Waarom dit taaier is:

- De weg op de berm zorgt voor een erosie bestendige laag, en daarmee voor bescherming van de berm, die als drempel fungeert in overstromingssituaties.

Variant: Belastingverhoging door bebouwing



Bij deze variant wordt bebouwing of infrastructuur op de dijk geplaatst.

Effecten:

- De extra belasting verhoogt de verticale spanning in de dijk.
- De dijk wordt multifunctioneel gebruikt.

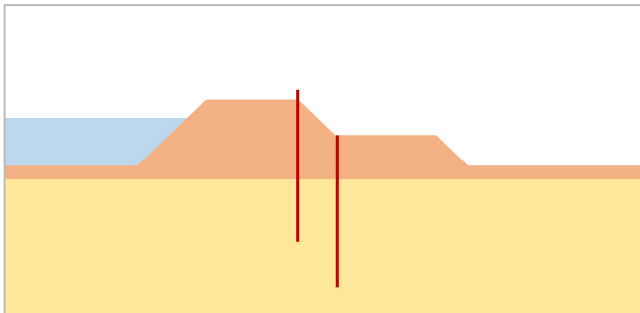
Waarom dit taaier is:

- Mits daarop ontworpen, fungeert de bebouwing als erosie bestendige bedekking van de dijk kruin. Denk bijvoorbeeld aan lintbebouwing aaneengesloten, welke golfaanval remt en bij schade ook een “puinlaag” vormt die de dijk beschermt.
- Overstromend water kan tot meer erosie leiden langs het object. Bebouwing (ofwel een NWO) leidt daarom veelal juist tot een minder taaie dijk. Hierbij zijn dan dus aanvullende maatregelen nodig om erosie om objecten heen te beperken (zoals aansluitingen met klei en/of zand cement stabilisatie onder bestrating).

5.4 Constructieve varianten

Constructieve varianten maken gebruik van technische elementen zoals damwanden en ankers die actief krachten opnemen, en daarmee het faalproces beïnvloeden. Deze maatregelen maken het mogelijk om het gedrag van de dijk onder belasting gericht te sturen.

Variant: Constructief scherm



Een constructief scherm bestaat uit wanden die in het binnentalud of in de kruin van de dijk worden geplaatst.

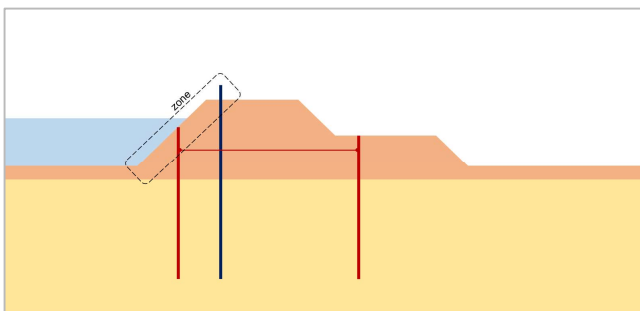
Effecten:

- De constructie neemt een deel van de krachten over.
- Minder vervorming en instabiliteit.

Waarom dit taaier is:

- Extra interne versterking van de dijk.
- Er blijft na falen een damwand staan die als drempel fungeert.

Variant: Verhoogde damwand tegen golfoverslag



Bij deze variant wordt binnen het dijklichaam een constructieve zone aangebracht met damwanden of vergelijkbare verticale elementen, eventueel met een horizontale verbinding.

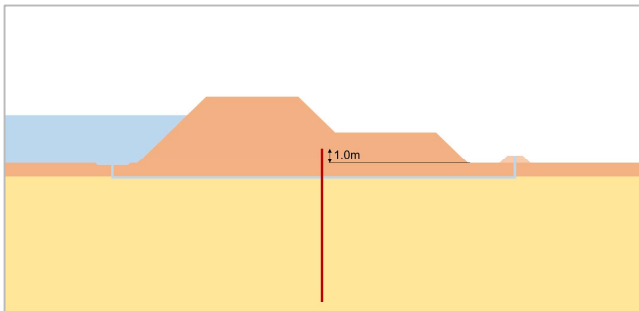
Effecten:

- De constructie neemt een deel van de krachten over.
- Minder vervorming en instabiliteit.
- Minder water slaat over de dijk en lagere belasting op het binnentalud (bij verhoogde damwand).
- Minder kans op erosie door overslag.

Waarom dit taaier is:

- Extra interne versterking van de dijk.
- Er blijft na falen een damwand of kistdam staan die als drempel fungeert.

Variant: Voorwaardelijke damwand als faalpadbeheersing



Bij deze variant wordt een damwand binnen het dijklichaam aangebracht, waarbij de bovenkant zich ongeveer 1 meter boven het maaiveld bevindt, maar onder het dijkoppervlak blijft.

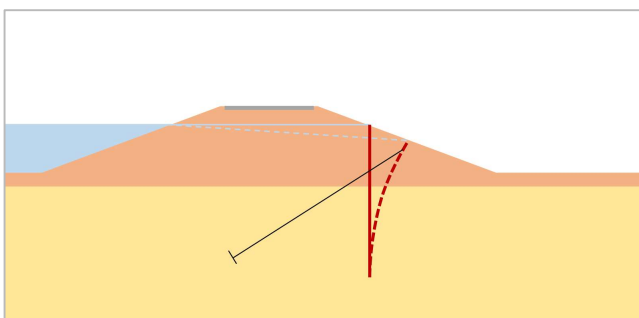
Effecten:

- De damwand verhoogt de interne stabiliteit.
- In combinatie met een voorland of berm wordt piping tegengegaan of sterk geremd.

Waarom dit taaier is:

- Faalmechanismen worden gestuurd en vertraagd in plaats van volledig voorkomen.
- De damwand vormt een drempel na het faalproces.

Variant: Adaptieve verankering bij vervorming



Bij deze variant wordt een damwand gecombineerd met een verankeringsstelsel dat pas actief wordt wanneer de dijk begint te vervormen. Het anker levert pas weerstand op het moment dat dit nodig is.

Effecten:

- De stabiliteit neemt toe zodra vervorming optreedt.
- Grondverplaatsing wordt beperkt door activering van het ankersysteem.
- De damwand en verankering beheersen samen het faalproces.

Waarom dit taaier is:

- De dijk behoudt langer zijn stabiliteit bij extreme belasting.
- Na falen fungeert de damwand als drempel en beperkt zo de gevolgen.

6 HET RAMSHEEP-RAAMWERK

Binnen het Nederlandse waterbeheer en infrastructuur speelt risicogestuurd werken een centrale rol. De *Handreiking Prestatiegestuurde Risicoanalyses (PRA)* van Rijkswaterstaat beschrijft een methodiek waarmee prestaties van infrastructuursystemen, zoals dijken, systematisch kunnen worden geanalyseerd en geborgd (Rijkswaterstaat, 2018). Het doel van deze aanpak is om aantoonbaar te maken dat objecten gedurende hun gehele levenscyclus voldoen aan gestelde prestatie-eisen, en om tegelijkertijd risico's en kosten inzichtelijk te maken.

Een belangrijk fundament onder deze methodiek is het gebruik van de zogenoemde RAMSHEEP-aspecten.

Het acroniem RAMSHEEP staat voor en bestaat uit de volgende negen aspecten:

- Reliability (betrouwbaarheid)
- Availability (beschikbaarheid)
- Maintainability (onderhoudbaarheid)
- Safety (veiligheid)
- Security (beveiliging)
- Health (gezondheid)
- Environment (milieu)
- Economics (kosten/economische aspecten)
- Politics (wet- en regelgeving, beleid, juridische zaken)

Deze aspecten vormen samen een integraal evaluatiekader voor de prestaties van infrastructuursystemen.

Binnen dit rapport is het RAMSHEEP-raamwerk gebruikt als structurerend raamwerk om de verschillen tussen taaie dijkconcepten en traditionele dijkversterking inzichtelijk te maken. Hierbij geldt dat:

- het raamwerk is toegepast om verschillen tussen taaie en traditionele dijken systematisch te kunnen duiden;
- de aspecten die in tabel 2 (zie in bijlage B) onder elk RAMSHEEP-criterium zijn opgenomen, projectspecifiek zijn opgesteld en door het projectteam zelf zijn gedefinieerd en ingedeeld;
- het raamwerk primair dient als hulpmiddel om de vergelijking te structureren, en niet als doel op zich.

7 HOOFDLIJNEN VOOR ONTWERP EN UITVOERING VAN TAAIE DIJKEN

In dit hoofdstuk worden de belangrijkste inzichten uit de analyse van de taaie dijkconcepten samengevat. Op basis van de systematische vergelijking in tabel 2 (zie in bijlage B) zijn overkoepelende patronen, verschillen en aandachtspunten geïdentificeerd. Daarbij wordt onderscheid gemaakt tussen aspecten waarin taaie dijken (a) gunstiger uitkomen dan traditionele dijkversterkingen, (b) een andere benadering vereisen dan gebruikelijk, en (c) andere aspecten die extra aandacht vragen en/of nog nader onderzoek behoeven. De nadruk ligt hierbij op het herkennen van generieke lijnen in gedrag, prestaties en randvoorwaarden, die richting geven aan het denken over taaie dijken, zonder direct in te zoomen op concrete handelingsperspectieven.

Bij het ontwerpen en uitvoeren van taaie dijken staat één principe centraal: het actief sturen op een gecontroleerd, vertraagd faalproces in plaats van uitsluitend het voorkomen van falen.

NB. Met traditionele versterking wordt hier bedoeld de varianten van dijkversterking die in de huidige ontwerppraktijk gangbaar zijn.

7.1 Aspecten waarin taaie dijken vaak gunstiger scoren dan traditionele versterking

Functionele betrouwbaarheid

Taaie dijken bieden in de meeste gevallen een hogere functionele betrouwbaarheid. Dit komt doordat:

- faalprocessen langzamer verlopen;
- en er meer tijd ontstaat voor ingrijpen;
- er in omstandigheden waarbij de hoogwaterbelasting korter duurt (zoals bij zee en meren) het taaie faalproces langer duurt dan de hoogwaterbelasting.

Uitzonderingen: Tijdens de bouwfase zijn er echter taaie varianten, die tijdelijk meer kwetsbaar zijn dan de traditionele dijkversterking:

- varianten met een kleikern kennen een langere kwetsbare fase tijdens ontgraving en verwerking;
- constructieve varianten kunnen leiden tot tijdelijke verzwakking van de dijk door ontgravingen en plaatsing.

Erosiebestendigheid

Veel varianten vergroten de erosiebestendigheid, bijvoorbeeld door:

- spreiding van belasting (flauwere taluds);
- sterkere materialen (klei, constructies);
- of aanvullende beschermingslagen.

Omgeving en ruimtelijke kwaliteit (medegebruik, omgevingskwaliteit, cultuurhistorie, ruimtebeslag, draagvlak)

Taaie dijken bieden vaak voordelen doordat:

- minder ruimte nodig is dan bij traditionele verbreding;
- bestaande dijkstructuren vaker behouden blijven;
- en kansen ontstaan voor natuurontwikkeling en multifunctioneel gebruik.

Uitzonderingen:

- zware oplossingen (klei, damwanden) kunnen beperkingen geven op de kruin;
- constructieve varianten vragen extra werkruimte tijdens uitvoering.

Biodiversiteit en milieu-effecten

Taaie dijken kunnen bijdragen aan:

- meer biodiversiteit (bijv. voorlanden, vegetatie, natte zones);
- minder ruimtebeslag, waardoor meer ruimte beschikbaar blijft voor natuur;
- minder materiaalgebruik (met name minder zand), waardoor transportbewegingen afnemen en de CO₂-uitstoot wordt beperkt.

Uitzonderingen:

- constructieve varianten (bijv. staal) hebben een hogere milieubelasting door hoge CO₂-uitstoot en energiegebruik;
- bij kleitoepassingen is geschikte klei niet altijd lokaal beschikbaar en moet deze vaak van verder worden aangevoerd.

