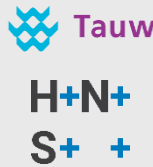




INVENTARISATIE VAN POTENTIEEL TAAI GEDRAG IN DE NEDERLANDSE DIJKEN



Rapport: 2026.175

M. Podt, MSc.

25 juni 2026

Subsidie RAAK-Publiek 2022, RAAK.PUB11.041

INHOUDSOPGAVE

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUCTIE | 5 |
| 1.1 | Een groeiende opgave | 5 |
| 1.2 | Taaie dijken | 5 |
| 1.3 | Doel en positionering | 6 |
| 2 | LEESWIJZER | 6 |
| 3 | ONTWIKKELING VAN DE AANPAK | 7 |
| 3.1 | Initiële aanpak: archetypen onvoldoende technische onderscheidend | 7 |
| 3.2 | Eerste iteratie: feitelijke geotechnische profielen ontbreken | 7 |
| 3.3 | Tweede iteratie: feitelijke dijkopbouw is niet in de legger vastgelegd | 8 |
| 3.4 | Derde iteratie: feitelijke situatie vastleggen op basis van openbare data | 9 |
| 3.5 | Kennisgeving van bestaande datasets | 9 |
| 4 | WORKFLOW | 10 |
| 4.1 | Component 1: geometrie | 11 |
| 4.2 | Component 2: constructie | 19 |
| 4.3 | Component 3: ondergrond | 24 |
| 4.4 | Risicokaarten | 25 |
| 5 | RESULTATEN | 26 |
| 5.1 | Landelijk beeld van potentieel taai gedrag | 26 |
| 5.2 | Rivierengebied | 28 |
| 5.3 | Zuidwestelijke delta | 29 |
| 5.4 | Noord-Nederland | 30 |
| 5.5 | Limburg | 30 |
| 5.6 | Interpretatie van potentieel taai gedrag | 31 |
| 5.7 | Overlay van risicokaarten | 33 |
| 6 | DISCUSSIE EN CONCLUSIES | 35 |
| 6.1 | Taaie gedrag als fysisch kenmerk | 35 |
| 6.2 | Ruimtelijke variatie en bepalende factoren | 35 |
| 6.3 | De rol van de ondergrond | 35 |
| 6.4 | Methodologische keuzes en datadekking | 36 |
| 6.5 | Implicaties voor waterveiligheid | 36 |

VOORWOORD

Dit rapport presenteert een reproduceerbare methodiek voor het inventariseren van kenmerken die bijdragen aan potentieel taai gedrag van Nederlandse dijken. De analyse is gebaseerd op landsdekkende, openbare geodata en vermijdt waar mogelijk subjectieve interpretaties. Daarmee wordt taaiheid benaderd als een fysisch en ruimtelijk afleidbare eigenschap van het dijklichaam.

De studie is tot stand gekomen in een iteratief proces, waarin verschillende benaderingen zijn verkend en getoetst in samenwerking met praktijk- en kennispartners. Daarbij is bewust gekozen voor een werkwijze die uitgaat van uniforme, openbaar beschikbare databronnen. Deze keuze maakt het mogelijk om dijken op een consistente en transparante wijze te analyseren, onafhankelijk van lokale datastandaarden of beheerpraktijken.

Het resultaat is een methodiek waarin uiteenlopende, openbare databronnen worden geïntegreerd tot een samenhangende ruimtelijke representatie van dijken. Hiermee wordt een eerste stap gezet richting een systematische inventarisatie van potentieel taai gedrag op nationale schaal.

De gepresenteerde resultaten hebben een verkennend karakter en dienen primair als input voor verdere kennisontwikkeling. Zij zijn nadrukkelijk niet bedoeld als directe beoordeling van de veiligheid of sterkte van individuele dijktrajecten.

Met dit rapport wordt beoogd een bijdrage te leveren aan de verdere ontwikkeling van datagedreven methoden binnen de waterveiligheidspraktijk en aan het verkennen van nieuwe perspectieven op risicoreductie.

BEGRIPPENLIJST

In dit rapport worden termen gebruikt uit de geo-informatica en geotechniek. Voor eenduidigheid in interpretatie zijn de belangrijkste begrippen hieronder gedefinieerd. De definities zijn functioneel van aard en sluiten aan bij het gebruik binnen de gehanteerde methodiek.

Tabel 1: Begrippen en hun beschrijvingen

| Begrip | Beschrijving |
|---|--|
| Vectordata | Ruimtelijke data bestaande uit discrete geometrieën (punten, lijnen en polygonen) met bijbehorende attributen, gebruikt voor objecten met een afgebakende ligging. |
| Rasterdata | Ruimtelijke data in een regelmatig grid van cellen (pixels), waarbij elke cel een waarde bevat die een ruimtelijke variabele representeert, zoals hoogte. |
| Feature class | Verzameling van vectorobjecten van hetzelfde geometrische type met een uniforme set attributen. |
| Attributentabel (<i>attribute table</i>) | Tabel gekoppeld aan een feature class of rasterdataset, waarin per object of cel de bijbehorende attributenvelden en -waarden zijn vastgelegd. |
| Attribuutveld (<i>data field</i>) | Kolom in een attributentabel die één specifieke eigenschap van objecten of cellen beschrijft. |
| Symbologie (<i>symbology</i>) | Instellingen voor de visuele representatie van geografische data, zoals kleur, classificatie, transparantie en lijndikte. |
| ArcGIS Online | Cloudplatform van Esri voor het publiceren, beheren en delen van geografische data, kaarten en webapplicaties. |
| ArcGIS Living Atlas | Door Esri beheerde collectie van gevalideerde en regelmatig geactualiseerde datasets en kaartlagen, beschikbaar via ArcGIS Online. |

