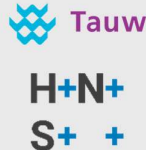


TAAIE DIJKEN KLIMAATROBUUST – REKENMETHODE, CASES EN STRESSTEST_



Rapport: 2026.176

Dr. ir. Frank den Heijer

1 mei 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	9
1.4 Leeswijzer	9
2 BRUIKBAARHEID BESCHIKBARE METHODEN.....	10
2.1 Het Wettelijk Beoordelings Instrumentarium (WBI2017) - exclusief faalpaden	10
2.2 Het Beoordelings en Ontwerp Instrumentarium BOI - faalpaden	11
2.3 Volledige risico benadering	13
2.4 Bruikbaarheid beschikbare methoden	15
3 REKENMETHODE VOOR EFFECTEN TAAI GEDRAG EN KLIMAATVERANDERING.....	16
3.1 Van faalpaden naar risicopaden	16
3.2 De taaiheidsindex: een praktische werkwijze voor het updaten van de norm.....	16
3.3 Conceptuele aanpak bepalen risico voor meerdere risicopaden.....	23
3.3.1 Faalkans	24
3.3.2 Gevolgen	26
3.3.3 Risico	28
3.4 De klimaatrobuustheidsindex.....	29
3.5 Samenvatting conceptuele aanpak.....	29
4 CASE STUDIES EN STRESSTEST	31
4.1 Doel: indruk impact modelleren taaï gedrag	32
4.2 Beschrijving van de cases	32
4.2.1 Rivierengebied: WRIJ Pleijdijk, WSRL Wolferen-Sprok	32
4.2.2 Kustgebieden: HHNK Balgzanddijk	34
4.2.3 Merengebied: HHNK Wieringermeerdijk	35
4.2.4 Overgangsg gebied Rivier-Zee: HHSK Hollandse IJssel	36
4.3 Uitgangspunten voor de toepassing van RISK-TDK-EVENT	38
4.4 Het bepalen van de ontwerpdimensies.....	41
4.5 Conceptuele aanpak bepalen kosten dijkversterking	43
4.6 Technische gegevens van de cases voor input van TDK-EVENT	44
4.7 Berekeningen	45
4.7.1 Pleijdijk.....	46
4.7.2 Wolferen-Sprok.....	48
4.7.3 Wieringermeerdijk.....	51
4.7.4 Balgzanddijk	54
4.7.5 Hollandse IJsseldijk	56
4.8 Kwaliteitsindicatie.....	58
4.8.1 Vergelijking met VNK.....	59
4.8.2 Vergelijking met TDK.....	60
5 DISCUSSIE	63

6	CONCLUSIES	68
	REFERENTIES	70
	BIJLAGE A – AFLEIDING VAN EEN EQUIVALENT 0D-POLDEROPPPERVLAK	71
	BIJLAGE B – VERGELIJKING BRESGROEI IN TDK EN D-HYDRO VOOR LOCATIE LOO	75
	BIJLAGE C – CASE GREBBEDIJK: VERGELIJKING REKENWIJZE OPT. FAALKANS	77
	BIJLAGE D – VERSLAG WORKSHOP 3, WATERSCHAP RIJN EN IJSSEL	79

SAMENVATTING

In voorliggend rapport wordt verslag gedaan van het onderzoek naar de effectiviteit van de toepassing van 'taaie dijken', als een innovatie voor de grote dijkversterkingsopgave in Nederland. Traditioneel worden dijken steeds hoger en breder gemaakt om risico's te beperken, wat leidt tot grote ruimtelijke problemen. En omdat de ontwerpeis is uitgedrukt in een overstromingskans die wettelijk is voorgeschreven, is er geen stimulans om de ontwerpen voor te bereiden op een functie tijdens een mogelijke overstroming. De dijk kern wordt daarom meestal met zand versterkt omdat dat goedkoper is dan resistentere materialen. Taaie dijken daarentegen bezwijken langzaam; ze beperken de bresgroei en het instromende watervolume en bieden meer tijd voor evacuatie, wat resulteert in geringere gevolgen.

Het probleem in de huidige praktijk is echter dat er geen praktische werkwijze bestaat om deze verminderde overstromingsgevolgen expliciet te waarderen. Huidige beoordelingsmethoden schieten tekort voor taaie dijken. Bij het Wettelijk Beoordelings Instrumentarium 2017 (WBI) keek men primair naar het initiële faalmoment en negeerde men meestal de ontwikkeling van het faalpad tijdens hoogwater. Faalpadanalyses, zoals de Toets op Maat, analyseerden wel de stappen van het bezwijkproces, maar betrokken hierin niet de uiteindelijke overstromingsgevolgen. Het BOI 2023 biedt meer ruimte om het gehele faalpad te beschouwen van een kering om de invloed van het gehele faalproces op de faalkans te beschouwen, al wordt deze ruimte in de praktijk niet veelvuldig gebruikt. Het effect van bresgroei op het instromende water en de impact op de consequenties worden echter ook hierin niet beschouwd.

Om dit op te lossen introduceert onderhavige studie de 'risicopaden', een doorwerking van de 'faalpaden' naar de risico's, waarbij zowel de kans op doorbraak als het overstromingsvolume integraal worden berekend. Voor een integrale risicopaden aanpak is geen compleet inzetbaar model beschikbaar. Een eerder ontwikkeld 'volledig risicomodel' (TDK) berekend weliswaar het integrale risico, maar dat instrument is uitsluitend beschikbaar voor het rivierengebied en voor slechts twee inleidende faalmechanismen, waardoor het niet landelijk inzetbaar is.

Daarom is de praktisch-provisorische methode *RISK-TDK-EVENT* ontwikkeld. Deze methode gebruikt waterstandskansen uit HYDRA-NL in combinatie met een vereenvoudigd 0D-overstromingsmodel (komberging) dat nauwkeurig is geijkt op data uit de landelijke LIWO-database. Binnen deze methode zijn twee uiterst praktische maatstaven geïntroduceerd:

- **Taaiheidsindex (*TI*):** Een index gedefinieerd als de ratio tussen de overstromingsgevolgen van een brosse (zand)dijk en die van een (mogelijk taaier) alternatief. Hoe hoger de *TI*, hoe taaier en veiliger de dijk. De *TI* fungeert als een 'norm-update-factor' waarmee in vroege ontwerpfasen het veiligheidsvoordeel van taai gedrag direct kan worden omgezet in andere ontwerpeisen, zonder zware numerieke optimalisaties.
- **Klimaatrobustheidsindex (*KRI*):** Een index die reflecteert in hoeverre het veiligheidsvoordeel van het taaie ontwerp vergroot in de toekomst (bijv. in 2050 of 2100, onder invloed van klimaatverandering en zeespiegelstijging).

De methode is toegepast op vijf locaties in Nederland, variërend over rivier-, meer-, en kustgebieden. Op elke locatie zijn een brosse (zand), bestaande en taai (kleikern en/of damwand) ontwerp met elkaar vergeleken op risicoreductie, footprint (ruimtebeslag) en kosten:

- **Rivierengebieden (Pleijdijk & Wolferen-Sprok):** Taai gedrag pakt hier positief uit. Met een taai ontwerp stijgt de taaiheidsindex naar respectievelijk 4,9 en 5,6. Voor beide cases neemt de benodigde ruimte sterk af en dalen de potentiële kosten ten opzichte van brosse zanddijken. NB. De potentiële kosten zijn de kosten om de dijk aan te leggen. Ze zijn in deze studie gekozen

omdat de versterkingskosten afhangen van de huidige dijken. Als de huidige dijken al veilig zijn versterkingen niet nodig. Dat maakt ook vergelijking tussen de cases onderling zinloos.

- Merengebied (Wieringermeerdijk): Een taaie, resistente drempel vlak boven het relatief stabiele meerpeil resulteert hier in een forse taaieheidsindex van 20. Het economische overstromingsrisico daalt sterk, en er zijn ruimte- en kostenbesparingen ten opzichte van een brosse dijk. Aandachtspunt is wel dat in deze situatie het beperken van de schade aan de dijk een belangrijker criterium wordt dan de economisch optimale kans op overstroming door het beperken van de schade in het achterland.
- Overgangsgebied (Hollandse IJsseldijk): Het taaie ontwerp behaalt hier een hoge taaieheidsindex (8) en reduceert economische risico's vrijwel volledig, en levert tevens een ruimtebesparing op. Wel zijn de aanlegkosten licht hoger dan de brosse referentie.
- Kustgebied (Balgzanddijk): Hoewel de veiligheid verbetert (taaieheidsindex 2,9), is het taaie ontwerp hier financieel beduidend minder gunstig. De grote stormopzet stelt zulke hoge eisen aan een robuuste drempel (zoals zeer lange damwanden), dat dit ontwerp bijna dubbel zo duur uitvalt als de brosse variant.

Concluderend is de ontwikkelde RISK-TDK-EVENT methode toepasbaar, en geeft het goede overeenkomst met de resultaten van LIWO en VNK studies. Hiermee biedt de methode een concreet en werkbaar handvat voor verdere ontwikkeling: het toont aan dat taaie dijken in rivier- en merensystemen de risico's significant verlagen en ook de toekomstige veiligheid verhogen, ruimtebeslag verkleinen en kosten reduceren.

Ontwerpers moeten zich realiseren dat niet alle faalpaden even goed te vertragen zijn. Mechanismen gedreven door erosie (overslag) lenen zich uitstekend voor taaie gedrag, maar abrupte geotechnische bezwijkmechanismen zoals macro-instabiliteit doen dat niet zonder meer, en moeten nog steeds afdoende worden voorkomen.

Daarnaast verandert een succesvolle taaie dijk het operationele beheer aanzienlijk. De kans op een overstroming met catastrofale gevolgen wordt fors verkleind, en de gevolgen zullen geringer zijn. Nog vaker zal de kering echter alleen schade ondervinden. De acceptatie van deze schade wordt dan voornamelijk een economische afweging, die moet worden gebaseerd op de *Total Cost of Ownership*.

Tot slot vereist dit van beheerders en bestuurders strategische keuzes: gebruiken ze de veiligheidswinst van een taaie dijk om de norm te verlagen voor een goedkoper ontwerp, of benutten ze dit als klimaatrobuuste buffer of een buffer voor kwetsbaarheden zoals graverij?

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, Taaie dijken klimaatrobuust, Projectplan in het kader van RAAK-Publiek 2022, 2022) onderzoeken we de praktische mogelijkheden voor de innovatie 'taaie dijken', die goedkoper en met een kleiner ruimtebeslag aan de veiligheidsnormen voor waterkeringen voldoen (HWBP, 2019).

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. Als het gedrag van een dijk de processen tot doorbraak vertraagd, of noodmaatregelen soms doorbraak

voorkomen, dan verkleint dat de kans op doorbraak. 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 is 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 is geïnventariseerd.

WP2 – Taaie ontwerpen van dijken: verkennen hoe taai gedrag wordt 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 zijn onderworpen aan de belastingen volgend uit enkele klimaatscenarios; synthese om de resultaten te interpreteren en wegen.

Voorliggend rapport is onderdeel van WP2 (Den Heijer, Podt, & Rijke, 2022), deliverable D2.1: Samenvatting van de workshops, de rekenmethode en berekeningen

1.2 Probleemstelling – geen rekenmethode en nauwelijks voorbeeld cases

Wanneer overstromingskansen de wettelijke normen overschrijden zijn er, uitgaande van een zg. stabiel oordeel, in hoofdlijn 3 mogelijke interventies om weer aan de normen te voldoen:

1. de dijken verzwaren (hogere en breder maken),
2. de belastingen verlagen door bv. dijkverlegging (Ruimte voor de Rivier, 2018),
3. de gevolgen verkleinen door bv. compartimentering (Nationaal Waterplan, 2016-2021; Kok, Jongejan, Nieuwjaar, & Tanczos, 2016).

Sinds enkele jaren is er bij dijkwerkers steeds meer aandacht gekomen voor een vierde mogelijkheid voor risico-reductie:

4. het zodanig versterken of 'vertaaien' van het dijklichaam en dijkzone zelf, dat de gevolgen van onverhoopte doorbraak relatief gering zijn (Deltares, 2022) (HWBP, 2019) (Den Heijer, 2020) (Den Heijer & Kok, 2022). In Figuur 2 zijn verschillende mogelijkheden voor taaie dijk constructies gegeven.

Toepassen van deze 4^e mogelijkheid wordt in de praktijk nog bemoeilijkt omdat de bestaande normen en beoordelingsmethoden voor de veiligheid, nog niet expliciet en kwantitatief rekening kunnen houden met

het verminderen van de gevolgen van falen van de waterkering door taai gedrag: het langzame bezwijkproces van taaie dijken. De veiligheidsnormen zijn immers uitgedrukt als overstromingskansen voor de dijken langs de kust, rivieren en grote wateren (Waterwet, 2017). Voldoen aan die normen is voldoende. De normen zijn gebaseerd op het lokaal individueel risico, het economisch risico en op het groepsrisico (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016), met de risico's als een combinatie van de kans op overstroom en de gevolgen van overstrooming, maar die gevolgen zijn gebaseerd op de LIWO database waarin veelal grote bressen zijn aangenomen, die overeenstemmen met bros gedrag. Het effect van een (constructieve) versterking die de gevolgen vermindert, leidt niet automatisch tot een minder strenge norm.

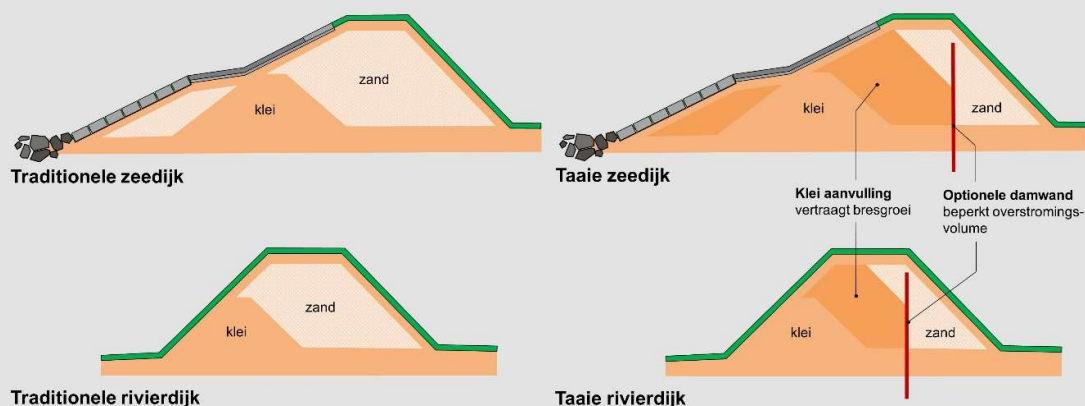
In de praktijk van de actuele versterkingsopgave worden dijken ontworpen met het doel om met minimale financiële inspanningen aan de ontwerpnormen te voldoen. Omdat zand goedkoper is dan klei, resulteert dit in een voorkeursoplossing voor 'brosse' dijken met een zandkern of zandaanvulling. Bij de voorbereiding van versterkingswerken is er daarom geen 'incentive' om ook een vergelijking te maken waarbij opnieuw gezocht wordt naar de maatschappelijk aanvaardbare norm. De norm ligt praktisch vast.

Er zijn daarom behoudens theoretische exercities geen vergelijkingen beschikbaar tussen verschillende ontwerpen waarin kosten, risico's en ruimtebeslag worden vergeleken onder de conditie van minimale maatschappelijke kosten. Dat is een probleem voor wat betreft de communicatie over taaie dijken. De vraag die daarbij moet worden beantwoord is immers: 'Wat zijn de (maatschappelijke) voordelen van deze innovatie?'.

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

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

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



Figuur 2: Voorbeelden van traditionele en taaie dijkconstructies

1.3 Doelstelling en aanpak op hoofdlijnen

Het doel van onderzoek waarvan dit rapport verslag doet is het ontwikkelen van een praktisch-provisorische¹ methode om de veiligheid en effectiviteit van taaie dijken te beoordelen, het uitvoeren van een aantal cases daarmee, en op het analyseren van de verschillen met traditionele/brosse dijken. Bij deze analyse gaat het om de kosten, de risico's, de ruimte en de beheerbaarheid.

De aanpak van de vergelijking en analyse is op hoofdlijnen:

- Ontwikkel een rekenwijze waarmee de mate van taai gedrag (risico ontwerp / risico bros) voor verschillende ontwerpen kunnen worden vergeleken.
- Pas die rekenwijze toe op een aantal cases in verschillende gebieden in NL voor een drietal verschillende ontwerpen: een bros ontwerp, het bestaande ontwerp en een evident taai ontwerp.
- Bepaal de kosten van een versterkings-stap voor deze drie ontwerpen (bijvoorbeeld ten opzichte van de situatie voor de huidige situatie, of ten opzichte de hypothetische situatie dat er nog geen dijk op die locatie is)
- Vergelijk de uitkomsten voor wat betreft economische risico's, investeringskosten en ruimtebeslag.
- Analyseer deze vergelijking kwalitatief, bijvoorbeeld of de uitkomsten verklaarbaar zijn, of er rode draden te vinden zijn voor de relatie tussen taai gedrag en belastingregime.

1.4 Leeswijzer

Voorliggend rapport is deliverable D2.1 van het project. Voor de ontwikkeling van het veiligheidsdenken dat de voedingsbodem was voor de innovatie 'taaie dijken' wordt verwezen naar Hoofdstuk 2 in (HAN, 2026) en voor de eigenschappen van een taaie dijk naar paragraaf 5.2 in (HAN, 2026). In voorliggend rapport wordt in Hoofdstuk 2 eerst een overzicht gegeven van de beschikbare methoden, en wordt nagegaan of daarmee cases kunnen worden uitgevoerd. Daarna wordt in Hoofdstuk 3 de aanpak beschreven om te komen tot een praktische rekenmethode waarin het faalpad en de risico's tijdsafhankelijk kunnen worden betrokken. In Hoofdstuk 4 zijn de cases beschreven alsmede de resultaten van de uitgevoerde berekeningen en de onderlinge vergelijking. In Hoofdstuk 5 is een discussie met betrekking tot de vergelijking gegeven. Het rapport sluit af met de conclusies in Hoofdstuk 6.

¹ De toevoeging 'provisorisch' duidt op het gebruik van bestaande technieken, omdat anders een evident veel grotere onderzoeks-omvang dan het onderhavige project nodig zou zijn.

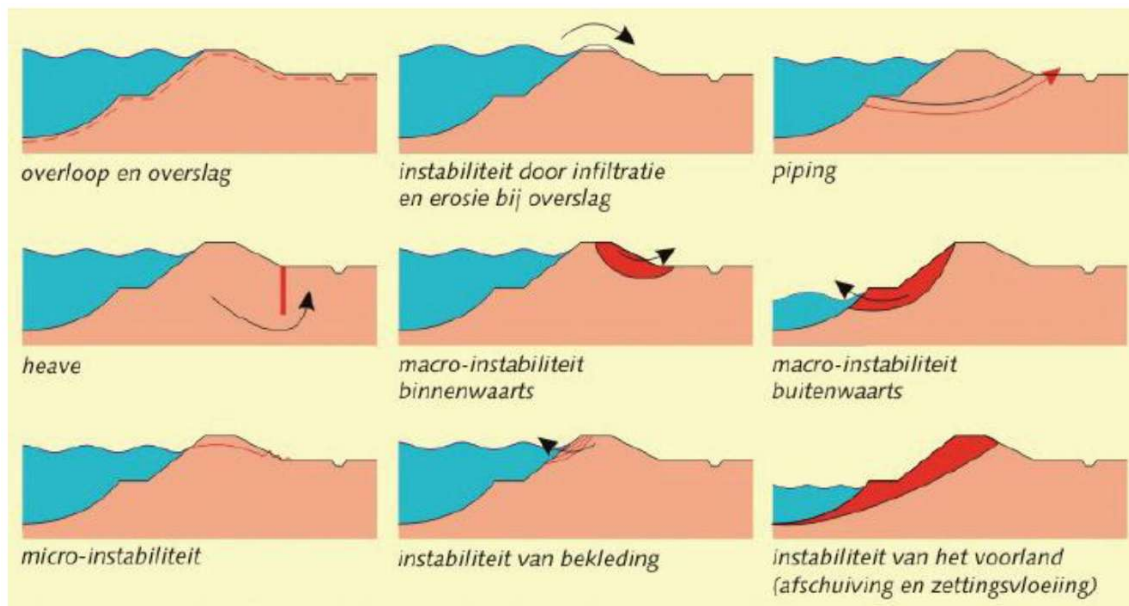
2 BRUIKBAARHEID BESCHIKBARE METHODEN

Onderstaand worden 3 methoden beschreven in relatie tot de kernaspecten voor het beoordelen van taai dijken: het tijdsaspect tijdens een hoogwatergebeurtenis, de erosie na initieel faalmechanisme, en de bresgroei, alle in relatie tot het beperken van de gevolgen van overstromen (den Heijer, 2024).

2.1 Het Wettelijk Beoordelings Instrumentarium (WBI2017) - exclusief faalpaden

Traditioneel wordt een overstroming gedefinieerd als de situatie waarin een dijk zijn waterkerend vermogen verliest, leidend tot substantiële schade of slachtoffers². Dit verlies van waterkerend vermogen is (voor de meeste faalmechanismen) tot vrij recent gedefinieerd geweest als het moment waarop een initieel faalmechanisme optreedt, en dit wordt ook nu nog vaak toegepast.

Voor het bepalen van de aanwezige weerstand tegen het optreden van een faalmechanisme zijn rekenregels ontwikkeld zodat de dijken de hydraulische belastingen veilig kunnen keren. De eerste versies daarvan waren een voorschrift, het Voorschrift Toetsen op Veiligheid (VTV, 2006), later is het doorontwikkeld and hernoemd als het Wettelijk Beoordelings Instrumentarium (WBI, 2017), wat in 2023 weer werd vervangen voor het Beoordelings en Ontwerp-instrumentarium BOI 2023. Het instrumentarium bevat voor alle initiële faalmechanismen beoordelingschema's en rekenprocedures. In Figuur 3 is een overzicht van de belangrijkste faalmechanismen gegeven. De samenstelling van de beoordeling voor alle faalmechanismen leidt tot een oordeel over de waterkering.



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

Naast de dijk- en grond gegevens zijn de Hydraulische Randvoorwaarden (HR) nodig, de waterstanden en golven voor de waterkeringen. Deze zijn in 1996 voor het eerst vastgesteld, na een uitvoerige inventarisatie van de ontwerpwaarden, en in de jaren daarna geactualiseerd en aangevuld op basis van probabilistische modellen (Geerse, Slomp, & Waal, 2011; Den Heijer, Vos, Diermanse, Groeneweg, & Tönis, 2008). Onder de huidige normering worden ze gerepresenteerd met HYDRA-NL. Dat is een model

² Praktisch wordt 'leidend tot substantiële schade of slachtoffers' gedefinieerd als de situatie waarin er in een gebied meer dan 20 cm water komt te staan.

dat is ontwikkeld en uitgeleverd door het Rijk, voor het bepalen van de representatieve hydraulische randvoorwaarden en hydraulische belastingniveaus, afhankelijk van locatie en faalmechanisme. Bij het afleiden van de HR wordt uitgegaan van de maximale belasting tijdens een hoogwatergebeurtenis.

Het tijdsaspect tijdens een hoogwatergebeurtenis ontbreekt in de rekenregels voor initieel falen behalve voor het faalmechanisme bekleding, en dus ook de navolgende erosie en bresgroei. Daarom is deze aanpak niet geschikt om verschillende dijkontwerpen te vergelijken op taai gedrag.

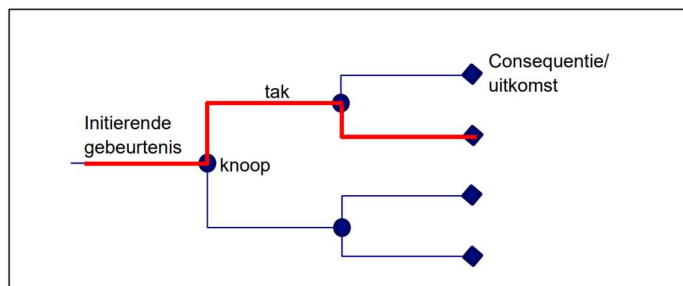
NB. Voor het ontwerpen van dijken wordt in essentie dezelfde kennis van de fysische processen gebruikt, met aangepaste veiligheidsfactoren omdat het niet om de actuele situatie gaat maar om een onzekere toekomstige situatie.

2.2 Het Beoordelings en Ontwerp Instrumentarium BOI - faalpaden

Faalpaden beschrijven de keten van gebeurtenissen die leiden tot het falen van een dijk, van de eerste tekenen van problemen tot een uiteindelijke doorbraak. Het concept faalpad helpt om beter te begrijpen hoe en waarom een dijk faalt. In plaats van enkel te focussen op het eerste faalmechanisme, zoals een afschuiving door macro-instabiliteit, wordt gekeken naar de opeenvolgende gebeurtenissen die uiteindelijk een doorbraak veroorzaken. Deze benadering staat ook bekend als 'Het verhaal van de kering, waarin de ontwikkeling van het falen stap voor stap wordt beschreven.

Het Wettelijk Beoordelingskader BOI 2023 (Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2023) biedt ook de mogelijkheid om een faalpad na initieel falen te beoordelen, zoals de erosie van een talud en kern na het afslaan van de bekleding. De gebeurtenissen tussen het initiële falen en de uiteindelijke bresgroei kunnen in een Toets op Maat worden meegenomen. In het Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium (WBI2017/WBI2023) zijn gebeurtenisbomen uitgewerkt die dit proces van initiële schade naar 'bresgroei' beschrijven. Voor elke faalmechanisme is een specifieke faaldefinitie vastgesteld. Voor de Toets op Maat zijn geen algemeen toepasbare formules of procedures zoals die er zijn voor het ontstaan van initiële schade.

In (Van, 2022) is een uitvoerig overzicht gegeven van historische cases en aanpak en toepassing in verschillende landen. De kern van de aanpakken is het gebruik van een gebeurtenissenboom of faalboom, waarbij de opeenvolgende gebeurtenissen ofwel in serie ofwel parallel aan elkaar worden gerelateerd, zie Figuur 4.



Figuur 4 Conceptuele weergave van een gebeurtenissenboom en een faalpad.

In Nederland wordt de faalpadenaanpak gebruikt door op de knopen van de gebeurtenissenboom overgangskansen toe te kennen, bijvoorbeeld gebaseerd op expertmeningen, die aangeven of een volgende stap in het proces wordt ingezet of niet, zie Figuur 5. Zowel de opeenvolging van deze gebeurtenissen in de tijd, als deze overgangskansen zijn subjectief. En met het effect van de bresafmetingen op de gevolgen wordt geen rekening gehouden. Voor het gestelde doel biedt dit model

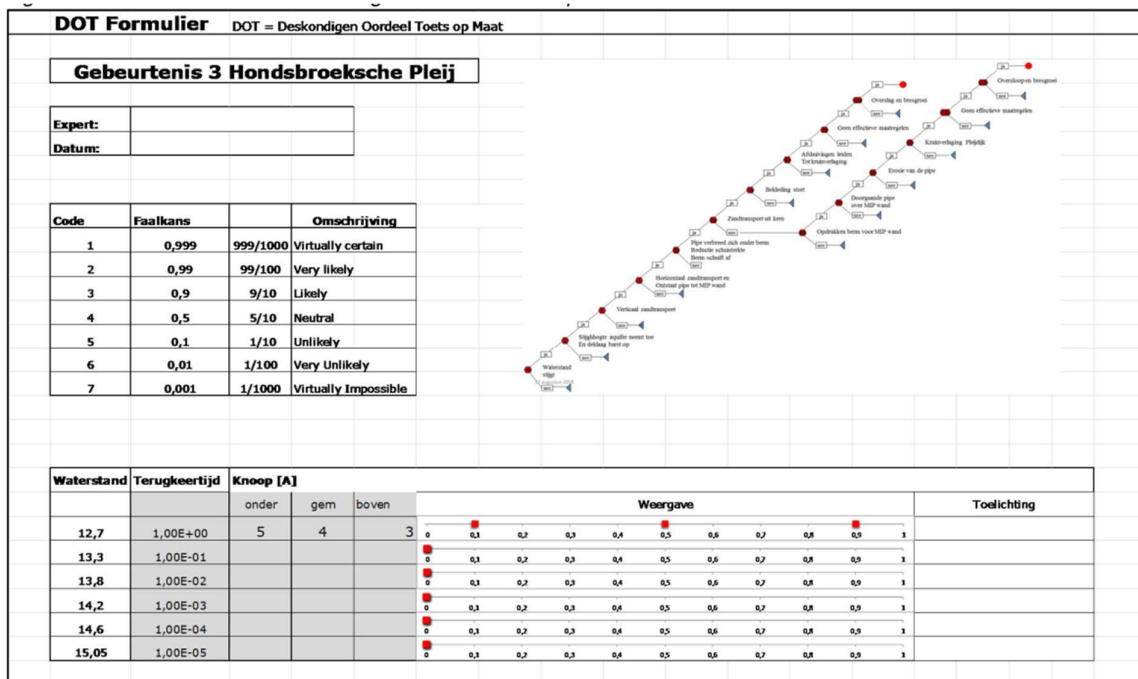
dus niet voldoende inzicht, omdat taaie dijken ontworpen worden om het bezwijkgedrag te vertragen, en de bresgroei en uiteindelijke bresafmetingen te verminderen, wat resulteert in een kleiner overstromingsvolume en daarmee in lagere schade en minder slachtoffers. Hierdoor voldoen de huidige traditionele faalpadanalyses niet.

Sommige faalpadanalyses nemen wel de volledige tijdsduur tijdens een extreem event mee. Een punt van aandacht daarbij is dat ze gebruik maken van dezelfde normen die gebaseerd zijn op de beschikbare overstromingssimulaties. Uitgangspunt voor de huidige overstromingssimulaties is dat de bres geïnitieert wordt ten tijde van de piek in het hoogwater. In de faalpadenaanpak zoals hier bedoeld wordt er soms vanuit gegaan dat de volledige tijdsduur tijdens een extreem event beschikbaar is voor bresvorming, waarbij de bres dus niet per definitie optreedt ten tijde van hoogwater. Dergelijke faalpadanalyses passen dus niet consistent bij de normering.

NB. Dit model maakt het wel mogelijk om meer inzicht te krijgen in de sterkte en kwetsbaarheid van een waterkering. Door het faalpadmodel te gebruiken, kunnen waterkeringbeheerders beter anticiperen op mogelijke risico's en gerichtere maatregelen nemen om de veiligheid van dijken op lange termijn te waarborgen.

Expertkennis als noodzakelijke aanvulling

Omdat we nog niet alle aspecten van taaie dijken volledig kunnen modelleren, is expertkennis cruciaal. Expertschattingen worden gebruikt om overgangskansen tussen de verschillende fasen van een risicopad te bepalen. Workshops met experts worden georganiseerd om deze overgangskansen in te schatten.