Hydrologie

Taaie dijken kunnen in specifieke varianten hydrologisch gunstiger gedrag vertonen. Met name bij varianten met een kleikern geldt dat:

- schommelingen in grondwaterstanden binnen het dijklichaam worden gedempt;
- de interne waterdruk zich gelijkmatiger ontwikkelt;
- de freatische lijn daardoor stabiel en minder variabel is.

Logistieke haalbaarheid

In een deel van de gevallen is sprake van:

- minder grondtransport, doordat minder materiaal (met name zand) hoeft te worden aangevoerd en verwerkt;
- een beperktere impact op de omgeving tijdens de uitvoering door minder transportbewegingen en hinder.

Uitzonderingen:

- buitentalud-varianten zijn vaak afhankelijk van bereikbaarheid via water;

- kleitoepassingen vragen ruimte voor opslag en verwerking;
- soms zijn het aantal kuubkilometers wel groter, ook al is het aantal kuubs grond minder groot.

7.2 Aspecten die een andere benadering vereisen dan traditioneel

Faalpaden

Bij taaie dijken verschilt het dominante faalpad per type maatregel. Afhankelijk van de gekozen variant worden bepaalde faalmechanismen juist belangrijker of minder bepalend.

- **Buitentaludvarianten:** nadruk op erosie en bekledingsfalen; daarnaast aandacht voor buitenwaartse stabiliteit;
- **Binnentaludvarianten:** nadruk op binnenwaartse macrostabiliteit en poriëndrukontwikkeling; kans op piping neemt vaak af;
- **Varianten op dijklichaamniveau:** nadruk op interne processen zoals piping, scheurvorming (bij klei) en natte stabiliteit;
- **Constructieve varianten:** nadruk verschuift naar constructief falen (zoals rotatie of bezwijken van elementen), terwijl kans op piping en interne erosie vaak worden beperkt.

Materiaalkeuze & materiaalkwaliteit

Bij taaie dijken speelt materiaalkeuze een nog belangrijkere rol dan bij traditionele dijkversterking. Omdat het ontwerp gericht is op het vertragen van faalprocessen, is de kwaliteit en het gedrag van materialen direct van invloed op de effectiviteit van de maatregel.

Dit uit zich onder andere in:

- **Binnentaludvarianten:** omdat schade aan de dijk niet direct wordt geassocieerd met falen, kan het binnentalud vaker worden blootgesteld aan overslag en erosie, waardoor de kwaliteit van de bekleding van groot belang is. Hier spelen ook effecten van structuurvorming (in klei) en invloed van klimaatverandering op materiaal degradatie;
- **Varianten op dijklichaamniveau: Alleen belangrijk voor varianten met kleikern:** de werking van de maatregel is sterk afhankelijk van de kwaliteit van de klei, zoals doorlatendheid, homogeniteit en verwerkbaarheid;
- **Constructieve varianten:** materialen zoals staal zijn gevoelig voor degradatie (bijvoorbeeld diktereductie), waardoor hoge kwaliteitseisen een belangrijke rol spelen. Met name de aansluiting van constructies is belangrijk, omdat faalpaden zich vaak op overgangen ontwikkelen.

Hydrologie, uitvoeringsrisico's en monitoring

Bij taaie dijken zijn hydrologisch gedrag, uitvoeringsrisico's en monitoring sterk met elkaar verweven en vragen zij om een integrale benadering. Maatregelen beïnvloeden de grondwaterstroming en waterdruk in en rond de dijk, wat directe gevolgen heeft voor zowel het ontwerp als de uitvoering. Dit brengt specifieke risico's en aandachtspunten met zich mee die gedurende het project gemonitord moeten worden.

- **Buitentalud- en binnentaludvarianten:** de uitvoering kan afhankelijk zijn van waterstanden (met name bij buitentaludvarianten) en vraagt aandacht voor risico's zoals onverwachte grondwaterstromen, verstoring van de bestaande stabiliteit en het onjuist functioneren van drainage (bijv. bij de variant freatische lijn), waardoor monitoring van grondwaterstanden noodzakelijk is;
- **Varianten op dijklichaamniveau: Alleen belangrijk voor varianten met kleikern:** door de hoge eisen aan de uitvoering, waaronder verdichting, vochtgehalte en homogeniteit, is monitoring van zettingen, scheurvorming en vochtgehalte noodzakelijk in verband met het krimp- en zwelgedrag van klei;
- **Constructieve varianten:** damwanden en andere constructieve elementen kunnen de grondwaterstroming beïnvloeden en opstuwning veroorzaken, wat vraagt om zorgvuldige positionering en een goede afstemming met de ondergrond, waarbij monitoring vaak indirect moet plaatsvinden, bijvoorbeeld via grondwatermetingen of controle van materiaalgedrag.

Niet-waterkerende objecten

Taaie dijkconcepten kunnen een grotere impact hebben op niet-waterkerende objecten in, op en aan het dijklichaam, zoals kabels en leidingen, wegen, bebouwing en drainagevoorzieningen.

- **Varianten op dijklichaamniveau:** tijdens de uitvoering kan (een deel van) de dijk worden ontgraven of aangepast, wat invloed heeft op aanwezige objecten zoals kabels en leidingen, funderingen van bebouwing, wegen of drainage, waardoor deze mogelijk moeten worden verlegd, verwijderd of tijdelijk buiten gebruik worden gesteld;
- **Constructieve varianten:** conflicten met kabels en leidingen kunnen ontstaan, wat aanvullende afstemming en maatregelen vereist.
- NB. De dijk zal vaker schade ondervinden dan doorbreken, en dus zullen de NWO's ook vaker beschadigd kunnen raken. In de meeste gevallen zal schade nog steeds zeldzaam zijn.

Toegankelijkheid voor onderhoud

De toegankelijkheid voor inspectie en onderhoud kan veranderen, met name bij buitentaludvarianten.

- **Buitentaludvarianten:** doordat maatregelen zich buitendijks bevinden, zijn inspectie en onderhoud vaker afhankelijk van waterstanden en getij en kan de bereikbaarheid beperkter zijn dan bij traditionele dijken.

Aanpasbaarheid / herstelbaarheid

De aanpasbaarheid en herstelbaarheid van taaie dijken verschilt per type maatregel en is vaak minder vanzelfsprekend dan bij traditionele oplossingen.

- **Buitentaludvarianten:** bij vegetatieoplossingen speelt beheer een belangrijke rol;
- **Varianten op dijklichaamniveau: Variant met kleikern:** herstel kan vaker nodig zijn, doordat klei gevoelig is voor scheurvorming en afbrokkeling en daarnaast kunnen zettingen (klink) optreden die in de tijd leiden tot aanpassingen van het dijkprofiel;

- **Varianten op dijklichaamniveau: Innovatieve (verkittende) oplossingen:** beperkte praktijkervaring kan leiden tot onzekerheden bij herstel;
- **Constructieve varianten:** ondergrondse elementen zoals damwanden zijn lastig te onderhouden en flexibiliteit voor toekomstige aanpassingen is beperkt en vaak kostbaar.

Veiligheid tijdens uitvoering

De veiligheid tijdens de uitvoering vraagt bij taaie dijken extra aandacht.

- **Varianten op dijklichaamniveau: Alleen belangrijk voor innovatieve (verkittende) oplossingen:** innovatieve materialen kunnen gezondheids- en milieurisico's met zich meebrengen, bijvoorbeeld door chemische reacties tijdens verwerking;
- **Constructieve varianten:** kunnen aanvullende veiligheidsrisico's met zich meebrengen door het gebruik van zwaar materieel en complexe uitvoeringsmethoden.

Maakbaarheid en fasering

De maakbaarheid en fasering van taaie dijken zijn vaak complexer dan bij traditionele versterkingen en vragen daarom om een andere aanpak.

- **Buitentaludvarianten:** maatregelen zijn complexer door werken in of nabij water en afhankelijkheid van waterstanden;
- **Binnentaludvarianten: Alleen belangrijk voor variant freatische lijn:** hydrologische maatregelen zoals een getrapte freatische lijn vereisen nauwkeurige detaillering;
- **Varianten op dijklichaamniveau: Alleen belangrijk voor varianten met kleikern:** kleitoepassingen zijn gevoeliger voor weersomstandigheden en vragen meer controle tijdens uitvoering;
- **Constructieve varianten:** vereisen specialistisch materieel en expertise.

Materiaalbeschikbaarheid

De beschikbaarheid van materialen kan beperkend zijn voor bepaalde taaie dijkconcepten.

- **Varianten op dijklichaamniveau: Alleen belangrijk voor varianten met kleikern:** geschikte klei is vaak schaarser dan zand;
- **Varianten op dijklichaamniveau: Alleen belangrijk voor innovatieve (verkittende) oplossingen:** innovatieve materialen kunnen minder beschikbaar en/of duurder zijn.

Dit kan invloed hebben op de haalbaarheid en kosten van een ontwerp.

Juridisch

Taaie dijkconcepten kunnen leiden tot aanvullende juridische aandachtspunten.

- **Buitentaludvarianten:** maatregelen kunnen extra vergunningen vereisen, bijvoorbeeld in relatie tot natuurwetgeving of rivierbeheer en dijkbeheer;
- **Varianten op dijklichaamniveau:** kunnen aanvullende eisen stellen aan grondverzet en materiaalgebruik;
- **Constructieve varianten:** kunnen invloed hebben op vergunningen door trillingen, geluid en nabijheid van bebouwing, en door mogelijke conflicten met kabels en leidingen.

Politiek

De toepassing van taaie dijken kan bestuurlijke afwegingen vereisen.

- **Buitentaludvarianten:** maatregelen kunnen invloed hebben op buitendijkse gebieden, wat afstemming vraagt met belangen zoals natuur en rivierbeheer;
- **Varianten op dijklichaamniveau: Alleen belangrijk voor innovatieve (verkittende) oplossingen:** kunnen te maken krijgen met beleidsmatige beperkingen of terughoudendheid vanwege onzekerheden.

Verantwoordelijkheidsverdeling

De verantwoordelijkheidsverdeling kan veranderen, met name bij buitentaludvarianten.

- **Buitentaludvarianten:** beheer en onderhoud liggen grotendeels bij de waterbeheerder en er is vaak afstemming nodig met andere beheerders, zoals Rijkswaterstaat of natuurorganisaties.

7.3 Andere aspecten die extra aandacht vragen

Innovatieve (verkittende) oplossingen

Innovatieve, verkittende oplossingen vormen een potentieel interessante categorie binnen het ontwikkelen van taaie dijken. Tegelijkertijd geldt dat de kennisbasis en praktijkervaring met deze oplossingen momenteel nog beperkt zijn. Hierdoor gaan deze toepassingen gepaard met een relatief hoge mate van onzekerheid.

Deze onzekerheden hebben betrekking op verschillende aspecten. In de eerste plaats is nog onvoldoende inzicht beschikbaar in de relevante faalmechanismen voor dergelijke oplossingen, en de wijze waarop de sterkte ervan zich ontwikkelt in de tijd. Ook is de functionele betrouwbaarheid van dergelijke oplossingen onder uiteenlopende omstandigheden nog niet eenduidig vastgesteld.

Daarnaast spelen technische uitvoeringsrisico's een belangrijke rol. De verwerking van innovatieve materialen kan complex zijn en stelt specifieke eisen aan uitvoering, kwaliteitsborging en controle. Ook de milieueffecten van deze oplossingen zijn nog niet altijd volledig in beeld, bijvoorbeeld met betrekking tot emissies, uitloging of effecten op de omgeving.

Verder bestaan er onzekerheden rondom de logistieke haalbaarheid, zoals beschikbaarheid van materialen, transport en verwerking op locatie. Ook is nog onvoldoende duidelijk op welke wijze

monitoring het beste kan worden ingericht om het functioneren van deze oplossingen tijdens en na aanleg te volgen.

Tot slot speelt acceptatie een rol, zowel binnen de sector als bij bevoegd gezag en omgeving. Onbekendheid met het gedrag en de prestaties van deze oplossingen kan leiden tot terughoudendheid bij toepassing.

Taaigheid van de omgeving

Naast de eigenschappen van de dijk zelf is ook de rol van de omgeving van belang voor het realiseren van taai gedrag. Dit vraagt om een bredere, systeemgerichte benadering, waarbij taaigheid niet uitsluitend wordt beschouwd op het niveau van de dijk, maar als eigenschap van het gehele systeem.