1 INTRODUCTIE

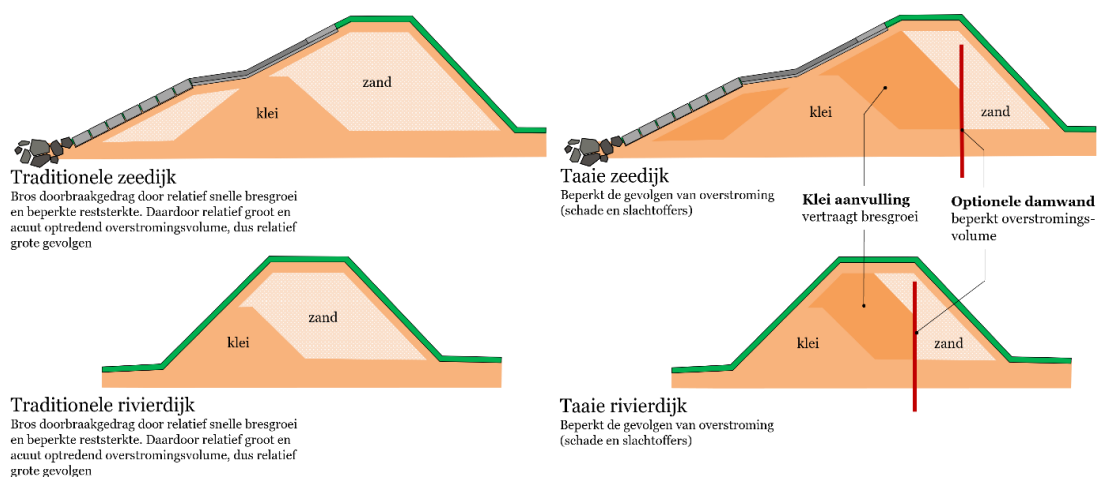
1.1 Een groeiende opgave

Nederland staat voor de grootste dijkversterkingsopgave sinds de Deltawerken: vóór 2050 moet minimaal 1.400 kilometer worden versterkt van de ruim 3.700 kilometer primaire waterkeringen. Deze opgave wordt verder vergroot door klimaatverandering, bodemdaling en toenemende economische waarde in beschermde gebieden. De huidige Nederlandse waterveiligheidsaanpak richt zich, als de veiligheid onvoldoende is, voornamelijk op het vergroten van de sterkte van dijken, bijvoorbeeld door ze hoger en breder te maken, door hydraulische belastingen te verlagen via dijkverleggingen (Ruimte voor de Rivier 2018-2026, 2026), of het verkleinen van gevolgen door compartimentering (Kok et al., 2017; Nationaal Waterplan 2016-2021, 2016). In de praktijk betreft het vaak dijkversterking. Deze waterveiligheidsstrategie sluit aan bij het dominante veiligheidsdenken, waarin risico wordt gedefinieerd als de kans op falen vermenigvuldigd met de gevolgen. In de praktische uitwerking ligt de nadruk echter vrijwel volledig op het reduceren van de faalkans (den Heijer, 2021) tot normniveau. Dit normniveau is wettelijk vastgelegd en gebaseerd op gevolgen die zijn berekend op basis van overstromingssimulaties die uitgaan van brosse dijken (den Heijer et al., 2025). De ontwerppraktijk is dat dijken worden geoptimaliseerd op sterkte tegen het optreden van initiële faalmechanismen, terwijl het gedrag daarna, dat ook invloed heeft op de daadwerkelijke gevolgen, nauwelijks expliciet wordt beschouwd.

Binnen deze context ontstaat een fundamentele beperking van de ontwerppraktijk. De dominante ontwerpoplossing, een zandlichaam met kleibekleding, resulteert in relatief *brosse dijken*, waarbij na het optreden van initiële faalmechanismen doorbraak en bresgroei snel verlopen. Het onderliggende risicoconcept, waarin juist ook de gevolgen van falen bepalend zijn, biedt meer mogelijkheden.

1.2 Taaie dijken

Sinds enkele jaren is er bij dijkwerkers toenemende aandacht voor een aanvullende benadering voor risicoreductie: het zodanig versterken of ‘vertaaien’ van het dijklichaam zelf, dat de gevolgen van onverhoopte doorbraak relatief gering zijn (Deltares, 2022; den Heijer, 2021; den Heijer & Kok, 2024; HWBP, 2019). Een *taaie dijk* kenmerkt zich door een grotere functionaliteit dan alleen het voorkomen van falen. Ook het beheersen van het falen is onderdeel van de functionaliteit. Door het vertraagde bezwijkgedrag wordt tijd gecreëerd voor evacuatie en noodmaatregelen, terwijl de instroom van water wordt beperkt doordat de bres kleiner blijft. Hierdoor kunnen risico’s substantieel worden gereduceerd zonder dat de dijk daarvoor groter hoeft te worden. De mate van taaieheid hangt sterk samen met de materiële en constructieve opbouw van de dijk. Traditionele dijken met een zandkern en een kleibekleding gedragen zich doorgaans bros, terwijl dijken met een kleikern of met constructieve elementen zoals damwanden in grotere mate kunnen bijdragen aan vertraagd bezwijkgedrag (Figuur 1).



Figuur 1: Voorbeelden van traditionele- en taaie dijk constructies

Ondanks deze inzichten ontbreekt het momenteel aan een praktische en objectieve manier om ‘taai gedrag’ systematisch te identificeren en te kwantificeren in bestaande dijken. In de huidige beoordelingssystematiek wordt taai gedrag niet expliciet meegenomen, waardoor mogelijk aanwezige gevolgbeperkende eigenschappen van dijken onbenut blijven.

De definitie van een klimaatrobuuste taaie dijk, zoals gedefinieerd in definitierapport van project Taaie Dijken Klimaatrobuust, is als volgt:

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

1.3 Doel en positionering

Binnen het project *Taaie Dijken Klimaatrobuust* wordt gewerkt aan een praktische werkwijze om taai gedrag en klimaatrobuustheid van dijken te definiëren en te kwantificeren. Een belangrijk onderdeel hiervan is het systematisch inventariseren van taai gedrag in bestaande dijken en dijkzones in Nederland.

In deze studie is invulling gegeven aan deze deliverable door het ontwikkelen van een landsdekkende en reproduceerbare inventarisatie van fysische en ruimtelijke kenmerken die indicatief zijn voor potentieel taai gedrag. Waar in het projectplan wordt uitgegaan van een typologische benadering op basis van dijkarchetypen, is in deze studie gebleken dat deze indeling onvoldoende onderscheidend is om verschillen in technische dijkopbouw op consistente en schaalbare wijze te beschrijven. Om deze beperking te ondervangen, is gekozen voor een datagedreven benadering waarin dijken niet worden geclassificeerd op basis van vooraf gedefinieerde typen, maar worden beschreven aan de hand van hun observeerbare fysische en ruimtelijke eigenschappen.

Hiertoe wordt een technische representatie opgebouwd op basis van drie samenhangende componenten: geometrie, constructie en ondergrond. Deze componenten sluiten aan bij de opbouw van geotechnische profielen en maken het mogelijk om dijken op uniforme wijze te analyseren binnen een ruimtelijk expliciet kader. Binnen deze benadering wordt taai gedrag niet direct vastgesteld, maar benaderd als een eigenschap die kan worden afgeleid uit combinaties van relevante kenmerken van het dijklichaam.

De gepresenteerde resultaten hebben een verkennend karakter en zijn bedoeld als bouwsteen voor verdere analyse en methodiekontwikkeling binnen het project. De inventarisatie vormt daarmee geen directe beoordeling van de veiligheid of prestaties van individuele dijken, maar biedt een basis voor vervolgonderzoek naar de relatie tussen dijkopbouw, faalgedrag en gevolgbeperving.

2 LEESWIJZER

Dit rapport is als volgt opgebouwd. Hoofdstuk 1 introduceert het concept taaigheid en positioneert de studie binnen de bredere waterveiligheidsopgave. Hoofdstuk 2 beschrijft de iteratieve ontwikkeling van de gehanteerde aanpak. In hoofdstuk 3 wordt de datapreparatie toegelicht, gevolgd door de methodiek in hoofdstuk 4, waarin de drie componenten geometrie, constructie en ondergrond systematisch worden uitgewerkt. De resultaten van de inventarisatie worden gepresenteerd in hoofdstuk 5 en bediscussieerd in hoofdstuk 6.

Binnen de methodiek wordt onderscheid gemaakt tussen verschillende typen data en bewerkingen. Ter bevordering van de leesbaarheid worden de volgende conventies gehanteerd:

- GIS feature classes (vectors & rasters) : **Normtrajecten**
- GIS geoprocessing tools : **Mosaic to New Raster**
- Codefiles en code snippets : **AHN_download**

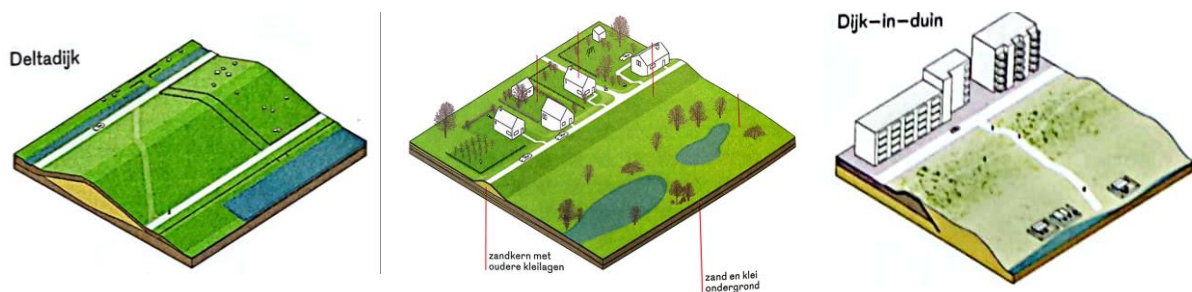
3 ONTWIKKELING VAN DE AANPAK

3.1 Initiële aanpak: archetypen onvoldoende technische onderscheidend

Het projectplan schrijft voor dat de inventarisatie van potentieel taai gedrag in huidige dijken wordt uitgevoerd aan de hand van dijkarchetypen, zoals beschreven in de publicatie *Dijken van Nederland* (Pleijster, 2014). De dijkbeheerders in het consortium geven in een workshop een globaal beeld van welke typen dijkopbouw en dijkzone inrichting zij beheren. In deze workshop wordt de bruikbaarheid van de classificatie in *Dijken van Nederland* bekeken voor toepassing van de in §1.2 gegeven definitie van een klimaatrobuuste taai dijk, en indien nodig verder gespecificeerd. Op basis hiervan zou vervolgens de taatheid per dijktype worden bepaald.