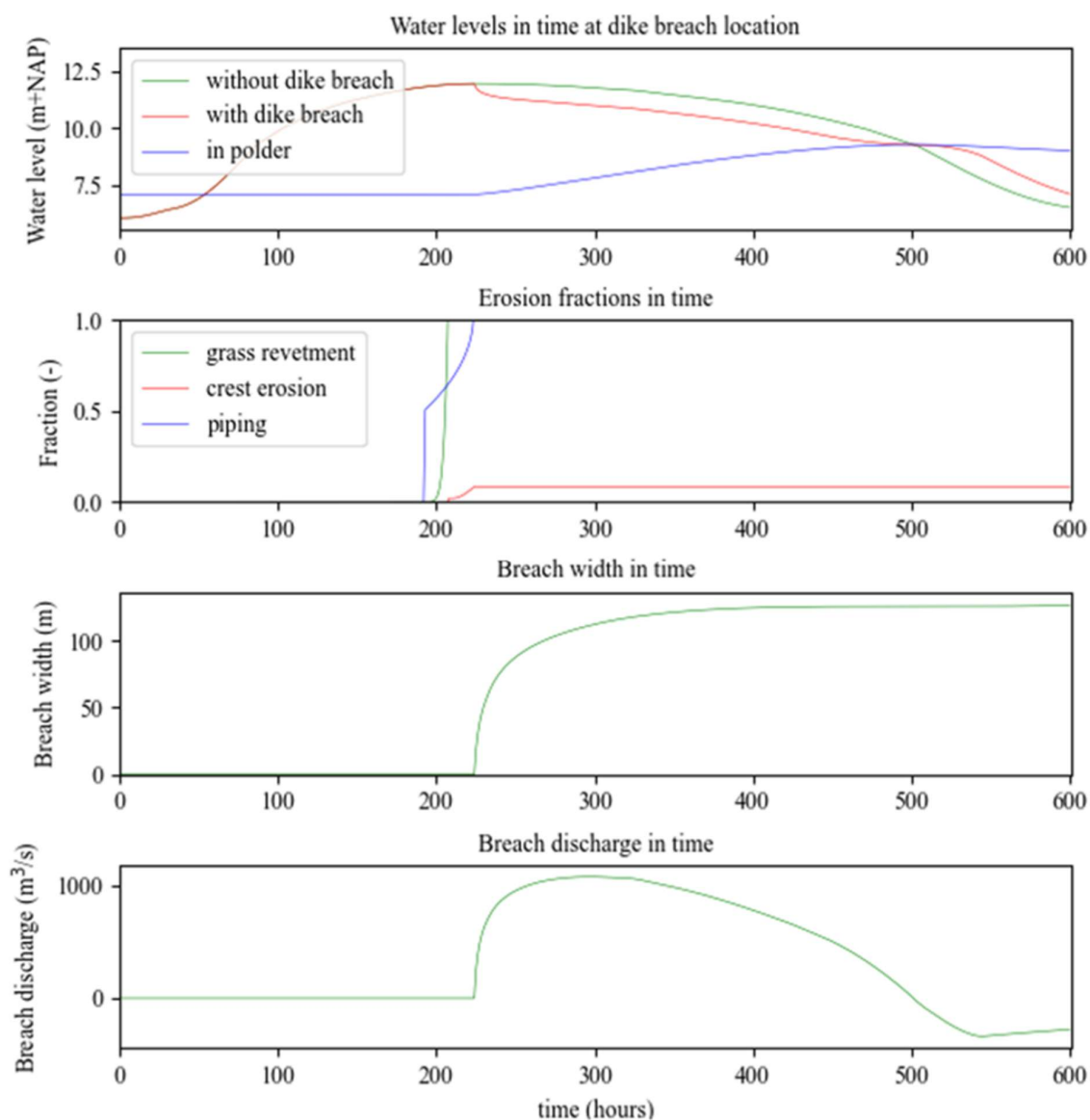


Figuur 5 Formulier voor ophalen expertmeningen

2.3 Volledige risico benadering

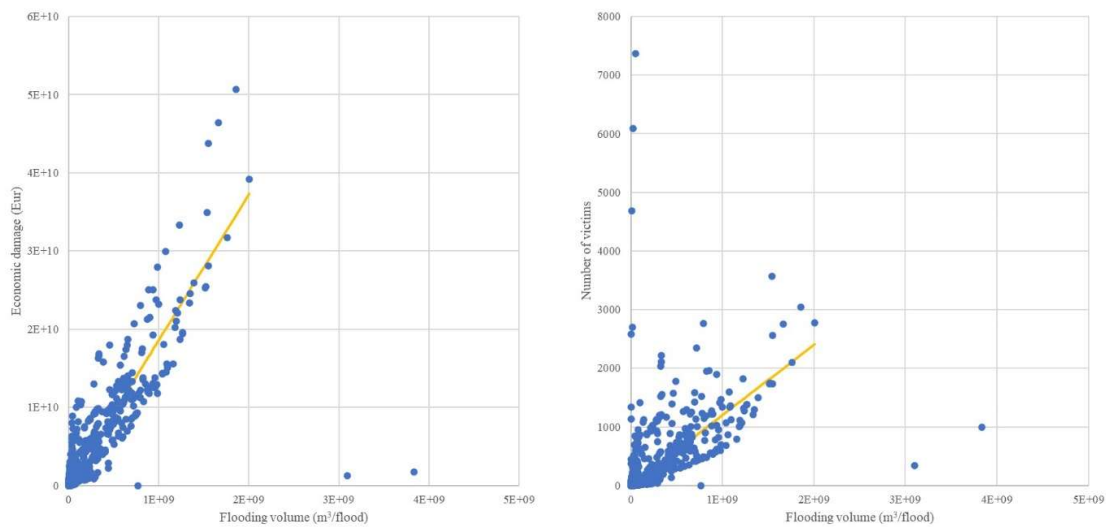
In (Den Heijer & Kok, 2022) is een volledige risicoanalyse uitgewerkt, waarin naast de faalpaden ook de risico's als gevolg van falen, en als gevolg van de bresgroei en -afmetingen zijn betrokken. In dit rapport benoemen we dat verder als het TDK-model.

Het risico wordt benaderd met een Monte Carlo Importance Sampling Analyse waarin vele hoogwater gebeurtenissen worden getrokken, en de resulterende gevolgen opgeteld. Voor elke hoogwater gebeurtenis wordt het gehele verloop van de belastingen in de tijd, het optreden van initieel falen, vervolgprocessen tot dijkdoorbraak, bresontwikkeling, instroom in de achterliggende polder, en schade en slachtoffers integraal gemodelleerd, zie Figuur 6.



Figuur 6 Voorbeeld van een het verloop van waterstanden, bresgroei en bresvolume als gevolg van een faalgebeurtenis. Bron: (Den Heijer & Kok, 2022).

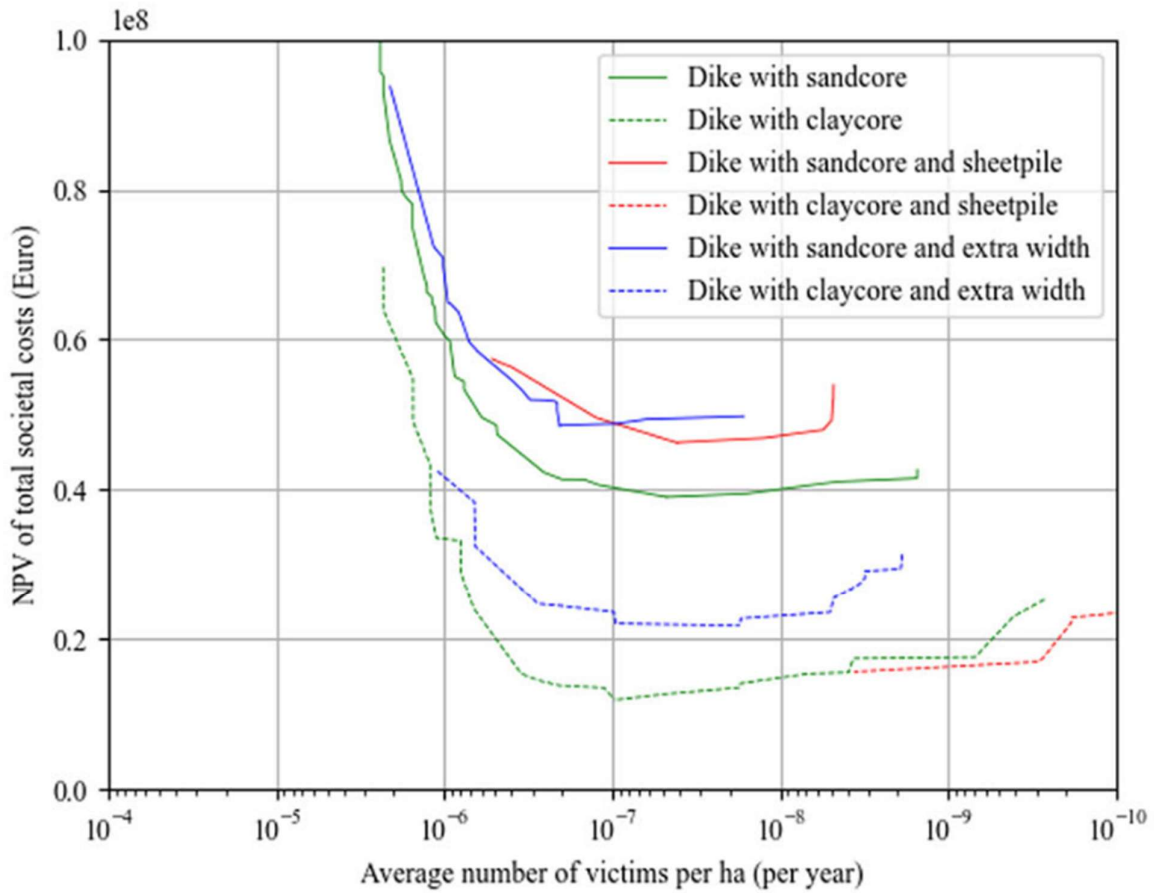
Voor het bepalen van de gevolgen kon hierbij de LIWO database niet direct gebruikt worden, omdat de gevolgen in de LIWO database slechts voor een beperkt aantal waterstanden beschikbaar zijn, en meestal het moment van falen de hoogste waterstand is tijdens een gebeurtenis. Daarmee komt juist het cruciale punt voor taaie dijken (vertraging van het proces) niet tot uiting. Daarom maken (Den Heijer & Kok, 2022) de denkstap naar het overstromingsvolume. Voor de casus die zij uitwerken (de Grebbedijk) zijn alle rivieroverstromingen geanalyseerd en het bijbehorende overstromingsvolume bepaald. Het lineaire verband dat daarin gevonden werd is gebruikt als proxy voor de schade afhankelijk van het overstromingsvolume, zie Figuur 7. Daarin komt het vertragende effect van een taaie dijk wel tot uiting omdat een taaiere dijk een minder groot overstromingsvolume zal doorlaten, wat met deze aanpak tot minder grote gevolgen leidt. Het overstromingsvolume is in deze aanpak bepaald met een kombergingsaanpak (0D).



Figuur 7 Schade en slachtoffers afhankelijk van instromend volume, voor alle rivieroverstromingen in de LIWO database (blauw), tezamen met het resultaat van een fit (oranje). Bron: (Den Heijer & Kok, 2022).

Het resultaat heeft een andere vorm dan de gebruikelijk voor een WBI beoordeling of ontwerp. Er wordt gezocht naar die dijkafmetingen die de minimale maatschappelijke kosten vergen. De maatschappelijke kosten zijn dan de som van de kosten om deze afmetingen te bereiken en de risico's. Dat is voor de huidige veiligheidsaanpak vooraf en eenmalig gedaan en vastgelegd in de wettelijke norm. In (Den Heijer & Kok, 2022) is voor een serie aan dijkafmetingen bovenstaande risico berekening doorlopen. Het resultaat heeft dan de vorm van dijkafmetingen, die behoren bij de minimale maatschappelijke kosten. Verschillende dijk constructies (kern, opbouw, drempels, etc.) kunnen op deze wijze worden beoordeeld en onderling vergeleken. De constructie die de minimale maatschappelijke kosten vergt heeft de voorkeur. Zie als voorbeeld Figuur 8.

Conceptueel is deze aanpak de meest ontwikkelde voor het gestelde doel. Echter, de instrumentatie van de aanpak betreft alleen het rivierengebied, en slechts 2 faalpaden (golfoverslag-erosie binnentalud en kruin - bres; opbarsten – heave – piping – pipe ontwikkeling – bres). Deze aanpak kan dus ook niet voor alle cases in het project worden gebruikt.



Figuur 8 Voorbeeld van het resultaat van de volledige risico analyse. Bron: (Den Heijer & Kok, 2022).

2.4 Bruikbaarheid beschikbare methoden

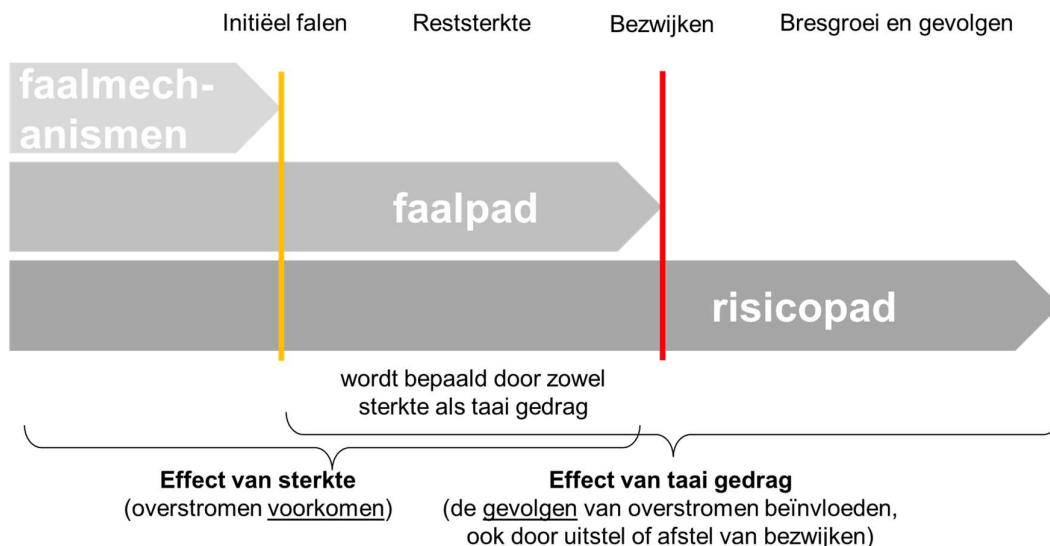
Samenvattend zijn geen van alle methoden geschikt of compleet voor alle faalpaden en voor alle gebieden in Nederland. Er moet dus een aanpak worden opgezet voor onderhavig project.

3 REKENMETHODE VOOR EFFECTEN TAAI GEDRAG EN KLIMAATVERANDERING

3.1 Van faalpaden naar risicopaden

Hoewel het gebruik van faalpaden waardevol is voor het analyseren van de opeenvolging van gebeurtenissen die leiden tot dijkfalen, schiet dit concept tekort voor taaie dijken. Gevolgen van falen worden niet meegenomen in faalpad-analyses. Het concept taaie dijken beoogt juist om de gevolgen van een doorbraak te beperken door vertraging van het bezwijkgedrag en beperking van bresgroei en bres afmetingen.

In (Den Heijer & Kok, 2022) worden voor twee van de faalpaden ook de daarna volgende risico's bepaald. We nemen deze aanpak over en benoemen dat als *risicopaden*, zie Figuur 9. Risicopaden richten zich op de integrale risico's: zowel de kans op doorbraak als de verwachte gevolgen ervan. Risicopaden bieden een vollediger beeld van de mogelijke gevolgen van falen, omdat ze rekening houden met het verminderde instromende watervolume, de langere tijd voor evacuatie, en het beperkte schade- en slachtofferrisico dat kenmerkend is voor taaie dijken.



Figuur 9 Verschillen faalpad en risicopad.

De benadering via risicopaden is essentieel voor het ontwerpen en beheren van taaie dijken, omdat het helpt om de daadwerkelijke veiligheidsvoordelen van taaï gedrag te kwantificeren en te benutten in zowel beleid als praktijk. Er wordt daarom in dit hoofdstuk een rekenmodel ontwikkeld waarmee inzicht kan worden gegenereerd in de relatie tussen ontwerpen van een dijk die daardoor taaï gedrag vertoont en het risicoprofiel ervan. We noemen dit het *risicopadenmodel*.

3.2 De taaïheidsindex: een praktische werkwijze voor het updaten van de norm

We introduceren de taaïheidsindex TI . Deze index vertaalt de optimale faalkans behorend bij een brossse dijk constructie in die voor een zekere (mogelijk taaïere) constructie x :

$$P_{f_{opt,design x}} = TI \cdot P_{f_{opt,bros}}$$

Vergelijking 1

Hierin is $P_{f_{opt, design x}}$ de economisch optimale faalkans voor een dijktraject met een gegeven constructie type. De taaheidsindex is dus gedefinieerd als de verhouding tussen de economisch optimale faalkans van een brossse dijk en de economisch optimale faalkans van een zeker (mogelijk taaier) dijkontwerp. De taaheidsindex van een bross dijkontwerp is daarmee per definitie gelijk aan 1. Een bross dijkontwerp kan niet brosser zijn dan bross, dus de waarde 1 is daarmee ook de theoretisch minimale waarde. De taaheidsindex van een dijkontwerp is groter naarmate het gedrag taaier is.

Voor veel dijktrajecten in Nederland is de veiligheidsnorm gebaseerd op uitgangspunten die passen bij een brossse dijk, zie (den Heijer, 2025). In dat geval verandert Vergelijking 1 in:

$$P_{f_{opt, design x}} = TI \cdot standard$$

Vergelijking 2

Hierin is *standard* de vigerende norm voor de faalkans, die in Nederland voor elk dijktraject wettelijk is vastgelegd. In deze vergelijking heeft de taaheidsindex de vorm van een norm-update-factor. In het tekstkader 'De norm en de norm-update-factor f_d uit (den Heijer et al., 2025)' is nader geduid hoe de norm relateert tot de wetenschappelijk onderbouwde factor f_d voor de norm-update-factor in (den Heijer et al., 2025).

Niet voor alle dijktrajecten in Nederland is de veiligheidsnorm gebaseerd op uitgangspunten die passen bij een brossse dijk. In zulke gevallen is er de-facto in de normering al rekening gehouden met de aanwezigheid van een zekere mate van taaie gedrag. Omdat het normenstelsel in Nederland wettelijk is verankerd, is het praktisch aantrekkelijk om een relatie te leggen tussen de norm en de taaheidsindex. Daartoe wordt de taaheidsindex $TI_{standard}$ gedefinieerd, die behoort bij de uitgangspunten van de dijkconstructies die ten behoeve van de normering zijn gebruikt. Gebruik van Vergelijking 1, met *standard* voor $P_{f_{opt, design x}}$, leidt tot:

$$TI_{standard} = \frac{standard}{P_{f_{opt, bross}}}$$

Vergelijking 3

Daarmee is er een relatie tussen de taaheidsindex voor een dijk met een risicoprofiel van een zekere (mogelijk taaie) constructie x , de norm-update-factor f_d en de taaheidsindex die impliciet bij de normering is gebruikt (combinatie van Vergelijking 6 en Vergelijking 3):

$$TI = f_d \cdot TI_{standard}$$

Vergelijking 4

Substitutie van Vergelijking 4 in Vergelijking 1 geeft:

$$P_{f_{opt, design x}} = f_d \cdot TI_{standard} \cdot P_{f_{opt, bross}}$$

Vergelijking 5

Dit is een meer algemene formulering dan Vergelijking 2.

NB. Voor alle dijktrajecten waarvoor tijdens het normering brossse uitgangspunten zijn genomen is $TI_{standard} = 1$ en $P_{f_{opt, bross}} = standard$, waarmee Vergelijking 5 voor die gevallen gelijk is aan Vergelijking 2.

De norm en de norm-update-factor f_d uit (den Heijer et al., 2025)

De Nederlandse wettelijke normen zijn gebaseerd op de strengste eisen vanuit economisch perspectief, het lokaal individueel risico (LIR) en het groepsrisico. Daarna zijn de normen voor alle dijktrajecten geïnclassificeerd, ze zijn 'afgerond' in veiligheidsklassen. De normen van grofweg de helft van onze waterkeringen wordt door economisch risico bepaald en de andere helft door slachtoffer risico's of bijzondere risico's. De normen zijn dus slechts deels bepaald door het economisch criterium.

In onderhavig rapport gaan we alleen in op het economisch risico, omdat de taaie dijken juist bedoeld zijn om het slachtoffer risico zo sterk te reduceren dat slachtoffers niet meer bepalend zijn voor de keuze van de norm. In (Kind, 2014) en (Eijgenraam et al., 2017) is aangetoond dat de economisch optimale faalkans tijdsafhankelijk is, en afhangt van de locatie van het dijktraject (type watersysteem). Deze faalkans verloopt in de tijd tussen een afkeurgrens en een ontwerpgrens. Die beide laatste nemen in de tijd langzaam af als gevolg van klimaatverandering en zetting etc. De afkeurgrens geeft aan dat zodra de actuele faalkans deze overschrijdt, het batig is om de dijk dan te versterken. De ontwerpgrens geeft aan tot welk niveau de versterking de faalkans dan zou moeten reduceren.

Als basis voor de wettelijke normen, zijn eerst de economisch optimale faalkans afgeleid voor alle dijktrajecten in Nederland, representatief voor 2050, zie verder (Kind, 2014). De wettelijke normen bevatten 2 waarden: de signaleringswaarde en de ondergrenswaarde. Voor dat deel van de wettelijke normen dat niet gebaseerd is op de slachtoffer risico's geldt: de ondergrenswaarde is geïnclassificeerd op basis van de economische optimale faalkans op de ontwerpgrens in 2050. De signaleringswaarde is geïnclassificeerd op basis van het gemiddelde tussen de afkeurgrens in 2050 en de economische optimale faalkans op de ontwerpgrens in 2050.

In (den Heijer & Kok, 2022), (den Heijer, 2025) en (den Heijer et al., 2025) wordt aangetoond dat ook de dijkconstructie invloed heeft op economisch optimale faalkans. In (den Heijer et al., 2025) wordt een factor f_d afgeleid die de relatie legt tussen enerzijds de economisch optimale norm voor een bepaald dijktraject en voor een bepaalde dijk constructie op een bepaald moment, en anderzijds met de economisch optimale norm die is gebruikt voor standaardisatie voor hetzelfde dijktraject. In (den Heijer et al., 2025) staat dit 'formeel' wetenschappelijk onderbouwd en uitgewerkt als:

$$P_{f_{risk-opt}} = f_d \cdot standard$$

Vergelijking 6

met:

$$f_d = \frac{I_{design}^{f_{ovx_{design}}} \cdot D_{standard(2050)}}{I_{standard}^{f_{ovx_{standard}}} \cdot D_{design(jaar)}}$$

Vergelijking 7

Voor de Nederlandse situatie, leidt de factor f_d tot een betrouwbare economisch optimale faalkans voor die dijktrajecten waar het economisch criterium prevaleert boven de andere eisen, en waar de getalsmatige aanpassing door de klasse-indeling in de wettelijke normen niet te groot is.

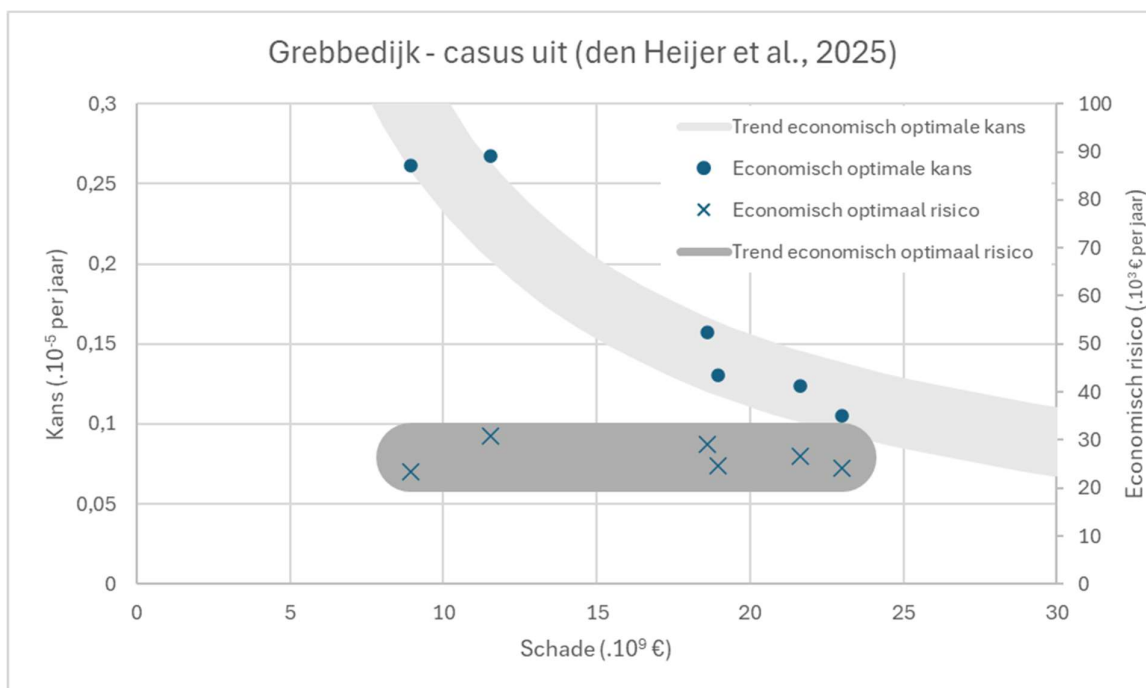
De casus Grebbedijk

In (den Heijer et al., 2025) is een casus uitgewerkt voor de Grebbedijk, aan de Neder-Rijn tussen Rhenen en Wageningen. De economisch optimale kans op falen is analytisch uitgewerkt voor 6 dijkconstructies, met de Aangepaste Van Dantzig methode, en vergeleken met de numerieke resultaten uit (den Heijer &

Kok, 2022). Voor de onderhavige studie zijn de basis gegevens nogmaals geanalyseerd en aangevuld met de 6 andere dijk constructies uit en (den Heijer, 2025), zie Bijlage C. De heranalyse betrof met name de berekening van de representatieve schade en de marginale investeringen.

Tabel 1 De resultaten van de heranalyse van de casus Grebbedijk in (den Heijer et al., 2025), en de vertaling daarvan in de taaiheidsindex.

Dijk constructie	Schade (Mld €)	Optimale faalkans (.10 ⁻⁵ /jr)	Taaiheids- index (Verg. 1)	Risico (.10 ³ €/jr)	Taaiheids- index (praktisch)	Verhouding tussen indexen kolom (4)/(6) (-)
	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
zandkern (bros)	23	0,10	1,0	24	1,0	1,0
Kleikern	19	0,13	1,2	25	1,2	1,0
Zandkern met damwand	12	0,27	2,6	31	2,0	1,3
Kleikern met damwand	9	0,26	2,5	23	2,6	1,0
Zandkern en brede kruin	22	0,12	1,2	27	1,1	1,1
Kleikern en brede kruin	19	0,16	1,5	29	1,2	1,2



Figuur 10 Relatie tussen de schade na overstroming en de economisch optimale faalkans en bijbehorende risico's voor een casus in (den Heijer et al., 2025).

In Figuur 10 zijn voor de 6 constructies uit (den Heijer et al., 2025) de in de Bijlage C opnieuw analytisch berekende economisch optimale kansen uitgezet tegen de representatieve gevolgen, zie ook de respectievelijke kolommen (2) en (3) in Tabel 1. De representatieve gevolgen zijn afgeleid als het economisch risico gedeeld door de economisch optimale kans (NB. het gaat hier om het economisch risico bij de dijkdimensies behorend bij die economisch optimale faalkans). Er is duidelijk te zien dat

naarmate het risicoprofiel dat behoort bij een dijkconstructie leidt tot lagere gevolgen na doorbraak, de economisch optimale kans op overstroming groter is dan bij een risicoprofiel met grotere gevolgen. Theoretisch zou de optimale faalkans evenredig moeten zijn met de reciproke van de schade, en dat klopt best goed, zie de lichtgrijze curve in Figuur 10.

Met deze gegevens van de analytische aanpak uit (den Heijer et al., 2025) is de taaheidsindex af te leiden voor deze 6 dijkconstructies, gegeven de definitie in Vergelijking 1. De taaheidsindex is bepaald ten opzichte van de brosse zandkern, zie kolom (4) in Tabel 1. Alle waarden liggen tussen 1 en 3.

NB. Merk op dat in de casus Grebbedijk de analyse gericht was op het ontdekken van de mogelijkheden om taai gedrag te modelleren, en niet op het vinden van grote taaheidsindices. Immers, de taaheidsindex bestond toen nog niet en wordt pas in voorliggend rapport voor het eerst gepresenteerd.

Praktische werkwijze

Ook is het opvallend dat de risico's (kans maal schade) voor alle varianten ongeveer gelijk zijn, zie kolom (5) in Tabel 1 en de markers in de donkergrijze balk in Figuur 10. Het risico dat behoort bij het een economisch optimale faalkans is dus onafhankelijk van de dijk constructie! Dit wordt in het volgende gebruikt om de taaheidsindex op een praktische wijze af te leiden.

Dit is praktisch omdat bijvoorbeeld tijdens de vroege fasen van een ontwerpproces nog niet alle informatie over kosten en dimensies beschikbaar is en dus ook niet over de meest optimale faalkansen en eventuele update van de normstelling. In deze praktische werkwijze wordt geen numerieke optimalisatie gedaan zoals in (den Heijer & Kok, 2022), en ook geen puur analytische optimalisatie zoals in (den Heijer et al., 2025). De kern is dat gezocht wordt naar de verhouding tussen de gevolgen van een brosse en een taai dijk, als proxy van de taaheidsindex. Die proxy is eenvoudig af te leiden, en kan dan worden gebruikt bij beoordelingen en in vroege stadia van ontwerp.

Er wordt gebruik gemaakt van de bevinding uit de casus hierboven dat de risico's tussen de verschillende varianten ongeveer constant zijn. Er wordt dus van uitgegaan dat de risico's die impliciet zijn geormerkt als 'acceptabel' door de normstelling, ook acceptabel zijn bij een alternatief dijkontwerp:

$$P_{f_{opt,design\ x}} \cdot \overline{D_{design\ x}} \approx P_{f_{opt,bros}} \cdot \overline{D_{bros}}$$

Vergelijking 8

Met $\overline{D_{design\ x}}$ en $\overline{D_{bros}}$ worden de representatieve waarden van de schade aangeduid. Gegeven de definitie in Vergelijking 1 kan de taaheidsindex met behulp van Vergelijking 8 worden gedefinieerd als de verhouding tussen de gevolgen van een brosse en een (mogelijk taaier) dijkontwerp:

$$TI = \frac{P_{f_{opt,design\ x}}}{P_{f_{opt,bros}}} \approx \frac{\overline{D_{bros}}}{\overline{D_{design\ x}}}$$

Vergelijking 9

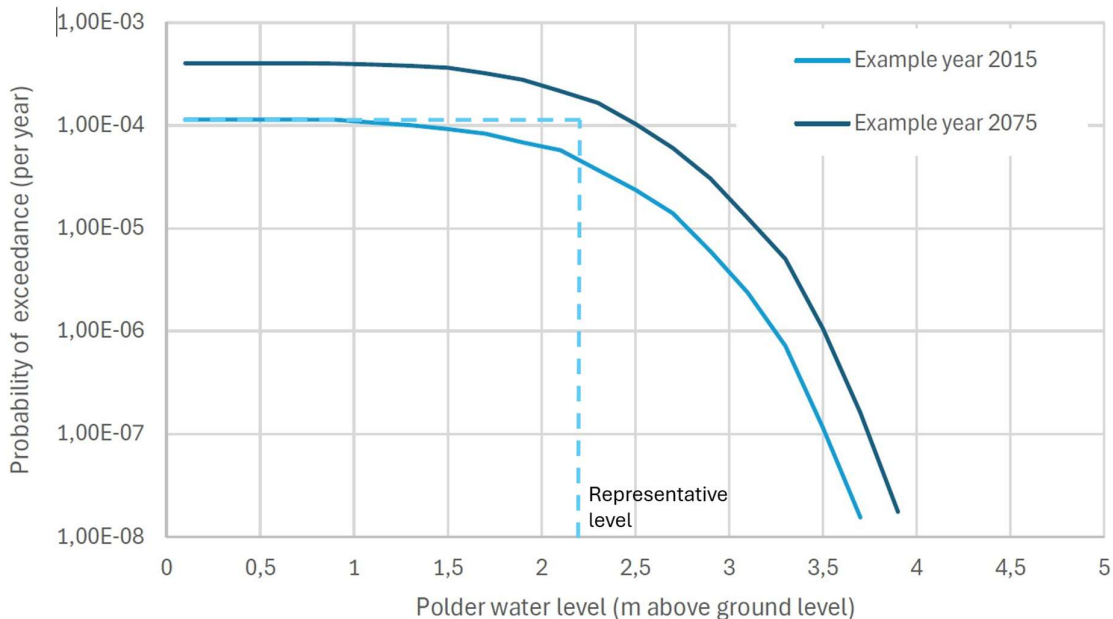
Die representatieve schadewaarden zijn eenvoudig af te schatten omdat ze veel meer afhankelijk zijn van het dijkconstructie type en het watersysteem dan van de precieze faalkans. Om dat aan te tonen wordt hieronder een schatting van $\overline{D_{design\ x}}$ afgeleid voor de casus Grebbedijk voor een zand kern en een kleikern.