De taaigheid van de omgeving kan worden gedefinieerd als de mate waarin de omgeving bijdraagt aan het vertragen van een dijkdoorbraak en het beperken van de gevolgen daarvan. Door de omgeving actief mee te nemen in het ontwerp, kan het faalproces worden beïnvloed en kunnen de uiteindelijke effecten van een doorbraak worden gereduceerd.

Verskillende omgevingsfactoren kunnen hierbij een rol spelen. De aanwezigheid van voorland, zoals kwelders of slikken, kan bijvoorbeeld leiden tot demping van hydraulische belasting in de vorm van golven en stroming. Hierdoor wordt de belasting op de dijk verminderd.

Daarnaast kan redundantie in het systeem bijdragen aan taaigheid. Voorbeelden hiervan zijn een tweede kering of aanwezige infrastructuur die als extra barrière fungeert. Dergelijke elementen kunnen ervoor zorgen dat de gevolgen van falen worden vertraagd of gedeeltelijk worden opgevangen.

Ook zijn er mogelijkheden voor gevolgbeperking binnen het achterliggende gebied. Denk hierbij aan compartimentering of de aanwezigheid van bergingsruimte, waardoor water tijdelijk kan worden opgeslagen en de impact van een doorbraak wordt verkleind.

De taaigheid van de omgeving heeft dus veel overeenkomsten met de meerlaagsveiligheid (Kok et al., 2017).

8 AANDACHTSPUNTEN VOOR ONTWERP EN UITVOERING VAN TAAIE DIJKEN

In dit hoofdstuk worden de inzichten uit hoofdstuk 7 vertaald naar praktische aandachtspunten voor de toepassing van taaie dijken in ontwerp en uitvoering. Waar hoofdstuk 7 zich richt op het identificeren van overkoepelende patronen en verschillen, ligt hier de nadruk op het bieden van concrete handvatten voor de praktijk. De geïdentificeerde aandachtspunten zijn uitgewerkt tot toepasbare richtlijnen en tips, gestructureerd naar twee categorieën: ontwerp en uitvoering. Hiermee wordt beoogd om professionals te ondersteunen bij het maken van onderbouwde keuzes en het beheersen van risico's bij het ontwerpen en realiseren van taaie dijken.

NB. Deze handreiking richt zich uitsluitend op de aspecten die bij taaie dijken extra aandacht vragen of wezenlijk verschillen van de gangbare praktijk. Als een dijk al taai gedrag vertoont kan het veiligheidsoordeel ook veranderen. Daar richt zich deze paragraaf niet op. Ook kan een voorgenomen versterking door een taai ontwerp leiden tot een aangepaste risico-prioritering. Ook daar richt deze paragraaf zich niet op.

8.1 Specifieke aandachtspunten voor het ontwerp van taaie dijken

Naast “voorkomen van falen” ook op “langzaam falen” ontwerpen

Kies voor ontwerpen die bewust sturen op trage faalpaden (zie alle taaie dijkconcepten in hoofdstuk 5).

- Faalkansbegroting: zet een risico afweging in om de faalkansbegroting af te leiden. Het resultaat daarvan is dat die faalpaden/risicopaden de meeste kansbijdrage krijgen die de minste risico's tot gevolg hebben. Dat zijn naar verwachting die paden die het beste te vertragen zijn;
- Erosiebestendige materialen: om doorbraak te kunnen vertragen moeten materialen worden gebruikt die niet of niet snel eroderen;
- Drempels: om de instroom na een doorbraak te kunnen verminderen spelen erosiebestendige drempels een belangrijke rol. Die moeten dan wel onder dergelijk omstandigheden stabiel zijn, dus niet alle huidige kleikernen zullen als drempel fungeren;
- Damwand: een damwand is een mogelijke drempel als het ontworpen is op overstroombaarheid. Dat is een aanvullend belastinggeval, en betekent vaak dat de damwand dieper moet steken of dikker moet zijn, of met een anker stabiel moet worden gemaakt.

Vervorming als ontwerpparameter en signaal

Het ontwerpen op trage faalpaden houdt in dat de reststerkte een expliciet onderdeel wordt van ontwerp en afwegingen. Vervorming en herstel na schade bij niet-falen maken daar onderdeel van uit. Vervorming vormt bij taaie dijken dus geen directe faalindicatie, maar een signaal dat via monitoring kan worden benut om tijdig maatregelen te treffen. Dat betekent echter ook dat er in de ontwerpfase extra informatie nodig is:

Werk expliciet uit hoe de dijk zich gedraagt:

- na initiële schade: dat zal voor een zand kern anders zijn dan voor klei, en het kan ook verschillen tussen verschillende klei categorieën; en dat geldt ook voor de diverse damwand-ontwerpen;
- bij tijdsafhankelijke belasting: de tijdsduur die de belasting aanhoudt speelt een belangrijke rol in relatie tot de erosie van de materialen, en de daartoe benodigde dijkdimensies (Den Heijer & Kok, 2022).

Bepaal daartoe:

- het vervormingsgedrag: hoe de vervorming verloopt afhankelijk van de belastingen, en tot welke vervorming van het profiel is er nog niet zoveel aan de hand (maw: wat is de vervormingscapaciteit) en welke vervorming acceptabel is in relatie tot de omgeving (gebouwen, andere functies etc.);
- potentie van noodmaatregelen: tot welk vervormingsprofiel is ingrijpen effectief en mogelijk zonder gevaar voor de medewerkers.

Monitoring en detectie integraal meenemen

Omdat vervorming en herstel een onderdeel is van de gehele veiligheidssysteem is monitoring daarvan ook een integraal onderdeel van het ontwerp van een versterkingsproject, en niet alleen van beheer.

Neem monitoring vanaf de start mee in het ontwerp. Dit is afhankelijk van het ontwerp van de kern en het gebruikte materiaal.

Richt monitoring specifiek op indicatoren die de veiligheidssituatie na initiële schade duiden, en op verouderingsaspecten:

- grondwaterstanden en poriëndruk;
- verlies van materiaal door interne erosie en piping;
- scheurvorming (met name bij klei);
- diktereductie bij constructieve elementen.

Koppel de monitoring aan waarschuwingssystemen en zorg voor handelingsperspectief.

Andere aandachtspunten

- Analyseer expliciet de effecten van maatregelen op de freatische lijn, grondwaterstroming en drainage, en voorkom ongewenste effecten zoals opstuwing en onverwachte stromingspaden;
- Borg materiaalgedrag en kwaliteit door gerichte eisen te stellen aan kritische materialen (zoals klei, staal en innovatieve materialen), en houd rekening met variabiliteit en degradatie in de tijd;
- Stem juridische en vergunningstechnische randvoorwaarden vroegtijdig af, met name bij buitendijkse maatregelen, natuurontwikkeling en constructieve ingrepen, in afstemming met bevoegd gezag en andere beheerders;
- Ontwerp met oog voor beheer, onderhoud en toekomstige aanpasbaarheid, door aandacht te besteden aan inspecteerbaarheid, onderhoudbaarheid en herstelmogelijkheden, en realiseer dat constructieve oplossingen vaak moeilijk aanpasbaar zijn en klei gevoelig is voor scheurvorming en zettingen.

8.2 Specifieke aandachtspunten voor de uitvoering van taaie dijken

Fasering als sturend principe

Bij de aanleg/aanpassing van dijken wordt al standaard rekening gehouden met het materiaalaanbod maar ook op mogelijke waterstanden, seizoensfluctuaties en hydrologische condities (zie hoofdstuk 2). Voor het ontwerp van een taaie dijk met klei zal extra aandacht geschonken moeten worden aan aanleggen en beheren van klei- of baggerspeciedepots, een verdichtingsplan met de nodige controles i.v.m. de gevoeligheid van dit materiaal voor vochtgehalte, homogeniteit, rijpheid en verwerkbaarheid. Bij de variant met constructieve elementen zijn een juiste positionering en interactie met de ondergrond van belang.

Hydrologische effecten tijdens uitvoering beheersen

Niet alle varianten van taaie dijken geven aanpassingen aan grondwaterstromen. Een aandachtspunt voor oplossingen met constructieve elementen is dat die opstuwings kunnen veroorzaken. Het monitoren van grondwaterstanden in combinatie met drainagevoorzieningen kan dan nodig zijn.

Extra aandacht voor veiligheid tijdens uitvoering

In het grondverzet, waarbij al gebruik wordt gemaakt van zware machines, is veiligheid altijd al belangrijk geweest. Extra aandacht moet worden besteed bij constructieve varianten en tijdelijke situaties waar stabiliteitsverlies door een combinatie van zetting en klink, grondwaterspanning bij o.a. ontgravingen en aanvullingen zich kunnen voordoen. Een veiligheidsanalyse per uitvoeringsfase is gewenst.

Goed plannen van materiaal en depotruimte

Naast een goede fasering met logische stappen die cruciaal zijn voor o.m. de beheersbaarheid en veiligheid is ook een gedetailleerde planning onontbeerlijk waardoor werkzaamheden goed op elkaar afgestemd worden. Activiteiten horen elkaar chronologisch goed op te volgen. Voor activiteiten met veel grondverzet is de beschikbaarheid (aanvoer), transportafstanden en eventuele depot locaties en ruimte voor materialen (vooral voor klei en baggerspecie) een expliciet onderdeel van de uitvoeringsplanning. Tekorten of overschotten van bulkmateriaal kunnen nadelig zijn voor de voortgang van het werk.

Continue monitoring tijdens als sturingsinstrument

Bij taaie dijken wordt aangeraden om te monitoren.

- Bij veel en zwaar grondverzet op wisselende ondergronden is het aan te raden dat zakbakens en piezometers worden geplaatst in en rond het werk.

- Bij veel verdichtingslagen, ten behoeve van de kwaliteit en veiligheid, zijn vervormingen van het dijklichaam en stabiliteit van de taluds de risico's die tijdens de uitvoering beheerst en dus gemonitord moeten worden.

Dat levert extra informatie (data) op die belangrijk is voor tijdige signalering van afwijkingen zodat in kritieke fasen beslissingen beter onderbouwd en daarop geanticipeerd kan worden. Bovendien geeft dat informatie over het gedrag en kwaliteit van aangebrachte materialen.

9 DISCUSSIE

Taaie dijken hebben duidelijke potentie als aanvullende benadering naast traditionele dijkversterking (HAN, 2026a; HAN, 2026b; HAN, 2026c). Tegelijkertijd roepen de bevindingen ook een aantal inhoudelijke en praktische vragen op over de toepasbaarheid binnen de huidige ontwerpraktijk.

Allereerst dient te worden opgemerkt dat de gekozen methodologische aanpak onzekerheden met zich meebrengt. In dit onderzoek is gebruikgemaakt van een kwalitatieve en conceptuele vergelijking binnen het RAMSHEEP-raamwerk, waarbij de beoordeling deels afhankelijk is van interpretatie en expert judgement. De indeling van aspecten en toekenning aan RAMSHEEP-criteria zijn uitgevoerd op basis van expert inschattingen. De waarderings op de aspecten zijn projectspecifiek, waardoor accenten in de praktijk kunnen verschuiven afhankelijk van aannames. Deze onzekerheden doen geen afbreuk aan de waarde van de analyse als verkennend en structurerend instrument voor de onderhavige studie.

Een belangrijk punt voor discussie is de aansluiting op het bestaande ontwerp- en uitvoeringsproces zoals beschreven in hoofdstuk 3. Dit proces is sterk ingericht op het voldoen aan normcondities en het minimaliseren van kosten, waarbij het voorkomen van falen centraal staat. De analyse (HAN, 2026c) laat echter zien dat taaie dijken juist waarde toevoegen door het vertragen van faalprocessen en het vergroten van reststerkte. Deze aspecten zijn momenteel slechts beperkt verankerd in de gangbare evaluatiekaders. Hierdoor bestaat het risico dat de meerwaarde van taaie dijken in de verkenningsfase onvoldoende wordt herkend en meegenomen in de afweging van alternatieven.