Gedurende Workshop 1 op 26-10-2023 bleek dat de dijkarchetypen uit *Dijken van Nederland* gebaseerd zijn op de landschappelijke inrichting rondom de dijk en slechts beperkt ingaan op de technische opbouw van het dijklichaam zelf (Figuur 2) (verslag workshop 1, 2026). Hoewel de inrichting van het voor- en achterland van invloed is op bresgroei en daarmee potentieel op taai bezwijkgedrag, biedt deze benadering onvoldoende basis voor het ontwikkelen van een technische typologie van dijken.

Dit werd zichtbaar tijdens een reeks workshopoefeningen waarin de archetypen werden gepositioneerd in verschillende tweedimensionale assenstelsels, waaronder (i) materiaalgebruik (constructie–grond) versus ruimtelijke dimensie (smal–breed), (ii) sterkte versus belasting, (iii) tijdsduur van bezwijken versus mogelijkheden om gevolgen te beperken, en (iv) constructie/materiaal versus belasting. In alle gevallen bleek het lastig om de archetypen eenduidig te positioneren. Bovendien trad clustering op, met name in categorieën die sterk door landschappelijke kenmerken worden bepaald, waardoor de spreiding over de assen beperkt bleef. Dit suggereert dat de archetypen uit *Dijken van Nederland* onvoldoende differentiëren op basis van technische kenmerken en daarmee beperkt bruikbaar zijn voor een technisch georiënteerde classificatie van dijken.



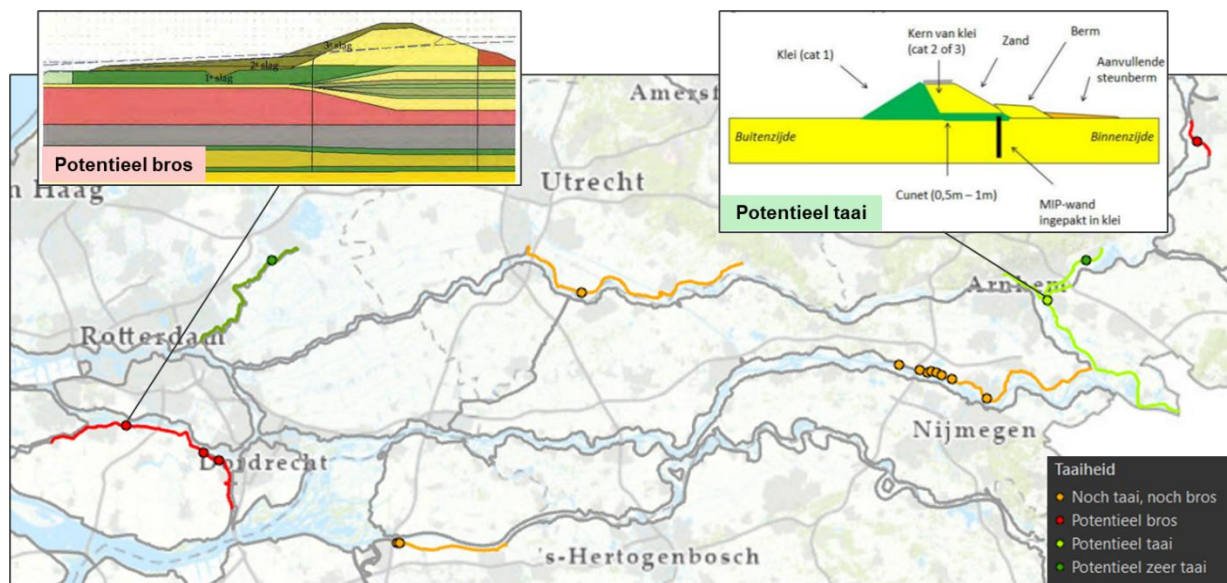
Figuur 2: Voorbeelden van dijkarchetypen uit *Dijken van Nederland*, met nadruk op landschapsinrichting.

3.2 Eerste iteratie: feitelijke geotechnische profielen ontbreken

In de eerste iteratie op de initiële aanpak, gepresenteerd tijdens Workshop 2 op 10-01-2024, is het archetype-denken verlaten ten gunste van een benadering op basis van feitelijke geotechnische dwarsprofielen (verslag workshop 2, 2024). Deze profielen worden verzameld bij waterschappen en via het Waterveiligheidsportaal (Informatiehuis Water, 2026) en bevatten informatie over opbouw, materiaalgebruik en ondergrond. Dit biedt in beginsel voldoende basis om, op grond van de gehanteerde definitie, een eerste indicering te geven van potentieel taai of bros bezwijkgedrag. Per dwarsprofiel is door de auteurs een indicering van de potentiële taatheid opgesteld. In de regel kregen zanddijken een indicering richting bros (rood), kleidijken een indicering richting taai (lichtgroen) en kleidijken met een damwand een indicering richting zeer taai (groen). Dijken met klei maar overwegend zand, of zanddijken met een damwand, ontvingen een indicering die niet noch als taai of bros kan worden gekarakteriseerd (oranje). In Bijlage A wordt de opzet van een archetyping exercitie beschreven.

De voorgestelde werkwijze kent een opschaling van dwarsprofielen naar trajectniveau, waarbij het taaheidsoordeel van een traject wordt bepaald op basis van het gemiddelde van de onderliggende profielen (zie Figuur 3). Tijdens de uitvoering van deze aanpak traden echter meerdere knelpunten op:

- Geotechnische dwarsprofielen blijken moeilijk toegankelijk. In beoordelingsrapportages op het Waterveiligheidsportaal wordt wel naar profielen verwezen, maar de bijlagen blijken vaak leeg of incompleet gepubliceerd.
- Het toekennen van taaheidsindicaties is methodologisch prematuur. De definitie van taaheid en taaheidsindicering is nog in ontwikkeling en zal naar verwachting de komende jaren wijzigen. Het vastleggen van oordelende classificaties in deze fase is daarom ongewenst.
- De aanpak is statisch van aard. Nieuwe inzichten in bezwijkgedrag zouden handmatige herziening van alle classificaties vereisen, wat de robuustheid en schaalbaarheid beperkt.



Figuur 3: Schematische weergave van de eerste iteratie, waarin trajecten worden geclassificeerd op basis van geaggregeerde profielloorden.