In Figuur 11 zijn 2 F_H -curves te zien uit (den Heijer, 2025). Ze geven het verband tussen de waterstand in de polder (horizontale as) en de kans op het overschrijden daarvan (verticale as). De aansluiting van de F_H -curves met de verticale as is dus de kans dat een waarde van 0 m waterdiepte wordt overschreden. Feitelijk is dat de faalkans of het veiligheidsniveau: de kans dat er een overstroming optreedt (in

Nederland wordt een overstroming gedefinieerd als er gemiddeld 20 cm waterdiepte is in een postcode gebied; dat is in dit voorbeeld praktisch dezelfde waarde). De overstromingsdiepten op de horizontale as hebben in de gekozen aanpak een lineaire relatie met de schade: een hogere waterstand in de polder leidt tot een evenredig hogere schade D , zie verder paragraaf 3.3.2. Het oppervlak onder de curve heeft dus ook een directe relatie met het economisch risico. Het oppervlak onder de lichtblauwe getrokken curve is even groot als dat onder de gestreepte rechthoek (dat lijkt op het oog niet zo, maar dat komt omdat de verticale as een logaritmische schaal heeft). De waarde van $\overline{D}_{design\ x}$ wordt bepaald door bij het veiligheidsniveau te zoeken naar een oppervlak onder de gestippelde gelijkgekleurde lijn dat even groot is als het oppervlak onder de F_H -curve. Het representatieve schade niveau voor een dergelijke curve is daarmee gedefinieerd als:

$$\overline{D}_{design\ x} = \frac{Risiko_{design\ x}}{P_{f_{opt,design\ x}}}$$

Vergelijking 10



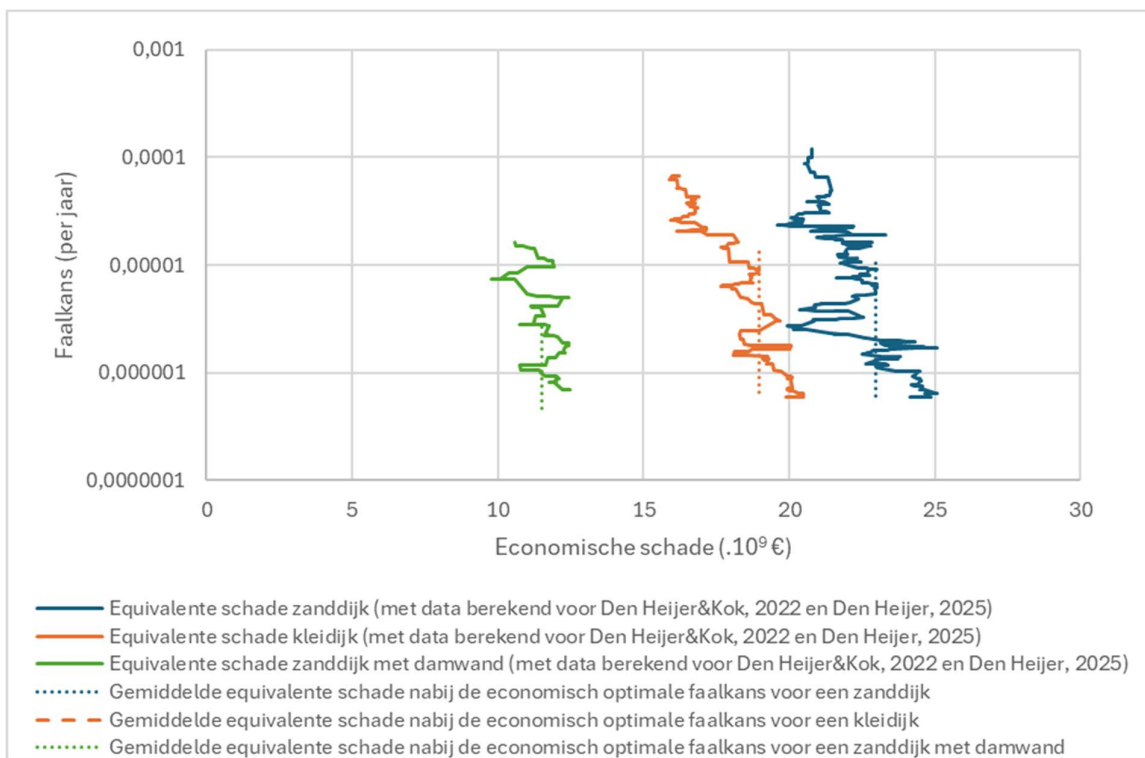
Figuur 11 Toelichting voor het bepalen van de representatieve schade uit de F_H -curves, aangepast van het Figuur 3.4 in (den Heijer, 2025): het oppervlak onder de lichtblauwe getrokken curve is even groot als dat onder de gestreepte rechthoek.

Elke combinatie van constructietype en dimensies leidt tot een F_H -curve. In de casus Grebbedijk zijn er ten behoeve van (den Heijer & Kok, 2022) en (den Heijer, 2025) honderden geproduceerd voor elk van de 6 constructie types. In Figuur 12 is het lopend gemiddelde voor 3 constructietypen gepresenteerd. Er is een zwak verband tussen de schade en de faalkans. Als de faalkans kleiner is, zijn de gebeurtenissen die tot falen leiden veel intenser, en daardoor neemt de schade iets toe. Maar de figuur toont ook aan dat in deze casus het verschil van 4 veiligheidsklassen (een factor 100, ca. 4 Mld €) nog steeds klein is ten opzichte van het verschil tussen de constructietypen: het verschil tussen een zanddijk en een kleidijk is ca. 5 Mld €, en het verschil tussen een zanddijk met en zonder damwand is zelfs is ca. 12 Mld € (ongeveer een factor 2) .

Dat maakt het mogelijk om de taaiheidsindex T_I af te leiden onafhankelijk van de normering of de precieze dimensionering. In Figuur 12 is een stippellijn aangegeven voor het gemiddelde van de representatieve

economische schade in een traject van een factor 10 hoger en lager ten opzichte van de economisch optimale faalkans. Wanneer dat zou zijn gedaan ten opzichte van de normering van $1 \cdot 10^{-5}$, zou dat in absolute zin weliswaar marginaal verschillen, maar omdat de afstand tussen de lijnen dezelfde blijft is het in de relatieve zin van Vergelijking 9 verwaarloosbaar.

Daarmee is aangetoond dat de representatieve schadewaarden (en daarmee de taaheidsindex met Vergelijking 9) onafhankelijk van de precieze faalkans kunnen worden geschat. Voor de casus in (den Heijer et al., 2025), is deze praktische uitwerking van de taaheidsindex bepaald ten opzichte van de brosse zandkern, zie kolom 6 in Tabel 1. De verhouding tussen de taaheidsindices, zie kolom 7, is in alle gevallen vrijwel gelijk is aan 1. Daarmee kan de praktische werkwijze goed worden gebruikt voor de vroege fasen van een ontwerpproces.



Figuur 12 Verband tussen het lopend gemiddelde van de equivalente schade over 10 F_H -curves en de faalkans. NB. de equivalente schade is gerelateerd aan het representatieve polder water level in Figuur 11.

De 'praktische werkwijze' en de norm-update-factor f_d

De 'praktische werkwijze' voor het bepalen van de taaibehoudingsindex TI komt onder een aantal voorwaarden volledig overeen met de norm-update-factor f_d uit (den Heijer et al., 2025), zie Vergelijking 7:

- De verhouding tussen de marginale investeringen $I' \times f_{ovx}$ voor enerzijds een beschouwde dijkconstructie en anderzijds een brossedijkconstructie is gelijk aan 1. Dat is geen onrealistische gedachte, aangezien een brossedijkconstructie mogelijk wat goedkoper is, maar wat omvangrijker is en dus een wat hogere waarde van f_{ovx} heeft, en de taaiere constructie wellicht wat duurder is, maar ook een kleinere waarde van f_{ovx} heeft. Dat kan elkaar compenseren.
- Voor de normering van het dijktraject is daadwerkelijk een set uitgangspunten gebruikt die duidt op brossedijkgedrag. Dat kan worden afgeleid uit de brossedijkbreedte (relatief groot), de afwezigheid van harde constructieve elementen, het kernmateriaal (zand) en moment van breken (tijdens hoogwater).
- Ook het tijdstip van de analyse is nog van belang: voor overeenkomst tussen de 'praktische werkwijze' en de norm-update-factor f_d moet (strikt genomen) gelijk zijn aan 2050, het jaar waarvoor de wettelijke normen gelden. Maar omdat de representatieve schade slechts zwak afhangt van het jaartal is dit de minst belangrijke voorwaarde.

Nadere uitwerking praktische werkwijze

De meest eenvoudige wijze om de taaibehoudingsindex te schatten is door de gevolgen van doorbraak te berekenen voor 1 belastingsituatie, bijvoorbeeld de vroeger veel gebruikte waarde MHW (Maatgevend HoogWater), voor een brossedijk ontwerp en een taaie ontwerp.

In voorliggende studie is een nauwkeuriger methode gebruikt, waarmee de bijdragen van verschillende risicopaden aan de taaibehoudingsindex kunnen worden bepaald. Daartoe zijn per risicopad risicoberekeningen nodig voor het afschatten van representatieve schade waarden $\overline{D_{design\ x}}$ met Vergelijking 12. Er wordt daarbij gekozen voor het risiconiveau bij een dijk die precies voldoet aan de norm. Om de risico's te berekenen moet de gehele schade-curve worden bepaald bij alle mogelijke overstromingssituaties, de F_H -curve in (den Heijer & Kok, 2022), zie ook Figuur 11. Met substitutie van Vergelijking 12 wordt Vergelijking 9 dan:

$$TI = \frac{P_{f_{opt,design\ x}}}{P_{f_{opt,bros}}} \approx \frac{\overline{D_{bros}}}{\overline{D_{design\ x}}} = \left[\frac{R_{risico\ Bros}}{R_{risico\ design\ x}} \right]_{norm}$$

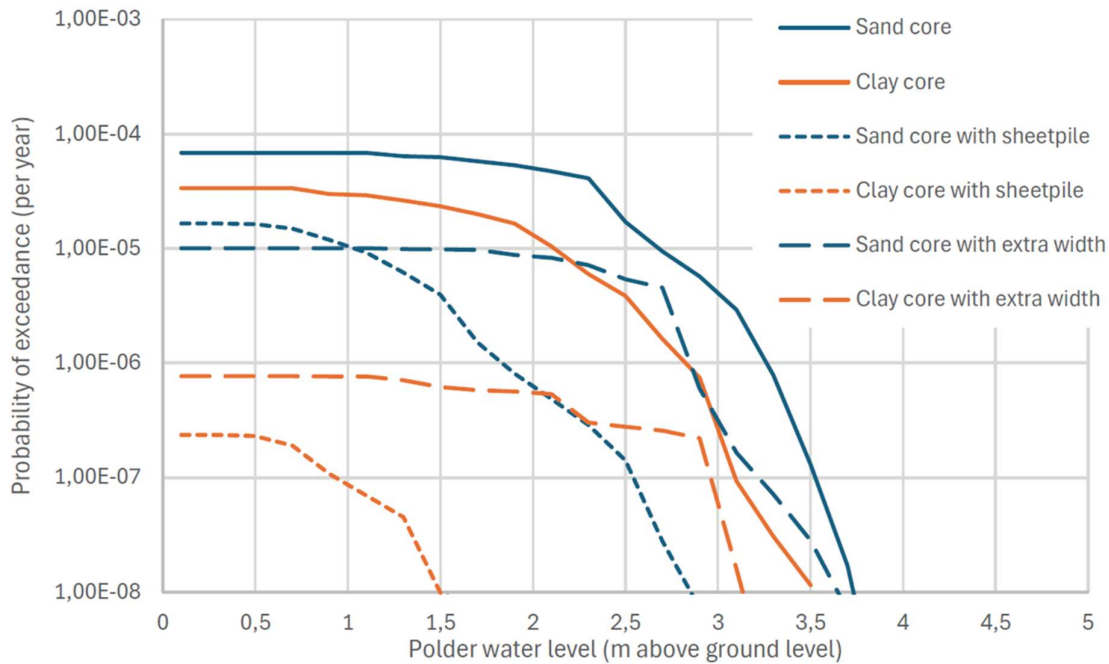
Vergelijking 11

Als er voor verschillende risicopaden taaibehoudingsindices kunnen worden bepaald, kan er gestuurd worden op de bijdragen per faalpad.

3.3 Conceptuele aanpak bepalen risico voor meerdere risicopaden

De risico's in Vergelijking 11 worden samengesteld op basis van meerdere van de risicopaden, geïntroduceerd in paragraaf 3.1. Dat is nodig omdat de gevolgen D van overstroming verschillen voor de onderscheiden risicopaden. Een risicopad dat wordt ingeleid door teveel golfoverslag leidt tot een ander moment van doorbreken dan een risicopad dat wordt ingeleid door het optreden van piping.

De gevolgen voor de risicopaden zijn elk ook weer afhankelijk van de dijk constructie. Dat is te zien in Figuur 13. Elk risicopad leidt dus via hydraulische belastingen en het type dijk constructie tot een overstromingseffect. Er is dus geen unieke waarde voor de gevolgen per dijk constructie.



Figuur 13 De F_H -curves verschillen per dijkconstructie. Bron:(den Heijer, 2025).

Zoals in paragraaf 3.2 toegelicht, is de oppervlakte onder de curves evenredig met het economisch overstromingsrisico. Om het oppervlak onder de curves te bepalen wordt daarom een volledige maar enigszins vereenvoudigde risico benadering opgezet, waarmee alle omstandigheden worden meegenomen waarin falen van de dijk leidt tot overstromingsgevolgen. Het risicoconcept wordt gebruikt, zoals ook in de basis van de volledige risicobenadering (paragraaf 2.3) is beoogd: de kans vermenigvuldigd met het gevolg, gesommeerd voor de verschillende risico paden:

$$R = \sum_{risicopad\ i}^n R_i = \sum_{risicopad\ i}^n P_i \cdot G_i$$

Vergelijking 12

Idealiter zou het gehele TDK-model (zie paragraaf 2.3) worden gebruikt, want dat model berekent direct het risico in Vergelijking 12, maar dat kan niet voor alle cases, omdat het belastingenmodel daarin alleen beschikbaar is voor de Rijntakken, en het sterkte model voor slechts 2 risicopaden. Daarom is ervoor gekozen om HYDRA-NL te gebruiken voor het genereren van de kansverdeling van de waterstanden f_h , en een rekenmodel te ontwikkelen wat daarop is gebaseerd. Aan elke trekking van een waterstand uit deze verdeling kan dan een waterstandsverloop worden verbonden (zie paragraaf 4.3)

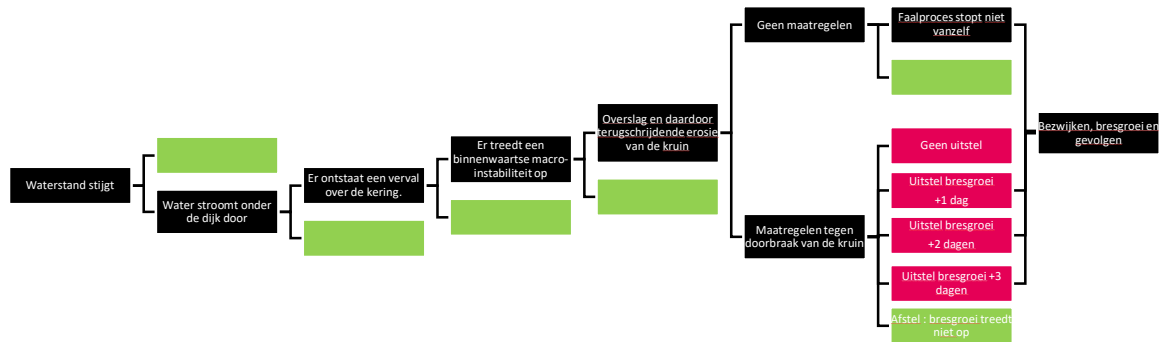
3.3.1 Faalkans

De kans op falen ten gevolge van een faalpad P_i wordt berekend als de kans op het optreden van een initieel faalmechanisme $P_{faalmechanisme\ i}$ vermenigvuldigd met het product van de overgangskansen voor de verschillende deelgebeurtenissen in de faalpaden (gebeurtenissenboom) en de kans dat de noodmaatregelen falen niet kunnen voorkomen:

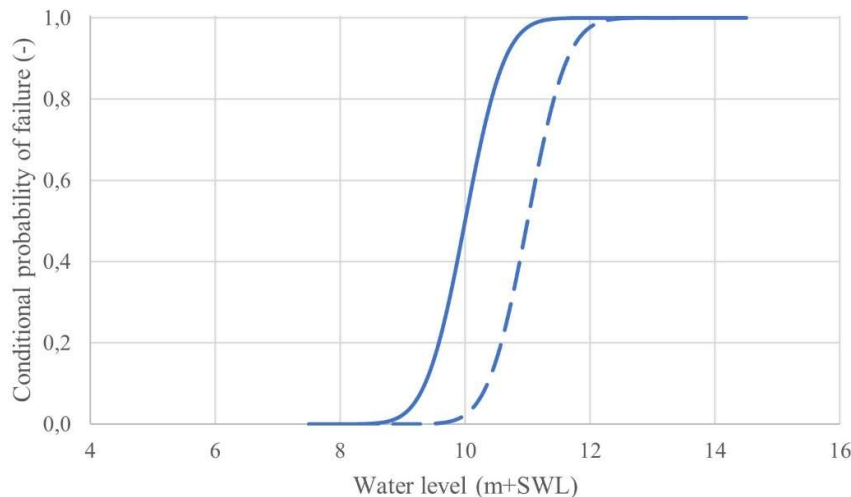
$$P_i = P_{faalmechanisme\ i} \cdot \prod_{j=1}^{j=m} P_{overgangskans\ ij} \cdot P_{noodmaatregelen\ falen}$$

Vergelijking 13

waarin j de indicator is voor de knoop in het faalpad. De overgangskansen van de knopen j naar $j+1$ worden met expertmeningen bepaald, net zoals dat voor de Toets op Maat wordt gedaan, zie Figuur 5. Veel knopen in de Toets op Maat betreffen achtereenvolgende fysische deelprocessen. Zie als voorbeeld Figuur 14. In de voorliggende studie worden die zoveel mogelijk samengevoegd en behandeld als een enkele knoop. Het gaat in deze studie om het verschil tussen taaie en brosse dijken. Knopen worden daarom alleen onderscheiden als ze de gevolgen significant verschillend kunnen beïnvloeden. Dat betreft voornamelijk het eventuele uitstel als gevolg van noodmaatregelen (zie als voorbeeld Figuur 14 in rood).



Figuur 14 Voorbeeld van een risicopad met enkele gebeurtenissen als gevolg van piping en macro-instabiliteit.



Figuur 15 Voorbeeld van een fragility curve met (gestreept) een curve die een iets 'sterkere' dijk weergeeft.

In de literatuur worden fragility curves gebruikt als de kans op het optreden van een faalmechanisme gegeven een optredende buitenwaterstand. In de meer gedetailleerde analyses worden daar soms ook de processen na het optreden van een faalmechanisme bij betrokken: de fragility curve geeft dan de conditionele kans op het optreden en doorlopen van een faalpad, gegeven een hoogwaterstand. In beide gevallen worden alleen de fysische processen betrokken, het is niet gebruikelijk dat in een fragility curve het al dan niet slagen van eventuele noodmaatregelen worden betrokken. De fragility curves geven ook in de onderhavige studie de conditionele kans op falen door een risicopad i , gegeven een waterstand, $P_{f|i,h}$, exclusief het effect van noodmaatregelen, zie Figuur 15:

$$P_{faalmechan\ i} = \int f_h \cdot P_{f|h} dh$$

Vergelijking 14

Hierin is de kans $P_{f|h}$ is een realisatie uit de fragility curves. Voor het afleiden van de fragility curves wordt een procedure gebruikt om de faalkans voor elk risicopad i af te regelen op de ruimte in de faalkansbegroting ω_i . De aanpak daarvoor is afgeleid uit (den Heijer, 2025), waarin met de fragility curve uit Figuur 15 wordt 'geschoven' net zolang tot :

$$P_{risicopad\ i} = \frac{P_{norm} \cdot \omega_i}{\prod_{j=1}^m P_{overgangskans\ ij}}$$

Vergelijking 15

De fragility curve is de cumulatieve van een kansverdelingsfunctie, die wordt aangenomen als een normale verdeling. Die heeft 2 parameters: het gemiddelde en de spreiding. Net als in (den Heijer, 2025) is voor elk risicopad de spreiding (standaardafwijking) gekozen op basis van expert judgement. Het gemiddelde is dan de enige overgebleven variabele, die met Vergelijking 14 kan worden afgeleid.

3.3.2 Gevolgen

Om de stap naar risicopaden te maken wordt er voor elk van de faalpaden gezocht naar de bijbehorende gevolgen G_i . Dat vereist een uitbreiding van het faalpaden concept: de gebeurtenissenboom wordt uitgebreid met een knoop voor het aspect van het tijdstip van falen tijdens een event. Zie als voorbeeld Figuur 14. Dat tijdstip is cruciaal omdat het de ontwikkeling van de bres beïnvloed. Om deze gevolgen te bepalen worden de instroomvolumes met een deel van het TDK-model bepaald: Dit wordt hierna TDK-EVENT genoemd omdat het voor een *specifieke gebeurtenis* de gevolgen berekend.

Overstromingsgevolgen

Het model TDK-EVENT berekent de bresgroei en het overstromingsvolume gegeven een tijdsafhankelijke hoogwaterbelasting en een moment van dijkbreuk, $V_Q(h(t), T_{bres})$. TDK-EVENT berekent wat wordt weergegeven in het 1^e, 3^e en 4^e deel van Figuur 6. Het oppervlak onder de debietcurve (het 4^e deel van deze figuur) is het overstromingsvolume V_Q gedurende een event. V_Q hangt af van de buitenwaterstand in de tijd $h(t)$, en van het moment van dijkdoorbraak T_{bres} . Met dit overstromingsvolume worden de gevolgen (schade en slachtoffers) berekend met:

$$D = \vec{a} \cdot V_Q(h(t), T_{bres})$$

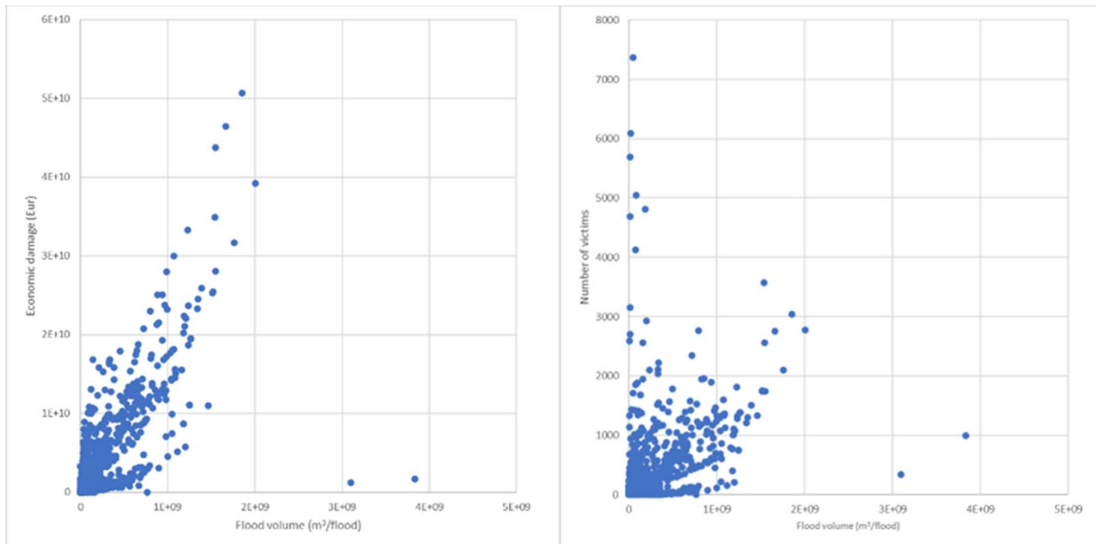
Vergelijking 16

met D de gevolgen, en \vec{a} een set parameter die de verhouding geven tussen D en V_Q . In (Den Heijer & Kok, 2022) zijn waarden voor \vec{a} afgeleid voor het rivierengebied, gebaseerd op de LIWO database: 18.6 €/m³ (schade) en 1.2 · 10⁻⁶ 1/m³ (slachtoffers), met overstromingsvolume V_Q in m³. Onderstaande figuren in Figuur 16, met de LIWO data van het overstromingsvolume per overstroming (hier) voor alle gebieden in Nederland, lijken sterk op Figuur 7. De waarden \vec{a} worden in onderhavige studie aangepast aan de specifieke gegevens uit de LIWO database.

Aan de hand van de volumes in LIWO wordt een representatief polderoppervlak afgeleid waarmee de kombergingsaanpak in TDK tot (vrijwel) dezelfde overstromingsvolumes leidt als in LIWO. Zie Bijlage A voor de aanpak en de uitwerking voor de in deze studie gekozen case locaties.

In de LIWO database zijn de aantallen slachtoffers gegeven voor zowel de situatie zonder rekening te houden met evacuatie als voor de effecten van verschillende waarschuwingstijden. Effectief is er dus sprake van een evacuatie fractie, f_E . De evacuatie fractie geeft de effectiviteit van de evacuatie aan. Die

wordt gerelateerd aan de waarschuwingstijd, zie een screenshot van de Schade en Slachtoffermodule waarin een grotere waarschuwingstijd een flinke reductie van de slachtoffers geeft, Figuur 17. De waarden voor a worden bepaald voor de situatie zonder evacuatie, zodat er nog moet worden gecorrigeerd met $(1 - f_E)$ om het aantal slachtoffers te bepalen op basis van de groep mensen die daadwerkelijk in het gebied is achtergebleven. De economisch waarde die wordt toegekend aan slachtoffers is 6.7M€ per slachtoffer (ook wel aangeduid met VoSL), gebaseerd op de berekeningen voor de normering (Kind, 2014).



Figuur 16 Schade en slachtoffers afhankelijk van instromend volume, voor alle overstromingen in de LIWO database.

Daarnaast worden er in (Kind, 2014) ook nog kosten bepaald voor de schade die 'getroffenen' lijden. Dat zijn mensen die geen slachtoffer zijn maar wel hinder en schade hebben ondervonden door de overstroming. De kosten per getroffene ($D_{inwoners}$) zijn in (Kind, 2014) bepaald op €12500. Daarmee is de volledige economische schade:

$$D = (a_{schade} + a_{slachtoffer} \cdot VoSL \cdot (1 - f_E) + a_{getroffenen} \cdot D_{inwoners}) \cdot V_Q(h(t), T_{bres.})$$

Vergelijking 17

Deze economische schade D is daarmee de uitkomst van de TDK-EVENT berekening, gegeven een hoogwater $h(t)$, een tijdstip van dijkbreuk $T_{bres.}$, en de polderkarakteristieken a . Omdat D nog afhankelijk kan zijn van het risicopad i , omdat het initiële faalmechanisme nog effect heeft op het tijdstip van dijkbreuk en de aanvang van de bresgroei, introduceren we hier $G_i(h(t), T_{bres.}, \vec{a})$ als de economische schade D voor risicopad i voor een polder met schade karakteristieken \vec{a} .

Kosten voor dijkherstel

Naast de overstromingsgevolgen is er ook nog economische schade omdat de dijk moet worden hersteld na situaties waarin de dijk is doorgebroken, of niet is doorgebroken maar wel beschadigd. Bij de normering van de Nederlandse waterkeringen is deze post verwaarloosbaar geacht. Ook nu is de verwachting dat dit relatief geen grote post is in de meeste Nederlandse situaties. Maar als de overstromingsgevolgen erg gering zijn door een taaie dijk, zou dit de grootste bijdrage kunnen worden.

Voor deze studie zijn er provisorische keuzen gemaakt om deze schades te schatten:

- Totale bresbreedte: de dijken langs zee en meer breken over 5% van de dijk lengte (ervaringsgegevens). In het rivieren gebied gaan we uit van 300 m, als gevolg van ontlasting van benedenstroom gelegen dijken zullen meervoudige bressen minder vaak voorkomen.
- Schadelengte L_{schade} : De lengte waarover de dijk schade heeft opgelopen zal minimaal de bresbreedte zijn, maar vermoedelijk (veel) groter. Hier wordt de totale bresbreedte aangehouden. Dat is dus een onderschatting
- Eenheidskosten per lengte, $I_{per\ m}$: er wordt vanuit gegaan dat deze even groot zijn als de aanlegkosten, zie paragraaf 4.5, Vergelijking 22. De kosten voor herstel zijn vermoedelijk minder tot veel minder dan de aanlegkosten. Dit is dus een overschatting. Praktisch is er dus aangenomen dat deze overschatting en de onderschatting uit het vorige punt elkaar compenseren.
- Frequentie dijkherstel: bij zeer brosse dijken is de kans op dijkherstel gelijk aan de kans op doorbraak. Als de dijk niet doorbreekt, is er ook geen schade. Bij zeer taaie dijken is de kans op benodigd dijkherstel veel groter dan de kans op doorbraak: er kan veel vaker dijkschade optreden, terwijl er nog geen doorbraak is opgetreden. Dat is immers juist een eigenschap van de taaie dijk. Naarmate de dijk taaier is zal er vaker schade aan de dijk op kunnen treden zonder doorbraak. In deze studie is daarom de taaieheidsindex TI als schattingsmaat genomen voor de frequentie van dijkschade. NB. Strikt genomen hoort deze post niet onder het kopje 'gevolgen' maar onder 'kans', maar omdat de gebruikte risicodefinitie 'kans maal gevolg' is, maakt dit praktisch niet uit. De facto wordt door deze aanpak de fragility curve (zie Figuur 15) voor deze kostenpost (dus alleen voor dijkschade) over een afstand TI verschoven naar lagere waterstanden.

Het bovenstaande leidt tot kosten voor dijkherstel voor een zekere gebeurtenis:

$$D_{dijk} = L_{schade} \cdot I_{dijk} \cdot TI$$

Vergelijking 18

3.3.3 Risico

De volledige berekening van het risico is een combinatie van Vergelijking 12, Vergelijking 13, Vergelijking 14, en Vergelijking 17, en ziet er dan als volgt uit:

$$R = \sum_{risicopad\ i}^n P_{noodmaatregelen} \int f_h \cdot P_{f|h_i} \cdot \prod_{j=1}^{j=m} P_{overgangskans\ ij} \cdot (G_i(h(t), T_{bres}, \vec{a}) + D_{dijk}) dh$$

Vergelijking 19

Deze risico berekening vormt een schil om de uitkomsten van TDK-EVENT, en wordt benoemd als RISK-TDK-EVENT. Vanuit de schil RISK-TDK-EVENT wordt TDK-EVENT aangeroepen voor elk risicopad, voor een reeks aan hoogwaters, en voor een reeks combinaties van noodmaatregelen en dijkbreuktijdstippen ten opzichte van hoogwater. De invoer voor het uitvoeren van RISK-TDK-EVENT voor een specifieke locatie is:

- Kansverdeling buitenwaterstanden, en de overgangskansen
- Type watersysteem (rivier/meer/zee). Het waterstandsverloop in de tijd verschilt per watersysteem.
- Begroting over de risicopaden. Naar analogie met de faalkansbegroting moet ook hier het totaal van de kans op de risicopaden gelijk zijn aan 100%.
- Bresbreedte bij aanvang van de bresgroei

- Bresgroei in relatie tot het type dijkconstructie (kernmateriaal/damwand/brede dijk). De constructie van de dijk beïnvloedt het gedrag van bres en instromend volume. Ook de bresdrempel (niet erodeerbaar niveau) bepaalt het instromend volume. Uiteraard is het minimum daarvan de hoogste waarde van polder- en uiterwaardniveau.
- Kansverdeling van het uitstel van bresvorming door noodmaatregelen, en bijbehorende evacuatie fractie

3.4 De klimaatrobustheidsindex

De taaiheidsindex zoals gegeven in paragraaf is niet constant in de tijd. Dat is een logisch gevolg van de definitie in Vergelijking 1, Vergelijking 9, en Vergelijking 11. De risico's in Vergelijking 11 zijn niet constant in de tijd door klimaatverandering en veroudering van de dijk. Brosse dijken reageren daar anders op dan de taaiere dijken.

Stel bijvoorbeeld dat er een dijk is ingericht met een drempel op een bepaalde hoogte, en stel dat klimaatverandering tot 10cm waterniveau verschil leidt. Dat heeft dan een groter effect op de instroom bij een lage of geen drempel (bros) dan op de instroom bij een hoge drempel (taai). Dat komt omdat de instromende debieten Q (en dus ook de cumulatieve instroom $V_Q(h(t), T_{bres})$) evenredig zijn met de $H^{3/2}$, waarin H de waterhoogte boven de drempel.