Bij taaie dijkconcepten is niet zozeer sprake van complexere initiële faalmechanismen, maar verschuift de aandacht deels naar de vervolg mechanismen, afhankelijk van de gekozen variant. Hierdoor worden bekende processen, zoals erosie, poriëndrukontwikkeling, scheurvorming of constructief gedrag, in een andere context bepalend voor het functioneren van de dijk. Deze verschuiving vraagt om andere kennis en ervaring, die in de huidige praktijk nog beperkt aanwezig is. Met name de interactie tussen hydrologisch gedrag, materiaalkeuze en uitvoering is niet altijd volledig onderbouwd met praktijkervaring. In de planuitwerkingsfase, waarin keuzes verder worden geconcretiseerd, kan dit leiden tot een voorkeur voor bewezen en gestandaardiseerde oplossingen, zoals ook impliciet wordt gestimuleerd binnen het proces uit hoofdstuk 3.

Ook de uitvoeringsfase brengt nieuwe aandachtspunten met zich mee. In tegenstelling tot traditionele dijkversterking, waarbij het proces relatief voorspelbaar is, vragen taaie dijkconcepten vaak om een hogere mate van beheersing tijdens uitvoering. Denk hierbij aan gevoeligheid voor waterstanden, eisen aan materiaalverwerking (bijvoorbeeld bij klei) en de toepassing van constructieve elementen. Bovendien kunnen tijdelijke risico's ontstaan, zoals lokale verzwakking van de dijk tijdens ontgravingen of het aanbrengen van maatregelen. Deze kunnen worden beheerst met een intensievere inzet van monitoring en risicomanagement dan gebruikelijk is binnen de huidige werkwijze.

Verder blijkt uit dit onderzoek dat binnen de beschouwde taaie dijkconcepten ook innovatieve varianten, zoals het opwaarderen van grond door verkitting, potentie hebben om het gedrag van de dijk te verbeteren, maar de kennisbasis en praktijkervaring zijn momenteel nog beperkt. Hierdoor bestaan er nog onzekerheden over het langetermijngedrag, de relevante faalmechanismen en de uitvoerbaarheid in de praktijk, wat vraagt om nader onderzoek en validatie.

Daarnaast laat het onderzoek zien dat ook de 'taaiheid' van de omgeving een belangrijke factor kan zijn. Door niet alleen de dijk zelf, maar ook de omgeving — zoals voorland of binnendijkse maatregelen

— mee te nemen, kan het faalproces verder worden vertraagd en kunnen de gevolgen van een doorbraak worden beperkt. Dit biedt potentie om de effectiviteit van taaie dijken verder te vergroten, maar vraagt nog om verdere uitwerking.

10 CONCLUSIE

Taaie dijken vormen een kansrijke en relevante aanvulling op de huidige manier van dijkversterking. Het fundamentele verschil met traditionele dijken ligt in de ontwerpfilosofie: waar de huidige praktijk zich primair richt op het voorkomen van falen, richten taaie dijken zich op het beheersen en vertragen van het faalproces. Hierdoor ontstaat meer tijd voor ingrijpen, wat leidt tot een hogere functionele betrouwbaarheid van de waterkering doordat er tijd is voor noodmaatregelen, en een lager risico omdat het overstromingsvolume wordt beperkt en er meer tijd is voor evacuatie.

Er is een inventarisatie gemaakt van mogelijke verschijningsvormen van taaie dijken, samengevat in vier groepen: aanpassingen aan het buitentalud, aanpassingen aan het binnentalud, varianten op dijklichaamniveau en constructieve varianten. De analyses van de vier groepen taaie dijk-varianten op een reeks ontwerp- en uitvoeringsaspecten, laten zien dat taaie dijken vaak gunstig scoren op aspecten zoals erosiebestendigheid, ruimtegebruik en multifunctionaliteit.

Voor concrete toepassing van taaigheid in het ontwerpproces en realisatie (aannemingscontracten) is het belangrijk dat de taaigheid ook wordt gewaardeerd. De toepassing vraagt om een andere benadering in ontwerp, uitvoering en beheer, met meer aandacht voor de dijkconstructie met bijvoorbeeld drempels, materiaalgedrag, hydrologie, monitoring en risicobeheersing. Dit betekent dat het ontwerp- en uitvoeringsproces daaraan moet worden aangepast, zodat naast faalkans ook reststerkte, faalpaden en gevolgbeperking (risicopaden) expliciet worden meegenomen. Daarvoor zijn ontwerprichtlijnen benodigd. Vervormingsgedrag zal moeten worden betrokken in het ontwerp, en de monitoring van vervorming in de uitvoering. Tevens vraagt de verwerkbaarheid van klei zowel aanpassingen qua planning als depotruimte.

Hoewel taaigheid nu nog niet in het ontwerpproces expliciet meegenomen kan worden, is het belangrijk om hier al wel rekening mee te houden in de lopende ontwerpen. Daarom is het belangrijk om de taaigheid in de bestaande dijk te herkennen als deze versterkt wordt, zodat deze taaigheid zo veel als mogelijk in tact kan blijven.

Voorliggend rapport laat zien dat ontwerp en uitvoering weliswaar anders is dan bij traditionele dijken, maar dat er geen grote belemmeringen zijn. Dit document biedt handvatten om taaie dijken daadwerkelijk toe te passen in de praktijk. In die zin kan deze handreiking worden gezien als een eerste praktisch overzicht voor dijkwerkers om taaigheid expliciet mee te nemen in projecten en zo bij te dragen aan een meer robuuste en toekomstbestendige waterveiligheidsaanpak.

REFERENTIES

Den Heijer, F., & Kok, M. (2022). Assessment of ductile dike behavior as a novel flood risk reduction measure. *Risk Analysis*, 1–16. <https://doi.org/10.1111/risa.14071>.

Den Heijer, F., Podt, M., & Rijke, J. (2022). Taaie dijken klimaatrobust, Projectplan in het kader van RAAK-Publiek 2022.

Halter, W., Groenouwe, I., & Tonneijck, M. (2018). *Handboek Dijkenbouw, Uitvoering, versterking en nieuwbouw*. Hoogwaterbeschermingsprogramma, HWBP.

HAN. (2026a). *Taaie dijken klimaatrobust - Definities. Ontwikkeling definities taaiheid en klimaatrobustheid*. Rapport No. 2026.174, F. den Heijer, Sustainable River Management, HAN University of Applied Sciences.

HAN. (2026b). *Taaie dijken klimaatrobust - Inventarisatie van potentieel taai gedrag in de Nederlandse dijken*. Rapport No. 2026.175, M. Podt, Sustainable River Management, HAN University of Applied Sciences.

HAN. (2026c). *Taaie dijken klimaatrobust - Rekenmethode, cases en stresstest*. Rapport No. 2026.176, F. den Heijer, Sustainable River Management, HAN University of Applied Sciences.

HWBP. (2014). *Handreiking Planuitwerking*. <https://www.hwbp.nl/documenten/2017/10/01/handreiking-planuitwerking>.

HWBP. (2017). *Handreiking Verkenning, versie 2*. <https://www.taskforcedeltatechnologie.nl/wp-content/uploads/2017/05/20170922-HWBP-Handreiking-verkenning-versie-2-september-2017.pdf>.

HWBP. (2019). *Kennis- en innovatieagenda Hoogwaterbeschermingsprogramma*. HWBP. Opgehaald van <https://www.hwbp.nl/documenten/publicaties/2019/11/19/kennis--en-innovatieagenda>.

Jorissen, R., Nieuwjaar, M., Tánčzos, I., de Vries, W., ter Horst, W., Lansink, J., Havinga, F., Heijn, K., Bronsveld, J., Zomer, W., Nurmohamed, N., & Schelfhout, H. (2021). *Waterkeren: Waterkeringen in Nederland*. Studie Bijdehand.

Kok, M., Jongejan, R.B., Nieuwjaar, M.W.C., & Tánčzos, I.C. (2017). *Grondslagen voor hoogwaterbescherming ; Tweede herziene druk*. Expertise Netwerk Waterveiligheid (ENW).

Rijkswaterstaat. (2018). *Handreiking prestatiegestuurde risicoanalyses (PRA) - Sturen op prestaties van systemen*. <https://essit.nl/praktijkvoorbeelden/624-handreiking-prestatiegestuurde-risicoanalyses>.

Van Belzen, J., Rienstra, G., & Bouma, T. (2021). *Dubbele dijken als robuuste waterkerende landschappen voor een welvarende Zuidwestelijke* (Report No. 2021-01). Yerseke: NIOZ.

BIJLAGE A – RAMSHEEP-CRITERIA EN EVALUATIEASPECTEN

Reliability (Betrouwbaarheid)	
<i>Of de dijk consequent zijn beoogde functie vervult — namelijk het weerstaan van erosie, vervorming en falen — onder normale en extreme hydraulische belastingen.</i>	
Functionele betrouwbaarheid (=bedrijfszekerheid)	<i>De mate waarin de dijk zijn primaire waterkerende functie (beschermen tegen overstroming) blijft vervullen onder hydraulische belasting zonder falen of onacceptabele vervorming, ook tijdens en direct na uitvoering.</i>
Erosie bestendigheid	<i>De mate waarin het materiaal van de dijk bestand is tegen erosie door waterstroming, golfslag en overslag, tijdens en na dijkbreuk.</i>
Faalpaden	<i>De mate waarin de faalpaden (geïnitieerd door faalmechanismen) zich in de tijd ontwikkelen tot een bres.</i>
Materiaalkeuze & materiaalkwaliteit	<i>De mate waarin de eigenschappen en kwaliteit van gebruikte materialen de structurele prestaties en betrouwbaarheid van de dijk ondersteunen.</i>
Technische uitvoeringsrisico's	<i>De mate waarin technische risico's tijdens uitvoering (bijv. fouten in plaatsing, verdichting of constructie) kunnen optreden en beheerst worden.</i>
Niet-waterkerende objecten	<i>De mate waarin objecten zoals kabels, leidingen, gebouwen of infrastructuur met behoud van veiligheid in of nabij de dijk kunnen worden geïntegreerd.</i>
Taaheid omgeving	<i>De mate waarin de omgeving bijdraagt aan het vertragen van de dijkdoorbraak, en daardoor van de gevolgen.</i>
Availability (Beschikbaarheid)	
<i>Of de dijk en de bijbehorende functies (toegang, ruimte, medegebruik) bruikbaar en toegankelijk zijn wanneer dat nodig is, zowel tijdens de bouw als gedurende de gehele levensduur.</i>	
Medegebruik / compatibiliteit met omgeving	<i>De mate waarin de dijk gecombineerd kan worden met andere functies zoals recreatie, infrastructuur, ruimtelijke ontwikkeling en verkeersbelasting.</i>
Maintainability (Onderhoudbaarheid)	
<i>Of de dijk efficiënt en veilig kan worden geïnspecteerd, gemonitord, gerepareerd en versterkt, zonder onevenredige inspanning of verstoring.</i>	
Toegankelijkheid voor onderhoud	<i>De mate waarin de dijk en onderdelen van de dijk bereikbaar zijn voor inspectie en onderhoudswerkzaamheden.</i>
Aanpasbaarheid / herstelbaarheid	<i>De mate waarin de dijk nu en in de toekomst kan worden aangepast, versterkt, hersteld of uitgebreid.</i>
Monitoring	<i>De mate waarin de toestand van de dijk goed gemeten en gevolgd kan worden met inspecties of sensoren.</i>
Safety (Veiligheid)	
<i>Of het ontwerp, de aanleg en het beheer van de dijk kunnen worden uitgevoerd zonder onaanvaardbare risico's voor werknemers, bewoners, infrastructuur en het milieu.</i>	
Veiligheid tijdens uitvoering	<i>De mate waarin de aanleg van de dijk veilig kan plaatsvinden voor werknemers en omgeving.</i>
Health (Gezondheid)	
<i>Of de dijk een positieve bijdrage levert aan de kwaliteit van de leefomgeving — inclusief landschap, cultuur, comfort en het welzijn van aan de dijk of nabijgelegen gemeenschappen.</i>	
Omgevingskwaliteit	<i>De mate waarin de dijk bijdraagt aan een aantrekkelijke, veilige en gezonde leefomgeving voor omwonenden.</i>
Cultuurhistorie	<i>De mate waarin het ontwerp rekening houdt met cultuurhistorische waarden van het landschap en bestaande dijkstructuren.</i>