3.3 Tweede iteratie: feitelijke dijkopbouw is niet in de legger vastgelegd

De tweede iteratie volgt uit een aanbeveling tijdens Workshop 3 op 16-04-2024, om niet langer direct te classificeren, maar eerst de relatie tussen (fysieke) dijk-elementen en faalmechanismen in kaart te brengen (verslag workshop 3, 2024). De invloed van deze elementen op faalmechanismen bepaalt immers mede de snelheid van bezwijken en daarmee de mate van taa gedrag. In Tabel 2 worden vijftien dijk-elementen gekoppeld aan vijf veelvoorkomende faalmechanismen. Een markering geeft aan of een element invloed uitoefent op een specifiek faalpad. Elk van deze dijk-elementen kan worden vastgelegd als een afzonderlijke data-laag / feature class, veelal gebaseerd op bestaande (open) databronnen. De aanpak verschuift daarmee van subjectieve classificatie naar objectieve dataverzameling: het opbouwen van een nationale dataset waarin feitelijke dijkenmerken systematisch worden vastgelegd. Zodra duidelijk is welke kenmerken bijdragen aan taa bezwijkgedrag, kan binnen deze dataset worden geanalyseerd waar combinaties van relevante kenmerken optreden.

Tabel 2: Relatie tussen faalpaden en uiterlijke dijkenmerken.

| Faalpad | Kruinhoogte | Kruinbreedte | Taluds | Binnenberm | Buitenberm | Ondergrond | Kern-materiaal | Bekleding toplaag | Bekleding onderlaag | Deklaag | Intreepunt | Uitreepunt | Dam- en diepwanden | Kabels- en leidingen | Kunstwerken |
|---|-------------|--------------|--------|------------|------------|------------|----------------|-------------------|---------------------|---------|------------|------------|--------------------|----------------------|-------------|
| Overslag > erosie binnentalud > erosie kern | x | x | x | | x | | x | x | x | | | | | | |
| Piping > zandmeevoerende wel > pipe > erosie | | | | x | | x | x | | | x | x | x | | | |
| Macrostabieliteit BI > afschuiven > erosie kern | x | x | x | x | | x | x | | | x | | | x | x | x |
| Macrostabieliteit BU > afschuiven > erosie kern | x | x | x | | x | x | x | | | x | | | x | x | x |
| Falen van bekleding > erosie kern | | | x | | | | x | x | x | | | | | | x |

Waterschappen registreren informatie over waterkeringen in de legger en beheerregisters, waarin onder meer ligging, vorm, afmetingen en constructie zijn vastgelegd. De inrichting van deze datasets valt onder eigen bevoegdheid van het waterschap, wat leidt tot aanzienlijke variatie in terminologie en data-architectuur. Daarom wordt per waterschap de legger geanalyseerd op bruikbare datalagen en vertaald naar een uniforme structuur. Tijdens uitvoering bleek dat leggers zich richten op juridische inpassing van dijken, en niet zozeer de feitelijke buitensituatie. De buitensituatie is daarentegen wel vastgelegd in beheerregisters, maar deze zijn nagenoeg niet openbaar beschikbaar of opvraagbaar. Dit wordt nader toegelicht in §4.1. De derde iteratie bouwt daarom voort op de tweede iteratie, maar is gebaseerd op openbaar beschikbare datasets.

3.4 Derde iteratie: feitelijke situatie vastleggen op basis van openbare data

De derde iteratie resulteert in de ontwikkeling van de Dijkatlas: een landsdekkende, uniforme dataset waarin heterogene (open) databronnen op consistente en reproduceerbare wijze worden geïntegreerd. De Dijkatlas bestaat uit drie kerncomponenten:

1. *Geometrie*: beschrijft de vorm en ligging van het dijklichaam, afgeleid uit hoogtedata;
2. *Constructie*: geeft inzicht in de opbouw van de dijk, gebaseerd op geïnterpreteerde geotechnische parameters;
3. *Ondergrond*: representeert de geologische context via vertaling van volumetrische ondergrondmodellen naar numeriek analyseerbare puntdatasets.

Door deze componenten modulair te combineren ontstaat een schaalbare en consistente datastructuur, waarin uiteenlopende databronnen via de ruimtelijke referentie, de dijk, met elkaar worden verbonden. In een gefragmenteerd datalandschap maakt deze aanpak een gestandaardiseerde en organisatie-onafhankelijke representatie van dijken mogelijk. In dit rapport worden de analyses om tot de kerncomponenten te komen afzonderlijk uitgewerkt. Deze analyses vormen in bovengenoemde volgorde een workflow. Deze workflow is ook toepasbaar in andere contexten waar soortgelijke hoogte- en ondergrondmodellen aanwezig zijn (Podt et al., 2026).

3.5 Kennisgeving van bestaande datasets

In de praktijk beheren waterkeringsbeheerders ieder hun eigen regionale datasets, waarin voor hen relevante gegevens zijn opgenomen. In het verleden zijn pogingen gedaan om deze datasets landelijk te harmoniseren, maar deze hebben niet geleid tot een structureel en actueel resultaat. Tabel 3 geeft een overzicht van de belangrijkste bestaande datasets en hun eigenschappen. Hieruit blijkt dat een integraal, landelijk geharmoniseerde dataset die geschikt is voor technische analyse van dijken momenteel ontbreekt.

Tabel 3: Bestaande dijkdatasets en hun eigenschappen

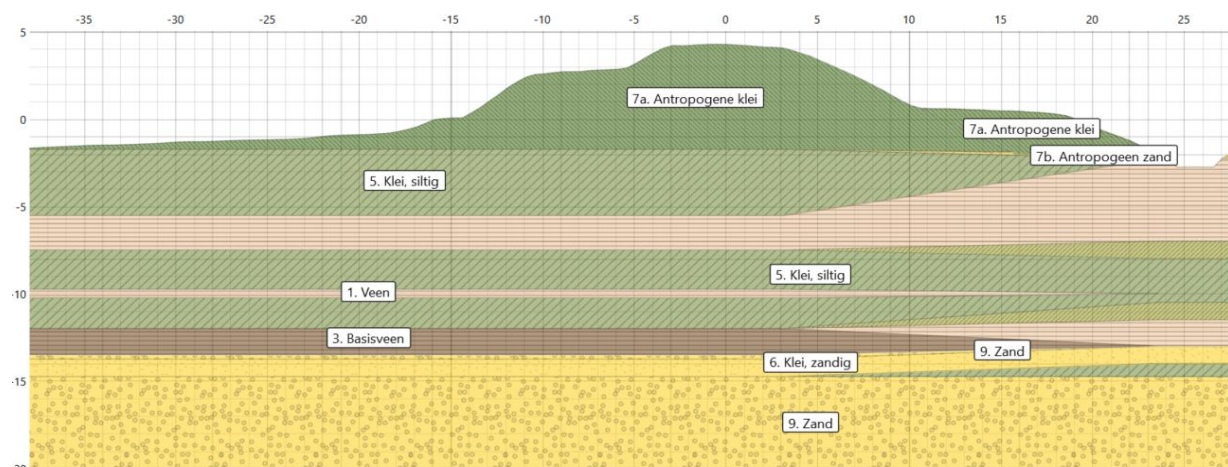
| Dataset | Eigenschappen |
|------------------------------|--|
| Legger waterschap | <ul style="list-style-type: none"> + Openbaar beschikbaar - Een statische weergave voor juridische doeleinden en visievorming - Bevat technische dijkdata. |
| Beheerregister waterschap | <ul style="list-style-type: none"> + Bevat technische dijkdata. - Niet openbaar beschikbaar. - Grote variatie in detailniveau en structuur. |
| Waterstaatswerken RWS | <ul style="list-style-type: none"> + Afgeleide van kniklijnen uit beheerregisters. - Niet goed herleidbaar naar brondata; geen time stamp. - Updatet niet met veranderingen in beheerregisters. |
| Informatiemodel Water (IMWA) | <ul style="list-style-type: none"> + Poging tot landelijke samenvoeging van beheerregisterdata - Beperkt tot zes waterschappen - Laatste update in 2018 (voor zover bekend) |

4 WORKFLOW

Deze sectie presenteert een reproduceerbare workflow voor het reconstrueren van technische kenmerken van gronddijken op basis van openbare geodatasets. De workflow is opgebouwd rond drie kerncomponenten die samen een technische representatie van de dijk vormen: geometrie, constructie en ondergrond. Hoewel de workflow wordt gedemonstreerd met landelijke datasets uit Nederland, is deze workflow overdraagbaar naar andere landen of regio's met een vergelijkbare datavoorziening.