Om dit effect te indiceren is een klimaatrobustheidsindex gedefinieerd volgens:

$$\text{Klimaatrobustheidsindex} = \frac{\text{taaiheidsindex (jaar } x)}{\text{taaiheidsindex (heden)}}$$

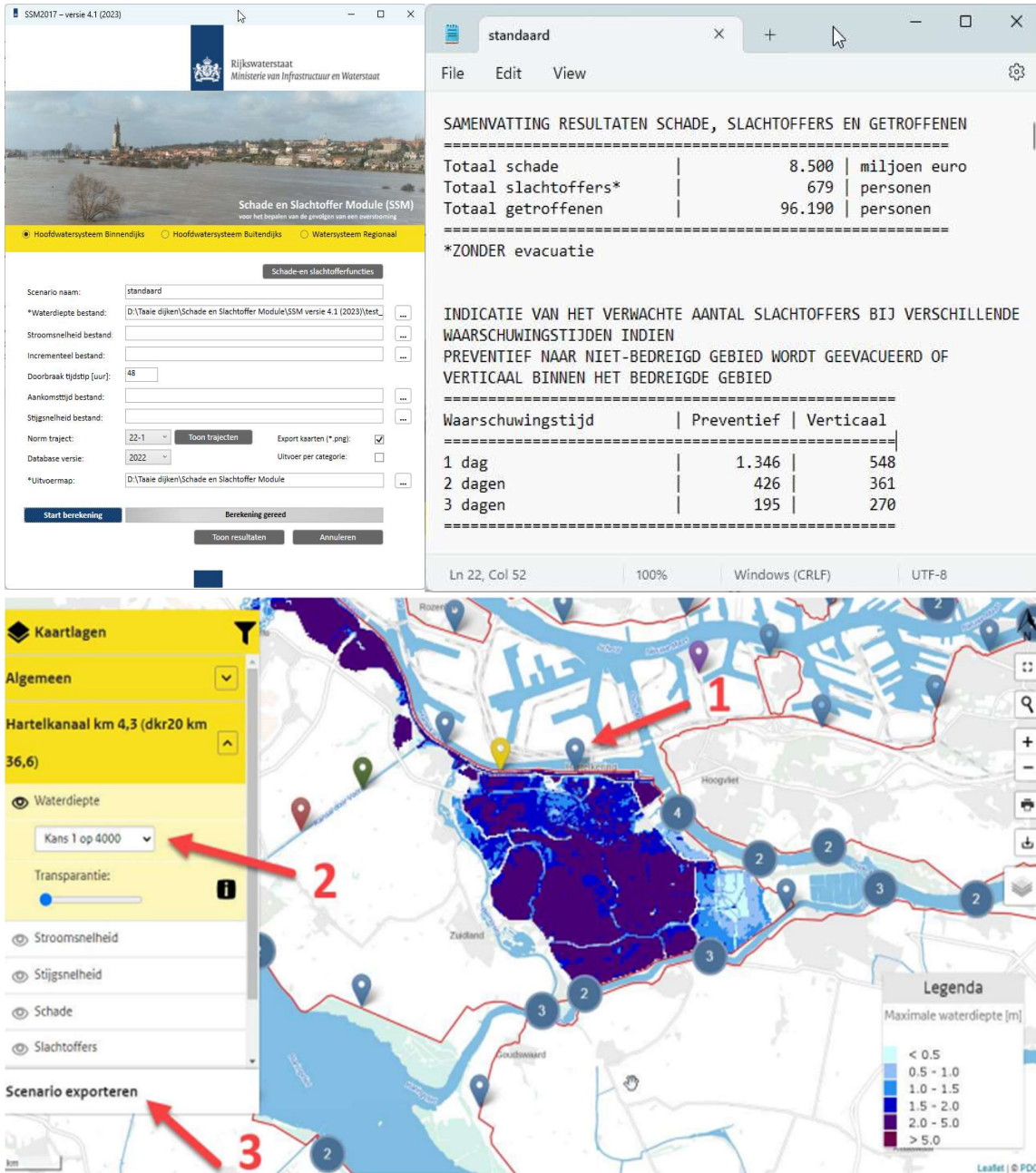
Vergelijking 20

3.5 Samenvatting conceptuele aanpak

De aanpak is een combinatie van de huidige (wettelijke en geïnstrumenteerde) benadering in Nederland, en van de aanpak in (den Heijer & Kok, 2022), die in paragraaf 2.3 is geschetst als het beste passende, maar nog niet overal toepasbare aanpak). Samenvattend is deze aanpak:

- Er wordt een volledige risicobenadering toegepast. De beoogde risiconiveaus, die via het toepassen van de norm in combinatie met brossse dijken zouden worden bereikt, moeten ook met bij gebruik van andere constructietypen worden bereikt. De taaiheidsindex legt de relatie tussen deze risiconiveaus.
- De gevolgen niet alleen berekend bij de situatie dat de dijk juist breekt, zoals voor de huidige normering is gedaan, maar voor het gehele spectrum aan mogelijke doorbraak omstandigheden.
- De taaiheidsindex is mede bepaald op de expertmeningen voor de effectiviteit van noodmaatregelen.
- De overgangskansen zijn voor alle ontwerpvarianten gelijkgesteld aan 1.
- Voor het bepalen van de ontwerpdimensies wordt de (in de huidige praktijk gebruikelijke) keuze gemaakt om een knip te leggen tussen de berekening van de kans en het gevolg.

Als we dat vergelijken met de huidige aanpak in Nederland, zijn er specifiek voor de variant brossse dijken veel overeenkomsten. In de huidige aanpak in Nederland wordt veelal ook uitgegaan wordt van een overgangskans van 1, en geen rekening wordt gehouden met het effect van noodmaatregelen.



Figuur 17 De schade en slachtoffermodule

4 CASE STUDIES EN STRESSTEST



Figuur 18 Overzicht van de case locaties.

4.1 Doel: indruk impact modelleren taai gedrag

De toepasbaarheid rekenmethode voor het waarderen van taai en klimaatrobuust gedrag uit Hoofdstuk 3 wordt onderzocht aan de hand van case studies. Naast toepasbaarheid is ook het resultaat van de cases van belang omdat het een indruk geeft van de impact. De cases zijn daarom strategisch gekozen, zodat ze een representatief beeld geven van diverse dijktypen en belastingtypen, zie Figuur 18. Ze zijn aangedragen door de aan het project deelnemende waterschappen.

We bekijken voor elk van de cases 3 ontwerpen:

- Bestaand: Hiervoor wordt zoveel mogelijk het aanwezige dijkttype behouden, en
- Nieuw (bros): Een bros ontwerp is gezien de definitie van de taaïheidsindex de referentie voor de mate waarin een ontwerp taai gedrag vertoont. Een bros ontwerp wordt hier gedefinieerd als een zanddijk met een bekleding waarvoor een overslag criterium van 0,1 l/m/s moet worden aangehouden ('slechte bekleding'). Tevens wordt er bij een brosse situatie van uitgegaan dat er geen noodmaatregelen worden getroffen.
- Nieuw (taai): Een taai ontwerp is dan bijvoorbeeld een kleidijk met een niet-erosieve drempel. Tevens wordt er bij een taaie situatie van uitgegaan dat er noodmaatregelen kunnen worden getroffen.

In voorliggende studie wordt het effect van de ontwerpvariant bepaald door het vergelijken van ontwerpdimensies (hoogte en footprint) en de ruimtelijke, kosten en risico effecten.

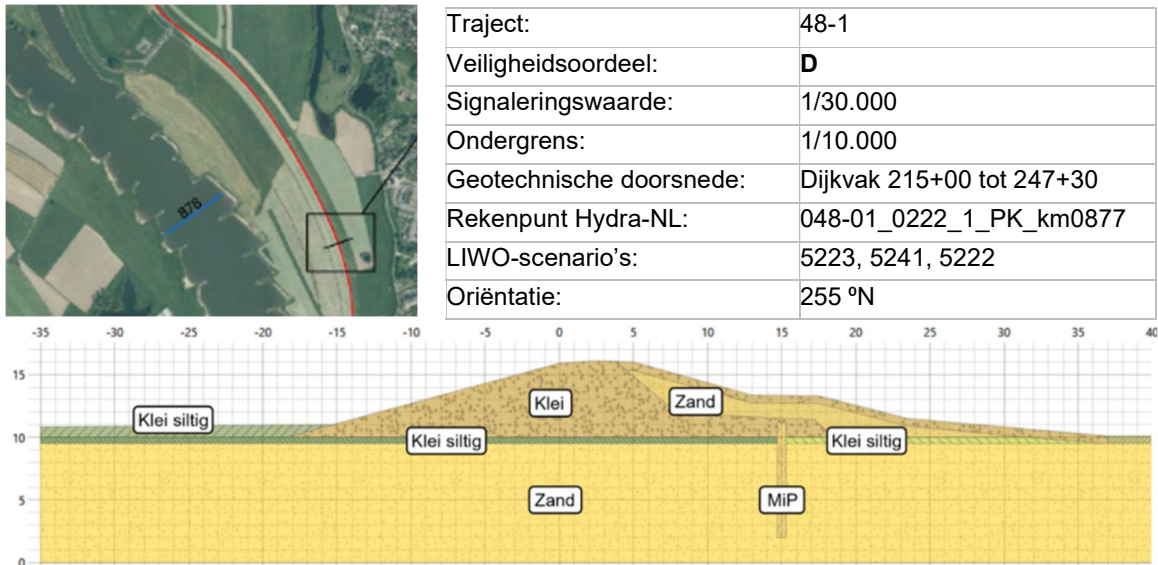
4.2 Beschrijving van de cases

4.2.1 Rivierengebied: WRIJ Pleijdijk, WSRL Wolferen-Sprok

De Pleijdijk is door Waterschap Rijn en IJssel (WRIJ) aangeleverd als taaie dijk vanwege het vrij robuust kleilichaam aan de buitenzijde, zie Figuur 19. De dijk is door RWS aangelegd in het jaar 2000 als dijkverlegging, en vervolgens overgedragen aan WRIJ. De dijk heeft een mixed in place midwand die bescherming moet bieden tegen piping. Ook de midwand wordt redelijk taai geacht. De dijk heeft een veiligheidsoordeel D, blijkt uit beoordeling. WRIJ neemt veel zandmeevoerende wellen waar achter de kering. Ook na het aanbrengen van een aanvullende steunberm tegen de wellen, wordt nog steeds grofweg hetzelfde aantal wellen waargenomen, alleen een stukje verder landinwaarts.

Tabel 2 Gegevens Pleijdijk

Actuele situatie	Maat	Eenheid
Kruinhoogte	16,1	m+NAP
Bermbreedte	5,5	m
Bermhoogte	13,4	m+NAP
Kleilaag op berm	0,7	m
Kruinbreedte	5	m
Hoogte bovenzijde MIPwand	11,25	m+NAP
Hoogte onderzijde MIPwand	2	m+NAP
Polderniveau	10,1	m+NAP
Deklaag	0,6	m
Lengte dijktraject	27	km



Figuur 19 Bovenaanzicht van de case locatie in de Rijn, tabel met technische gegevens, en een doorsnede van de locatie aan de Pleijdijk.

Gegevens over de precieze locatie en het gebruikte rekenpunt in HYDRA-NL, de normering, de gebruikte LIWO scenario's zijn opgenomen in Figuur 19. Een aantal actuele gegevens over de dimensies opgenomen in Tabel 2.

Dijktraject Wolferen-Sprok is door Waterschap Rivierenland aangeleverd als taai traject, zie Figuur 20. Het veiligheidsoordeel is D, de dijk is momenteel in versterking. Op dit traject zijn brosse zanddijken in de minderheid. De kleidijken in het traject hadden voor de versterking een grote zandflens aan de binnenzijde. Er was angst dat de zandflens bij overslag te verzadigd zou raken. In verband met de overslagbestendigheid worden die er daarom bij de versterking uitgehaald en vervangen door klei. De kleidijken waren dus al redelijk taai, maar worden nu nog taaier. Voor onderhavige studie is daarom gekozen voor een dijkdoorsnede uit de zanddijken met kleikap.

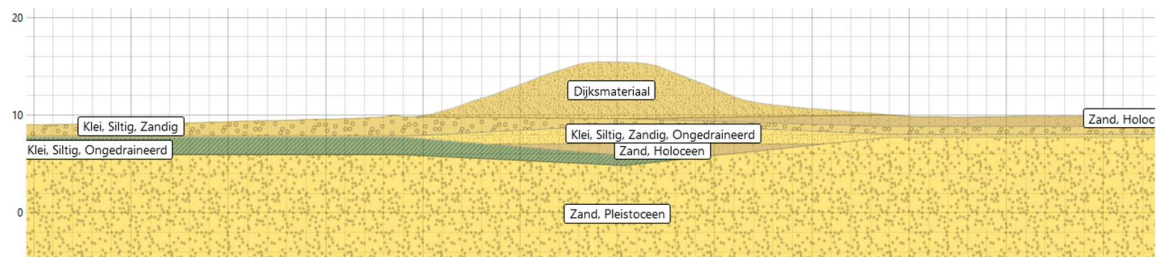
NB. Op dit traject staan vaak ook damwanden in de teen. Vanuit de taaigheids-gedachte zou de damwand misschien in de binnenkruin zijn geplaatst, zodat ook het overslagprobleem kon worden gereduceerd.

Tabel 3 Gegevens Wolferen Sprok

Actuele situatie	Maat	Eenheid
Kruinhoogte	15,4	m+NAP
Bermbreedte	-	m
Bermhoogte	-	m+NAP
Kleilaag op berm	0,7	m
Kruinbreedte	6	m
Taludhelling	1:3	
Polderniveau	9,9	m+NAP
Deklaag	1,8	m
Lengte dijktraject	26	km



Traject:	43-4
Veiligheidsoordeel:	D
Signaleringswaarde:	1/30.000
Ondergrens:	1/10.000
Geotechnische doorsnede:	WOS_sectie9_STBI_h3,5_b10_loop_3_v5
Rekenpunt Hydra-NL:	043-04_0186_1_WA_km0887
LIWO-scenario's:	21058, 19055
Oriëntatie:	315 °N



Figuur 20 Doorsnede van de dijk bij Wolferen-Sprok en tabel met technische gegevens van de dijkdoorsnede.

Gegevens over de precieze locatie en het gebruikte rekenpunt in HYDRA-NL, de normering, en de representatieve LIWO scenario's zijn opgenomen in Figuur 20. Een aantal actuele gegevens over de dimensies opgenomen in Tabel 3.

4.2.2 Kustgebieden: HHNK Balgzanddijk

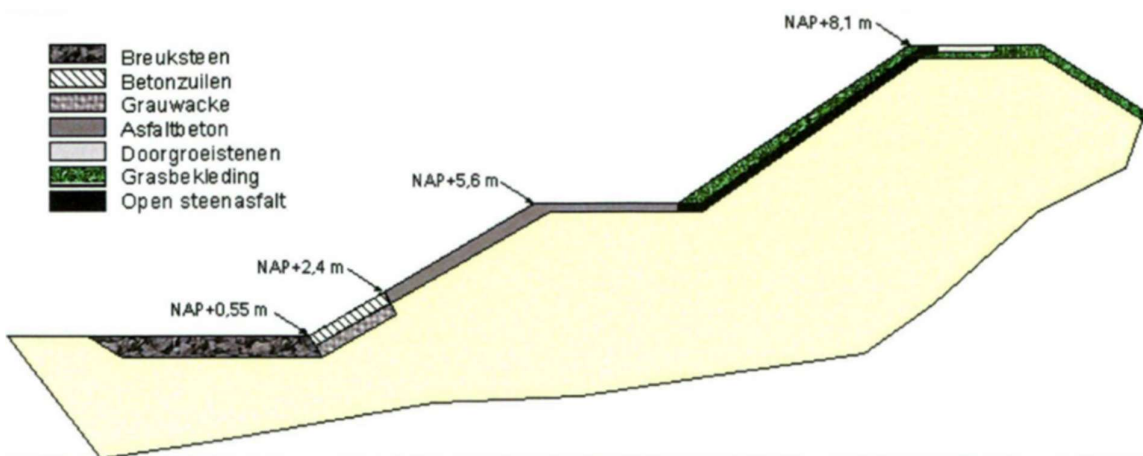
De Balgzanddijk is door het Hoogheemraadschap van Hollands Noorderkwartier (HHNK) aangeleverd als taaie zeedijk, zie Figuur 21. De dijk is breed en opgebouwd van zand.

Tabel 4 Gegevens Balgzanddijk.

Actuele situatie	Maat	Eenheid
Kruinhoogte	8,1	m+NAP
Bermbreedte (zeewaartse zijde)	5	m
Bermhoogte (zeewaartse zijde)	5,6	m+NAP
Kleilaag (vanaf berm en daarboven)	Onbekend	m
Kruinbreedte	5	m
Taludhelling	1:3	
Lengte dijktraject	10	km



Traject:	13-5
Veiligheidsoordeel:	A
Signaleringswaarde:	1/3.000
Ondergrens:	1/1.000
Geotechnische doorsnede:	niet beschikbaar
Rekenpunt Hydra-NL:	WZ_1_13-5_dk_00008
LIWO-scenario's:	4320, 4288, 4374, 4339
Oriëntatie:	68 °N



Figuur 21 Doorsnede van de Balgzanddijk en tabel met technische gegevens van de dijkdoorsnede.

Het taaie gedrag zit mogelijk in de opbouw van de bekleding in combinatie met de breedte van de dijk. Het ontwerp van de bekleding is afgestemd op de golfbelasting. De bekleding bestaat beneden de berm uit steen en asfalt, en daarboven is het een kleilaag met een grasbekleding. Stabiliteit en piping faalmechanismen spelen niet zo bij zeedijken. Gegevens over de precieze locatie en het gebruikte rekenpunt in HYDRA-NL, de normering, en de representatieve LIWO scenario's zijn opgenomen in Figuur 21. Een aantal actuele gegevens over de dimensies opgenomen in Tabel 4.

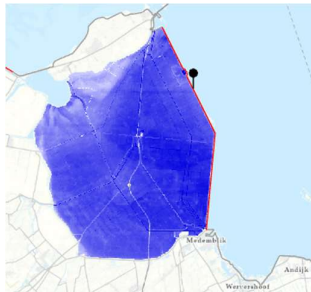
4.2.3 Merengebied: HHNK Wieringermeerdijk

De dijk aan de Wieringermeer is door het Hoogheemraadschap van Hollands Noorderkwartier (HHNK) aangeleverd als casus, zie Figuur 22. Het is een locatie aan het IJsselmeer.

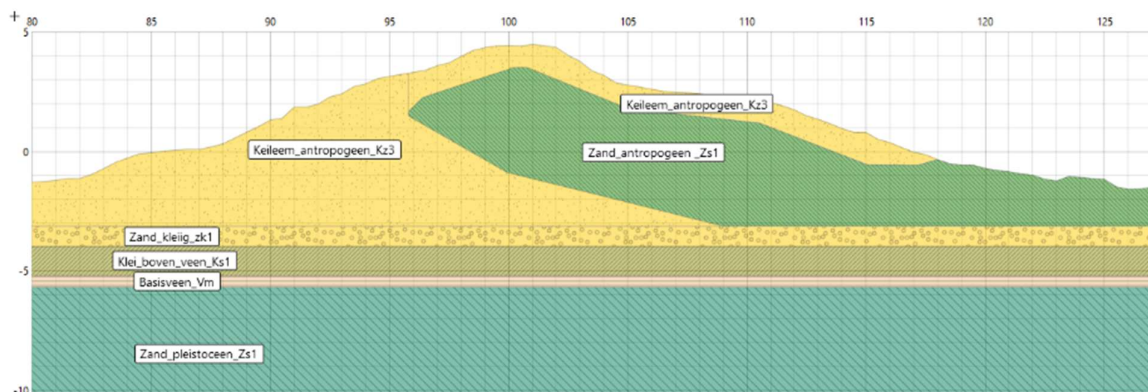
Tabel 5 Gegevens Wieringermeerdijk

Actuele situatie	Maat	Eenheid
Kruinhoogte	4,45	m+NAP
Bermbreedte	6	m
Bermhoogte	2,5	m+NAP
Kleilaag op berm	0,9	m
Kruinbreedte	3	m
Taludhelling	1:3	
deklaag	1,2	m

Polderniveau	-3,2	m+NAP
Lengte dijktraject	21	km



Traject:	12-2
Veiligheidsoordeel:	A
Signaleringswaarde:	1/3.000
Ondergrens:	1/1.000
Geotechnische doorsnede:	WBI_12_2_PSIG_358_STBI_SC1_UV
Rekenpunt Hydra-NL:	YM_1_12-2_dk_00051
LIWO-scenario's:	3888, 3886, 4241, 4237
Oriëntatie:	62 °N



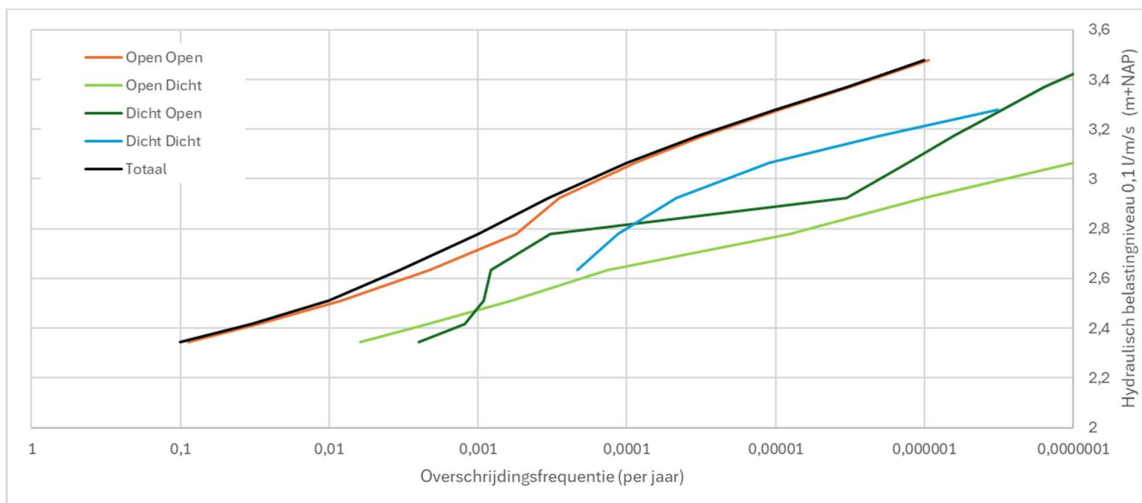
Figuur 22 Doorsnede van de Wieringermeerdijk en tabel met technische gegevens van de dijkdoorsnede.

Voorheen was de Wieringermeer onderdeel van de Zuiderzee, en de dijk is aangelegd (1927-1930) voordat de Afsluitdijk is gesloten (1932). Er is een keileemdam aangelegd tot ruim boven het toenmalig nog aanwezige hoogtij. De dijk is opgebouwd op deze keileemdam met een zandaanvulling en een kap van klei. De polder is diep, omdat het de voormalige bodem is van de Zuiderzee. Gegevens over de precieze locatie en het gebruikte rekenpunt in HYDRA-NL, de normering, en de representatieve LIWO scenario's zijn opgenomen in Figuur 22. Een aantal actuele gegevens over de dimensies opgenomen in Tabel 5.

4.2.4 Overgangsgebied Rivier-Zee: HHSK Hollandse IJssel

De dijk aan de Hollandse IJssel is door het Hoogheemraadschap van Schieland en de Krimpenerwaard (HHSK) aangeleverd. HHSK heeft de dijk aangeleverd als taai traject. Het is een kleidijk met sporadische plekjes zand op -10 tot -15m, zie Figuur 24. Het betreft het overgangsgebied tussen rivier en zee en de belasting wordt dus beïnvloed door zowel rivier- als zeekarakteristieken.

De Hollandse IJssel ligt daarnaast achter zowel de Measlantkering als de Hollandse IJsselkering/Algerakering. De sluitkarakteristieken van beide keringen zijn van invloed op de hydraulische belastingen. Een uitwerking van HYDRA-NL berekeningen voor de case locatie laat zien dat de waterstanden voornamelijk worden bepaald door de open-open situatie, zie Figuur 23.



Figuur 23 Resultaten van HYDRA-NL voor de studie locatie in de Hollands IJssel, uitgesplitst voor de 4 sluitscenario's voor respectievelijk de Measlantkering en de Algerakering.

De sluitkarakteristieken zijn ook van invloed op de overstrooming: als de Hollandse IJsselkering/Algerakering sluit dan is er slechts een beperkte hoeveelheid water in de Hollandse IJssel die het gebied in kan stromen ingeval van een bres. Dus ook het systeem reageert dan 'taai'. Ook hier hebben de 'open'-situaties dus grotere effecten. In voorliggende studie wordt uitgegaan van de 'open'-'open' situatie.

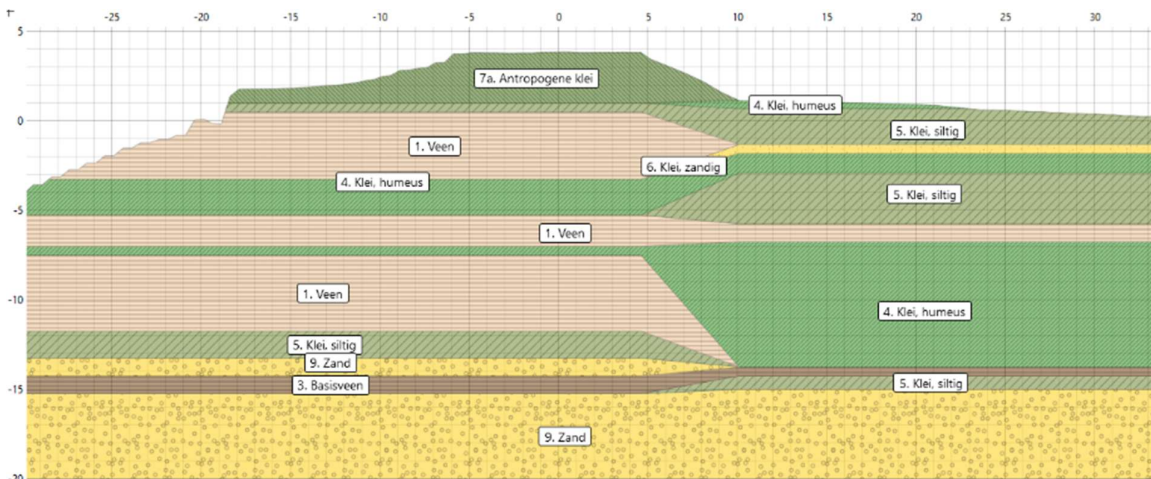
Gegevens over de precieze locatie en het gebruikte rekenpunt in HYDRA-NL, de normering, en de representatieve LIWO scenario's zijn opgenomen in Figuur 24. Een aantal actuele gegevens over de dimensies opgenomen in Tabel 6.

Tabel 6 Gegevens Hollandse IJsseldijk

Actuele situatie	Maat	Eenheid
Kruinhoogte	3,80	m+NAP
Bermbreedte	-	m
Bermhoogte	-	m+NAP
Kruinbreedte	9,7	m
Taludhelling	1:3 / 1:1,9	
deklaag	>>	m
Lengte dijktraject	20	km



Traject:	14-1
Veiligheidsoordeel:	D
Signaleringswaarde:	1/30.000
Ondergrens:	1/10.000
Geotechnische doorsnede:	STBI_HHSK57A
Rekenpunt Hydra-NL:	14-01_00189_1_HY_km0017.17
LIWO-scenario's:	19569, 19567, 19565
Oriëntatie:	170 °N



Figuur 24 Bovenaanzicht van de case locatie in de Hollandse IJssel, tabel met technische gegevens, en een dijkdoorsnede van de locatie van de dijk.

4.3 Uitgangspunten voor de toepassing van RISK-TDK-EVENT

Onderstaand wordt achtereenvolgens uitgewerkt hoe de generieke invoer voor RISK-TDK-EVENT (zie paragraaf 3.3.3) wordt bepaald voor de cases.

Het type watersysteem en het waterstandsverloop

Dijken aan rivieren, meren en aan zee worden elk belast door hoge waterstanden, maar elk hebben ze een verschillend waterstandsverloop. Het is van belang dit waterstandsverloop en instroomdebieten voldoende nauwkeurig te modelleren omdat die het instroomvolume bepalen, en dus de schade, zie Vergelijking 16. Voor alle watersystemen zijn de 0D-polderkarakteristieken (voor het bepalen van het instroomdebiet vooral de polderoppervlakte) afgeleid conform Bijlage A. Het waterstandsverloop wordt bepaald voor:

- **Rivier:** Bij een doorbraak wordt rekening gehouden met de reductie van de buitenwaterstand als gevolg van het instromend debiet. Daarvoor is het model uit (den Heijer & Kok, 2022) gebruikt. Voor de duur van een afvoergolf wordt daarin 675 uur aangehouden (225 uur voor de was en 450 uur voor de val), conform WBI. NB. De bresgroei in het model is vergeleken met een D-HYDRO berekening voor de locatie Loo, zie Bijlage B. De resultaten komen vrij goed overeen.
- **Zee:** Bij een doorbraak aan het getijdengebied spelen de waterstandscomponenten stormopzet en getij, die beiden het verloop van de waterstand bepalen (en dus van belang zijn voor de instroom). Voor de getijamplitude wordt een jaargemiddelde waarde gebruikt. De maximale hoogte van de stormopzet wordt bepaald door het getijmaximum van de hoogwaterstand af te

trekken. Er wordt een stormduur van 50 uur gebruikt, dat verloopt volgens een cosinusvormig patroon. Daarmee ligt het hoogwaterverloop in de tijd vast (NB. Afgezien van het faseverschil tussen getijmaximum en stormopzet).

- *Meer*: Een hoogwaterperiode in het meer wordt gesimuleerd door stormopzet periode en een gemiddeld meerpeil. Er wordt een stormduur van 50 uur gebruikt, dat verloopt volgens een cosinusvormig patroon. Daarmee ligt het hoogwaterverloop in de tijd vast.

Begroting over de risicopaden

We bekijken de risicopaden voor 4 initiële faalmechanismen, daarnaast wordt een risico pad ‘overig’ gedefinieerd. Er wordt in deze fase van het onderzoek van uitgegaan dat de risicopaden elkaar niet beïnvloeden. Bij de verdeling van de faalkans over de risicopaden wordt zoveel mogelijk aangesloten bij de standaard-faalkansbegroting. De faalkansbegroting telt op tot 100%, de risicopaden begroting uiteraard ook, zie Tabel 8.

NB. Alleen voor locaties waarbij een faalmechanisme objectief niet op kan treden, zoals piping onder een zanddijk (Balgzanddijk) of bij een dik kleipakket (Ijsseldijk), wordt de bijbehorende fractie teruggebracht tot 1% ten bate van andere mechanismen. En voor verificatieberekeningen met VNK wordt de geconstateerde verdeling uit de VNK rapporten gebruikt.

Kansverdeling buitenwaterstanden en overgangskansen (ook voor de klimaateffecten)

Voor het genereren van de kansverdeling van de waterstanden f_h wordt het pakket HYDRA-NL gebruikt (Duits, 2019). Het betreft de verdeling van de hoogste hoogwaterstanden tijdens een gebeurtenis. De basis achter HYDRA-NL is een set berekeningen met fysische waterbewegingsmodellen. Uitgangspunt daarbij is dat er bovenstreams of in de omgeving geen dijkbreuk optreedt die de belastingen beïnvloeden.

De overgangskansen zijn gelijk gekozen aan 1. Dat betekent dat, als er een faalmechanisme optreedt, er in alle gevallen een bres wordt gevormd, afgezien van het effect van noodmaatregelen.

NB. Noodmaatregelen kunnen, gegeven een faalmechanisme, voorkomen dat er een bres optreedt, dat wordt in het vervolg van deze paragraaf behandeld.

Voor de fragility curve wordt een normale verdeling aangenomen, met de paramaters (μ, σ). De spreiding σ hangt af van het initiële faalmechanisme, zie de kolommen ‘2023’ in Tabel 7. In Figuur 15 wordt dit visueel weergegeven door de breedte van de curve. Het gemiddelde μ ervan wordt (gegeven deze spreiding σ) afgeregeld op de normfaalkans, zodat de fictieve dijk in 2023 precies aan de norm voldoet. Voor de kansen op overstromen in 2050 en 2100 worden de gemiddelden μ van 2023 gebruikt, maar wel de waterstandsverdelingen f_h die bij die jaren behoren. De dijk wordt dus tussendoor niet ‘versterkt’. De spreiding σ weerspiegelt de veroudering en hangt voor sommige faalmechanismen dus ook af van het jaartal, zie Tabel 7.

Tabel 7 Spreiding fragility curves in (m)

Risicopad, ingeleid door	bros			bestaand			taai		
	2023	2050	2100	2023	2050	2100	2023	2050	2100
Golfoverslag	0,5	0,6	0,7	0,5	0,6	0,7	0,5	0,5	0,5
Piping	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
Macro instabiliteit	1,0	1,2	1,4	1,0	1,2	1,4	1,0	1,0	1,0
Falen bekleding	1,0	1,2	1,4	1,0	1,2	1,4	1,0	1,2	1,4
Overig	1,0	1,2	1,4	1,0	1,2	1,4	1,0	1,0	1,0

Bresbreedte bij aanvang van de bresgroei

Voor de initiële bresbreedtes is een expertinschatting gemaakt en opgenomen in Tabel 8.