Environment (Milieu)	
<i>Of het ontwerp en de aanleg van de dijk ecologische systemen, hydrologie, biodiversiteit en milieukwaliteit ondersteunen en verbeteren.</i>	
Ruimtebeslag	<i>De mate waarin het ontwerp van de dijk ruimte inneemt en daarmee beschikbaarheid van omliggend gebied beïnvloedt.</i>
Hydrologie	<i>De mate waarin de het dijkontwerp invloed heeft op grondwaterstromen, waterstanden en drainage/afwatering op het omliggende gebied.</i>
Biodiversiteit	<i>De mate waarin het ontwerp effecten heeft op flora, fauna en ecologische processen.</i>
Milieu-effecten	<i>De mate waarin aanleg en materialen milieueffecten veroorzaken, zoals emissies, bodemimpact of grondstofgebruik.</i>
Economics (Kosten / economische aspecten)	
<i>Of de dijk op een kosteneffectieve manier kan worden gebouwd, onderhouden en aangepast, rekening houdend met levenscycluskosten, planning, logistiek en beschikbaarheid van middelen.</i>	
Maakbaarheid	<i>De mate waarin het ontwerp praktisch en efficiënt uitvoerbaar is met beschikbare technieken en onder realistische omstandigheden.</i>
Planning / fasering	<i>De mate waarin aanleg en versterking van de dijk efficiënt gefaseerd en gepland kunnen worden.</i>
Logistieke haalbaarheid	<i>De mate waarin transport, uitvoering en organisatie van werkzaamheden praktisch uitvoerbaar zijn.</i>
Materiaalbeschikbaarheid	<i>De mate waarin benodigde materialen voldoende beschikbaar zijn op de markt.</i>
Politics (Wet- en regelgeving, beleid, juridische zaken)	
<i>Of de dijk in lijn is met wet- en regelgeving, beleidsdoelen, maatschappelijk draagvlak, bestuurlijke structuren en de politieke bereidheid om het gekozen concept te realiseren.</i>	
Juridisch	<i>De mate waarin het ontwerp voldoet aan bestaande wet- en regelgeving en toetsingskaders.</i>
Politiek	<i>De mate waarin het ontwerp past binnen bestuurlijke prioriteiten en beleidskeuzes.</i>
Maatschappelijk / draagvlak	<i>De mate waarin het ontwerp maatschappelijk acceptabel en stakeholders, bewoners en bestuurders het ontwerp ondersteunen.</i>
Verantwoordelijkheidsverdeling	<i>De mate waarin duidelijk is welke partijen verantwoordelijk zijn voor aanleg, beheer en eventuele risico's.</i>

Tabel 1: Overzicht en beschrijving van RAMSHEEP-criteria en evaluatieaspecten.

BIJLAGE B – UITWERKING EVALUATIEKADER TAAIE DIJKCONCEPTEN

	Traditionele dijkversterking	Varianten aan het buitentalud	Varianten aan het binnentalud	Varianten op dijklichaamniveau	Constructieve varianten
Reliability (Betrouwbaarheid)					
Functionele betrouwbaarheid (=bedrijfszekerheid)	<p>bros faalgedrag → snel en abrupt verlies waterkerende functie bij bezwijken</p> <p>geen geleidelijke degradatie → beperkte signalering voorafgaand aan falen</p>	<p>aanpassing aan buitenzijde dijk → hydraulische belasting blijft direct op talud werken → reductie belasting op de totale dijk</p> <p>sterkte afhankelijk van kwaliteit taludbekleding → erosiebescherming cruciaal</p> <p>geen reductie sterkte tijdens en direct na de uitvoering</p>	<p>versterking aan binnentalud → extra stabiliteit tegen binnenwaartse afschuiving</p> <p>binnendijkse steunberm kan macrostabiliteit verbeteren</p> <p>geen reductie sterkte tijdens uitvoering</p>	<p>langere kwetsbare fase bij ontgraving → klei blijft langer open</p> <p>gevoelig voor vocht en rijping → beïnvloedt stabiliteit en uitvoerbaarheid</p> <p>voor innovatieve verkittende oplossingen onvoldoende ervaring en dus onzeker</p>	<p>damwand kan op verschillende hoogten worden aangebracht → Inbouwdiepte en positie van damwand bepalen effectiviteit → beïnvloedt betrouwbaarheid van de dijk</p> <p>na slaan damwand en aanvullen → dijk direct op sterkte</p> <p>fase voor slaan damwand geeft verminderende sterkte, i.v.m. voorbereidende ontgravingen</p>
Erosie bestendigheid	<p>kleibekleding cruciaal → bij falen directe erosie van zandkern</p> <p>bij zandkern: beperkte reststerkte bij schade → erosie versnelt snel, geen intrinsieke erosieremmende mechanismen in kern</p>	<p>golfbelasting op het talud neemt af door flauwer talud of voorland</p> <p>golfenergie wordt eerder gebroken → lagere belasting op bekleding</p> <p>erosie van bekleding en ook zandkern treedt minder snel op</p>	<p>geen wezenlijk verschil t.o.v. een traditionele dijkversterking</p>	<p>cohesieve klei → hogere natuurlijke erosiebestendigheid</p> <p>eenmaal aangebracht → kern is direct robuust</p> <p>Hogere overslaggebieden geeft grotere belasting op binnenberm</p>	<p>damwand kan interne erosie (bijv. piping) beperken</p> <p>verschil met traditionele dijkversterking vooral bij interne erosieprocessen</p>
Faalpaden	<p>dominante mechanismen: piping, macrostabiliteit, bekledingsfalen</p> <p>mechanismen kunnen zich snel ontwikkelen tot volledig falen</p> <p>weinig faalvertraging aanwezig</p>	<p>hydraulische belasting wordt deels vóór of op het buitentalud gereduceerd</p> <p>erosie van het buitentalud ontwikkelt zich geleidelijker</p> <p>macro-instabiliteit buitenwaarts kan relevanter worden door aanpassing taludgeometrie</p>	<p>binnenwaartse macrostabiliteit verbeterd door steunberm of freatische lijn (→ reductie poriedruk)</p> <p>bij lange bermen → belasting ondergrond neemt toe maar pipinggevoeligheid neemt af</p>	<p>klei → andere dominante faalmechanismen (scheurvorming, natte stabiliteit)</p> <p>voor innovatieve verkittende oplossingen onvoldoende ervaring faalwijzen</p>	<p>faalmechanismen verschuiven deels van grondmechanisch naar constructief gedrag</p> <p>mogelijke mechanismen: wandrotatie, doorbuiging of onvoldoende verankering</p> <p>piping en interne erosie in dijklichaam kunnen worden beperkt door de damwand</p>

Materiaalkeuze & materiaalkwaliteit	kern bestaat voornamelijk uit zand → materiaal eisen daaraan zijn relatief beperkt kleibekleding (kwaliteit en dikte) bepalend voor erosiebestendigheid en functioneren	materiaal buitentaludbekleding of alternatieven vooroever bepalend voor prestaties gras-, klei- of steenbekleding → bepaalt erosieweerstand	materiaal binnentalud meer blootgesteld aan erosie, uitgaande van lagere kruinen dan traditioneel. kwaliteit vooral relevant voor stabiliteit kwaliteit binnenbekleding belangrijk bij overslag	kleitype bepaalt prestaties → categorie 1 functioneert beter dan categorie 2 kans op zandinsluitingen → beïnvloedt homogeniteit voor innovatieve verkittende oplossingen onvoldoende ervaring en dus onzeker	staal → gevoelig voor diktereductie op lange termijn (monitorbaar)
Technische uitvoeringsrisico's	uitvoering met standaard grondverzet → technisch goed beheersbaar afhankelijk van ondergrondcondities (zettingen, slappe lagen) → risico op instabiliteit tijdens aanleg gevoelig voor uitvoeringsfouten in kleibekleding (dikte, kwaliteit, aansluiting)	werkzaamheden buitendijks → uitvoering afhankelijk van waterstanden	bij variant freatische lijn: onverwachte grondwaterstromen, verstoring bestaande stabiliteit, drainage verkeerd aansluiten	hoge eisen aan verdichting, vochtgehalte en homogeniteit → kwaliteitsrisico's (vooral bij innovatieve opwaardering)	taaiheid bovenin slot → aandachtspunt monitoring mogelijk om positie damwand te controleren
Niet-waterkerende objecten	integratie van objecten (leidingen, kabels) vormt mogelijk zwakke plekken in kleibekleding verhoogde kans op falen door lekkage en piping langs objecten (onderloopsheid, achterloopsheid)	geen wezenlijk verschil t.o.v. een traditionele dijkversterking	geen wezenlijk verschil t.o.v. een traditionele dijkversterking	mogelijk grotere impact tijdens uitvoering doordat het dijklichaam gedeeltelijk moet worden ontgraven	damwand kan conflicteren met kabels en leidingen in dijk verlegging of bescherming mogelijk nodig meer aandacht dan bij traditionele grondversterking bij aansluitingen NWO's
Taaheid omgeving	<u>Wat vanuit de omgeving invloed kan hebben:</u> - aanwezigheid van voorland (bijv. kwelders, slikken) → demping van hydraulische belasting (golven, stroming) - redundantie in het systeem (bijv. tweede kering, infrastructuur) → gevolgen van falen word vertraagd of opgevangen - mogelijkheden voor gevolgbeperking (bijv. compartimentering, bergingsruimte) → impact van falen wordt gereduceerd	geen wezenlijk verschil t.o.v. een traditionele dijkversterking	geen wezenlijk verschil t.o.v. een traditionele dijkversterking	geen wezenlijk verschil t.o.v. een traditionele dijkversterking	geen wezenlijk verschil t.o.v. een traditionele dijkversterking
Availability (Beschikbaarheid)					
Medegebruik / compatibiliteit met omgeving	kruin en taluds geschikt voor lichte infrastructuur (wegen, fietspaden) door eenvoudige en stabiele opbouw recreatief medegebruik goed mogelijk (wandelpaden, groenvoorziening) beperkte flexibiliteit voor intensieve of zware functies door gevoeligheid van kleibekleding en erosie	flauwere taluds met klei kunnen beter worden ingepast in natuur of recreatief medegebruik (bijv. natuurvriendelijke oevers). Verder geen verschillen met de traditionele dijk.	meer mogelijkheden t.o.v. een traditionele dijkversterking	klei heeft lagere dynamische stijfheid → minder geschikt voor wegconstructies op de kruin. bij opwaardering (met klei of innovatieve verkittende oplossingen) van de kern is het afhankelijk van de opwaarderingstechniek	zware objecten of constructies op de kruin kunnen beperker zijn vanwege krachten op de damwand bij inspectieputten, ankers of aansluiting met de damwand kan lokale ruimte nodig zijn en dus hier meer invloed op medegebruik