Deze workflow combineert getransformeerde hoogtedata, sonderingsdata en lithologische ondergronddata, afkomstig uit Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN), Basistregistratie Ondergrond (BRO) en GeoTOP. Deze modellen worden in latere paragrafen toegelicht. Voor reproduceerbaarheid wordt gebruikgemaakt van breed beschikbare ruimtelijke analysetoolboxen binnen GIS-software, waarbij geoprocessing tools en algoritmen in vetgedrukt grijs worden aangeduid. De voorbereiding en verwerking van data worden geautomatiseerd met behulp van Python-scripts, ter ondersteuning van schaalbaarheid en toekomstige actualisaties. Binnen de workflow wordt onderscheid gemaakt tussen vectordata (punten, lijnen en polygonen) en rasterdata (pixelgebaseerde oppervlakken).

De Dijkatlas is met deze workflow conceptueel opgebouwd uit drie kerncomponenten: (1) geometrie, die de ruimtelijke begrenzing en vorm van het dijklichaam beschrijft; (2) constructie, die betrekking heeft op de opbouw en materialisatie van het dijklichaam; en (3) ondergrond, die de samenstelling van de onderliggende bodem karakteriseert. In samenhang bieden deze componenten een technisch integraal beeld van de dijk. Deze driedeling sluit aan bij de structuur van geotechnische profielen zoals toegepast in beoordelingspraktijken, zoals geïllustreerd in Figuur 4.



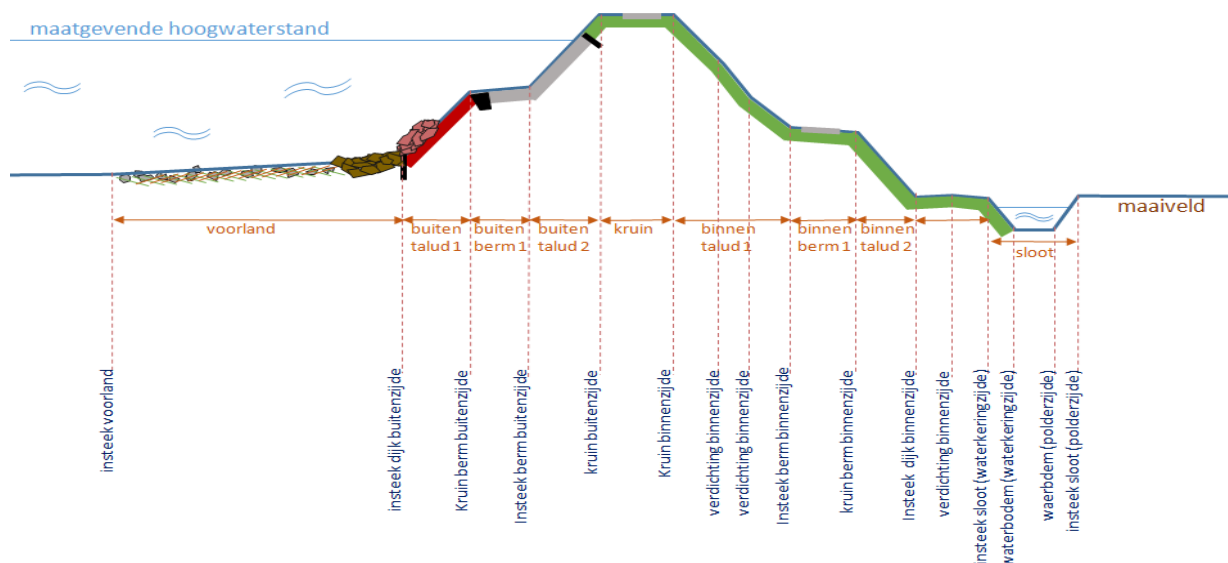
Figuur 4: Voorbeeld van een geotechnisch dwarsprofiel van de Hollandsche IJsseldijk (bron: HHSK)

Met het oog op een toekomstbestendige toepassing geldt als randvoorwaarde dat de datasets die ten grondslag liggen aan de Dijkatlas zowel actueel moeten worden gehouden, door tijdige actualisatie bij veranderingen in de buitenruimte, als openbaar toegankelijk moeten zijn. Deze combinatie is essentieel voor een consistente, landsdekkende actuele en reproduceerbare toepassing van de workflow.

Voor zover bekend voldoet momenteel geen enkele bestaande dijkdataset aan beide voorwaarden. De meest actuele dijkdata zijn doorgaans beschikbaar in beheerregisters van waterkeringsbeheerders. Hoewel deze datasets naar verwachting een hoge mate van actualiteit en detail bevatten, zijn zij in de regel niet publiek toegankelijk. Hierdoor ontstaat een spanningsveld tussen datakwaliteit en toegankelijkheid. Op de aard en implicaties van deze beheerregisters wordt nader ingegaan in §4.1.

4.1 Component 1: geometrie

Een hoge en brede dijk wordt in de praktijk vaak geassocieerd met veiligheid en robuustheid. Niet voor niets bestaan dijkversterkingsmaatregelen veelal uit dijkverhogingen en -verbredingen. De geometrie en omvang van het dijklichaam vormen daarmee één van de belangrijkste indicatoren voor sterkte en, in potentie, voor taai gedrag. De geometrie van een dijk wordt veelal ontleed aan de hand van kenmerkende profiellijnen, ook wel kniklijnen genoemd. Het DAMO definieert kenmerkende profiellijn als "lijnvormige elementen waarmee bepaalde kniklijnen van het dijklichaam worden vastgesteld" (Aquo, 2016). Een overzicht van de door DAMO onderscheiden kniklijnen is weergegeven in Figuur 5.

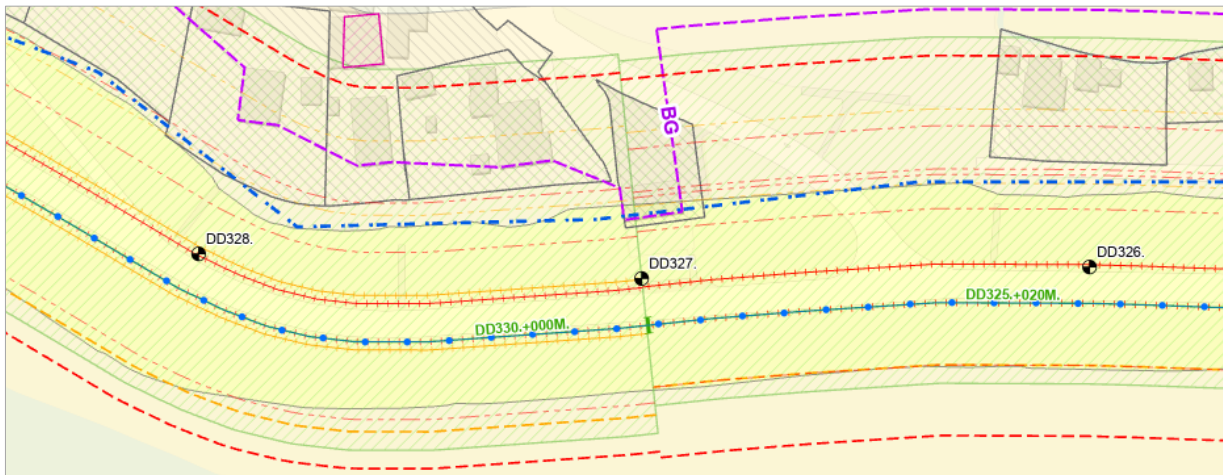


Figuur 5: Overzicht van kenmerkende profielkniklijnen volgens DAMO, die de belangrijkste geometrische overgangen binnen het dijklichaam vastleggen, zoals teen, berm en kruin.