Tabel 8 Begroting risicopaden

Risicopad, door	ingeleid	Fractie ω_i	Fractie ω_i	Initiële bresbreedte
			Balgzanddijk / IJsseldijk	
Golfoverslag		24%	24% / 47%	10
Piping		24%	1% / 1%	10
Macro instabiliteit		4%	4% / 4%	30
Falen bekleding		10%	33% / 10%	10
Overig		38%	38% / 38%	10

Bresgroei in relatie tot het type dijkconstructie

De constructie van de dijk beïnvloedt het gedrag van bresgroei en het instromend volume. Er worden drie ontwerpvarianten beschouwd (bros, bestaand, taai). De volgende uitgangspunten worden gehanteerd:

- *Bros*: voor de kritische snelheid in de Verheij-van der Knaap formule (bresgroei) wordt een waarde voor zand aangehouden (0,2 m/s). Voor het toelaatbaar golfoverslagdebiet wordt 0,1 l/m/s gekozen. Er is geen drempel in het dwarsprofiel na dijkbreuk. De kans op effectieve noodmaatregelen is voor deze dijken nihil, dus $P_{noodmaatregelen\ falen} = 1$.
- *Bestaand*: voor de kritische snelheid in de Verheij-van der Knaap formule (bresgroei) wordt een waarde voor zanddijken 0.2 m/s aangehouden en voor kleidijken 0,5 m/s aangehouden. Voor het toelaatbaar golfoverslagdebiet wordt 1 l/m/s gekozen als er een goede grasmat ligt op het binnentalud, anders 0,1 l/m/s. Een drempel in het dwarsprofiel na dijkbreuk wordt alleen gemodelleerd als die ook aanwezig is. De kans op effectieve noodmaatregelen is voor deze dijken niet nihil, $P_{noodmaatregelen\ falen}$ wordt onderstaand uitgewerkt.
- *Taai*: voor de kritische snelheid in de Verheij-van der Knaap formule (bresgroei) wordt een waarde voor kleidijken aangehouden (0,5 m/s), uitgezonderd situaties waarin dat evident onlogisch of onmogelijk is gezien het huidige dijkttype. Voor het toelaatbaar golfoverslagdebiet wordt 1 l/m/s gekozen. Daarmee wordt het effect van overslag overigens wel fors onderschat, omdat er na eventuele erosie van het binnentalud, ook nog een kleikern is. Een drempel wordt gemodelleerd: bij zee tot boven hoogtij, bij meren tot boven gemiddeld meerpeil, bij rivieren enkele meters boven uiterwaard- of polderniveau. De kans op effectieve noodmaatregelen is voor deze dijken niet nihil, $P_{noodmaatregelen\ falen}$ wordt onderstaand uitgewerkt.

Kansen op noodmaatregelen en evacuatiefractie

Noodmaatregelen kunnen zowel de bresvorming uitstellen of zelfs afstellen. Ze hebben dus effect op de bresontwikkeling (bij uitstel) of op de kans op falen (bij afstel). Zie als voorbeeld het schema in Figuur 14. Er is een knoop ingevoegd voor het effect van noodmaatregelen. Net als bij de Toets op Maat worden de kansen op deze knopen via expertmeningen uitgevraagd. Daarmee kunnen dan de gevolgen worden bepaald conform het TDK model. In voorliggend project is een expertmeningen sessie gehouden (zie agendapunt 3 in de workshop 3, bijlage D). Het resultaat is gegeven in onderstaande tekstbox.

Bij de normstelling (Slootjes & Wagenaar, 2016) is al aangenomen dat een flinke fractie van de inwoners is geëvacueerd op het moment van dijkdoorbraak (56%). In de dijkdoorbraakscenarios die daar destijds voor zijn gebruikt wordt in de meeste gevallen aangenomen dat dijkdoorbraak optreedt ten tijde van

hoogwater. Voor deze studie wordt ervan uitgegaan dat deze fractie wordt behaald als de dijk breekt *ten tijde van* hoogwater.

Als de noodmaatregelen zorgen voor verder uitstel van doorbraak (of zelfs afstel), worden hogere evacuatiefracties gehanteerd. Het voorbeeld in de tekstbox hierboven betekent dat:

- een kans van 60% wordt toegekend aan het scenario dat het nemen van noodmaatregelen niet zorgt voor uitstel. Daarbij behoort dan een evacuatiefractie van 56%.
- Als er 1 dag uitstel wordt bereikt (10% kans, zie de tekstbox hierboven), wordt ervan uitgegaan dat 60% van de overblijvers nog wordt geëvacueerd, wat leidt tot een evacuatiefractie van 82% (56% + 60% van de 44% overblijvers)
- Als er 2 dagen uitstel wordt bereikt, worden opnieuw 60% van de overblijvers geëvacueerd, wat leidt tot een evacuatiefractie van 92% (56% + 60% van 44% + 60% van de 18% overblijvers)
- Als er 3 dagen uitstel wordt bereikt, worden nog 30% van de overblijvers geëvacueerd, ervan uitgaande dat er steeds meer mensen tussen zitten die moeilijker te evacueren zijn, ofwel door de omstandigheden, ofwel door onwil om te vertrekken, wat leidt tot een evacuatiefractie van 95% (56% + 60% van 44% + 60% van 18% + 30% van de 8% overblijvers)

Voor het faalmechanisme bekleding is er een bijzondere omstandigheid. Voor bekleding kan de doorbraak ook voorafgaand aan hoogwater plaatsvinden (dat speelt vooral bij rivierdijken omdat daar wind en hoogwater onafhankelijk zijn). Voor de 3 dagen voorafgaande aan hoogwater wordt daarom ook een kans toegekend: voor elke dag 15%. Aan het tijdstip van hoogwaterzelf wordt ook 15% toegekend (in plaats van 60% voor de andere faalmechanismen) dus in totaal is er ook voor bekleding 100% van de kansruimte verdeeld. De evacuatiefractie zal in de dagen voorafgaand aan hoogwater wellicht nog kleiner zijn dan 56%. Voor die situaties is pragmatisch gekozen voor respectievelijk 0, 25 en 40% evacuatie.

Het bovenstaande leidt tot het overzicht van de gehanteerde kansverdeling voor uitstel van overstromen en evacuatiefractie in Tabel 9.

Tabel 9 overzicht met gehanteerde kansverdeling voor het effect van noodmaatregelen en evacuatie.

Uitstel	Kans voor alle faalmechanismen behalve bekledingen	Kans voor faalmechanisme bekledingen	Evacuatiefractie
-3 dagen t.o.v. hw	0%	15%	0%
-2 dagen t.o.v. hw	0%	15%	25%
-1 dag t.o.v. hw	0%	15%	40%
Geen	60%	15%	56%
1 dag	10%	10%	82%
2 dagen	10%	10%	92%
3 dagen of langer	10%	10%	95%
afstel	10%	10%	nvt

4.4 Het bepalen van de ontwerpdimensies

De ontwerp dimensies zijn van belang voor het ruimtebeslag, de materiaalbehoefte en de kosten. Ze worden bepaald door te zoeken naar de kans waarop bij het ontwerp moet worden gedimensioneerd,

zoals we normaliter doen. De gangbare ontwerptools (BOI) kunnen worden gebruikt. Voor elk faalmechanisme wordt een ontwerpkans bepaald, waarmee de dimensies kunnen worden berekend.

In voorliggende studie zijn een aantal uitgangspunten gekozen voor het bepalen van deze dimensies:

- Er wordt ontworpen voor omstandigheden in het heden: jaar 2023.
- De ontwerpdijkhoogte wordt bepaald door het risicopad ingeleid door faalmechanisme overloop/overslag
- De ontwerp berm- en/of damwandlengte wordt bepaald door het risicopad ingeleid door faalmechanisme piping.
- De bermhoogte wordt eveneens bepaald door het risicopad ingeleid door faalmechanisme piping. NB. Daarmee kan de bermhoogte iets worden onderschat, omdat het voorkomen van macro instabiliteit soms een hogere berm vereist.
- de bovenzijde van de damwand bepaalt de drempelhoogte. Deze kan worden opgegeven of afhankelijk gemaakt van de andere dimensies van de dijk. In dat laatste geval wordt de damwandhoogte gelijkgesteld aan de bermhoogte minus de dikte van de kleilaag op de dijk.
- de horizontale positie van de damwand wordt gekozen in het binnentalud ter plaatse van de overgang naar de berm. Als de bermbreedte nihil is dan wordt de damwand op het binnentalud zover richting de kruin geplaatst als nodig om te zorgen dat piping niet 'stroomopwaarts' van de damwand kan plaatsvinden.
- De ontwerp taludhelling wordt bepaald door het risicopad ingeleid door faalmechanisme macrostabiliteit. Daarvoor wordt standaard een taludhelling 1:3.5 gekozen.
- de risicopaden ingeleid door andere faalmechanismen leiden mogelijk tot andere dijkopbouw en bekleding, maar niet tot andere dijkdimensies.

Toelaatbare faalkans per faalmechanisme

De dijkdimensies kunnen met deze uitgangspunten worden bepaald met HYDRA-NL (voor het bepalen van de dijkhoogte) en Sellmeijer (voor het bepalen van de bermafmetingen). De aanpak is feitelijk niet anders dan hoe conform het gangbare ontwerpinstrumentarium (OI2023) de dimensies worden bepaald: gegeven een toelaatbare kans per faalmechanisme $P_{faalmechanisme\ i}$ per dijkdoorsnede wordt gezocht naar de bijbehorende dimensies. Het afleiden van de toelaatbare kans per faalmechanisme van de norm verschilt wel.

- Er wordt vanuit gegaan dat voor alle cases de norm is gebaseerd op een bros karakter van de bestaande dijk.
- Het ontwerp-dijktype bepaald de taaiheidsindex, TI, waarmee de norm kan worden gereduceerd tot een ontwerpkans (eigenlijk: de norm vergroot tot een ontwerpkans, want de $TI \geq 1$).
- De opzet van de risicopaden begroting is gelijk aan die van de faalkansbegroting, met partities ω_i per risicopad. Daarmee kan de ontwerpkans per faalmechanisme worden bepaald.
- Lengte effecten N_i worden bepaald conform (WBI, 2017), waarmee de ontwerpkans per dijkdoorsnede kan worden bepaald.
- het totaal van de overgangskansen tussen het faalmechanisme en overstromen (per definitie kleiner of gelijk aan 1) kan in rekening worden gebracht. NB. In deze studie wordt daarvoor voorlopig een waarde van 1 gebruikt.

Dit leidt tot de volgende toelaatbare kansen per faalmechanisme per dijkdoorsnede:

$$P_{faalmechanisme\ i} = \frac{P_{norm} \cdot \omega_i \cdot TI}{N_i \cdot \prod_{j=1}^{j=m} P_{overgangskans\ ij}}$$

Vergelijking 21

Praktisch betekent dit dat de kans op een initieel faalmechanisme minder streng hoeft te zijn dan in de gebruikelijke aanpak. Voor alle drie de type dijkconstructies in de vorige paragraaf worden de dimensies gebaseerd op de norm als uitgangspunt voor de afmetingen. De toelaatbare kans per faalmechanisme verschilt tussen de drie ontwerpvarianten omdat de taaiheidsindex verschilt.

NB. Door de aanname in deze studie dat de overgangskansen gelijk zijn aan 1 is hier verwaarloosd dat ook de overgangskansen verschillen tussen de drie ontwerpvarianten. Zowel de absolute waarde van de ontwerpkanen als de verschillen tussen de ontwerpvarianten worden daarmee dus onderschat.

Ontwerptools uit BOI

HYDRA-NL : Om de afmetingen te bepalen voor elk van de beschouwde initiële faalmechanismen wordt gebruik gemaakt van HYDRA-NL voor de hydraulische randvoorwaarden:

- voor de geotechnische faalmechanismen worden de ontwerpwaterstanden bepaald. Dat zijn de waterstanden in het illustratiepunt, bij de faalkansruimte voor het betreffende faalmechanisme, zie Vergelijking 21.
- Voor het ontwerp van de dijkhoogte. HYDRA-NL bevat al de functionaliteit om de kans op overschrijden van het golfoverslagcriterium te bepalen bij een bestaande dijk, of om een ontwerphoogte te bepalen bij een gegeven kans en criterium.

Sellmeijer : Voor het bepalen van de afmetingen om de kans op het faalmechanisme piping voldoende te beperken worden de bovengenoemde ontwerpwaterstanden uit HYDRA-NL gebruikt in combinatie met de formulering van Sellmeijer:

- Bij de beoordeling van een bestaande dijk wordt de kritieke waterstand bepaald, gegeven de aanwezige kwelweglengte. Met HYDRA-NL kan dan de daarbij behorende kans worden bepaald.
- Bij een ontwerp wordt gegeven de norm gekeken welke kwelweglengte nodig is en die wordt dan via het ontwerpen van bv een berm bereikt. Deze aanpak wordt in deze studie gebruikt.
- Er wordt gekeken naar twee logische opbarst locaties die piping kunnen inleiden: op de overgang berm-binnentalud, en binnenwaarts van de berm (uittreepunt). De eerste opbarst locatie bepaald de benodigde hoogte van de berm (op basis van de hoeveelheid extra gewicht en hoogte). De tweede opbarst locatie bepaald de benodigde lengte van de berm.

Schatting lengte damwand

Voor de lengte van de damwand is een inschatting gemaakt zoals ook in (den Heijer et al., 2025) is gedaan. De gedachte daarachter is dat ook in een overstromingssituatie, als er mogelijk een ontgrondingskuil achter de damwand ontstaat, de damwand nog stabiel moet zijn. De lengte van de damwand is 5 maal zo lang gekozen als de overstorthoogte van de damwand bij dijkfalen, met een minimum van twee-derde van de lengte onder polderniveau. NB. Er zijn alternatieven zoals het zetten van een anker, waardoor de damwandlengte mogelijk beperkter kan blijven.

4.5 Conceptuele aanpak bepalen kosten dijkversterking

De investeringskosten voor dijkversterking zijn overeenkomstig met (Den Heijer & Kok, 2022). Ze zijn gebaseerd op het model KOSWAT en ervaring van waterschappen, zie in (Klerk, 2022, bijlage 2.1), resulterend in versterkingskosten van ongeveer 7 M€/km.

NB. Het kostenmodel KOSWAT is het model dat is gebruikt voor de normering (Waterwet, 2017).

Om de versterkingskosten van verschillende dwarsdoorsneden te kunnen onderscheiden, worden de kosten gerelateerd aan:

- volumes (aanvoeren, vervangen of verwijderen),
- materiaal (klei of zand),

- constructie (damwand, dikte van kleilaag),
- vernieuwing van de wegverharding op de dijk,
- verwerving van de ruimte voor dijkversterking
- en vaste of initiële kosten (bijvoorbeeld voor ontwerp en werkvoorbereiding).

Onderstaande vergelijking geeft de samenstelling van deze kosten:

$$I_{per\ m} = I_0 + V_{extra} \cdot c_e + V_{herplaats} \cdot c_h + V_{verwijderd} \cdot c_v + A_{ruimte} \cdot c_r + L_{damwand} \cdot c_d + I_{weg} \cdot c_w$$

Vergelijking 22

met daarin achtereenvolgens :

- de vaste kosten I_0 ,
- de kosten voor extra materiaal (zand of klei, $V_{extra} \cdot c_e$),
- de kosten voor materiaal dat eerst uit het profiel moet worden gehaald, tijdelijk opgeslagen en daarna herplaatst ($V_{herplaatst} \cdot c_h$),
- de kosten voor het definitief verwijderen van materiaal omdat bv ander kernmateriaal wordt aangebracht ($V_{verwijderd} \cdot c_v$),
- de kosten voor het aankopen van extra grond ($A_{ruimte} \cdot c_r$),
- de kosten voor de damwand ($L_{damwand} \cdot c_d$)
- en de kosten voor het hernieuwen van de weg ($I_{weg} \cdot c_w$).

Tabel 10 Overzicht gebruikte waarden voor het schatten van de investeringskosten van een dijkversterking.

Parameter	Omschrijving	Eenheid	Waarde
I_0	Vaste kosten	per m	200
c_e	Eenheidsprijs materiaal aanvoer en plaatsing	per m ³	40 (zand), 47 (klei)
c_h	Eenheidsprijs materiaal herplaatst	per m ³	10
c_v	Eenheidsprijs materiaal afvoer	per m ³	15
c_r	Eenheidsprijs aankoop grond (A_{ruimte})	per m ²	40
c_d	Eenheidsprijs materiaal damwand	per m ²	350
c_w	Eenheidsprijs aanleg weg	per m	600

De investeringskosten K bestaan daarmee uit het product van de eenheidsinvesteringskosten $I_{per\ m}$ en de lengte van de dijk L_{dijk} :

$$K = I \cdot L_{dijk}$$

Vergelijking 23

De maatschappelijke kosten MK bestaan uit de som van de investeringskosten en de contante waarde van de risico's R^{PV} (bij een rente r gelijk aan R/r) :

$$MK = I \cdot L_{dijk} + \frac{R}{r}$$

Vergelijking 24

4.6 Technische gegevens van de cases voor input van TDK-EVENT

De invoer voor RISK-TDK-EVENT voor een specifieke locatie betreft:

- Aanvullende gegevens voor het bepalen van de hydraulische randvoorwaarden: de schematisatie in een type watersysteem (zee, meer of rivier); het meerpeil, of het faseverschil tussen getij maximum en maximale stormopzet.
- De schematisatie van de 0-D overstromingssimulaties: de afmetingen van de kombergingsbeschouwing (oppervlak en bodemdiepte) en de minimale drempeldiepte van de bres.
- De schade parameters in Vergelijking 17 waarmee de LIWO data wordt benaderd

In Bijlage A zijn deze gegevens voor alle case locaties gegeven. In Bijlage A is beschreven hoe ze zijn afgeleid en afgeregeld, zodat de uitkomsten zo goed mogelijk overeenkomen met de LIWO data. Figuur 42 in Bijlage A geeft voor zowel schade, slachtoffers als getroffen en de vergelijking tussen de LIWO data en de resultaten van TDK-EVENT voor deze 0-D schematisatie. De overeenkomst is verrassend goed. Dat geeft voldoende vertrouwen om de 0-D schematisatie te gebruiken om de effecten van andere dijkconstructies te bepalen.

4.7 Berekeningen

Voor de 5 cases zijn berekeningen gemaakt voor 3 schematisaties: van de brosse, de bestaande en de taai dijken. Onderstaand zijn de resultaten gepresenteerd in 4 tabellen en 3 figuur.

De tabellen bevatten een regel voor elke schematisatie. Elke casus start met een eerste tabel met een beschrijving van de schematisatie en aanvullende gegevens van de dijk, en een tweede tabel met de visuele weergave van de schematisatie. Daarna worden in tabel drie en vier de rekenresultaten gegeven voor dijken die precies voldoen aan het risico dat met de normering impliciet voldoende is geacht. De kolommen in de derde tabel bevatten respectievelijk:

- De economische risico's in 2023
- De economische risico's in 2050
- De economische risico's in 2100
- De taaiheidsindex 2023
- De klimaatrobustheidsindex 2050 en 2100

De kolommen in de derde tabel bevatten respectievelijk:

- De dijkhoogte
- De lengte van de damwand
- De 'footprint' van het profiel, bepaald als de afstand tussen buiten en binnenteen
- De oppervlakte van de dwarsdoorsnede, als een maat voor de hoeveelheid gebruikt materiaal
- Kosten.

De kosten zijn gebaseerd op het opbouwen van de dijk vanaf de situatie 'geen dijk'. De kosten van het 'vertaaien' van bestaande dijken zijn niet beschouwd, omdat dat per situatie maatwerk is. Voor sommige van de cases is de bestaande situatie al veilig genoeg en behoeven de dijken dus niet te worden versterkt. Daarmee is de vergelijking van deze kosten voor de onderhavige verkenning minder relevant. Ook de maatschappelijke kosten (investering plus de contante waarde van het risico) zijn om die reden in de vergelijkende analyse niet beschouwd. De kosten zijn dus eerder te beschouwen als de potentiële kosten van de dijk, als referentiewaarde, dan als reële kosten om een dijkconstructie van broos in taai te wijzigen.

Tenslotte zijn voor elke casus de ontwikkelingen over de tijd voor elk van de drie schematisaties nog gegeven in 3 figuren met respectievelijk:

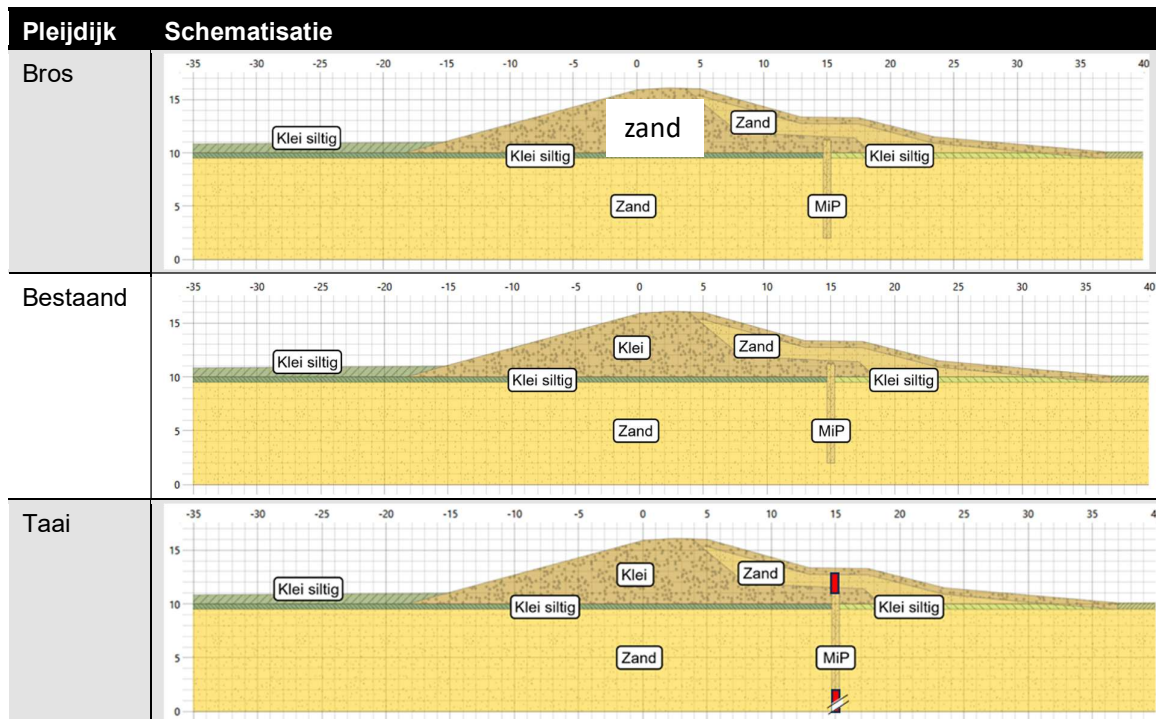
- de economische risico's
- de taaiheidsindex
- de klimaatrobustheidsindex

4.7.1 Pleijdijk

Tabel 11 Schematisatie Pleijdijk

Pleijdijk	Schematisatie (zie figuren in)	Resistent polder-niveau binnenteen (m+NAP)	Drempel (m tov res. polderniveau)
Bros	Zandkern, geen noodmaatregelen	10,1	0
Bestaand	Kleikern, MIPwand, wordt vanuit gegaan dat deze stabiel is onder overstromingsomstandigheden	11,25	1,15
Taai	Kleikern, MIPwand vervangen door damwand of vergelijkbaar, die aan de bovenzijde is verlengd tot bermniveau	12,7	2,6

Tabel 12 Schematisaties constructietypen Pleijdijk (afgezien van dimensionering en bermafmetingen)



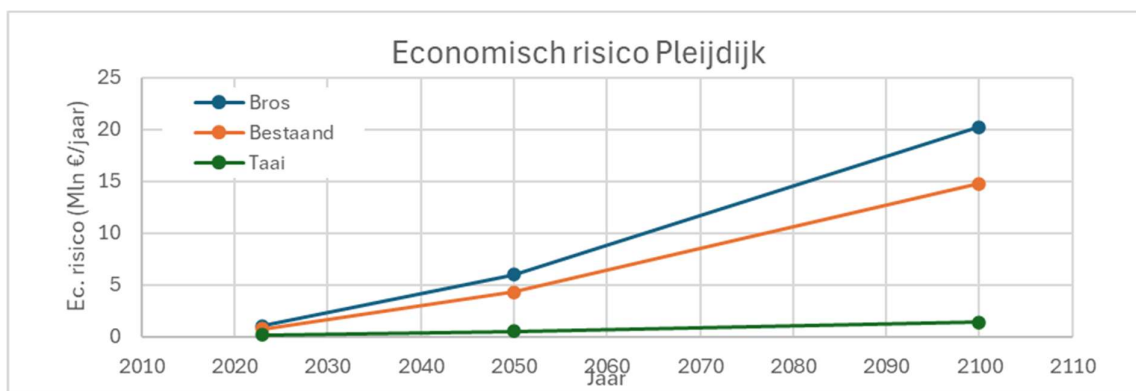
Tabel 13 Resultaten risico's, taaheidsindex en klimaatrobustheidsindex.

Pleijdijk	Ec. Risico 2023 (Mln €/jr)	Ec. Risico 2050 (Mln €/jr)	Ec. Risico 2100 (Mln €/jr)	Taaheids index 2023	Klimaatrob.h. index 2050/2100
Bros	1,0	6,0	20,2	1,0	1,0 / 1,0
Bestaand	0,7	4,3	14,8	1,4	1,0 / 1,0
Taai	0,2	0,5	1,4	4,9	2,3 / 3,0

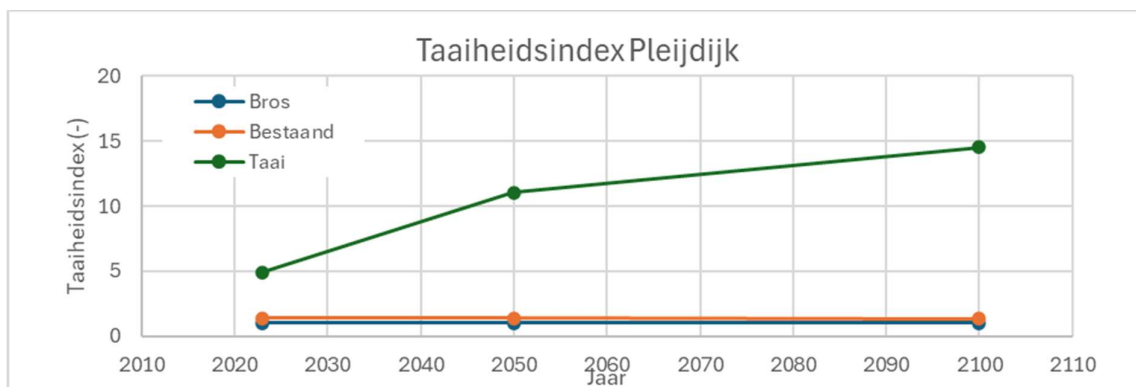
Tabel 14 Resultaten dimensies, ruimtebeslag en kosten (2023).

Pleijdijk	Kruinhoogte h_k (m+NAP)	L damwand (m)	Footprint incl. berm (m)	Oppervlakte dwarsdrsn (m ²)	Kosten (Mln €/km)
Bros	16,65	-	127	388	21,9
Bestaand	15,96	9,25	81	245	18,7
Taai	15,72	15,7	39	117	11,8

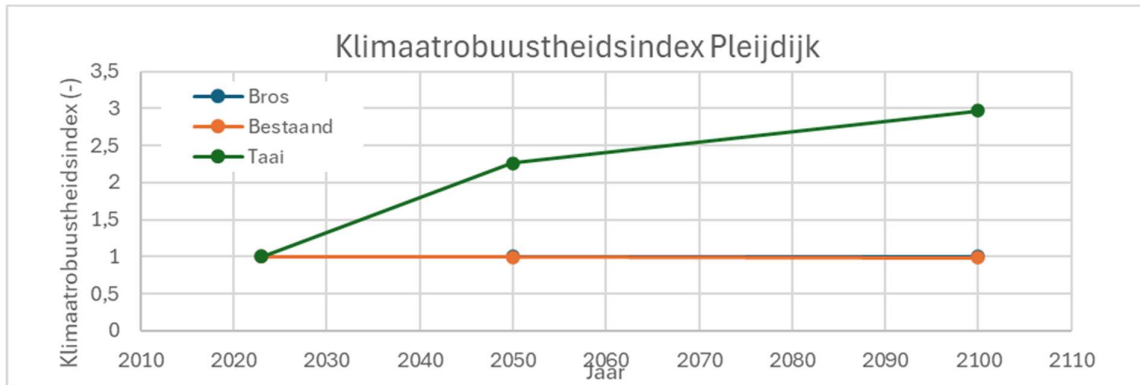
Door het vervangen van het brosse zandkern-ontwerp door een kleikern met een tot bermniveau verhoogde damwand, stijgt de taaïheidsindex naar 4,9. De toekomstige economische risico's worden, vergeleken met de brosse zanddijk, er ook door gereduceerd (klimaatrobustheidsindex 2050: 2,3). Tezamen geeft dit een veiligheidswinst die equivalent is aan ca 2 veiligheidsklassen. Tegelijkertijd biedt het taaie ontwerp veel ruimtelijke en financiële meerwaarde: de benodigde ruimte (footprint) neemt sterk af van 127 naar 39 meter, en de potentiële kosten van de dijk zijn beduidend lager: van 21,9 naar 11,8 M€ per kilometer.



Figuur 25 Resultaten economische risico's voor Pleijdijk



Figuur 26 Resultaten taaïheidsindex voor Pleijdijk



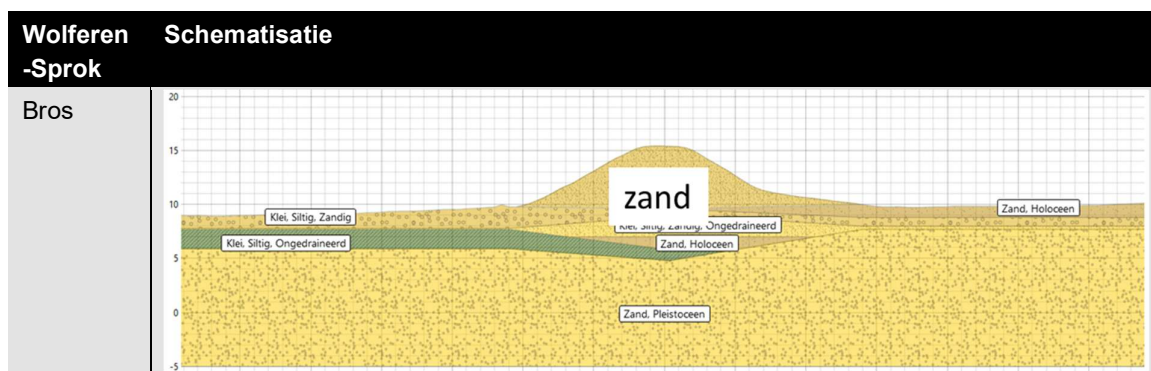
Figuur 27 Resultaten klimaatrobuustheidsindex voor Pleijdijk

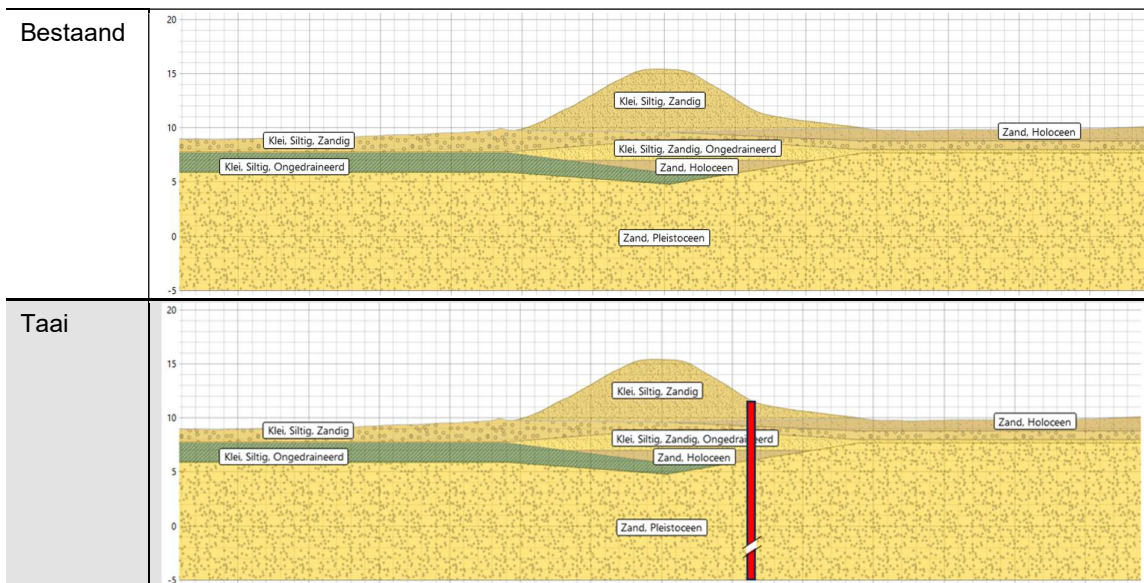
4.7.2 Wolferen-Sprok

Tabel 15 Schematisatie Wolferen-Sprok

Wolferen-Sprok	Schematisatie (zie figuren in Tabel 16)	Resistent polder-niveau binnenteen (m+NAP)	Drempel (m tov res. Polderniveau)
Bros	Zandkern, geen noodmaatregelen	9,9	0
Bestaand	Kleikern, berm	9,9	0
Taai	Kleikern, damwand of vergelijkbaar in binnentalud, die aan de bovenzijde is verlengt tot berm- of taludniveau	12	2,1

Tabel 16 Schematisaties constructietypen Wolferen-Sprok (afgezien van dimensionering en bermafmetingen)





Tabel 17 Resultaten risico's, taaïheidsindex en klimaatrobustheidsindex.