Maintainability (Onderhoudbaarheid)					
Toegankelijkheid voor onderhoud	goed toegankelijk en bekleding visueel inspecteerbaar onderhoud aan bekleding relatief eenvoudig uit te voeren	de taaidijkaanpassingen liggen buitendijks, waardoor inspectie en onderhoud vaker afhankelijk zijn van waterstanden en getij dan bij een traditionele dijk	geen wezenlijk verschil t.o.v. een traditionele dijkversterking	geen wezenlijk verschil t.o.v. een traditionele dijkversterking	geen wezenlijk verschil t.o.v. een traditionele dijkversterking
Aanpasbaarheid / herstelbaarheid	relatief eenvoudig te versterken (ophogen/verbreden) herstel na falen vaak ingrijpend en grootschalig Bij grotere schades: beperkte modulaire of gefaseerde herstel mogelijkheden	geen wezenlijk verschil t.o.v. een traditionele dijkversterking vegetatiebeheer belangrijk onderdeel onderhoud bij variant met vegetatie	geen wezenlijk verschil t.o.v. een traditionele dijkversterking	kleikern goed aanpasbaar → wel afhankelijk van kleibeschikbaarheid binnen zelfde concept → goed aanpasbaar in hoogte/breedte herstel vaker nodig → type werk blijft gelijk klei kan scheuren / afbrokkelen → meer aandacht nodig klink → profiel verandert langzaam → eerder ophogen nodig bij opwaarderen met innovatieve verkittende oplossingen mogelijke complicaties omdat er nog geen ervaring mee is	minder goed aanpasbaar dan een traditionele dijk → latere aanpassing van het stabiliteitsconcept is lastig of niet mogelijk (verlengen aan bovenzijde kan wel, naar beneden verlengen of achteraf verdikken niet) damwand zit ondergronds → moeilijk direct onderhoudbaar beperkte flexibiliteit bij toekomstige aanpassingen (verwijderen is moeilijk en duur)
Monitoring	voornamelijk visuele inspectie en standaard metingen beperkte (voornamelijk visuele) detectie van vroege fasen van faalprocessen (zoals piping, bv wellen) geen geïntegreerde monitoring voor progressief falen	geen wezenlijk verschil t.o.v. een traditionele dijkversterking	bij variant freatische lijn: monitoring grondwaterstanden wenselijk	monitoring gericht op gedrag van nieuwe kleikern controle op zettingen, scheurvorming en vochtgehalte klei aandacht voor krimp- en zwelgedrag klei → kan invloed hebben op waterdichtheid bij opwaarderen met innovatieve verkittende oplossingen onzeker hoe we moeten monitoren	indirect monitorbaar → grondwatermetingen en diktereductie-methoden
Safety (Veiligheid)					
Veiligheid tijdens uitvoering	relatief veilige uitvoering met gangbare technieken en materieel risico's door werken met zwaar materieel en transportbewegingen verhoogd risico bij werken aan of nabij bestaande waterkering (stabiliteit tijdens uitvoering)	geen wezenlijk verschil t.o.v. een traditionele dijkversterking	geen wezenlijk verschil t.o.v. een traditionele dijkversterking	voor de meeste varianten geen wezenlijk verschil t.o.v. een traditionele dijkversterking mogelijk dat verkittende oplossing een chemische reactie veroorzaken en ook bij verwerken een gezondheids- of milieurisico met zich meebrengen	werken met damwanden extra veiligheidsrisico

Health (Gezondheid)					
Omgevingskwaliteit	eenvoudige, uniforme vormgeving → beperkt ruimtelijke kwaliteit grote schaal en ruimtebeslag → visuele impact op landschap voor integratie met natuurlijke of stedelijke omgeving vaak constructieve aanpassingen nodig	aanpassing buitentalud/vooroever kan kansen bieden voor natuurontwikkeling	kan significant kansen bieden t.o.v. een traditionele dijkversterking	minder vormgevingsimpact omdat veranderingen ondergronds zijn en minder ruimtebeslag innemen	minder vormgevingsimpact omdat veranderingen ondergronds zijn en minder ruimtebeslag innemen
Cultuurhistorie	vaak aantasting van historisch dijkprofiel en beleving door verbreding/verhoging	bestaande dijkkrui en binnentalud blijven grotendeels intact historisch dijkprofiel beter behouden dan bij volledige profielvergroting impact op cultuurhistorische waarden vaak kleiner dan bij traditionele versterking	bestaande krui en buitentalud blijven behouden historisch dijkbeeld aan rivierzijde blijft intact impact op cultuurhistorische waarden vaak kleiner dan bij traditionele versterking.	historisch dijkprofiel blijft grotendeels behouden impact op cultuurhistorische waarden vaak kleiner dan bij traditionele versterking	historisch dijkprofiel blijft grotendeels behouden impact op cultuurhistorische waarden vaak kleiner dan bij traditionele versterking
Environment (Milieu)					
Ruimtebeslag	ruimtegebruik neemt steeds toe bij hogere veiligheidsniveaus groot ruimtebeslag nodig voor stabiliteit (flauwe taluds) en piping-berm zonder verlies aan veiligheid alleen optimalisatie mogelijk met dure (constructieve) maatregelen	ruimtebeslag vaak vergelijkbaar of kleiner dan traditionele dijkversterking uitgezonderd de uiterwaarden	ruimtebeslag vaak vergelijkbaar of kleiner dan traditionele dijkversterking	klei is taaier → steilere taluds mogelijk → kleiner ruimtebeslag dan traditionele dijkversterking Note: hoe lager kleikwaliteit hoe groter de dijk moet zijn	veel ruimte nodig tijdens de uitvoeringsfase maar minder dan traditionele dijkversterking → Installatie kan invloed hebben op krui en wegconstructie daarna minder ruimtebeslag dan traditionele dijkversterking
Hydrologie	doorlatende zandkern beïnvloedt grondwaterstroming bij dijkverhoging: wijziging van stijghoogtes en stromingspatronen in de ondergrond geen actieve sturing van hydrologisch systeem → effecten op omgeving niet gereguleerd maar gevolg van ontwerp	mogelijk lichte verandering van infiltratie en afstroming op het buitentalud door aangepaste taludvorm effect op hydrologie meestal kleiner dan bij een traditionele zandversterking, omdat minder extra volume aan zand wordt aangebracht	effect op hydrologie meestal kleiner dan bij een traditionele zandversterking	bij aanwezigheid van een kleikern is de freatische lijn stabiel en minder variabel	hogere freatische lijn in de dijk door de damwand als hydraulische barrière opstuw van grondwater → risico op verhoogde grondwaterstanden in de omgeving kans op onderlopende kelders in hoger gelegen achterland (bijv. Grebbeberg)
Biodiversiteit	(beperkte ecologische waarde door uniforme grasbeksleding) weinig variatie in habitats op taluds en krui geen intrinsieke stimulans voor natuurontwikkeling	aanpassing buitentalud kan kansen bieden voor ontwikkeling van voor-oevervegetatie flauwer talud kan habitatdiversiteit vergroten impact op buitendijkse natuur mogelijk tijdens uitvoering	veel variatie mogelijk bij het alternatief met getrapte waterniveaus (variant freatische lijn)	aanpassing kern door klei en innovatieve verkittende oplossingen → niet gastvrij voor bevers voor de klei-oplossing: neutraal tot licht gunstig t.o.v. traditionele dijk	kleinere ruimtelijke impact dan een zandversterking (behoud bestaand habitat), maar damwand zelf biedt weinig ecologische waarde

Milieu-effecten	grote hoeveelheden grondverzet → hoge milieubelasting (transport, winning) gebruik van natuurlijke materialen → geen verontreiniging, maar wel impact	minder materiaalgebruik t.o.v. een traditionele dijkversterking	minder materiaalgebruik t.o.v. een traditionele dijkversterking	kleiwinning → gevoelig voor PFAS aanvoer van klei → hogere MKI andere innovatieve verkitende oplossingen moeten nader onderzocht op milieu-effecten	staalproductie → hogere materiaalgebonden emissies geluid en trillingen tijdens plaatsing potentieel probleem voor bodemorganismen
Economics (Kosten / economische aspecten)					
Maakbaarheid	technisch eenvoudig en bewezen uitvoerbaar weinig specialistische kennis of technieken vereist breed toepasbaar onder verschillende omstandigheden	vereist werkruimte buitendijks, wat niet altijd beschikbaar is door rivier, natuur of vergunningen uitvoering kan complexer zijn door werken nabij of in het water en mogelijke waterstandsbeperkingen	bij variant freatische lijn: vraagt zorgvuldige detaillering van drainage en lagenopbouw	klei is gevoeliger voor natte omstandigheden en moeilijker verwerkbaar werkzaamheden kunnen sneller stilvallen bij regen ontwerp en uitvoering vragen meer precisie en daardoor meer controles	plaatsing vereist specialistisch materieel
Planning / fasering	goed faseerbaar door opbouw in lagen uitvoeringsfasering kan invloed hebben op waterveiligheid	uitvoering afhankelijk van waterstanden en hoogwaterseizoenen planning daardoor soms complexer dan bij traditionele dijkversterking	planning vergelijkbaar met traditionele dijkversterking bij variant freatische lijn: uitvoering per segment mogelijk	uitvoering vaak gefaseerd om stabiliteit en goede verdichting te waarborgen planning complexer dan bij sommige traditionele versterkingen	niet te veel tegelijk aanpakken → fasering belangrijk noodmaatregelen beschikbaar houden
Logistieke haalbaarheid	grote afhankelijkheid van aanvoer zand en klei intensieve transportstromen nodig (weg/water) logistiek is bepalend voor uitvoerbaarheid en hinder	transport en werkzaamheden moeten (deels) buitendijks plaatsvinden, wat de bereikbaarheid kan beperken materieel en materiaal moeten soms via tijdelijke werkwegen of vanaf het water worden aangevoerd logistiek kan complexer zijn dan bij een traditionele versterking aan de landzijde	eenvoudiger door beperkt grondverzet en materiaaltransport werkwegen kunnen wel aan de binnenkant	transport en verwerking van grote hoeveelheden klei werkruimte nodig voor ontgraven en opbouwen kern voor innovatieve verkitende oplossingen moet de toepassing nader worden onderzocht	veel minder grondtransport nodig dan bij een zandversterking goed te plannen → logistiek beheersbaar goed planbaar met beschikbare uitvoerende partijen
Materiaalbeschikbaarheid	kwaliteit klei kan lokaal beperkend zijn concurrentie om materialen kan invloed hebben op planning	geen wezenlijk verschil t.o.v. een traditionele dijkversterking	geen wezenlijk verschil t.o.v. een traditionele dijkversterking	geschikte klei → schaarser dan zand materiaal voor innovatieve verkitende oplossingen kan aanzienlijk duurder zijn	voldoende aanbieders → geen knelpunt

Politics (Wet- en regelgeving, beleid, juridische zaken)					
Juridisch	past binnen bestaande normen en toetsingskaders vergunningverlening relatief standaard weinig juridische complexiteit t.o.v. innovatieve oplossingen	werkzaamheden buitendijks kunnen extra vergunningen vereisen bijvoorbeeld in relatie tot rivierbeheer of natuurwetgeving juridische complexiteit mogelijk groter dan bij traditionele versterking	geen wezenlijk verschil t.o.v. een traditionele dijkversterking	vergunningen vergelijkbaar met traditionele dijkversterking grondverzet en materiaalwinning kunnen aanvullende eisen geven mogelijk aanvullende eisen materialen voor innovatieve verkittende oplossingen	trillingen en geluid kunnen vergunningseisen beïnvloeden mogelijk aanvullende eisen bij nabij bebouwing mogelijke complicaties bij kabels en leidingen
Politiek	hoge acceptatie door bekend en bewezen concept lage drempel voor besluitvorming	effect op buitendijks gebied kan bestuurlijke afweging vereisen bijvoorbeeld bij natuur- of rivierkundige belangen	geen wezenlijk verschil t.o.v. een traditionele dijkversterking	bij innovatieve verkittende oplossingen kunnen er beleidsmatige beperkingen van kracht zijn	geen bijzondere eisen vanuit beleid
Maatschappelijk / draagvlak	herkenbare en vertrouwde oplossing → vaak breed draagvlak weerstand mogelijk door ruimtebeslag en impact omgeving beperkte meerwaarde voor omgeving → minder positieve beleving	effect op natuur en recreatie buitendijks mogelijk draagvlak afhankelijk van lokale ruimtelijke functies	bij variant freatische lijn: misschien gevoelig omdat effect op hydrologie meer mogelijkheden (functies) binnendijks vanwege meer ruimte	onzekerheden van de innovatieve verkittende oplossingen → beïnvloeden acceptatie maar gebruik van natuurlijke materialen kan positief worden gezien als de dijkhoogte kan blijven zoals hij is, is dat positief	trillingen en geluid kunnen hinder veroorzaken → tijdelijke overlast voor omgeving dijk kan blijven zoals hij is → weinig maatschappelijke impact kortere bouwtijd kan juist positief zijn
Verantwoordelijkheidsverdeling	duidelijke rolverdeling (waterschap, aannemer, beheerder) weinig complexiteit in beheer en eigenaarschap standaard contract- en beheerstructuren toepasbaar	beheer en onderhoud grotendeels bij waterbeheerder bij buitendijkse ingrepen soms afstemming met andere beheerders bijv. Rijkswaterstaat of natuurbeheerders	geen wezenlijk verschil t.o.v. een traditionele dijkversterking	geen wezenlijk verschil t.o.v. een traditionele dijkversterking	geen wezenlijk verschil t.o.v. een traditionele dijkversterking

Tabel 2: Systematische analyse van taaie dijkconcepten ten opzichte van traditionele dijkversterking op basis van RAMSHEEP-criteria.