Waterschappen registreren in hun leggers en beheerregisters verschillende typen kniklijnen (Figuur 6), die elk een ander doel dienen. In leggers en beheerregisters zijn vaak terug te vinden:

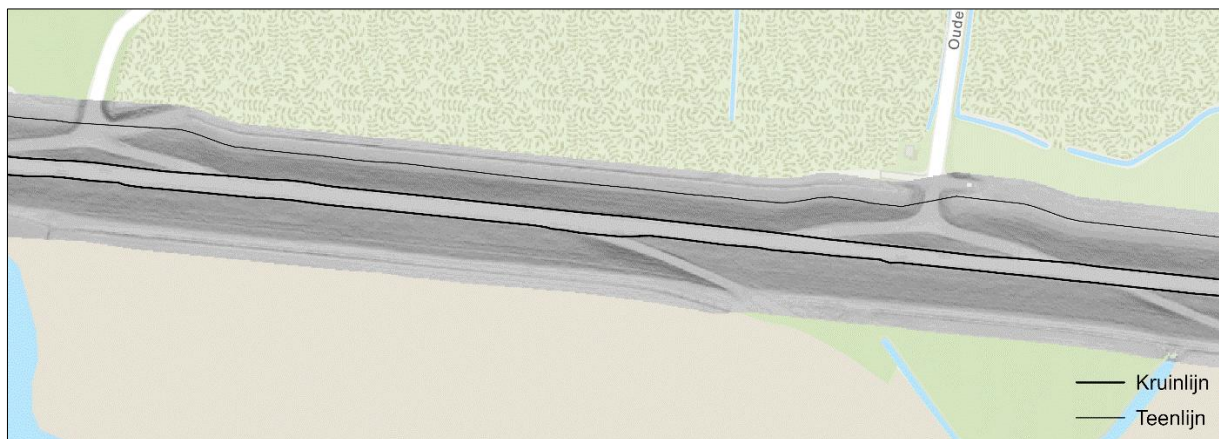
- **Profielkniklijnen beheer:** de feitelijke, in de buitensituatie waarneembare kniklijnen. Relevant voor de beheerder, omdat deze precies moet weten hoe de dijk erbij ligt. Wordt frequent geactualiseerd in het beheerregister.
- **Profielkniklijnen legger:** de normatieve toestand van de dijk op het moment van vaststelling van de legger. Een statische weergave voor juridische doeleinden en visievorming. Wordt om de jaren geactualiseerd a.d.h.v. een nieuw leggerbesluit.
- **Profielkniklijnen PVVR:** het profiel van vrije ruimte heeft als doel het voorkomen van ontwikkelingen die toekomstige versterkingen moeilijk of onmogelijk maken. De kniklijnen PVVR dienen als een juridische reservering van ruimte.

Voor de Dijkatlas zijn uitsluitend de profielkniklijnen beheer relevant, omdat deze de actuele geometrie van de dijk in de buitenruimte representeren. In de praktijk blijkt het detailniveau en toegankelijkheid van deze profielkniklijnen echter sterk te variëren tussen waterschappen. Leggers worden ontsloten via uiteenlopende mediums, zoals webapplicaties, map- of webserver of als niet-bewerkbare pdf-bestanden. Een inventarisatie laat zien dat slechts zes van de 21 waterschappen profielkniklijnen daadwerkelijk als bewerkbare data beschikbaar stellen, in het Informatiemodel Water (HWH, 2025). In de overige gevallen bevatten leggers hooguit centerlijnen ter indicatie van de ligging van de waterkering. Dit zijn referentielijnen die doorgaans langs de as van de kruinzone lopen, of langs de benadering van één van de kruinlijnen (Figuur 6, zie blauwe lijn met punten). Beheerregisters, waarin doorgaans de meest actuele geometrische data zijn vastgelegd, zijn niet openbaar beschikbaar.

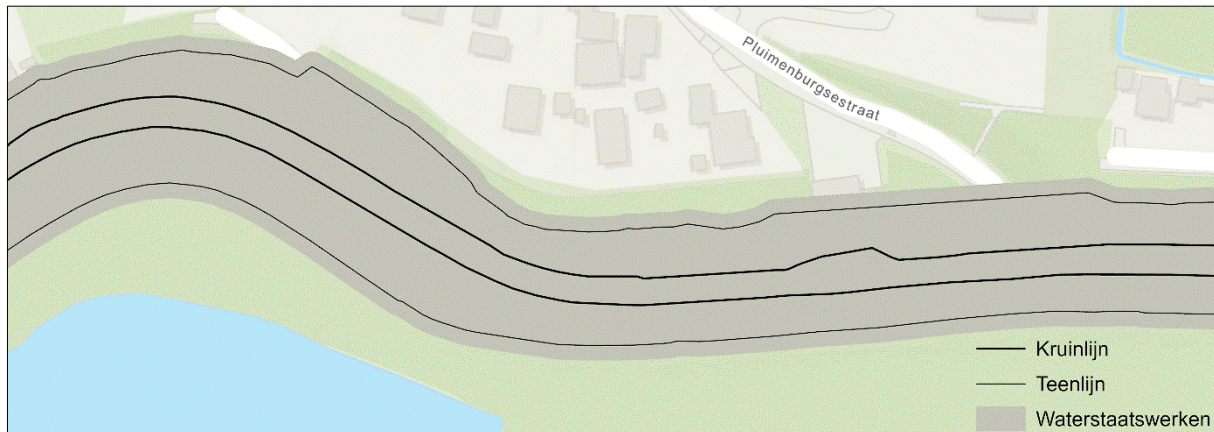


Figuur 6: Een rijkheid aan kniklijnen in de Legger Waterkeringen van Waterschap Rivierenland. Profielkniklijnen legger zijn weergegeven in rood, en kniklijnen behorend tot het profiel van vrije ruimte (PVVR) zijn geel geïllustreerd (WSRL, 2025).

Ook waar kniklijnen wél beschikbaar zijn, blijken zij regelmatig incompleet of onnauwkeurig. Zo ontbreken in diverse beheerregisters teenlijnen of kniklijnen voor bermen en op- en afgangen, wat resulteert in een vertekende en onvolledige representatie van de dijkgeometrie (zie Figuur 7). Een workaround is het gebruik van de feature class **Waterstaatswerken** van Rijkswaterstaat, waarvan de begrenzing in veel gevallen circa vier meter buiten de teenlijnen uit leggers ligt (Figuur 8). Door deze dataset met een negatieve buffer te corrigeren, kunnen ontbrekende teenlijnen deels worden benaderd. Deze aanpak is echter niet consistent toepasbaar en de herkomst en actualiteit van de onderliggende data zijn vaak onduidelijk.



Figuur 7: Projectie van profielkniklijnen uit een legger op een hellingsraster afgeleid uit AHN4. De figuur illustreert het ontbreken van een teenlijn en kniklijnen voor op- en afgangen, wat resulteert in een vertekende representatie van de dijkgeometrie.



Figuur 8: Vergelijking tussen de feature class Waterstaatswerken en profielkniklijnen uit de legger, waaruit blijkt dat Waterstaatswerken in veel gevallen overeenkomt met een circa 4 meter buffer rondom de teenlijnen, of vice versa.