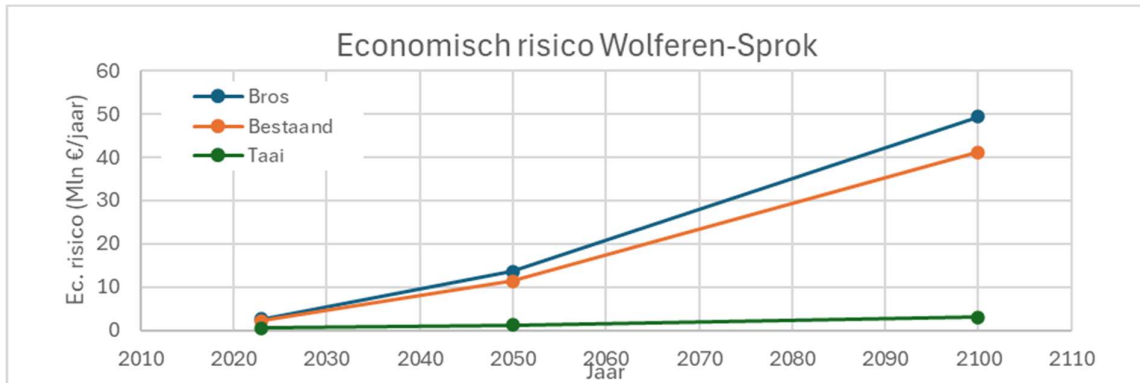
Wolfere n-Sprok	Ec. Risico 2023 (Mln €/jr)	Ec. Risico 2050 (Mln €/jr)	Ec. Risico 2100 (Mln €/jr)	Taaïheids index 2023	Klimaatrob.h. index 2050/2100
Bros	2,7	13,6	49,4	1,0	1,0 / 1,0
Bestaand	2,2	11,3	41,3	1,2	1,0 / 1,0
Taaï	0,5	1,1	3,1	5,6	2,1 / 2,9

Tabel 18 Resultaten dimensies, ruimtebeslag en kosten (2023)

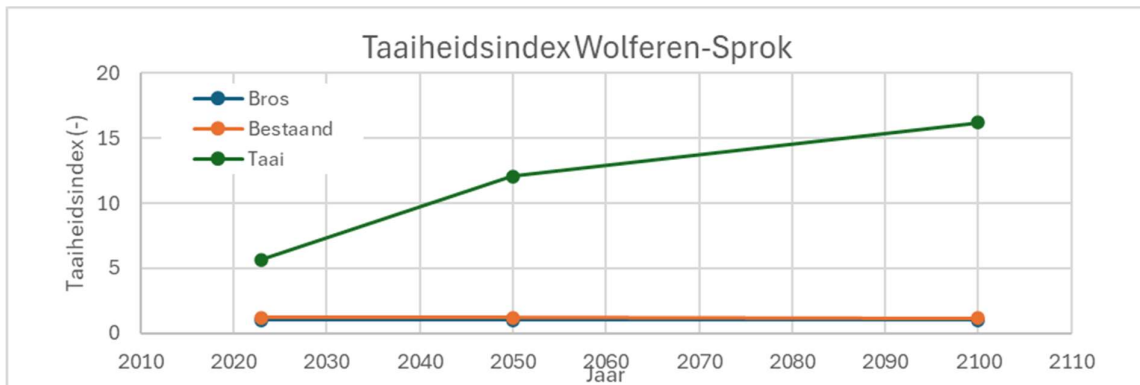
Wolfere n-Sprok*	Kruinhoogte h_k (m+NAP)	L damwand (m)	Footprint incl. berm (m)	Oppervlakte dwarsdrsn (m^2)	Kosten (Mln €/km)
Bros	16,00	-	179	575	31,0
Bestaand	15,46	-	178	567	34,6
Taaï	15,11	12	40	123	10,7

* Intredepunt aangenomen op 40 m tov buitenteen

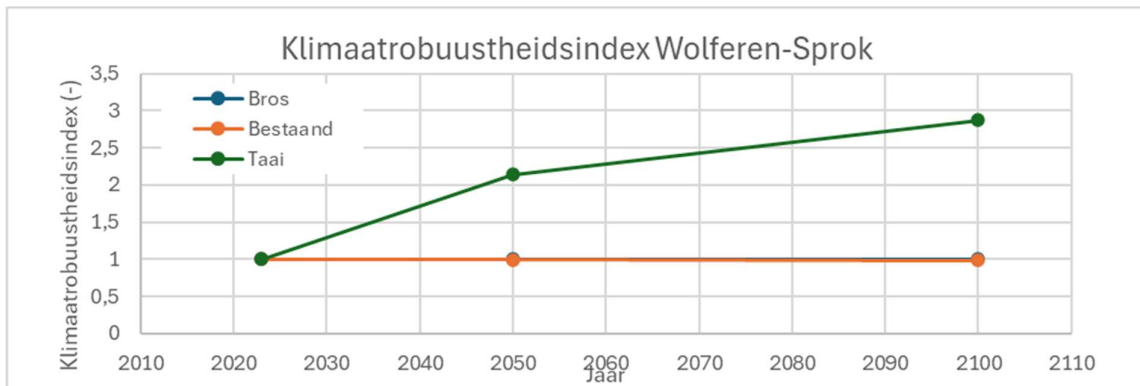
Het toepassen van een taaï ontwerp met een kleikern en een damwand in het binnentalud verhoogt de taaïheidsindex naar 5,6. De toekomstige economische risico's worden, vergeleken met de brosse zanddijk, er ook door gereduceerd (klimaatrobustheidsindex 2050: 2,1). Tezamen geeft dit een veiligheidswinst die equivalent is aan ca 2 veiligheidsklassen. Daarbij zorgt de taaïe variant voor een efficiënter ruimtegebruik doordat de footprint afneemt van 179 naar 40 meter, terwijl de potentiële kosten van de dijk met ruim € 20 miljoen per kilometer dalen.



Figuur 28 Resultaten economische risico's voor Wolferen-Sprok.



Figuur 29 Resultaten taaiheidsindex voor Wolferen-Sprok.



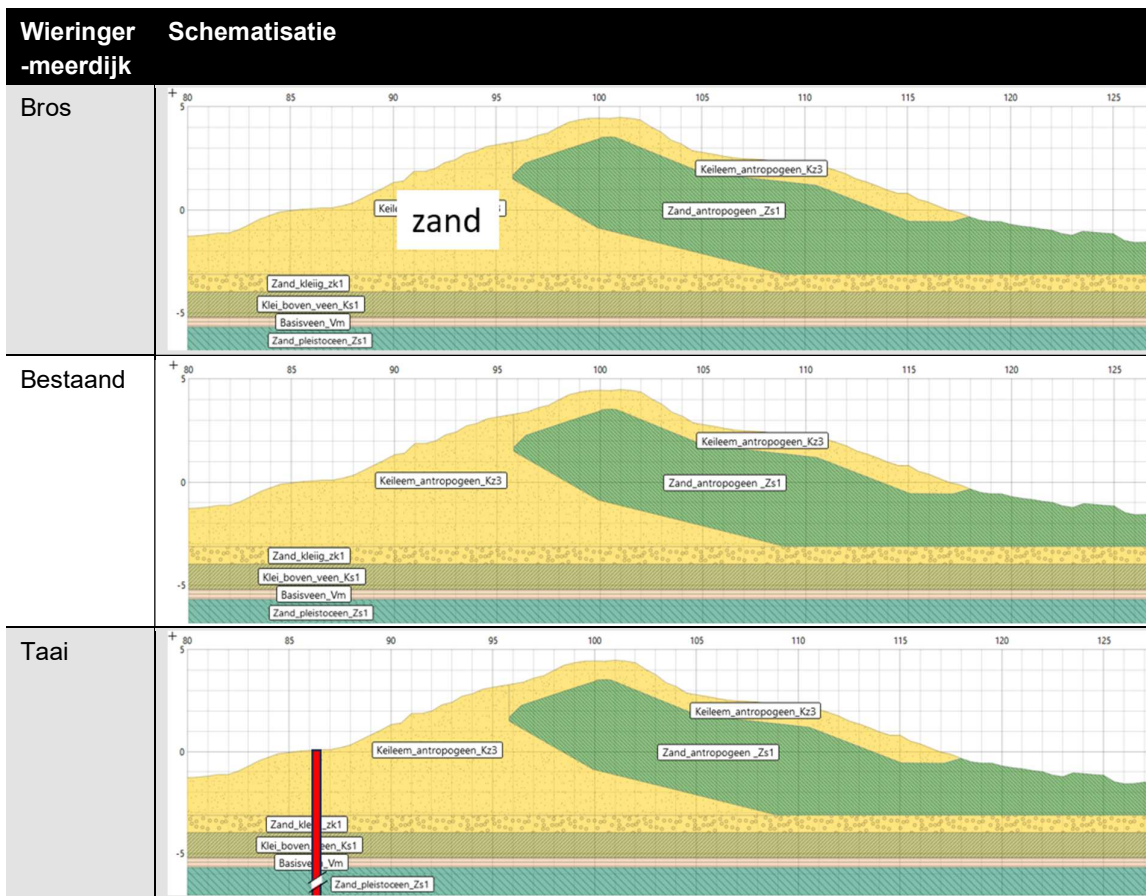
Figuur 30 Resultaten klimaatrobustheidsindex voor Wolferen-Sprok.

4.7.3 Wieringermeerdijk

Tabel 19 Schematisatie Wieringermeerdijk

Wieringermeerdijk	Schematisatie (zie figuren in)	Resistent polder-niveau binnenteen (m+NAP)	Drempel (m tov res. polderniveau)
Bros	Zandkern, geen noodmaatregelen	-3,2	0,0
Bestaand	Kleikern, maar niet stabiel bij overflow	-3,2	0,0
Taai	Kleikern, resistente en stabiele drempel gemaakt in buitentalud, net boven meerpeil	0,0	3,2

Tabel 20 Schematisaties constructietypen Wieringermeerdijk (afgezien van dimensionering en bermafmetingen)



Tabel 21 Resultaten risico's (contante waarde), taaïheidsindex en klimaatrobustheidsindex.

Wieringe rmeerdijk	Ec. Risico 2023 (Mln €/jr)	Ec. Risico 2050 (Mln €/jr)	Ec. Risico 2100 (Mln €/jr)	Taaïheids index 2023	Klimaatrob.h. index 2050/2100
Bros	3,7	7,8	10,2	1	1,0 / 1,0
Bestaand	3,3	6,8	9,0	1,1	1,0 / 1,0
Taai	0,2	0,3	0,3	20	1,3 / 1,5

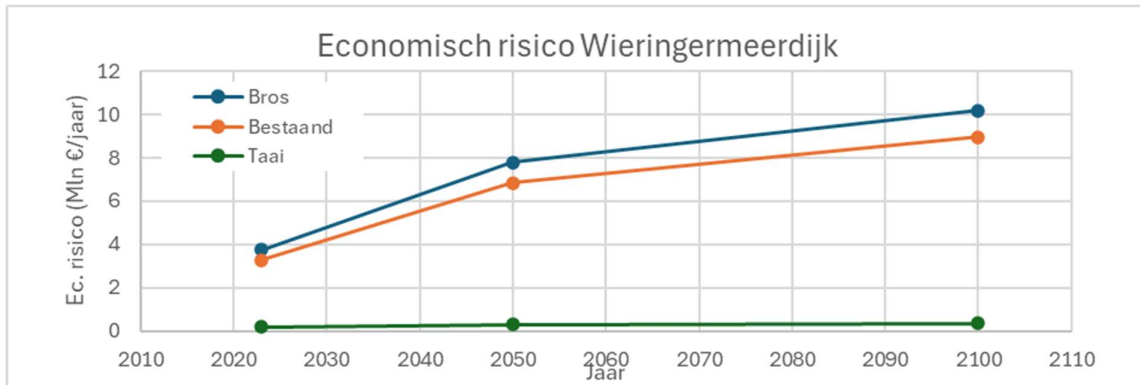
Tabel 22 Resultaten dimensies, ruimtebeslag en kosten (2023).

Wieringer meerdijk	Kruinhoogte h_k (m+NAP)	L damwand (m)	Footprint incl. berm (m)	Oppervlakte dwarsdrsn (m ²)	Kosten (Mln €/km)
Bros	4,65	-	55	227	12,4
Bestaand	3,60		48	173	10,9
Taai	2,77	9,6*	42	135	10,5

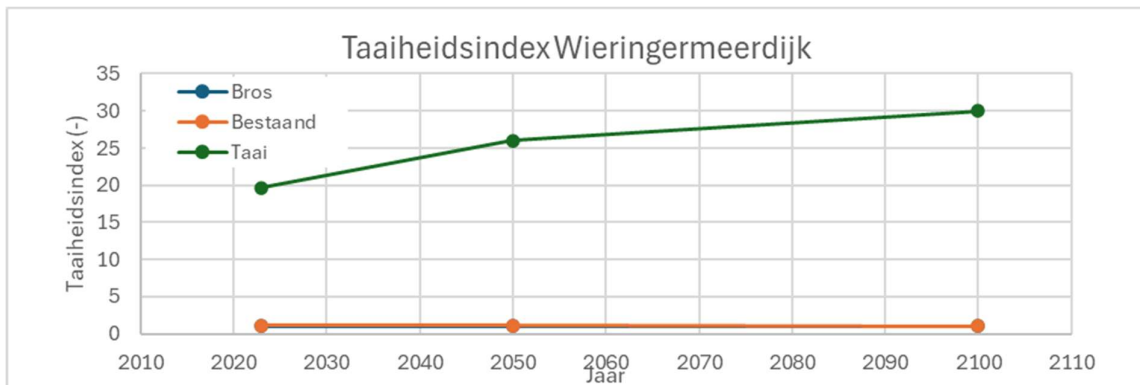
* Berekend bij een bovenzijde op 0 m+NAP, net boven het meerpeil.

Voor deze locatie aan het meer zorgt een taai ontwerp met een resistente kleidrempel net boven het meerpeil voor een forse verhoging van de taaïheidsindex (20), waardoor het overstromingsrisico sterk

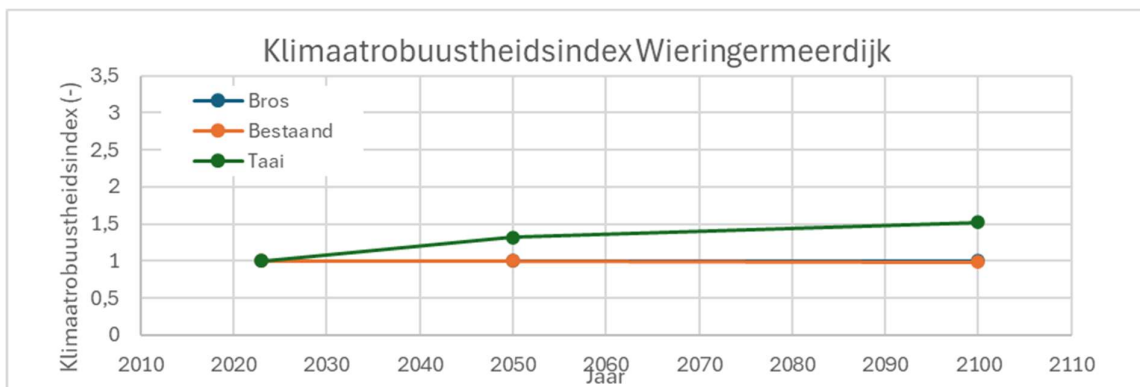
wordt gereduceerd. De toekomstige economische risico's worden, vergeleken met de brosse zanddijk, er ook door gereduceerd (klimaatrobustheidsindex 2050: 1,3). Tezamen geeft dit een veiligheidswinst die equivalent is aan ca 3 veiligheidsklassen. Dit uitzonderlijk veilige en robuuste profiel is bovendien in alle opzichten voordeliger: het verkleint de footprint van 55 naar 42 meter en de potentiële kosten van de dijk vallen lager uit (€ 10,5 Mln €/km) dan bij de aanleg van een traditionele zanddijk (€ 12,4 Mln €/km).



Figuur 31 Resultaten economische risico's voor Wieringermeerdijk



Figuur 32 Resultaten taaideindex voor Wieringermeerdijk



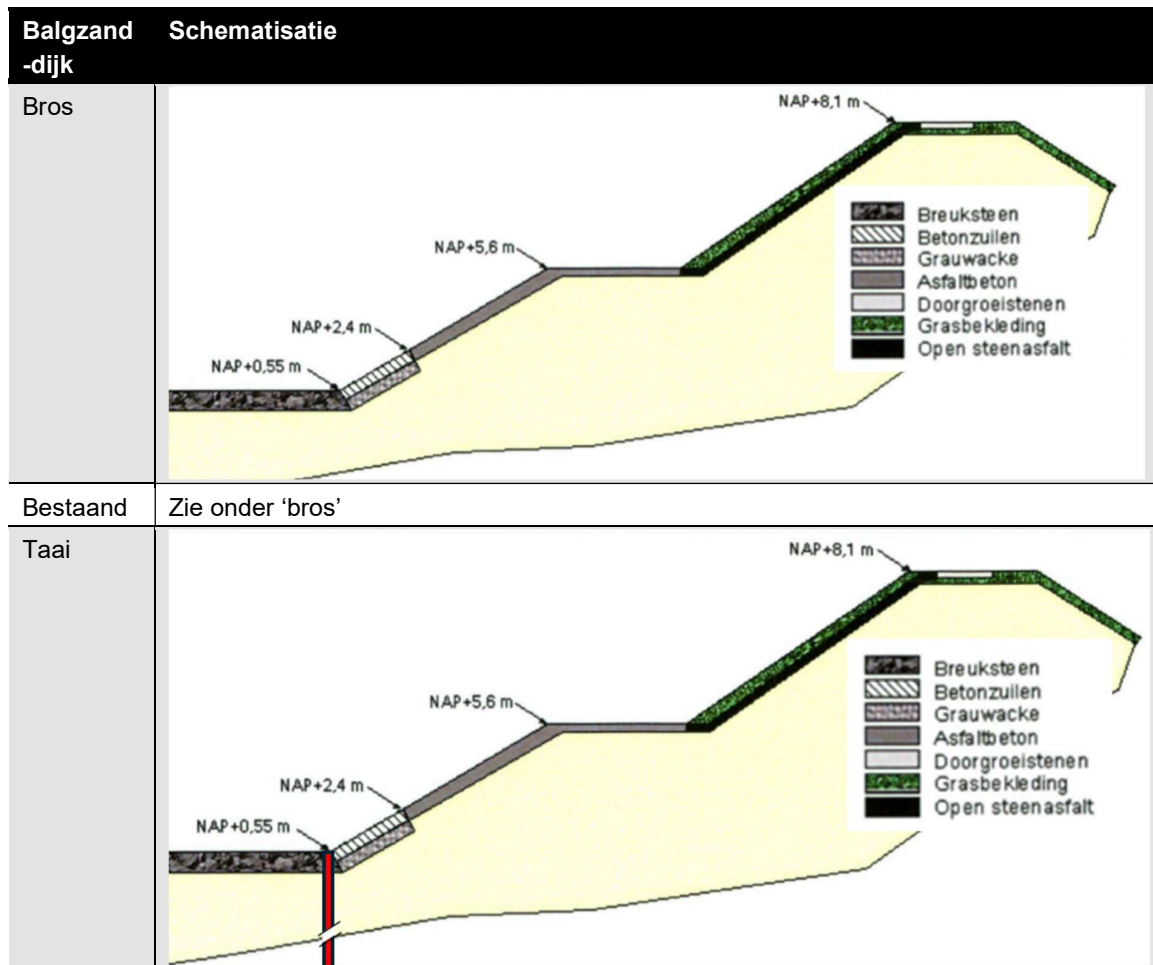
Figuur 33 Resultaten klimaatrobustheidsindex voor Wieringermeerdijk

4.7.4 Balgzanddijk

Tabel 23 Schematisatie Balgzanddijk

Balgzanddijk	Schematisatie (zie figuren in)	Resistent polder-niveau binnenteen (m+NAP)	Drempel (m tov res. polderniveau)
Bros	Zandkern, geen noodmaatregelen	0,1	-
Bestaand	Zandkern	0,1	-
Taai	Resistente en stabiele drempel gemaakt in buitentalud, net boven hoogtij	1	0,5

Tabel 24 Schematisaties constructietypen Balgzanddijk (afgezien van dimensionering en bermafmetingen)



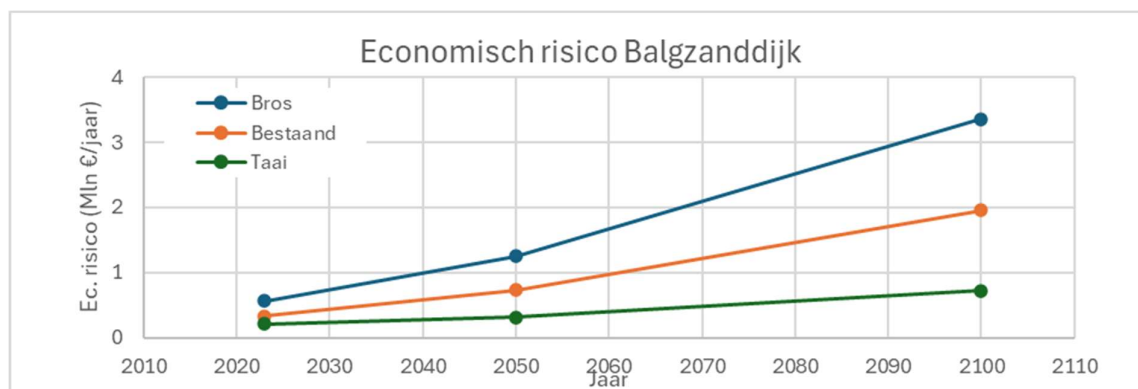
Tabel 25 Resultaten risico's, taaiheidsindex en klimaatrobustheidsindex.

Balgzand-dijk	Ec. Risico 2023 (Mln €)	Ec. Risico 2050 (Mln €)	Ec. Risico 2100 (Mln €)	Taaiheids index 2023	Klimaatrob.h. index 2050/2100
Bros	0,6	1,3	3,3	1,0	1,0 / 1,0
Bestaand	0,3	0,7	2,0	1,7	1,0 / 1,0
Taai	0,2	0,3	0,7	2,7	1,5 / 1,8

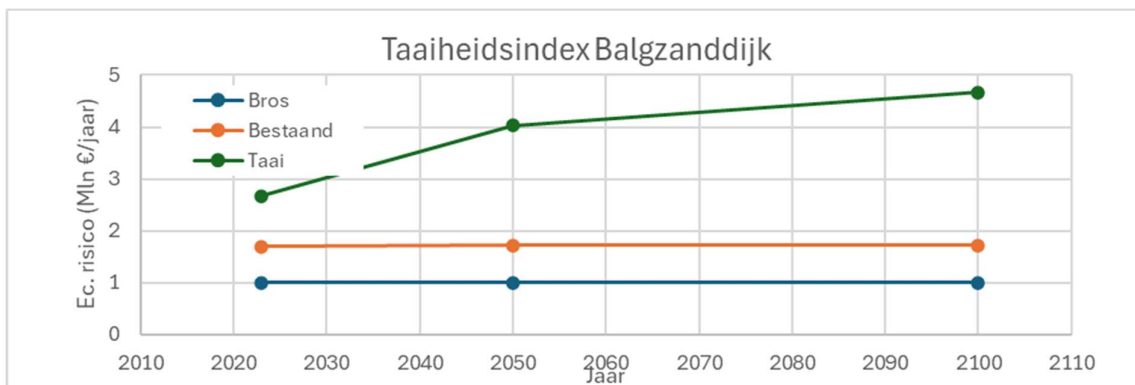
Tabel 26 Resultaten dimensies, ruimtebeslag en kosten (2023).

Balgzand-dijk	Kruinhoogte h_k (m+NAP)	L damwand (m)	Footprint incl. berm (m)	Oppervlakte dwarsdrsn (m ²)	Kosten (Mln €/km)
Bros	7,31	-	50	193	8,5
Bestaand	6,28	-	44	144	6,6
Taai	6,10	23	43	137	14,4

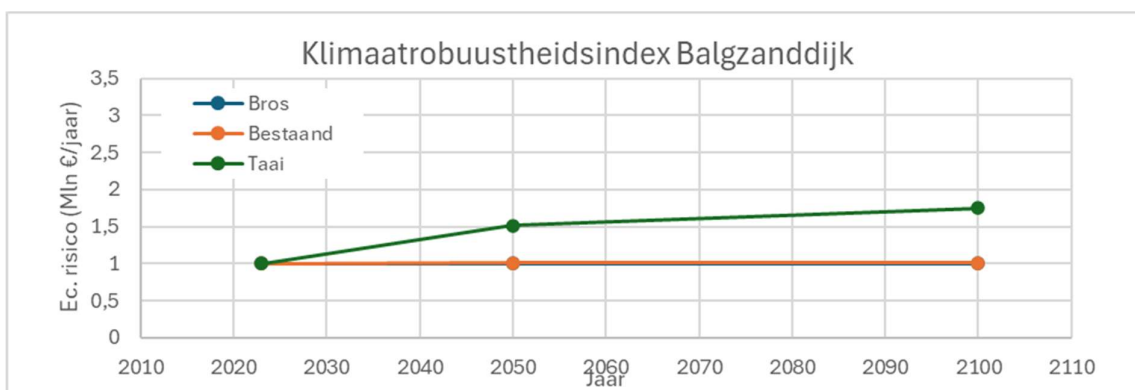
Door het inrichten van een stabiele drempel net boven hoogtij verbetert de taaiheidsindex tot 2,7. De toekomstige economische risico's worden, vergeleken met de brosse zanddijk, er ook door gereduceerd (klimaatrobustheidsindex 2050: 1,5). Tezamen geeft dit een veiligheidswinst die equivalent is aan ca 1 veiligheidsklasse. Het is bij deze specifieke zeedijk echter opvallend dat hoewel het ruimtebeslag bij het taaie ontwerp iets afneemt (footprint van 50 naar 43 meter), de potentieel benodigde investeringskosten voor deze constructie juist fors hoger uitvallen (€ 14,4 Mln €/km ten opzichte van € 8,5 Mln €/km voor de brosse variant). Het aanbrengen van een resistente drempel net boven hoogtij kost veel geld, omdat de damwand dan erg lang moet zijn. De overstorthoogte ingeval van een bres is voor deze casus namelijk maatgevend voor de lengte van de damwand, zie paragraaf 0. Mogelijk dat (paradoxaal genoeg) een iets hogere plaatsing van de drempel voordeliger kan zijn. De optimalisatie daarvan is in deze studie niet uitgevoerd omdat dat niet bijdraagt aan het inzicht met betrekking tot de kern van het taaie dijken concept.



Figuur 34 Resultaten economische risico's voor Balgzanddijk



Figuur 35 Resultaten taaibeidsindex voor Balgzanddijk



Figuur 36 Resultaten klimaatrobustheidsindex voor Balgzanddijk

4.7.5 Hollandse IJsseldijk

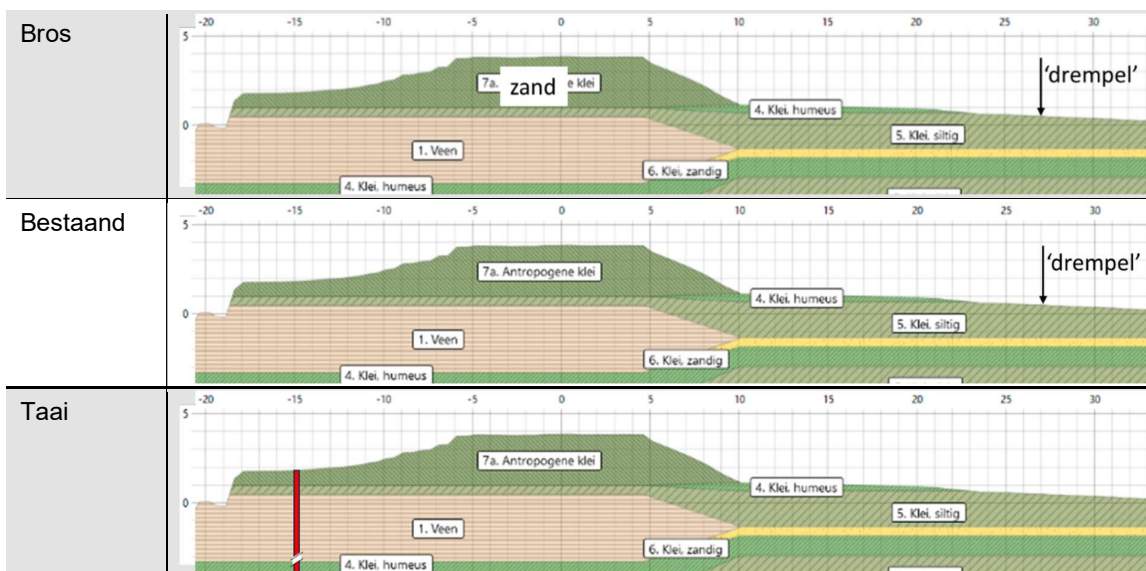
Tabel 27 Schematisatie Balgzanddijk

Hollandse IJsseldijk	Schematisatie (zie figuren in)	Resistent niveau binnenteen (m+NAP)	Drempel (m tov res. polderniveau)
Bros	Zandkern, geen noodmaatregelen	-2*	4
Bestaand	Kleikern, niet stabiel na falen	-2*	4
Taai	Resistente en stabiele drempel gemaakt in buitentalud	2	4

* de praktische drempel lijkt op 0,5m+NAP (het is op de case locatie een 'hoogvlakte' achter de dijk), maar dat is niet langs het gehele dijktraject het geval, zodat deze lokale drempel niet als zodanig is meegenomen.

Tabel 28 Schematisaties constructietypen Hollandse IJsseldijk (afgezien van dimensionering en bermafmetingen)

Hollandse IJsseldijk	Schematisatie



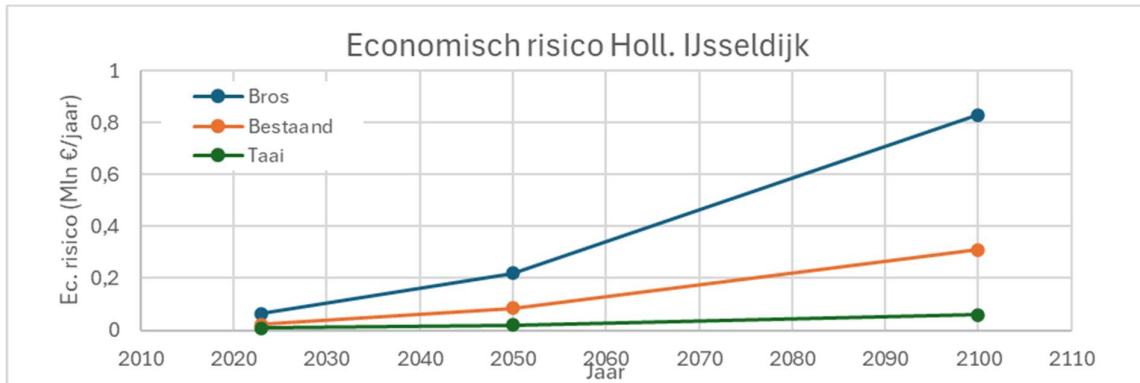
Tabel 29 Resultaten risico's, taaiheidsindex en klimaatrobustheidsindex.