BIJLAGE C – VERSLAG WORKSHOP 4 - TAAIE DIJKEN KLIMAATROBUUST

Vergadersoort : Partnerworkshop voor Workshop 4 bij projectlocatie Neder-Betuwe WSRL
 Datum meeting : 12 september 2024
 Datum rapportage : 12 september 2024
 Notulist : Maarten Podt
 Aanwezigen : Helle Larsen (HWBP), Barbara Bouman (TAUW), Eduard?, Meindert Van (Deltares), Frank Den Heijer (HAN), Ghaith Al Hussain (TAUW), Jeroen Kooman (WSRL), Martin Egas (Ploegam), Rik Beekx (Dura Vermeer), Leo Zwang (Fugro), Oscar van Dam (STOWA), Sanne van Mispelaar – Schalkx (Aveco de Bondt), Michelle Schouten (HHNK), Herman-Jaap Lodder (HHSK), Jan den Daas (HAN), Sebastian Lemmens (HAN), Maarten Podt (HAN)

Agenda

9:30	Opening, agenda, mededelingen en doel	(Frank)
9:40	Waterschap Rivierenland	(Jeroen)
9:55	Stand van zaken in vogelvlucht	(Frank)
10:10	Dijken Atlas	(Maarten)
10:25	Inleiding 'Aan de slag met schetsontwerpen' : voorbeeld W'-Sprok	(Jan)
10:40	Pauze	
10:55	Aan de slag in 3 groepen: schetsen voor andere case locaties	(Allen)
11:45	Terugmeldingen: varianten en argumentatie	(subgroepen)
12:00	Experiment Taaie Dijken - Flood Proof Holland	(Matthijs)
12:10	Afspraken en wvttk	(Frank)
12:15	Met lunch naar de dijk	(allen olv Jeroen)
13:00	Sluiting	

Introductie van project Neder-Betuwe door WSRL

20,2 km dijkversterking, waarvan:

- 16 km is afgekeurd op STBI, waarvan:
 - 10km wordt versterkt,
 - 6km wordt voorzien van stabiliteitsschermen.
- 12 km is afgekeurd op piping, waarvan:
 - 6 km verticale maatregelen,
 - 6 km stabiliteitsschermen.



Dijkvakken versterkingsproject Neder-Betuwe (bron: RHDHV, 2022)

- In vorige versterking na 1995 zijn veel zandscheggen aangelegd. Een zandscheg ontstaat wanneer bij versterking een kleikern is aangevuld met een zandlaag, en is afgedekt met klei (KKP, 2019). Wanneer deze verzadigd is door overslag geeft dit een onstabiele situatie.
- In project Neder-Betuwe was de overweging om de scheggen af te graven en te vervangen door klei. Er is toch besloten het overslagdebiet en de hoogte te handhaven, en de zandscheggen te draineren via een binnentalud met een helling van 1:3,5.
- Een aantal dijkvakken worden niet beschermd tegen piping. Dit zijn vaak dijkvakken nabij een beschermingszone waar niet ontgrond mag worden. Ontgroning in deze zone zal waarschijnlijk tot piping leiden. De buitenbeschermingszone is naar verwachting één meter breed over een lengte van 250 à 300 meter.
- Er wordt gevraagd of piping of de zandscheg het grootste probleem vormt. De zandscheg heeft weinig invloed op de damwand. De zandscheg heeft wel invloed op de manier van versterken.
- In het project is de innovatie kalk-in-klei toegepast. Bij een lokale KRW-geul kwam veel grond vrij. Dit lokale materiaal moest zeker een jaar in depot. Kalk toevoegen aan de klei versnelde dit proces. De verbeterde erosieve eigenschappen van met kalk verrijkt klei is vrij uitvoerig getest in de Hedwigepolder. Echter gaat het daar over een grote hoeveelheid toegevoegde kalk, waardoor een eventuele businesscase verdwijnt. Veel kalk zorgt tevens voor een ander ecologisch probleem, bij de Hedwigepolder ontstond een erg harde laag. In Neder-Betuwe wordt daarom de toepassing van een mindere mate kalk onderzocht.

Mededelingen

- Taaie Dijken heeft aandacht gekregen op het Waterforum, met dank aan Leo:
 - o <https://www.waterforum.net/45184-fugro%3A-%26lsquo%3Btaaie-dijk-innovatieve-oplossing-voor-stijgende-kosten-waterveiligheid%26rsquo%3B/>
 - o <https://www.waterforum.net/taaiere-dijken-beperken-schade-bij-overstroming/>
- Frank heeft op de RiverFlow 2024 conferentie in Liverpool een presentatie gegeven over taaie dijken. De groep vraagt of hij als engelse vertaling “long-term robustness” heeft gebruikt. Frank reageert: structural robustness / structural robust dikes.

Taaie Dijken Atlas

- De Taaie Dijken Atlas is in opzet gereed, en gevuld voor Waterschap Rivierenland. Het bevat een verzameling van feitelijke dijkkenmerken uit openbare bronnen. Het doel is om de Atlas nu te vullen met dijkendata van de andere waterschappen. Doel is om hiermee een indicatief overzicht op te stellen waar taai gedrag aanwezig zou kunnen zijn.
- De werkgroep reageert als volgt:
 - o De werkgroep ziet potentie van de atlas, ook voor andere doelen.
 - o Het verzamelen van de dijkdata kost veel tijd. Hoever ga je hierin door? Wanneer is het voor het project genoeg?
 - o Wat is de ambitie voor het geven van een taaieheidsindicatie?
 - o WSRL: voeg de absolute helling toe (overslag), Afstand tussen kruin en maaiveld
 - o Voeg een beoordelings ‘overlay’ toe.

Workshop schetsontwerpen: perspectieven van de werkgroep op taaie dijkontwerpen

Drie groepen zijn vervolgens aan de slag gegaan met het schetsen van doorsnedes om de dijk bij Wolferen-Sprok taaier te maken. Hieronder zijn deze schetsen gevisualiseerd en voorzien van uitleg van de groepen zelf.

1. Berm aanleggen

Een standaard bermaanlegging vanwege de beschikbare ruimte. “We hebben wel gedacht: een berm aanleggen is geen taaierheid, het is een standaardoplossing. Maar dat verhoogt toch de taaierheid? Meer grond betekent dat het langer duurt voordat de drempel weg is. Extra grond geeft extra taaierheid”.



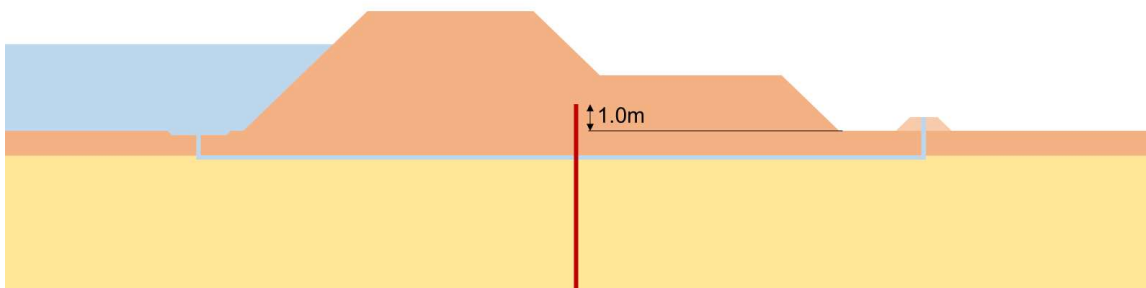
2. Waterstand verhogen + nooddijk

Compartimentering middels een extra dijkje, zodat bij overslag er water in het compartiment komt te staan. Het waterstandsverschil over de dijk neemt af en daarmee ook de stroomsnelheid in geval van doorbraak. Dit koopt tijd. Bij piping creëert dit compartiment tevens zijn eigen tegendruk.



3. Damwand als drempel, 1m boven maaiveld

Taaierheid toegevoegd met een damwand; een constructie die als drempel fungeert en aan de onderkant ook piping tegengaat. Hier is de gedachte dat een scherm ontworpen wordt op piping, dus een minder zware wand dan voor stabiliteit. Eerst ontwikkelt zich een pipe, dan bezwijkt de dijk, en daarna moet de damwand pas functioneren. Naar verwachting is dit duurder dan aanbrengen in de teen.



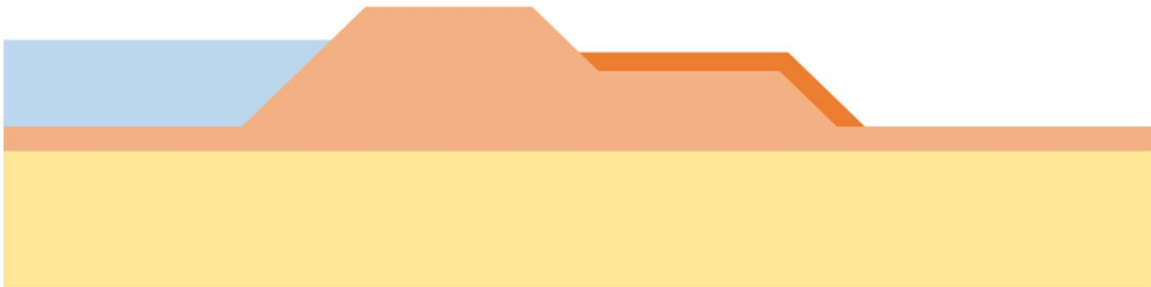
4. Deltadijk

Een dijk met genoeg grond waardoor het lang duurt voordat deze wegspoelt.



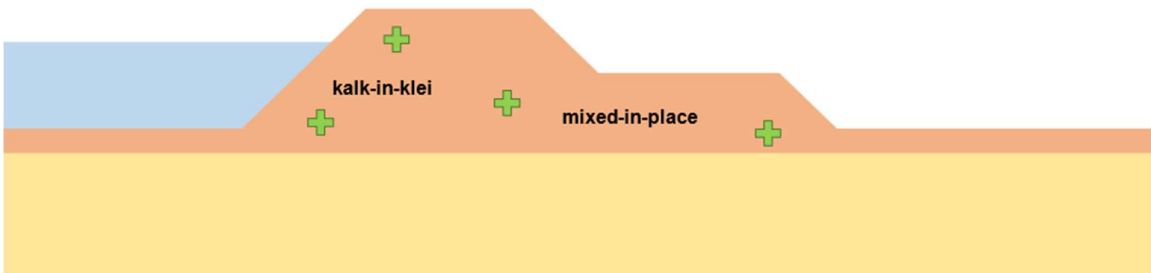
5. Berm verhogen

De binnenzijde/binnenberm versterken met klei. Taaiheid vergroten door meer grond en body.



6. Bestaande grond opwaarderen

Bestaande grond opwaarderen, bijvoorbeeld met eerdergenoemde voorbeelden van kalk-in-klei of mixed-in-place. Het opwaarderen verbetert de erosieve eigenschappen waardoor bresgroei wordt vertraagd.



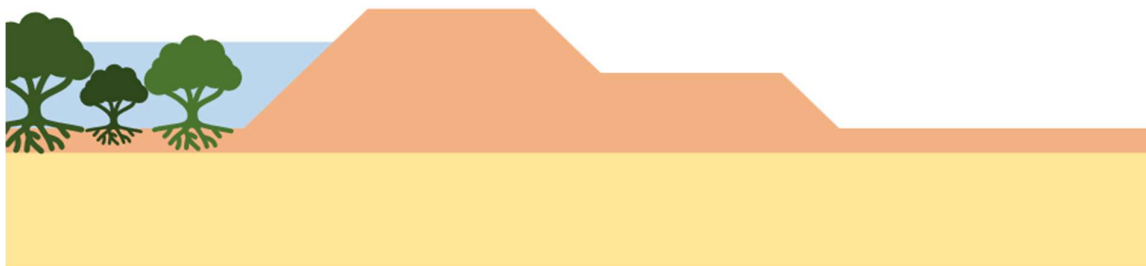
6. Taludverflauwing

Het veranderen van de dijkgeometrie; in dit geval het verflauwen van het buitentalud. Niet de taludverflauwing zelf, maar de grotere grondmassa beïnvloed taaiheid.