Gezien deze beperkingen wordt in de Dijkatlas afgezien van het gebruik van kniklijnen uit leggers en beheerregisters. In plaats daarvan worden de kniklijnen rechtstreeks afgeleid uit de hoogtemodellen van het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN). Een digitaal hoogtemodel is een rasterrepresentatie van de maaiveldtopografie. Het AHN biedt hoogtemodellen met een objectieve en reproduceerbare momentopname van de buitensituatie, met een bekende inwinningsdatum en landelijke dekking. Ten tijde van schrijven is het AHN4 het meest landsdekkende hoogtemodel. AHN5 is reeds ingewonnen voor het westelijk deel van Nederland, terwijl het AHN6 momenteel wordt ingevlogen voor de oostelijke delen. In de nabije toekomst ligt een gecombineerde toepassing van AHN5 en AHN6 voor de hand als voorkeursdataset. Wel verschillen de AHN-versies in distributievorm: AHN4 en AHN5 zijn beschikbaar als TOP-kaartbladen (5 x 6,25 km), terwijl AHN6 wordt ontsloten in een fijnmaziger grid (1 x 1 km). De in dit rapport gepresenteerde voorbeelden zijn gebaseerd op AHN4. De ontwikkelde workflow is echter zodanig opgezet dat de extractie van kniklijnen uit nieuwere AHN-releases geautomatiseerd kan worden uitgevoerd.

4.1.1 Area of interest AHN

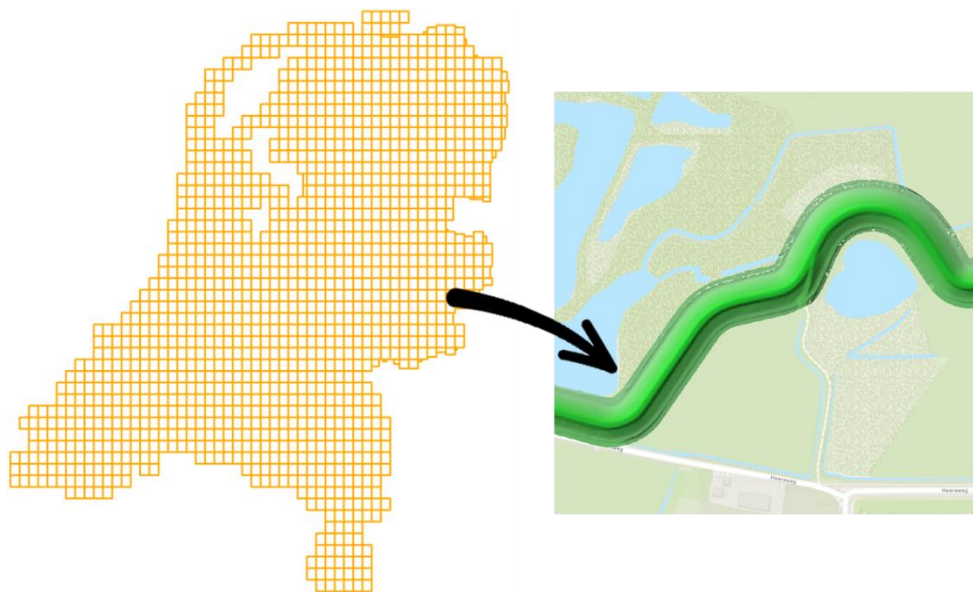
Voor het afleiden van kniklijnen uit AHN is het noodzakelijk om een ruimtelijk afgebakend analysegebied te definiëren: een *Area of Interest (AoI)*. Dit interessegebied omvat het dijklichaam van teen-tot-teen, aangevuld met een buffer in het voor- en achterland. Als basis voor het AoI wordt de door Rijkswaterstaat gepubliceerde feature class **Waterstaatswerken** gebruikt, beschikbaar via de ArcGIS Online Portal. Deze dataset lijkt in veel gevallen te zijn afgeleid van teenlijnen uit beheerregisters (zie §3.1), met een standaard uitwaartse buffer van circa 4 meter. Door hierop aanvullend een buffer van circa 6 meter toe te passen, wordt effectief een totaal van circa 10 meter rondom de teenlijnen gerealiseerd. Dit resulteert in een analysegebied dat voldoende ruimte biedt voor het betrouwbaar identificeren van kniklijnen.

Voor delen van Nederland waar **Waterstaatswerken** onvolledig is, met name in Zeeland, Limburg en de Waddeneilanden, wordt gebruikgemaakt van de door het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat gepubliceerde feature class **Normtrajecten**, beschikbaar via de ArcGIS Online Portal. In deze gevallen wordt de bufferbreedte afgestemd op de op satellietbeelden waargenomen dijkvoetafdruk. Deze breedte varieert per type waterkering en ligt in de Nederlandse praktijk doorgaans tussen circa 20 en 100 m: rivierwaterkeringen vereisen typisch een buffer van circa 40 m, terwijl kust- en estuariene waterkeringen aanzienlijk bredere buffers kennen van circa 80 m.

De gebufferde normtrajecten worden vervolgens samengevoegd (**merge**) met de gebufferde Waterstaatswerken tot één gecombineerd analysegebied: **AoI_AHN**. Dit vormt de ruimtelijke basis voor de verdere geometrische analyse van dijken binnen de Dijkatlas.

4.1.2 Extraheren van profielkniklijnen uit een hoogtemodel

Het AHN4 heeft een rasterresolutie van 0,5 m, wat gelijk is aan één hoogtemeting per 0,5 meter over het volledige Nederlandse grondgebied. Gegeven een totale oppervlakte van 41.850 km² resulteert dit in een rasterbestand van naar schatting $1,7 \times 10^{11}$ gridcellen. Om deze reden wordt het AHN4 aangeboden in 1.407 afzonderlijke TOP-kaartbladen. De **AHN** code is ontwikkeld om uitsluitend de kaartbladen te selecteren en downloaden die het dijklichaam kruisen. Deze code neemt als input een vectorbestand van de dijkvoet (**Aol_AHN**) als invoer dient. Vervolgens worden de geselecteerde AHN-tegels ingelezen, ruimtelijk begrensd (**clip**) op het Aol en opgeslagen in een zo compact mogelijk, maar detailbehoudend rasterformaat. De afzonderlijke tegels worden daarna samengevoegd tot één doorlopend mozaïekraster. Deze werkwijze maakt het mogelijk om rasteranalyses uit te voeren op één digitaal hoogtemodel dat uitsluitend het dijklichaam en de directe omgeving omvat, waardoor rekentijd en opslag aanzienlijk worden gereduceerd zonder verlies van detail.



Figuur 9: Van TOP-kaartblad naar een hoogteraster van de dijk.

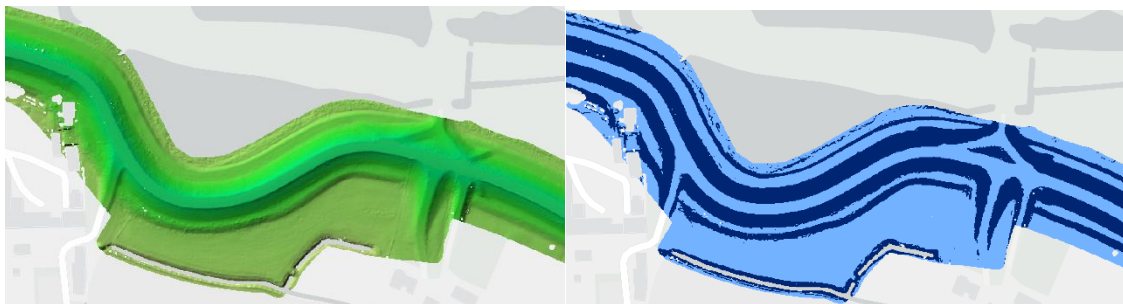
Hoogterasters bevatten regelmatig ontbrekende pixels als gevolg van wateroppervlakken of objecten die de sensor niet kan penetreren. Deze ontbrekende waarden worden in deze studie niet gecorrigeerd en blijven aanwezig in het hoogtemodel, om zo dicht mogelijk bij de brondata te blijven. Vervolgens wordt het hoogtemodel omgezet naar een hellingsraster met een **Slope**-algoritme. Een hellingsraster is een afgeleid raster waarin voor elke cel de lokale hellingshoek van het maaiveld wordt weergegeven, uitgedrukt in graden ten opzichte van het horizontale vlak. Deze helling wordt berekend op basis van hoogteverschillen met omliggende cellen, doorgaans binnen een 3x3-venster. Het resulterende hellingsraster wordt vervolgens geïnterpreteerd in vlakke en steile oppervlakken.