Hollandse IJsseldijk	Ec.Risico 2023 (Mln €/jr)	Ec. Risico 2050 (Mln €/jr)	Ec. Risico 2100 (Mln €/jr)	Taaiheids index 2023	Klimaatrob.h. index2050/2100
Bros	0,063	0,22	0,83	1,0	1,0 / 1,0
Bestaand	0,023	0,084	0,31	2,7	1,0 / 0,9
Taai	0,0083	0,019	0,059	7,6	1,5 / 1,9

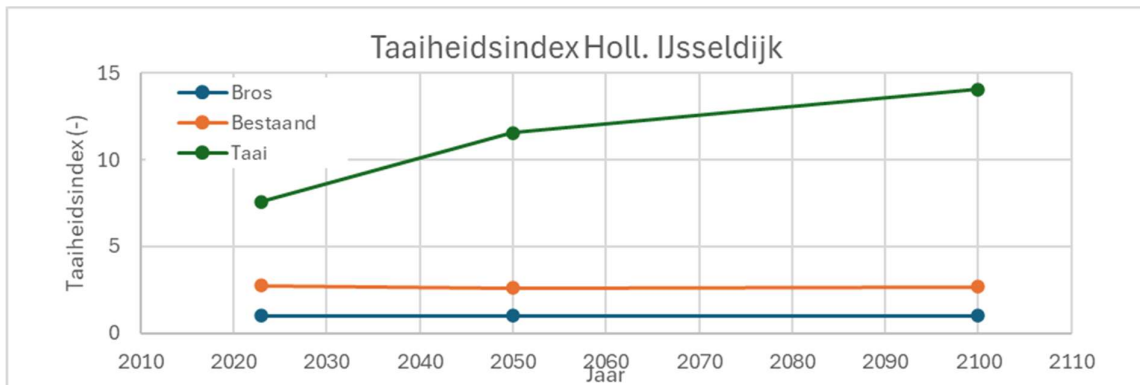
Tabel 30 Resultaten dimensies, ruimtebeslag en kosten (2023)

Hollandse IJsseldijk	Kruinhoogte h_k (m+NAP)	L damwand (m)	Footprint incl. berm (m)	Oppervlakte dwarsdrsn (m ²)	Kosten (Mln €/km)
Bros	3,59	-	45	148	7,0
Bestaand	3,27	-	42	134	7,1
Taai	3,15	12	42	129	11,1

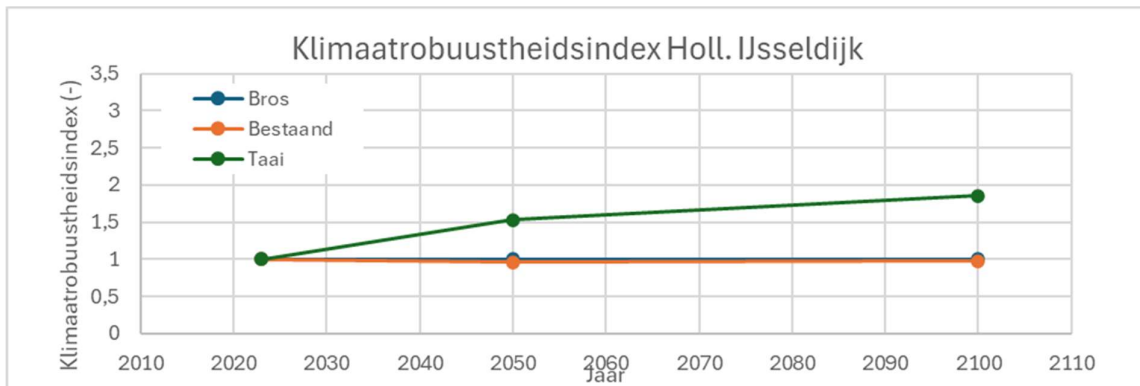
Het integreren van een resistente drempel in het buitentalud creëert in dit overgangsgebied tussen zee en rivier een zeer taaie dijk (taaiheidsindex: 8). De toekomstige economische risico's worden, vergeleken met de brosse zanddijk, er ook door gereduceerd (klimaatrobustheidsindex 2050: 1,5). Tezamen geeft dit een veiligheidswinst die equivalent is aan ca 2 veiligheidsklassen. Deze robuustere uitvoering vergt een hogere potentiële investering van € 11,1 ten opzichte van € 7,0 miljoen per kilometer, omdat er een damwand wordt geplaatst.



Figuur 37 Resultaten economische risico's voor Hollandse IJsseldijk



Figuur 38 Resultaten taaieheidsindex voor Hollandse IJsseldijk



Figuur 39 Resultaten klimaatrobustheidsindex voor Hollandse IJsseldijk

4.8 Kwaliteitsindicatie

Deze vergelijking tussen de dimensies van ontwerpvarianten geeft het potentiële effect aan van het gebruik van taaie ontwerpconcepten. De vergelijking sec geeft daarmee een kwalitatieve indruk of het verband tussen ontwerp en risico logisch is, maar het geeft geen oordeel over de kwaliteit van de aanpak. Daarom zijn nog vergelijkingen uitgevoerd met VNK en met het volledige TDK model, ze worden beschreven in onderstaande paragrafen.

4.8.1 Vergelijking met VNK

De aanpak met 'afgeregelde' fragilitycurves met aangenomen spreidingen, is gekozen om vrij snel een werkbaar instrument te kunnen maken voor de cases in deze studie. Er is een vergelijking gemaakt met enkele VNK-resultaten, waarvan de faalkans beschikbaar is. De vergelijking is uitgevoerd op het niveau van economische risico's. De vergelijking betreft dus de integratie van de kans op overstromen (paragraaf 3.3.1) met de gevolgen (NB. De gevolgen zijn apart geijkt op de LIWO -database met de aanpak in paragraaf 3.3.2).

De uitgangspunten zijn zoveel mogelijk gelijk gekozen aan die welke door VNK zijn gebruikt:

- VNK gebruikt de LIWO database. De LIWO-database is veelal uitgegaan van een brossse bres, ten tijde van hoogwater. In TDK-EVENT is de bresvorming dus gestart op t=0 (hoogwater), en is een brossse dijkconstructie gekozen.
- Om de economische risico's na te bootsen is de effectiviteit van de evacuatie gezet op 100%, zodat er geen slachtoffers vallen.
- Er is geen rekening gehouden met schade door getroffen.

De vergelijking is uitgevoerd voor de cases Wolferen-Sprok, Pleijdijk en Wieringermeerdijk. In de achtergrondrapporten (Arends, 2014; Reen, 2011; Vergouwe et al., 2014) is het meest corresponderende ringdeel opgezocht, en de bijbehorende faalkans. Het resultaat is gegeven in Tabel 31. In alle drie de beschouwde situaties komen VNK en RISK-TDK-EVENT redelijk overeen. Het verschil van ca 30% wordt bij faalkans-analyses meestal als 'goede overeenkomst' aangemerkt. Hier is dat niet verwonderlijk omdat in RISK-TDK-EVENT de 'ontwerp-faalkans' als uitgangspunt wordt gebruikt. De verschillen met het risico dat op basis van de gegevens in VNK is bepaald komen voort uit:

- De gebruikte (spreiding in de) fragility curve
- Het gebruik van LIWO-light, dat weliswaar voor enkele scenario's is geijkt op LIWO maar vervolgens ongelimiteerd is gebruikt voor alle mogelijk overstromingssituaties.

Tabel 31 Resultaten vergelijking met VNK resultaten. In de grijze regels de VNK resultaten, en in de daar onderstaande witte regel de resultaten met RISK-TDK-EVENT.

Document/ casus	Titel	Ringdeel	Schade (M€)	Scenariokans	Risico (M€/jr)
HB 2585156, okt 2014	Veiligheid Nederland in Kaart 2 Overstromingsrisico dijkkringgebied 48, Rijn en IJssel	5 (zie blz 36, figuur 19)	4980 (Zie blz 46, tabel 13, en blz 49, tabel 15: schade bij toetspeil)	1/950 (Zie , tabel 14)	5,2
Pleijdijk	Taaie dijken Klimaatrobuust	LIWO, door- braak Loo	Variabel, gehele waterst. domein	1/950, volledig toegekend aan falen door golfoverslag	7,8
HB 2311021, mei 2014	Veiligheid Nederland in Kaart 2 Overstromingsrisico dijkkring 43, Betuwe, Tieler- en Culemborger- waarden	11	11305 (Zie blz 62, Figuur 41: schade bij toetspeil)	1/320 (Sommatie van de dijkvakken behorende tot dit ringdeel)	35,3

Wolferen-Sprok	Taaie dijken Klimaatrobuust	LIWO, doorbraak Oosterhout	Variabel, gehele waterst. domein	1/320, volledig toegekend aan falen door piping	51,9
HB 1555732, dec 2011	Veiligheid Nederland in Kaart 2 Overstromingsrisico dijkkring 12, Wieringermeer	D	2265 (Zie blz 47, Figuur 41: schade bij toetspeil)	1/690 (Tabel 13 op blz 54)	3,3
Wieringermeerdijk	Taaie dijken Klimaatrobuust	LIWO, doorbraak Wieringermeerdijk	Variabel, gehele waterst. domein	1/690, volledig toegekend aan falen door piping	4,6

In de VNK eindrapportage worden ook nog waarden gegeven voor de verwachte schade en slachtoffers per overstroming. Die waarden kunnen ook met RISK-TDK-EVENT worden berekend: het risico gedeeld door de faalkans van de dijk. VNK heeft deze waarden alleen gegeven voor gehele dijkkringen. In de cases in dit rapport is naar doorbraken op specifieke locaties gekeken, al zijn die vrijwel identiek voor doorbraken ergens langs het dijktraject. De vergelijking kon dus alleen worden gemaakt voor die cases waarbij een dijkdoorbraak vergelijkbare overstromingspatronen liet zien zoals gebruikt in VNK (dus idealiter: 1 dijktraject en 1 doorbraaklocatie). Dat was voor 2 van de case enigszins het geval, Pleijdijk en Wieringermeerdijk. De vergelijking is in Tabel 32 gegeven, en laat zien dat de uitkomsten qua orde van grootte vergelijkbaar zijn.

Beide vergelijkingen met VNK-resultaten geven dus hetzelfde beeld. De waarden wijken af omdat er een andere methode is opgezet en gebruikt, maar de orde van grootte van de resultaten is vergelijkbaar. Dat geeft vertrouwen in het gebruik van RISK-TDK-EVENT voor de relatieve vergelijking van verschillende dijkconstructie varianten.

Tabel 32 Vergelijking van RISK-TDK-EVENT met VNK, voor die cases waar de overstromingsgebieden per dijktraject overeenkomen met die per dijkkring.

Casus	Schade & Slachtoffers per overstroming RISK-TDK-EVENT (Mld Euro)	Herkomst risico RISK-TDK-EVENT	Schade & Slachtoffers per overstroming VNK (Mld Euro)	Opm. VNK dijkkring
Pleijdijk	1Mln/jr / 0,0001/jr =10	Tabel 13	3,4+100 . VoSL* = 4,1	48
Wieringermeer	3,7Mln/jr / 0,001/jr =3,7	Tabel 21	1,8+53 . VoSL* = 2,2	12

* VoSL is gelijk aan die is gebruikt voor de normering, 6,7 M€/sl.

4.8.2 Vergelijking met TDK

In RISK-TDK-EVENT (paragraaf 3.3.3) wordt de fragility curve afgeregeld op een vooraf te bepalen faalkans. Daarbij worden vervolgens zowel de risico's als de ontwerpdimensies kunnen worden bepaald. Alle niet-gemodelleerde sterkte is verwaarloosd door de overgangskans aan te nemen op 1. Omdat voor de niet-brosse varianten ook een overgangskans van 1 is genomen worden de verschillen tussen de faalkansen van de ontwerpvarianten in voorliggende studie onderschat.

Het TDK-ricicomodel (paragraaf 2.3) is vollediger omdat daarin de volledige risicopaden worden gemodelleerd, gebaseerd op de dimensies van de dijk en de dijkopbouw. Weliswaar is dit model alleen

nog beschikbaar voor de risicopaden via dijkhoogte en piping, en alleen voor het rivierengebied (de Rijntakken), maar toch is het een goede mogelijkheid om inzicht te krijgen in de overgangskans. Als 'tussenresultaat' kan met het TDK-model namelijk ook worden bepaald bij welke kans de dijk faalt. En modelinstellingen maken het mogelijk om de dijkconstructie steeds verder 'af te pellen', zelfs tot het niveau dat er alleen gekeken wordt naar de overschrijdingsfrequentie van een overslagcriterium. Achtereenvolgens is voor de twee case locaties in het rivierengebied (Pleijdijk en Wolferen-Sprok) gekeken naar:

1. De kans op overschrijden van het golfoverslagcriterium van 1 l/m/s
2. De kans op falen van een dijk zonder bescherming op het binnentalud, en zonder kruinbreedte
3. De kans op falen van een dijk zonder bescherming op het binnentalud, en kruinbreedte
4. De kans op falen van een dijk met een grasbekleding op het binnentalud, en kruinbreedte
5. De kans op falen van een dijk met een gras- en kleibekleding op het binnentalud, en kruinbreedte

De overgangskansen zijn bepaald ten opzichte van (1) de kans op overschrijden van het golfoverslagcriterium van 1 l/m/s. Daarnaast is voor de complete dijk (5) nog een berekening gemaakt waarin:

6. het kern materiaal is veranderd van zand in klei (Pleijdijk)
7. het kern materiaal is veranderd van klei in zand (Wolferen-Sprok)

De overgangskansen lopen op tot grote waarden, zie Tabel 33. Ze zijn visueel weergegeven in Figuur 40. Voor de zanddijk (Pleijdijk) is te zien dat er veel effect is zodra er een (gras)bekleding op de dijk ligt (linker figuur, van kolom (3) naar (4), > factor orde 10). Als de kern ook in klei zou worden veranderd is er opnieuw een zeer groot effect (lichtgrijze kolom (5) in rechter figuur, tov gele kolom (5) in linker figuur, > factor orde 100).

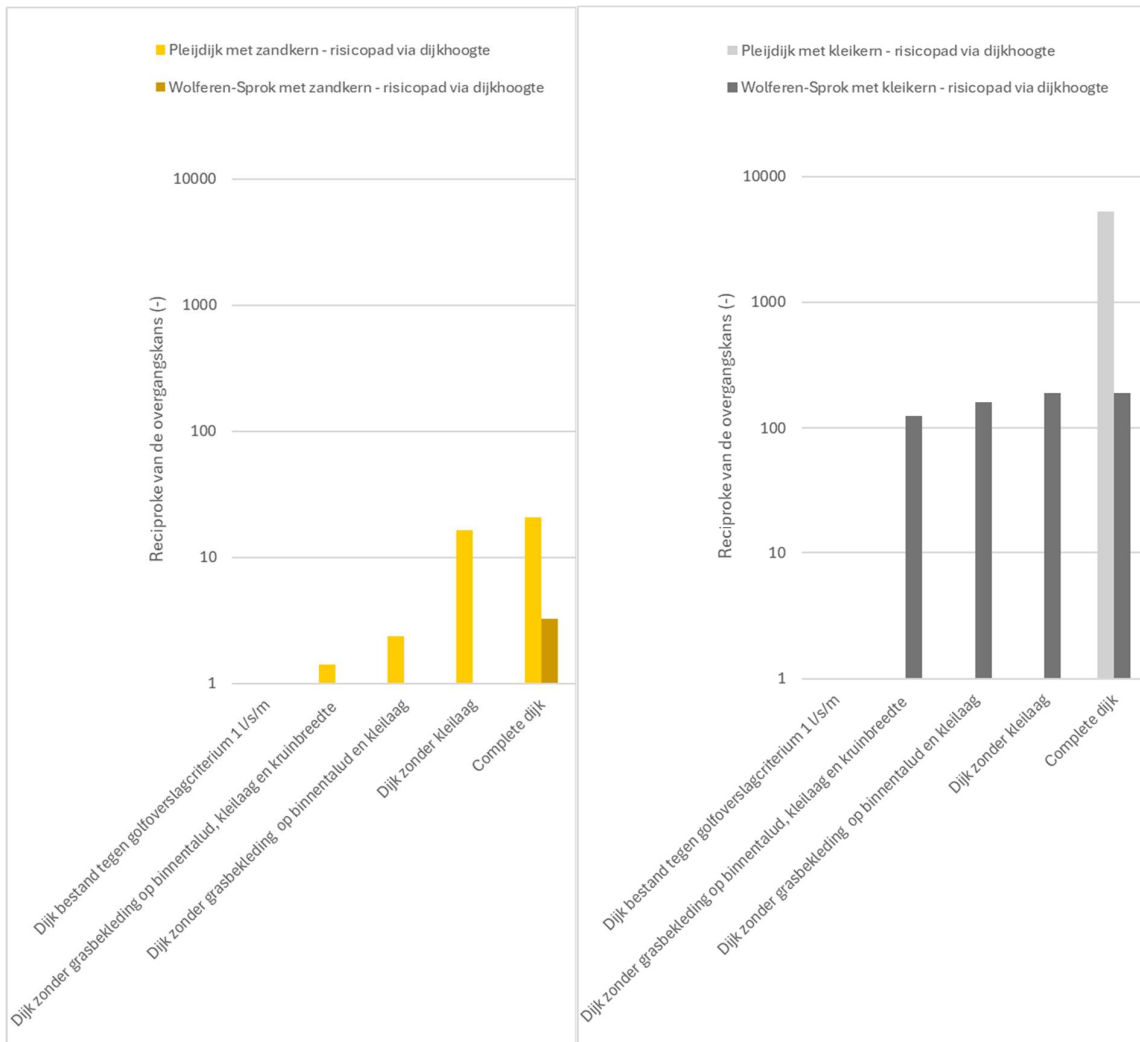
Voor de kleidijk (Wolferen-Sprok) heeft zelfs een pure kleikern al veel effect (kolom (2) in de rechter figuur, > factor orde 100). Als de kern in zand zou zijn geweest is er nog steeds een overgangskans veel kleiner dan 1, maar minder groot dan dat bij de Pleijdijk (linker figuur, donkergele kolom (5), > factor 3).

Tabel 33 Resultaten van de berekeningen met TDK voor twee case-locaties. De overgangskans is berekend ten opzicht van het golfoverslagcriterium van 1 l/m/s.

Dijkconstructie	Pleijdijk (zandkern)		Wolferen-Sprok (kleikern)	
	Kans (.10 ⁻⁵ per jr)	Reciproke over- gangskans (-)	Kans (.10 ⁻⁵ per jr)	Reciproke over- gangskans (-)
1. golfoverslag	2,6	1,0	2,4	1,0
2. geen bekleding, geen kruin	1,8	1,4	0,019	125
3. geen bekleding	1,1	2,4	0,015	160
4. grasbekleding	0,16	16	0,012	189
5. complete dijk, incl. grasbekle- ding en kleilaag	0,13	21	0,012	189
6. complete dijk met klei kern	0,0005	5286		
7. complete dijk met zand kern			0,72	3,3

Met de resultaten van het TDK-model is een indruk verkregen van het relatieve effect van de aanpak met RISK-TDK-EVENT ten opzichte van een volledige risicobenadering:

- de overgangskansen kunnen zeer klein kunnen zijn (de reciproke dus zeer groot), en ze zijn kleiner naarmate er meer elementen in de doorsnede zitten die taai gedrag vertonen.
- Dat betekent dat het effect van het taai gedrag dus groter tot veel groter is dan met RISK-TDK-EVENT bepaald.
- Op een zanddijk levert de grasbekleding de grootste bijdrage aan de overgangskans.
- Vooral een kleikern heeft een groot effect. NB. uiteraard moet de kern of drempel in overstromende situaties wel stabiel zijn, anders gaat het taai gedrag verloren. In deze studie is de stabiliteit beschouwd door een voldoende flauwe binnentaludhelling aan te nemen.



Figuur 40 Reciproke van de overgangskansen voor 2 case locaties, bepaald met TDK voor 2 risicopaden.

5 DISCUSSIE

Resultaten

De resultaten van de cases zijn samengevat in Tabel 34. De Taaiheidsindex varieert tussen 3 en 20 en de klimaatrobuustheidsindex voor 2050 is ongeveer een factor 2. Vermenigvuldiging van beide geeft de veiligheidswinst in 2050. Deze winst is 1 veiligheidsklasse (factor 3) voor de casus in het kustgebied, 2 klassen (factor 10) voor die in het rivierengebied, en 3 klassen (factor 30) voor die in het merengebied.

Tabel 34 Samenvatting resultaten cases.

Case	TI	KRI (2050)	Veiligheidswinst (klassen)
Pleijdijk	4,9	2,3	2
Wolferen-Sprok	5,6	2,1	2
Wieringermeerdijk	20	1,3	3
Balgzanddijk	2,7	1,5	1
Hollandse IJsseldijk	7,6	1,5	2

Risico-aanpak

De kern van de aanpak is het integrale risicogedachtengoed, waarin het risico wordt benaderd als een combinatie van de kans op een overstromingsgebeurtenis en de daadwerkelijke gevolgen daarvan. De aanpak verbetert de veelal beperkte toepassing daarvan in de huidige BOI-systematiek die gericht is op de kans op overstroming. Veel toepassingen richten zich daarnaast sterk op het initiële faalmoment en negeren het tijdsaspect, en de erosie tijdens een hoogwatergebeurtenis. De aanpak verbetert de fundamentele (maar juridisch gezien begrijpelijke) beperking van de huidige BOI-systematiek, waarin weliswaar een faalpaden-analyse de keten van bezwijken volgt, maar waarin de bresgroei, de overstroming en de uiteindelijke overstromingsgevolgen nog steeds buiten beschouwing worden gelaten.

Het concept van taaie dijken is er primair op gericht om de gevolgen van een onverhoopte doorbraak te beperken door middel van een vertraagd bezwijkproces en kleinere bresafmetingen. Een risicopad biedt een completer beeld doordat dit het effect van beperkte instromende volumes integraal meeneemt in de berekeningen van de gevolgen. Alleen door de overstap te maken naar risicopaden, kunnen de échte veiligheidsvoordelen van taai gedrag – zoals een aanzienlijk langere evacuatie tijd en een gereduceerd aantal slachtoffers – op de juiste waarde worden geschat en gekwantificeerd. De verruiming van het denken in faalpaden naar risicopaden is daarom een logische en noodzakelijke stap.

Modellering

Hoewel het volledige TDK-ricomodel conceptueel het verst is doorontwikkeld, is de actuele bruikbaarheid nog te beperkt. Dit model is vooralsnog alleen geïnstrumenteerd voor het rivierengebied en dekt slechts twee risicopaden af (ingeleid door de faalmechanismen als gevolg van piping en dijkhoogte tekort/golfoverslag). Daardoor was het voor voorliggende studie niet landelijk voor alle casussen inzetbaar.

Als alternatief is een praktisch-provisorische methode ontwikkeld die buitengewoon goed blijkt te werken en logische, verklaarbare rekenresultaten oplevert. De kracht van deze werkwijze schuilt in het slimme gebruik van reeds geaccepteerde modellen om de kwaliteit op specifieke onderdelen te waarborgen. Zo levert HYDRA-NL de kansverdelingen voor de waterstanden, en fungeert de landelijke LIWO-database

als robuuste basis voor de ijking van het vereenvoudigde overstromingsmodel LIWO-Light. De vergelijking met de resultaten voor VNK biedt vertrouwen in de gekozen uitwerking.

Binnen dit raamwerk blijken de Taaiheidsindex (*TI*) en Klimaatrobustheidsindex (*KRI*) praktisch. De *TI* functioneert als een efficiënte proxy waarmee ontwerpers in vroege fases het veiligheidsvoordeel van taaie gedrag direct kunnen waarderen, zonder dat een zware numerieke optimalisatie nodig is. Samen met de *KRI* bieden deze indexen de beheerder handvatten voor de beoordeling van de bestaande situaties, en om klimaatrobuste en weloverwogen dijkontwerpen te realiseren.

Effectiviteit

Uit de casestudies komen enkele duidelijke bevindingen naar voren over de effectiviteit van taaie dijken voor verschillende belastingregimes. Het effect van de taaie constructies hangt in de gekozen uitwerking af van de duur van de belasting, en van de hoogte van het hoogwater boven de drempel. Hoe groter de duur van de belasting hoe kleiner het effect van een taaie constructie: het overstromingsvolume komt dan immers toch wel binnen, alleen duurt het wat langer. Hoe hoger de drempel ten opzichte van het hoogwater hoe groter het effect van de drempel. Het beperkt letterlijk de duur dat het water kan instromen. Daarnaast is het tijdstip van dijkbreuk ten opzichte van het hoogwater van belang. Het uitstellende (of afstellende) effect door noodmaatregelen kan direct worden vertaald in een beperktere schade, een hoger evacuatie-percentages, en daardoor in een lager risico.

Voor het rivieren- en merengebied pakt het concept positief tot zeer positief uit. In riviersystemen is de duur van de belasting groot, maar niet oneindig, dus desondanks zorgt de beperkte tijdsduur van een afvoergolf ervoor dat een vertraagd bezwijkproces de evacuatie-effectiviteit vergroot en het instromende overstromingsvolume wordt beperkt. Dit verlaagt de verwachtingswaarde van de schade significant.

De casus Hollandse IJssel in het benedenrivierengebied laat een combinatie zien tussen beide hierboven genoemde effecten: de belasting is kortdurend (groot effect) en het hoogwater ligt niet zo ver boven het praktisch haalbare drempelniveau (groot effect). Dat laatste komt uiteraard mede door de twee stormvloedkeringen die de casus locatie beschermen. Het totale effect is aanzienlijk.

Bij de casus Wieringermeerdijk in het merengebied, resulteert een taaie drempel vlak boven het meerpeil in een extreme verhoging van de taaiheidsindex, omdat het overstromingsvolume dan zeer beperkt is. De tijdsduur dat de lokale waterstand door de storm tot boven het drempelniveau wordt gestuwd is dan immers beperkt tot de stormduur. Het effect is zo groot dat het veiligheidsniveau van de kering eerder zal worden bepaald door de herstelkosten bij schade aan de kering zelf dan door de beperkte schade in het achterland.

Langs de kust is het effect van het concept nog steeds aanwezig, echter het is er beduidend minder gunstig. Hoewel een taaie ontwerp ook hier de veiligheid (taaiheidsindex) aantoonbaar verbetert, laat de casus Balgzanddijk zien dat er een lange damwand nodig is, veel langer dan de damwand in het merengebied omdat de waterstandsniveaus zoveel hoger zijn, en daarmee de mogelijke ontgrondingskuil in een overstromingssituatie. Daardoor vallen de benodigde investeringskosten voor een taaie zeedijk aanzienlijk hoger uit dan voor de brossere referentievariant.

Schematisering

De schematisering bevat een aantal uitgangspunten, die het effect van het taaie gedrag kunnen beïnvloeden:

- Er wordt in het model vanuit gegaan dat de verschillende risicopaden (bijvoorbeeld ingeleid door golfoverslag, piping of instabiliteit) elkaar niet beïnvloeden. In werkelijkheid zullen ze elkaar bijna altijd beïnvloeden. Er moeten dus modelleringen komen van de overgangen tussen risicopaden. Naar verwachting zal dit het effect van taaie gedrag bij een taaie constructie minder beïnvloeden

- dan bij een brossse constructie. De feitelijke verschillen in faalkansen tussen de dijkvarianten worden hierdoor dus onderschat.
- Er is voor gekozen om de overgangskans na een initieel faalmechanisme altijd op 1 te stellen. Dit betekent schematisch dat zodra een faalmechanisme optreedt, dit in alle gevallen leidt tot de vorming van een bres, tenzij noodmaatregelen dit proces uit- of afstellen. Dit is gedaan voor zowel brossse als taaie dijkvarianten. Voor taaiere varianten is de overgangskans kleiner tot veel kleiner dan 1 (zie Tabel 33), dus daarom worden de feitelijke verschillen in faalkansen tussen deze dijkvarianten hiermee ook sterk onderschat.
 - De sterkte van de dijk wordt weergegeven in een *fragility curve* (de conditionele kans op falen gegeven een bepaalde waterstand). Deze wordt geschematiseerd als een normale verdeling. Het gemiddelde hiervan is per initieel faalmechanisme afgeregeld op de te bereiken overstromingskans. De spreiding is vastgesteld op basis van expert-inschattingen. De invloed van eventuele onnauwkeurige inschattingen in de spreiding wordt niet groot geacht, ook omdat het gemiddelde is afgeregeld op basis van deze spreidingen. Maar de vorm van de fragility curve, en dan met name de staart bij lage waterstanden, kan toch nog invloed hebben op het resultaat. Dat geldt echter voor alle dijkvarianten, zodat de onderlinge verschillen ertussen hier dus niet erg gevoelig voor worden geacht.
 - Dat geldt ook voor een aantal uitgangspunten zoals:
 - o de effectiviteit van evacuatie. Die is via vaste aannames gekoppeld aan de waarschuwingstijd en eventueel uitstel van een dijkbreuk.
 - o De hoogwaterbelasting in de tijd. Die wordt afhankelijk van het watersysteem geschematiseerd.
 - o De faalkansbegroting (of risicopad-begroting)
 - In de cases zijn de dijkdoorsneden representatief verondersteld voor een heel dijk traject. Dat is voor een case en het in dit rapport gestelde doel voldoende, maar zal in de praktijk niet zo kunnen werken: als er een dijkvak wordt verbeterd volgens een taai concept, dan zal nog niet direct het gehele dijktraject taai reageren. Er moet dan dus net als in de beoordeling, per dijkvak worden geschematiseerd.

Taai ontwerpen

Bij een ontwerp moet er gekozen worden voor de aanpak waarmee taai gedrag wordt verkregen. Het concept van een taaie dijk is gebaseerd op het vertragen van het bezwijkproces en het beperken van de bresgroei om zo de uiteindelijke overstromingsgevolgen te beperken. In de praktijk blijkt echter dat niet alle faalpaden zich er even goed voor lenen om 'taai' of traag gemaakt te worden.

Faalpaden die worden ingeleid door erosie-gedreven mechanismen, zoals overloop en golfoverslag, zijn relatief goed taai te maken. Door de dijk te voorzien van erosiebestendige materialen (zoals een robuuste kleikern) of fysieke barrières (zoals een damwand of een kleidrempel net boven het waterpeil), kan het uitschuren van de dijk en de bresgroei effectief worden vertraagd. Daarentegen zijn geotechnische faalmechanismen, zoals (binnenwaartse) macro-instabiliteit, veel lastiger taai te maken. Een dijk kan door de aanwezigheid van veel klei uitstekend bestand zijn tegen erosie door golfoverslag, maar toch plotseling en snel bezwijken door een diepe afschuiving. Dan gaat de taaigheid van de constructie in één klap volledig verloren. Dit betekent dat het simpelweg toevoegen van klei een dijk niet automatisch onder alle omstandigheden taai maakt.

Bij het ontwerpen van een taaie dijk moet daarom per specifiek faalmechanisme naar de risicobijdrage worden gekeken. De ontwerper moet er bewust op sturen dat trage faalpaden dominant worden, terwijl abrupte faalmechanismen zoals instabiliteit afdoende moeten worden voorkomen.

Voor de situatie na een dijkdoorbraak is de stabiliteit van de drempel van groot belang. Die kan op verschillende manieren worden vormgegeven, bijvoorbeeld door een damwand zoals in deze studie gekozen, of door een kleidrempel in de binnenberm, of met andersoortige vormen zoals het verkitten van kernmateriaal. In alle gevallen geldt dat zodra de gekozen constructie niet stabiel is in een overstromingssituatie, direct vrijwel het gehele effect van taai gedrag is verdwenen. De manier waarop die stabiliteit in overstroming-situaties kan worden geborgd vergt verdere studie.

Beheerbaarheid

Bij extreem robuuste of 'taai' dijken wordt de kans op een overstroming met catastrofale gevolgen drastisch verkleind. Veel groter is de kans dat de kering alleen schade zal ondervinden, maar niet zal breken. Voor het operationele beheer (assetmanagement) verandert dit de dynamiek aanzienlijk. Schade aan de dijk is bij taai dijken een onderdeel van het concept. De veiligheid wordt immers primair uit de robuuste dijk kern of drempel gehaald. Dat heeft voor- en nadelen.

Het voordeel is dat de acceptatie van schade daarmee vooral een economische afweging wordt: de verwachte kosten van het regelmatige herstel bepalen hoe vaak schade daadwerkelijk 'mag' optreden binnen de *Total Cost of Ownership*. Een ander voordeel is dat de beheerder zich minder (veiligheids)zorgen hoeft te maken over schade door bijvoorbeeld dierlijke graverij of recreatief medegebruik.

Een nadeel is dat te vaak schade effect kan hebben in het maatschappelijk vertrouwen. Bij duinwaterkeringen zijn we gewend dat schade optreedt. Bij dijken (nog) niet. De beheerder kan niet achterover leunen. Om het vertrouwen niet te schaden moet een dijk er ook veilig uit blijven zien. De beheerder zal daarom ook eisen moeten stellen aan hoe vaak schade vanuit dat oogpunt acceptabel is.

Belangrijke aspecten voor verder onderzoek op strategisch en tactisch niveau

Naast verbetering van de modellering en schematisering zijn er nog een aantal aspecten waarvoor verder onderzoek de mogelijkheden voor toepassing, acceptatie en gebruik vergroten. Het gaat dan om een aantal strategische / governance-aspecten en tactische / planningsaspecten:

- normen versus actuele en toekomstige beheer uitdagingen: een taai dijk biedt veiligheidswinst en dat noopt tot een strategische keuze. Enerzijds kan deze winst worden gebruikt om de faalkansnorm te verruimen, wat direct resulteert in een slanker en goedkoper ontwerp. Anderzijds kan men deze extra marge inzetten als robuuste buffer. Hierdoor is de waterkering aanzienlijk weerbaarder tegen de onzekerheden van klimaatverandering en wordt de dijk veel minder gevoelig voor schade door graverij, wat het beheer sterk vereenvoudigt. In het huidige beleid wordt ervan uitgegaan dat de waterkering beheerder de waterkering perfect op orde heeft. Dat is praktisch een onmogelijk opgave. Het leggen van een expliciete verbinding tussen beheer en veiligheidsnormering biedt de mogelijkheid om meer realistische keuzen te maken tussen het na te streven veiligheidsniveau, het ontwerp en (de praktisch mogelijke) kwaliteit van beheer.
- het dynamisch updaten van normen: er is nader onderzoek nodig naar de bestuurlijke (governance) en praktische implicaties van het verbinden van veiligheidsnormen aan de taaiheid van het gekozen dijkontwerp en het (praktisch mogelijke) beheerniveau. Een dynamisch of risicobewust normenstelsel kan voor de betrokken instanties onduidelijk overkomen, maar de beheerkwaliteit is inherent dynamisch omdat er telkens nieuwe uitdagingen zijn. Er moet worden onderzocht hoe dit proces goed kan worden ingericht.
- Tactische planning en portfolio-beslissingen Op het gebied van het prioriteren van versterkingsmaatregelen over een heel dijksysteem (tactische planning) worden verdere studies aanbevolen naar de mate waarin portfolio-beslissingen afhankelijk zijn van de specifieke

structurele robuustheid (taaiheid) van individuele dijken, en dus ook van de ontwerpen per dijkvak. De verwachting is dat taai gedrag pas de overhand krijgt in een traject als de meeste dijkvakken taai zijn. Dit beïnvloedt de prioritering en versterkingskeuzen van te versterken vakken.