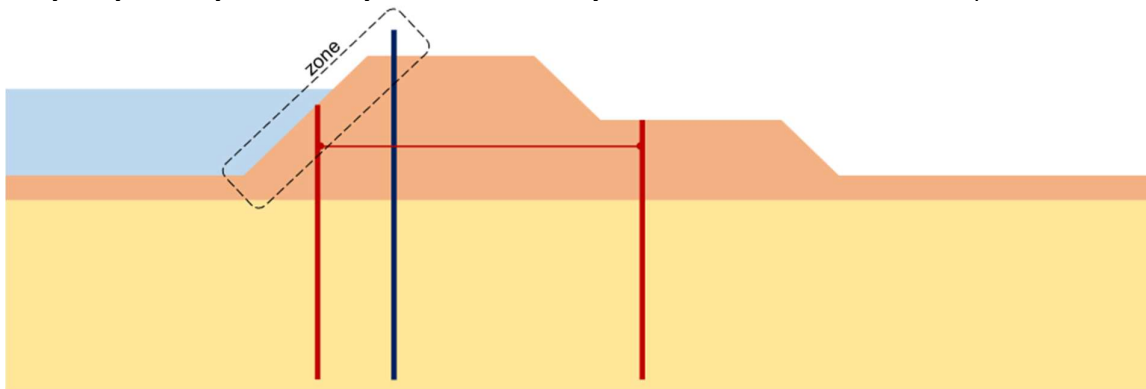
7. Vegetatiedrempel

In het voorland aan de buitenzijde een ruwe vegetatiedrempel. Mogelijk niet geschikt voor het Nederlandse rivierengebied waar dagen achter elkaar watergeweld is. Voor zeeweringen met relatief korte 48h stormbelasting is dit interessanter.



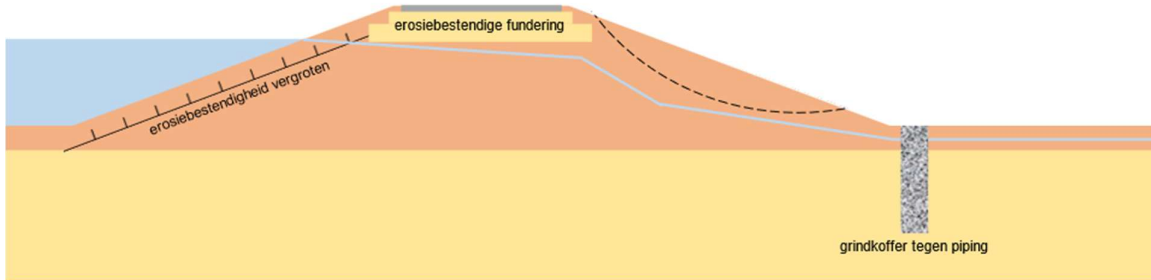
8. Constructie in buitendijkse zone

In plaats van één lange damwand in de berm, twee kortere damwanden op verschillende plekken die onderling met elkaar zijn verbonden; een soort kistdammen. Korte wanden krijg je beter de grond in dan lange wanden. Als de dijk bezwijkt, dan blijft de binnen-damwand niet staan, ook al zou deze verankering hebben. Dit betekent dat in de buitendijkse zone een constructie of drempel moet komen, met het idee dat er altijd wel een lading grond achter blijft liggen. De kruin schuift af en de binnenzijde ben je kwijt, dan blijft de buitendijkse damwand redelijk intact en dat vormt dan de drempel.



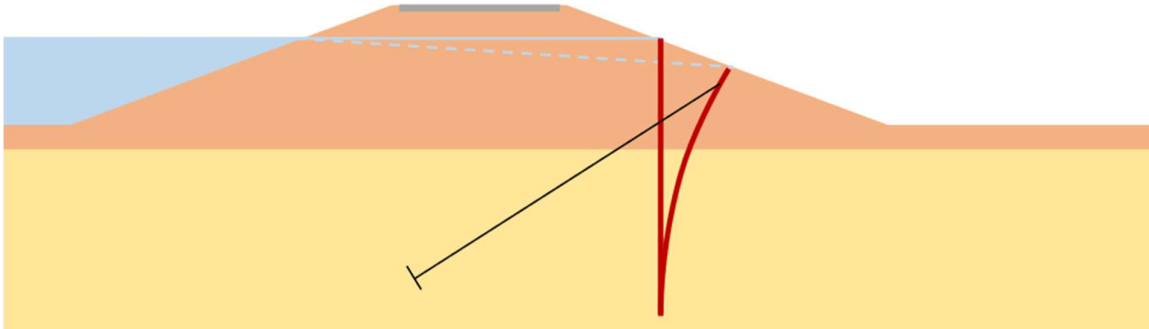
9. Erosiebestendigheid vergroten + grindkoffer tegen piping

Erosiebestendigheid aan buitendijkse zone verbeteren en zorgen dat de erosiebestendigheid doorloopt tot in de fundering, bijv. door te mixen. Zorg dat de buitenzijde niet weg kan eroderen en dat het asfalt daarop gedimensioneerd is. Hiermee kan overslag worden toegelaten. Wanneer de binnenzijde afschuift door overslag, dan zou piping kunnen worden opgevangen met bijv. een grindkoffer.



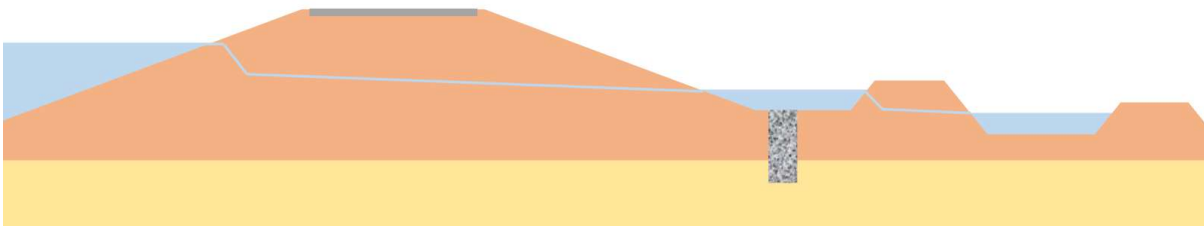
10. Flexibele damwand

Een andere denkrichting is een traditionele wand. Belangrijke overwegingen hierbij zijn de positionering van de wand en de mate van flexibiliteit. Een verankerde wand is stijf en biedt stabiliteit, terwijl een niet-verankerde wand kan vervormen. Tijdens de Eemdijkproef werd een (extreme) verplaatsing van zes meter zijwaarts en twee meter naar beneden waargenomen. Tegelijkertijd biedt deze twee meter ruimte om te bepalen hoe hoog de damwand in de dijk moet worden geplaatst om instroom te voorkomen. Daarnaast kan worden nagedacht over een licht anker dat pas in werking treedt bij vervorming van de damwand.



11. Kwelkade door getrapt waterniveau

Tot slot een variant met een soort kwelkade. Het idee is om het waterniveau getrapt te maken. Het overslag komt in een badje, gevolgd door een volgend badje. Belangrijk is dat de binnenzijde voldoende erosiebestendigheid heeft voor de overslagstroom. Eventueel een grindkoffer om een pipe naar het eerste bad tegen te gaan, en herhalen in volgende bad(en) totdat pipelengte lang genoeg is.



Reacties op de schetsopdracht

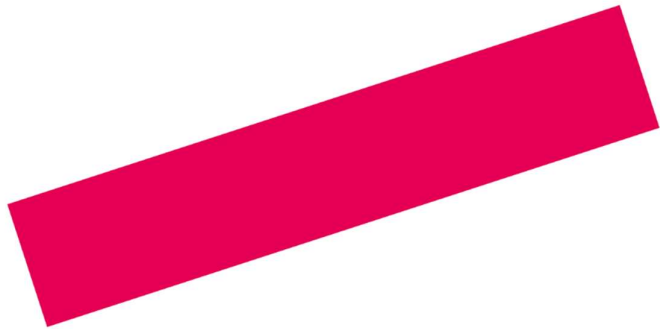
- Het vertaaien van een bestaande dijk is lastig. Hoe krijg je taatheid tegen piping? Ook al maak je de dijk van klei, piping gaat er gewoon onderdoor.
- Dit hangt af van de invalshoek waarmee je taatheid benaderd: het overstromen voorkomen versus het overstromen beperken.
- Hierdoor is piping gevoelsmatig niet relevant voor taatheid. Na een pipe is de dijk al bezweken, en pas dan komt taatheid van pas.
- Hoe flexibel mag je de damwand maken? Het referentiekader is weg. Voorbeeld: WRIJ staat overloop niet meer toe. De overloophoogte is dus de ondergrens, waardoor een damwand minstens die hoogte moet hebben.

Experiment Taaie Dijken - Flood Proof Holland

Een bresgroefexperiment voor Taaie Dijken behoeft veel debiet en Flood Proof Holland heeft niet de benodigde pompcapaciteit. De FPH-route wordt dus verlaten. Andere opties die zijn/worden verkend:

- Een kleinschaligere proef in stroomgoten. Het nadeel is dat veel labs geen zand en slibdeeltjes in de pompen willen. In sommige labs werken de stroomgoten echter met gekleurde balletjes.
- Frank heeft contact met Hogeschool Rotterdam. Zij hebben een golfbak van 10x20m. De hoogte is niet groot, er past een dijk van ca 70 cm. Watercirculatie is nodig voor aandrijvend vermogen. Met veel moeite is 300 l/s mogelijk. Op dit moment wordt een idee uitgewerkt met zuigende en blazende tankwagens buiten (nagekomen: dit ziet HRo toch niet als realistisch). Voor 1 à 2 m/s en een halve meter verval is minstens ca. 1 m³ nodig. Daarmee is deze faciliteit niet passend voor het beoogde bresgroei experiment.
- Op de HAN staat een betonnen schutsluisje waar met wat kluswerk ook wat in de doorsnede kan worden geëxperimenteerd. Ook hier speelt hetzelfde probleem met pompcapaciteit.
- Defensie heeft geen pompeenheden.
- We hadden ooit waterbouwkundig lab in noordoostpolder. Zouden proeven in het Waterloopbos kunnen? (nagekomen: Natuurmonumenten heeft aangegeven dit niet te willen)
- Leo benoemd erosieproeven uit 2023. Ook hier was de bevinding dat de pompen echt tegenvielen. Je moet dan denken aan diameters gelijk aan die van baggerleidingen.
- Myron bekijkt mogelijkheden voor (natuurlijke) stroomgoten in Spanje.
- In Laag-Keppel ligt een ijsbaan met een meter waterdiepte. Water kan daar de Oude IJssel in.
- Zomerkades in het bovenrivierengebied? Sterk genoeg om overlopen aan te kunnen, daar staan we het toe.
- Er zijn ook filmpjes van een Canadese proeffaciliteit voor rivieronderzoek, met 1 m³/s.

Onderwerp	Actie/afspraken	Actiehouder	Deadline
Afronden deliverable D1.2	Afronden van de Taaie Dijken Atlas en rapportage D1.2 Inventarisatie van Taaigheid in de Nederlands Dijken.	Maarten	Maart 2025
Experiment Taaie Dijken	Verder verkennen van de mogelijkheden voor een illustratieve bresgroeioproef	Frank	Maart 2025
Inventarisatie uitgevoerde proeven	Inventariseren van dijkdoorbraakproeven en beeldmateriaal	Maarten	Maart 2025
Vergaderlocatie workshop 5	Frank neemt contact op met HHSK om de volgende workshop in maart bij hen te organiseren	Frank	Z.s.m.



**OPEN UP
NEW HAN_ UNIVERSITY
OF APPLIED SCIENCES
HORIZONS.**

**HAN_ UNIVERSITY
OF APPLIED SCIENCES**