6 CONCLUSIES

Dit onderzoek heeft succesvol een praktisch-provisorische rekenmethode (RISK-TDK-EVENT) ontwikkeld om de veiligheid en effectiviteit van taaie dijken te kwantificeren. Door de conceptuele verschuiving van de focus op 'faalpaden' naar 'risicopaden' kunnen de daadwerkelijke veiligheidsvoordelen van een vertraagd bezwijkproces, zoals een kleiner instromend watervolume en meer tijd voor evacuatie, integraal in het overstromingsrisico worden gewaardeerd. De in deze studie geïntroduceerde Taaiheidsindex (*TI*) en Klimaatrobuustheidsindex (*KRI*) blijken daarbij efficiënte proxy's om deze veiligheidswinst in vroege ontwerpfases te beoordelen zonder dat zware numerieke optimalisatie nodig is. De taaiheidsindex is in feite een additionele veiligheidsfactor in het heden. De klimaatrobuustheidsindex is een factor die aangeeft hoe sterk de taaiheidsindex vergroot in de toekomst.

De ontwikkelde methode is zo opgezet dat het voortbouwt op de actuele belastingmodellen (HYDRA-NL) en overstromingssimulaties (LIWO). Vereenvoudigingen zijn daar met succes mee vergeleken. Het vereenvoudigde 0D-overstromingsmodel (komberging) geeft door slimme ijking verrassend goede overeenkomsten met de geaggregeerde uitkomsten van complexe ruimtelijke simulaties uit de landelijke LIWO-database. Daarnaast sluiten de berekende risico's op hoofdlijnen goed aan bij eerdere resultaten van Veiligheid Nederland in Kaart (VNK). Een vergelijking met het volledige TDK-risicomodel bevestigt bovendien dat de methode, door gekozen conservatieve aannames (het optreden van een faalmechanisme leidt direct tot overstroom), de feitelijke veiligheidsverschillen tussen brosse en taaie varianten eerder onderschatten dan overschatten. Dat is belangrijk omdat de in cases in deze studie gevonden veiligheidseffecten in werkelijkheid dus nog groter zullen zijn.

Uit de vijf casestudies blijkt dat de effectiviteit van taaie dijken aanzienlijke verschillen vertoont en sterk afhangt van het belastingregime. Voor rivier- en merengebieden pakt het concept positief tot zeer positief uit. Bij cases zoals de Pleijdijk en Wolferen-Sprok reduceren de taaie ontwerpen de economische risico's al significant (een factor 5 resp. 6), en bij de Wieringermeerdijk leidt het tot een grote winst (een factor 20), met name door de beperkte tijdsduur van het hoogwater. Deze veiligheidswinst gaat gepaard met een aanzienlijke afname van het ruimtebeslag (footprint) en miljoenen euro's lagere investeringskosten per kilometer in vergelijking met traditionele, brosse zanddijken. Langs de kust (zoals bij de Balgzanddijk) is het concept financieel echter minder gunstig; de benodigde lange damwanden die nodig zijn om ook in een overstromingssituatie (dus na falen van het grondlichaam) stabiel te zijn, maken een taaie zeedijk fors duurder dan een brose referentieontwerp. De casus Hollands IJsseldijk ligt in het overgangsgebied zee-rivier, maar wel achter stormvloedkeringen. De winst in termen van risico is ook hier fors (een factor 8). Kijkend naar de ontwikkelingen in de tijd, nemen de risico-voordelen van taaie dijken voor alle cases verder toe (een factor 1,3 tot 3 in 2100 ten opzichte van de taaiheidsindex 2023). Wat daarbij opvalt is dat de effectiviteit in het rivierengebied het meeste toeneemt, en in het meren gebied het minst (waar het initieel juist het meeste effect heeft).

Voor het in de praktijk brengen van taaie dijken zijn er belangrijke aandachtspunten voor ontwerp en beheer. Ontwerpers moeten zich realiseren dat niet elk faalmechanisme even gemakkelijk taaie te maken is; erosie is goed te vertragen, maar abrupte bezwijkvormen zoals macro-instabiliteit blijven ontwerp-kritisch en moeten afdoende worden voorkomen. Een belangrijk aandachtspunt is hoe moet worden omgegaan met de veiligheidswinst van taaie dijken bij ontwerp van dijkverbeteringen. Er zijn namelijk ook nieuwe bedreigingen, zoals graverij. In het huidige veiligheidssysteem zijn die belegd bij de beheerder, maar niet elk ontwerp laat toe om die bedreigingen efficiënt te mitigeren. Vanuit assetmanagement perspectief moeten beheer en ontwerp daarom aan elkaar worden verbonden.

Tot slot komt daar nog een aspect bij dat aan beheer raakt. Omdat de robuuste kern catastrofale doorbraken grotendeels voorkomt, zal er eerder schade aan de dijk optreden dan een doorbraak. Alhoewel schade aan de dijk nog steeds zeer zeldzaam zal zijn, zal het economisch risico dus ook deels het herstel van schade aan de dijk betreffen. Assetmanagement zal zich daardoor moeten richten op *Total Cost of Ownership*, waaronder ook het accepteren en herstellen van deze schade valt. Voor het kiezen van toelaatbare schade-frequenties dient naast economische argumenten ook rekening te worden gehouden met het maatschappelijk vertrouwen.

REFERENTIES

- Arends, M. (2014). *Overstromingsrisico dijkkringgebied 48 Rijn en IJssel*.
- den Heijer, F. (2025). *Comprehensive risk-perspective for flood defence system management*. ISBN 978-94-6384-803-9, Delft University of Technology.
- 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., van Gelder, P. H. A. J. M., & Kok, M. (2025). Risk-Aware Updating of Reliability Standards for Flood Defences. *Journal of Flood Risk Management*, 4, 17. <https://doi.org/doi.org/10.1111/jfr3.70134>
- Duits, M. (2019). *HYDRA-NL gebruikershandleiding, versie 2.7*.
- Eijgenraam, C., Brekelmans, R., Den Hertog, D., & Roos, K. (2017). Optimal strategies for flood prevention. *Management Science*, 63(5), 1644–1656. <https://doi.org/10.1287/mnsc.2015.2395>
- HAN (2026). *Taaie dijken klimaatrobuust - definities. Ontwikkeling definities taatheid en klimaatrobuustheid*. Rapport No. 2026.174, F. den Heijer, Sustainable River Management, HAN University of Applied Sciences
- Kind, J. M. (2014). Economically efficient flood protection standards for the Netherlands. *Journal of Flood Risk Management*, 7(2), 103–117. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12026>
- Klerk, W. J. (2022). *Decisions on life-cycle reliability of flood defence systems*. ISBN: 978-94-6384-313-3. Delft University of Technology.
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016. *Achtergronden bij de normering van de primaire waterkeringen in Nederland*. Hoofdrapport. N. Slootjes en H. van der Most. 22 april 2016
- Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. (2023). *Regeling van de Minister van Infrastructuur en Waterstaat, van 12 april 2023, nr. IENW/BSK-2023/94660, houdende vaststelling van regels inzake de beoordeling van de veiligheid van primaire waterkeringen (Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2023)*. <https://zoek.officielebekendmakingen.nl/stcrt-2023-11307.html>
- Reen, M. J. van. (2011). *Overstromingsrisico dijkkring 12 Wieringen*.
- Slootjes, N., & Wagenaar, D. (2016). *Factsheets normering primaire waterkeringen (factsheets standardization primary flood defences)*.
- Vergouwe, R., Huting, R. J. M., & Scheer, P. van der. (2014). *Overstromingsrisico dijkkring 43, Betuwe, Tieler- en Culemborgerwaarden*.

BIJLAGE A – AFLEIDING VAN EEN EQUIVALENT 0D-POLDEROPPPERVLAK

De LIWO database geeft de gevolgen voor gesimuleerde doorbaken nabij deze case locaties. Een vrij nauwkeurige schatting van de overstromingsvolumes die tot deze gevolgen hebben geleid, zijn afgeleid uit de ruwe data achter de LIWO simulaties: de sommatie van de maximale waterdieptes in elke gridcel van de simulatie. In Tabel 35 zijn de LIWO gegevens gegeven die gebruikt zijn voor de afleiding. De kolommen met V (volume), A (overstroomd oppervlak) en h (gemiddelde waterdiepte) zijn afgeleid uit de ruwe LIWO data.

Tabel 35 Gegevens uit de LIWO database voor het bepalen van de parameters \vec{a} voor Vergelijking 17.

Case	LIWO-ID	Getroffenen	Schade (M€)	Slacht-offers	V (Mm ³)	A (km ²)	h (m)
Balgzanddijk	4288	11122	586	30	30	45	0,68
	4320	11023	537	28	27	40	0,66
	4339	11447	724	39	44	55	0,81
	4374	11312	652	34	36	51	0,72
Ijsseldijk	19565	195671	10713	1126	141	87	1,63
	19567	195329	10331	1082	134	85	1,58
	19569	182931	8161	865	102	92	1,11
Pleijdijk	5222	103111	7950	579	325	146	2,22
	5223	101741	7496	545	309	140	2,20
	5241	102731	7811	567	319	145	2,20
Wieringermeerdijk	3886	12123	3136	126	688	195	3,52
	3888	12109	2986	115	627	195	3,21
	4237	12130	3389	145	791	196	4,04
	4241	12128	3180	129	705	195	3,61
Wolferen-Sprok	19055	289775	23320	1210	1338	574	2,33
	21058	272364	21026	1019	1194	564	2,12

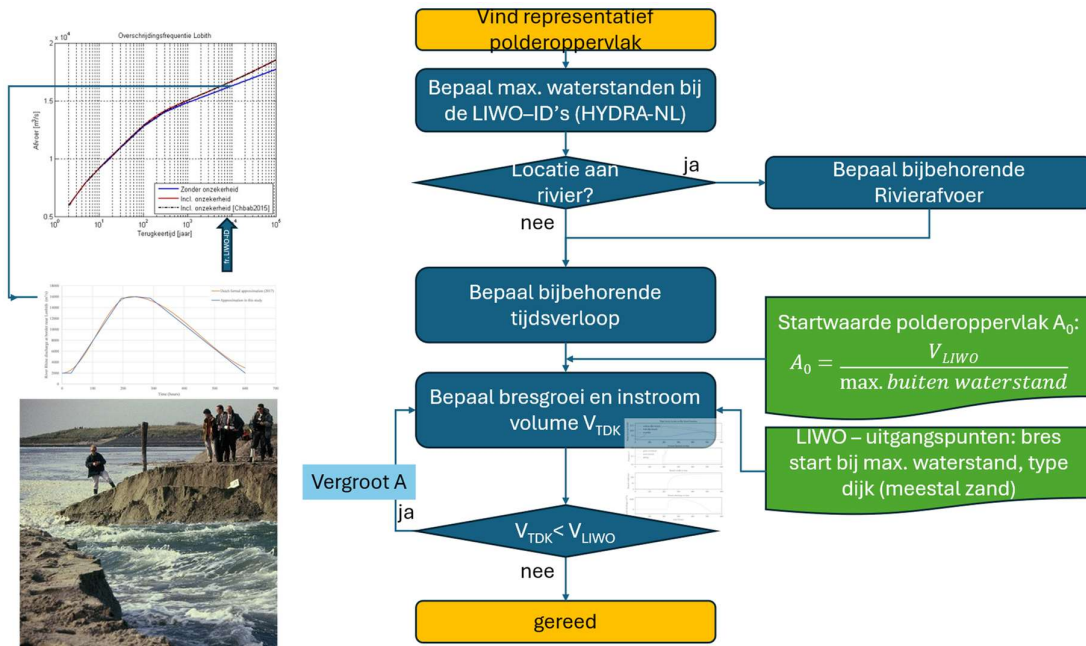
De volgende stap is om het polderoppervlak af te leiden. In het TDK-EVENT-model is het overstromingsmodel immers een kombergingsmodel, waarvoor een equivalent oppervlak en een polderniveau moet worden bepaald. De aanpak is erop gericht om het overstromingsvolume van de simulaties in de LIWO-database zo goed mogelijk na te bootsen:

- Kies een representatief polderniveau. Voor de locaties met een relatief vlakke ligging is een representatief gemiddelde in het gebied gekozen. Voor de rivier cases, is de achterliggende polder niet vlak. Daar is de maaiveld ligging aan de polderzijde bij de locatie gekozen, omdat anders de instroom onrealistisch groot zou zijn.
- Leidt een startwaarde voor het zoekproces af door een ondergrens van de polderoppervlakte te bepalen met $A = V/h$ (oppervlakte = overstromingsvolume gedeeld door de waterstand). V is bekend uit Tabel 35. De waterstand h kan maximaal gelijk zou zijn aan de maximale buiten waterstand tijdens een hoogwater. Als voor h dus de buitenwaterstand wordt genomen, wordt voor A een ondergrens gevonden.
- Doe een eerste check met het TDK-EVENT-model. Daarin wordt het gehele tijdsverloop van de buitenwaterstand bepaald aan de hand van de maximale buitenwaterstand h_{max} dat tijdsverloop

verschilt voor rivier (afvoergolf), meer (stormopzet) en zee (stormopzet en getij). Uitgangspunt daarbij is dat in de simulaties in de LIWO database de start van bresgroei is gekozen op het moment van hoogwater, en dat hoogtij samenvalt met de stormopzet (voor zee-locaties).

- Als het overstromingsvolume dan te klein is (wat de verwachting is omdat voor het startpunt naar een ondergrens van het polderoppervlak is gezocht), dan wordt het polderoppervlak stapsgewijs net zo lang vergroot tot het overstromingsvolume wel gelijk is aan dat in de LIWO database.

Bovenstaande aanpak is schematisch weergegeven in Figuur 41. Het resultaat van deze procedure is gegeven in Tabel 36. Duidelijk is te zien dan de kolommen V goed overeen komen. Oppervlakte A en diepten h wijken wel af. Maar dat is een logisch gevolg van het feit dat in werkelijkheid de polder geen bak is en de waterdiepten niet overal even hoog staan. Daardoor worden er (zeker in het rivierengebied) grotere oppervlakten en gemiddeld wat minder grote waterdiepten berekend. De berekende representatieve oppervlakten verschillen wel voor de verschillende LIWO-simulaties, maar de verschillen zijn relatief beperkt. Voor de schematisatie is gekozen voor de gemiddelde oppervlakte van alle LIWO-simulaties voor een locatie. Alle gegevens van de geschematiseerde polders zijn gegeven in Tabel 37. Daarmee kunnen vervolgens de parameters \bar{a} worden afgeleid. Als er meerdere LIWO simulaties zijn wordt het gemiddelde van de gevonden waarden van \bar{a} genomen. In Tabel 38 is het resultaat gegeven. Ter vergelijking is ook nog het resultaat gegeven van de parameters die gebruikt zijn in (den Heijer & Kok, 2022) voor de Grebbedijk, waaruit volgt dat de orde van grootte overeenkomt. De resulterende schematisatie is geverifieerd met de originele LIWO gegevens, zie Figuur 42. Het resultaat is bijzonder goed. De goede overeenkomst geeft vertrouwen voor het gebruik van Vergelijking 16 in deze studie.



Figuur 41 Rekenschema voor het bepalen van de representatieve polderoppervlakten (met A het oppervlak en V het overstromingsvolume).

De-facto is de aanpak met de 2D-overstromingssimulaties en de Schade en Slachtoffermodule (SSM) versimpeld tot een kombergingsaanpak (0D). Door de 'afregeling' op LIWO gegevens kan er in het belasting-bereik rond deze simulaties (welk bereik rond de veiligheidsnormen ligt en logischerwijze het meest van belang is) op eenvoudige wijze worden geëxperimenteerd met andere typen dijken, en de potentiële gevolgen daarvan.

Tabel 36 Vergelijking tussen de gegevens in de LIWO database en berekeningen met TDK met een geschematiseerde polder.

Case	LIWO-ID	V (Mm ³)	A (km ²)	h (m)	h _{max, bel.} (m+NAP)	h _{polder,TDK} (m)	V _{TDK} (Mm ³)	A _{TDK} (km ²)
Balgzanddijk	4288	30	45	0,68	4,70	3,01	31	10
	4320	27	40	0,66	4,14	2,53	27	11
	4339	44	55	0,81	5,81	4,07	44	11
	4374	36	51	0,72	5,26	3,52	37	10
Ijsseldijk	19565	141	87	1,63	3,28	3,06	142	46
	19567	134	85	1,58	3,06	2,60	134	51
	19569	102	92	1,11	2,78	3,03	102	34
Pleijdijk	5222	325	146	2,22	14,96	4,65	326	67
	5223	309	140	2,20	14,22	3,90	310	80
	5241	319	145	2,20	14,68	4,37	320	73
Wieringermeerdijk	3886	688	195	3,52	1,26	2,40	688	289
	3888	627	195	3,21	0,99	2,45	627	258
	4237	791	196	4,04	1,96	2,31	791	343
	4241	705	195	3,61	1,59	2,39	705	295
Wolferen-Sprok	19055	1338	574	2,33	14,69	2,98	1345	451
	21058	1194	564	2,12	14,24	2,67	1194	448

Tabel 37 Gegevens van de geschematiseerde polders voor de vergelijking met LIWO-data.

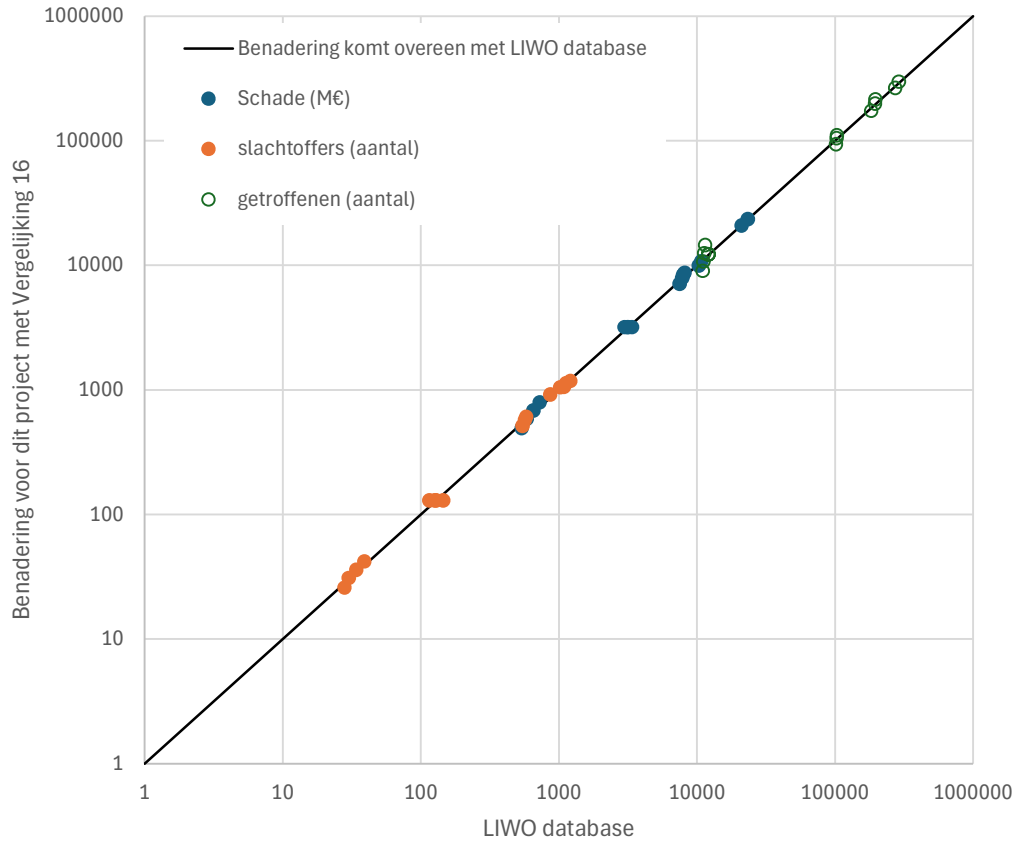
Case	type	Getij (m)	fase (Uur tov hw)	Meerpeil; gem zeeniv. (m+NAP)	Polder niveau (m+NAP)	Drempel niveau (m+NAP)	A _{TDK} (km ²)
Balgzanddijk	Zee	0,6	0	0	+0,5	+0,1	10,6
Ijsseldijk	Zee*	0,7	6	0	-2,0	-2,0	43,8
Pleijdijk	Rivier				+10,1	+10,1	74,4
Wieringermeerdijk	Meer			-0,25	-3,2	-3,2	296,5
Wolferen-Sprok	Rivier				+9,9	+9,9	449,1

* De hydraulische randvoorwaarden op de case locatie worden voornamelijk door de zee bepaald in de 'open-open' variant.

Tabel 38 Resultaat afleiding parameters \vec{a} .

Case	a _{getroffenen}	a _{Schade}	a _{Slachtoffers}
Balgzanddijk	3,4E-4	18,5	0,10E-6
Ijsseldijk	15,5E-4	77,7	8,2E-6
Pleijdijk	3,2E-4	24,4	1,8E-6
Wieringermeerdijk	0,2E-4	4,5	0,18E-6
Wolferen-Sprok	2,2E-4	17,5	0,88E-6

Grebedijk		18,6	1,2E-6
-----------	--	------	--------



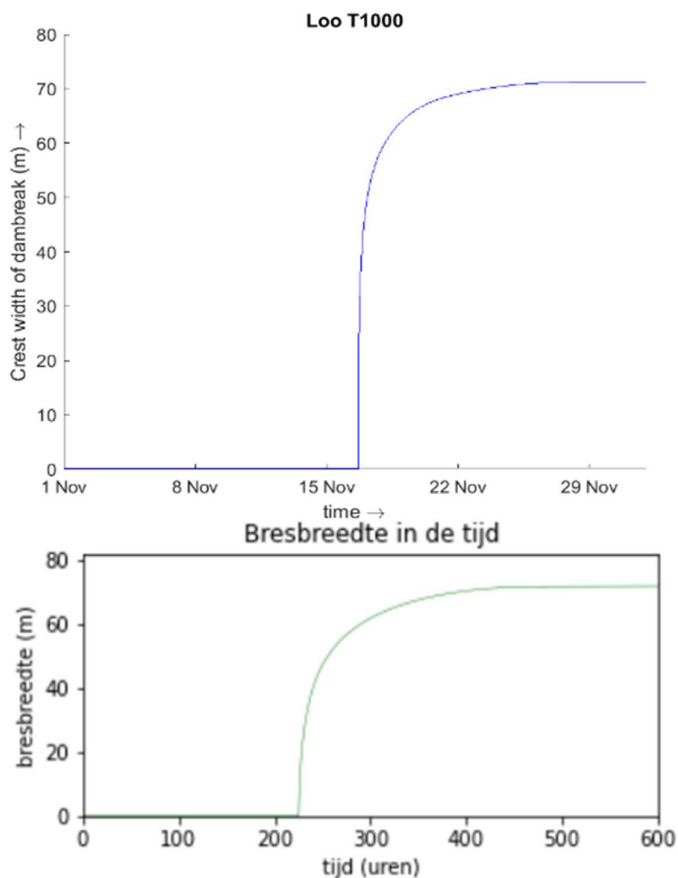
Figuur 42 Verificatie van het model (schematisatie en parameters) voor het bepalen van de gevolgen.

BIJLAGE B – VERGELIJKING BRESGROEI IN TDK EN D-HYDRO VOOR LOCATIE LOO

In het afstudeerwerk van G. Al Hussain is een overstromingsmodel in D-HYDRO gemaakt, met daarin de bresgroeimodule van Verheij en Van der Knaap. Daarmee heeft hij voor onderhavig project berekeningen gemaakt die kunnen worden vergeleken met het TDK-EVENT model. De overstromingsomvang komt overeen bij een zorgvuldig gekozen polderoppervlak. Dit is voor de Pleijdijk (nabij Loo) afgeleid in Bijlage A – Afleiding van een equivalent 0D-polderoppervlak. Als naast de overstromingsomvang ook de bresgroei ongeveer gelijk is dan geeft dat voldoende vertrouwen voor gebruik van het TDK model. Dat wordt onderstaand getest voor locatie Loo, met zoveel mogelijk dezelfde uitgangspunten in :

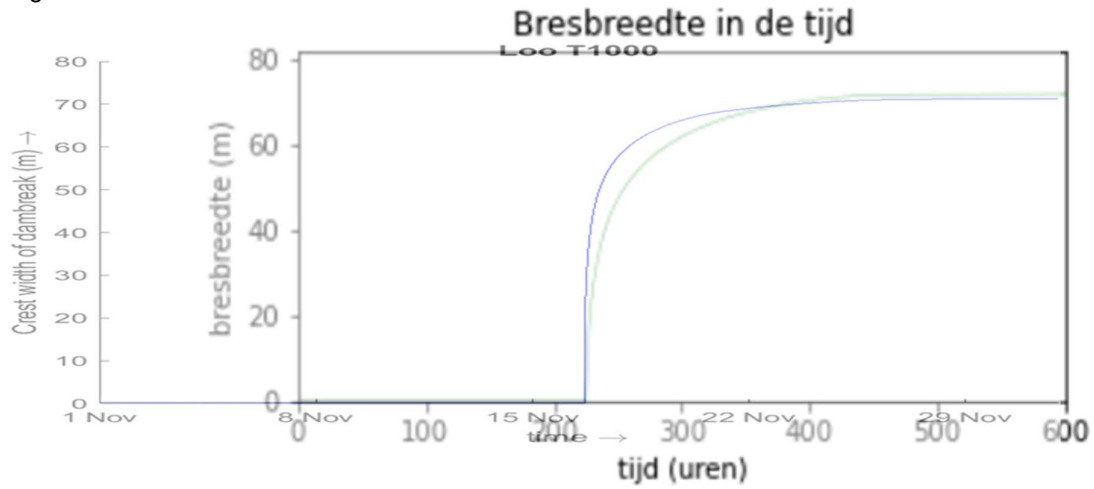
Uitgangspunt	Waarde
Doorbraaklocatie (rivier-km)	875
Equivalentte oppervlakte in TDK (km ²)	145
Start breedte bres (m)	1
Drempel tov polderniveau (m)	1,2
Polderniveau (m+NAP)	11

Helaas zijn alleen de uitgevoerde figuren beschikbaar en niet de onderliggende data, zie Figuur 43.



Figuur 43 Bresgroei patroon van D-HYDRO (links) en TDK (rechts).

Als we beide op elkaar leggen en synchroniseren (x-as: beginpunt van de bres voor beiden gelijk; y-as: verscalen tot de maatverdeling overeenkomt) komen de bresgroeipatronen redelijk goed overeen, zie Figuur 44.



Figuur 44 *Bresgroeipatroon van D-HYDRO (blauw) en TDK (vaag groen).*

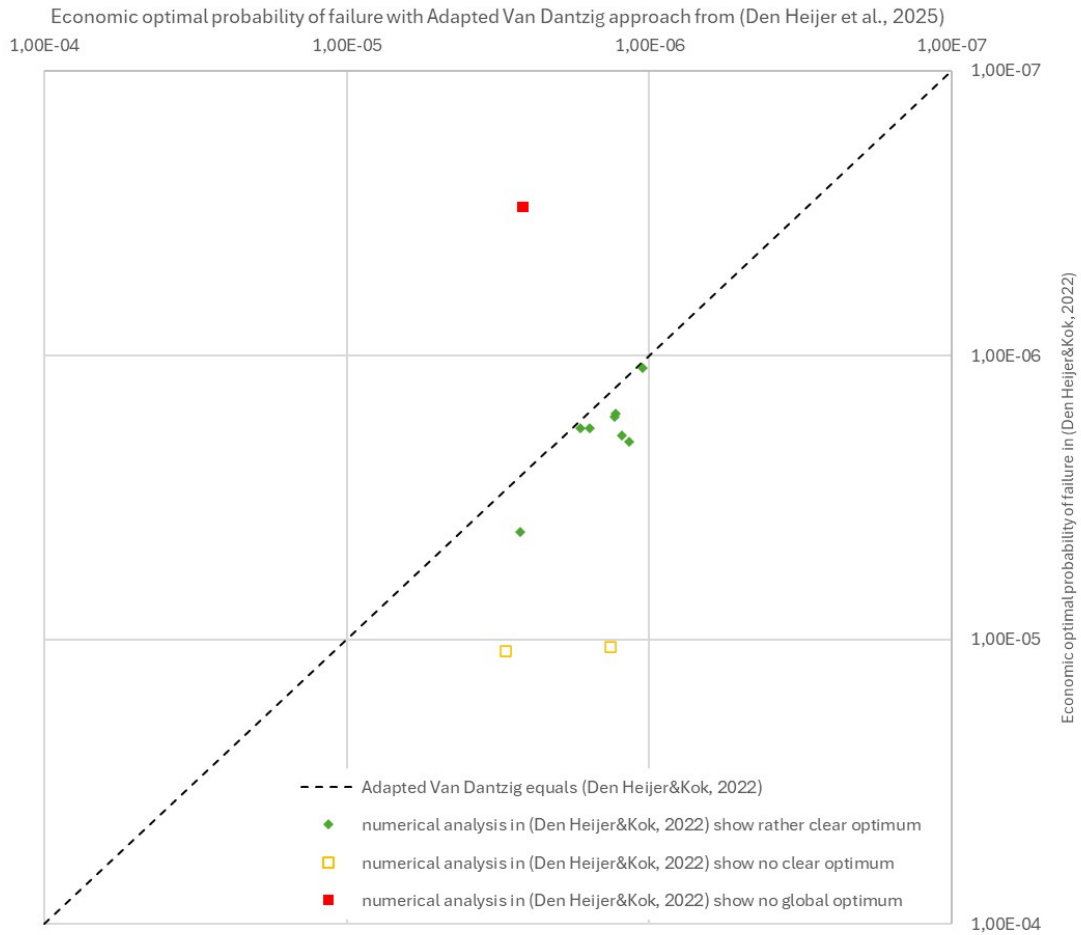
BIJLAGE C – CASE GREBBEDIJK: VERGELIJKING REKENWIJZE OPT. FAALKANS

Tabel 39 De resultaten van de heranalyse van de casus Grebbedijk in (den Heijer et al., 2025), en de vertaling daarvan in de taaibeindex. Voor toelichting op $f_{ovx.B}$ zie (den Heijer et al., 2025).

Dijk constructie	Originale kern	Optimale faalkans (numeriek) ($\cdot 10^{-5}$ /jr)		Equiv. Schade nabij opt (Mld €)	Marginale investering (Mln. €/m)	$f_{ovx.B}$ (m)	Optimale faalkans (AVD) ($\cdot 10^{-5}$ /jr)	Risico ($\cdot 10^3$ €/jr)
zandkern (bros)	Klei	0,11		23,0	8,4	0,096	0,105	24,1
Kleikern	Klei	0,16		19,0	10,4	0,079	0,130	24,7
Zandkern met damwand	Klei	0,42		11,5	9,5	0,108	0,267	30,8
Kleikern met damwand	Klei	0,03	*	8,9	9,3	0,083	0,261	23,3
Zandkern en brede kruin	Klei	0,19		21,6	10,4	0,086	0,123	26,7
Kleikern en brede kruin	Klei	0,18		18,6	12,2	0,080	0,157	29,2
zandkern (bros)	Zand	0,20		22,8	9,3	0,097	0,117	26,6
Kleikern	Zand	0,16		19,0	10,3	0,079	0,130	24,6
Zandkern met damwand	Zand	1,10	**	11,4	10,4	0,109	0,299	27,3
Kleikern met damwand	Zand	0,03	*	8,9	9,4	0,084	0,263	23,5
Zandkern en brede kruin	Zand	1,06	**	21,5	11,1	0,086	0,134	28,8
Kleikern en brede kruin	Zand	0,18		18,6	13,1	0,080	0,169	31,5

* geen globaal optimum in de numerieke studie - zodra damwand wordt geslagen dijk voldoende

** onduidelijk/vlak optimum in de numerieke studie



Figuur 45 Vergelijking tussen de economisch optimale faalkansen uit (den Heijer & Kok, 2022) en (den Heijer, 2025), voor de casus Grebbedijk.

BIJLAGE D – VERSLAG WORKSHOP 3, WATERSCHAP RIJN EN IJSSEL

OPEN UP
NEW HAN_ UNIVERSITY
HORIZONS. OF APPLIED SCIENCES