Dijkhellingen liggen in de praktijk doorgaans tussen 1:3 en 1:5. Op basis hiervan worden oppervlakken flauwer dan 1:5 (circa 11,3°) geïnterpreteerd als 'vlak'. De gehanteerde *grenswaarde* is hierbij de hellingshoek (in graden) die wordt gebruikt om het hellingsraster op te delen in de klassen 'vlak' en 'steil'. Hoewel oppervlakken onder deze grenswaarde niet strikt vlak zijn, maakt deze classificatie het mogelijk om geleidelijke overgangen, zoals op- en afritten, met relatieve precisie te identificeren en te visualiseren. De keuze van de grenswaarde blijkt echter gevoelig. Een lagere waarde van 10° resulteert in een nauwkeurige weergave van teenlijnen, maar introduceert ruis in zones met geleidelijke overgangen zoals op- en afritten. Een hogere waarde van 12° reduceert deze ruis en omvat op- en afritten beter, maar leidt ertoe dat de teenlijn het talud op 'kruip'. In Bijlage A is dit effect visueel geïllustreerd.

Omdat de keuze van de grenswaarde afhankelijk is van de lokale dijk morfologie, is een uniforme classificatie over het gehele studiegebied methodologisch niet gewenst. Zo blijkt een grenswaarde van 11,3° goed te werken in Rijn en Waaldijken, maar minder goed voor steilere dijken langs de Hollandsche

IJssel. Daarom wordt een adaptieve benadering van de grenswaarde aanbevolen. Als uitgangspunt wordt de fijnmazige kaartbladindeling van AHN6 (1 x 1 km) gehanteerd. Per kaartblad wordt een reeks hellingsrasters gegenereerd, waarbij de grenswaarde systematisch wordt gevarieerd in stappen van 0,1° binnen een bereik van 10° tot 13° (in totaal 31 varianten). Voor elk kaartblad wordt vervolgens bepaald welke grenswaarde de beste scheiding oplevert tussen vlakke en steile oppervlakken. Deze selectie wordt uitgevoerd met behulp van een supervised random forest machine learning-model. Hiervoor wordt een trainingsdataset gebruikt, bestaande uit een representatieve selectie van kaartbladen waarvoor de optimale grenswaarde handmatig is vastgesteld. Deze optimale waarde is gedefinieerd als de grenswaarde die leidt tot een consistente en visueel 'gladde' identificatie van overgangen, zoals teenlijnen en op- en afritten, met minimale ruis.

De classificatie-algoritmen evalueren per kaartblad de verschillende grenswaarden op basis van kwaliteitsindicatoren, zoals elementherkenning, randcontinuïteit en ruisniveau. Op basis hiervan wordt de grenswaarde geselecteerd die het beste aansluit bij de lokale morfologie. Deze adaptieve, datagedreven benadering voorkomt systematische bias die optreedt bij een uniforme grenswaarde en maakt het mogelijk om regionale variaties in dijkvorm en landschap expliciet te accommoderen. Daarmee wordt de robuustheid van de kniklijndetectie vergroot en wordt de methode geschikt voor consistente, landsdekkende toepassing. Ten tijde van schrijven bevindt de implementatie van deze adaptieve grenswaarde zich nog in ontwikkeling. De uitkomsten hiervan hebben geen invloed op de inventarisatie van potentieel taai gedrag, zoals beschreven in §5.



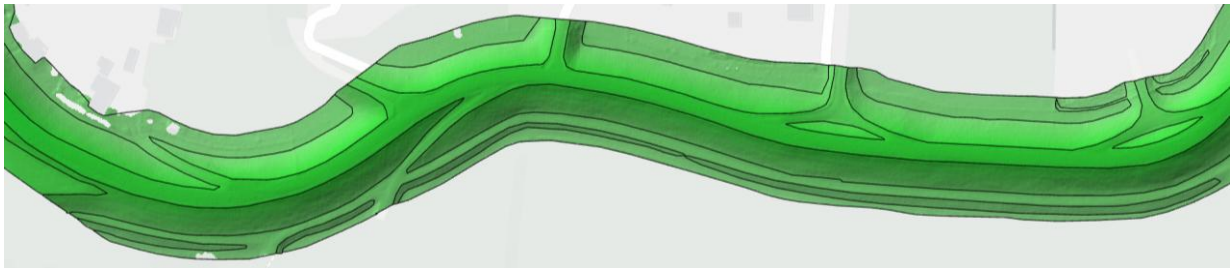
Figuur 10: Digitaal hoogtemodel van een gronddijk, weergegeven als hillshade (links) en het bijbehorende geclassificeerde hellingsraster waarin vlakke en steile oppervlakken worden onderscheiden (rechts).

Na classificatie van het hellingsraster worden hellingsovergangen zichtbaar, maar deze zijn nog uitsluitend aanwezig in de rasterrepresentatie en niet expliciet als afzonderlijke objecten vastgelegd. Hierdoor zijn zij niet direct geschikt voor verdere analyse op objectniveau. Om deze overgangen om te zetten naar vectorobjecten, wordt het hellingsraster opnieuw geclassificeerd tot een binair raster met integer waarden middels een **classify**-algoritme. De uitkomst is een binair raster waarin bijvoorbeeld waarde 0 staat voor vlakke oppervlakken en waarde 1 staat voor steile oppervlakken.

Hoewel het voor de hand ligt om lijnobjecten direct uit dit binaire raster te extraheren (bijvoorbeeld via *Raster to Line*), leidt deze aanpak tot slordige ruisgevoelige lijnen. Om deze ruis te reduceren wordt eerst een **Raster to Polygon**-conversie uitgevoerd met een vereenvoudigde polygon-output. Door deze vereenvoudiging wordt de blokkerige rasterstructuur omgezet in gladde polygongrenzen. Polygonen bieden daarnaast het voordeel dat zij selectie en filtering op basis van oppervlakte mogelijk maken, wat bij lijnobjecten beperkt is tot lengte. Hierdoor kunnen kleine artefacten worden verwijderd. In deze workflow worden polygonen met een oppervlakte kleiner dan 100 m² geselecteerd en verwijderd, op basis van het grootste gedeelte oppervlak. Het resultaat is een opgeschoonde polygonlaag waarin de kniklijnen duidelijk herkenbaar zijn, maar waarin langs de grenzen nog ruis en triangulatie-artefacten aanwezig zijn (Bijlage A, Figuur 29 en Figuur 30).

Na de extractie van lijnobjecten bevatten de kniklijnen nog veel kleine geometrische onregelmatigheden, zoals hoekige segmenten en overbodige knooppunten, die voortkomen uit de rastergebaseerde oorsprong van de data. Deze artefacten zijn niet representatief voor de werkelijke dijkgeometrie en bemoeilijken verdere analyse.

Om deze artefacten te reduceren, wordt een lijnsimplificatie toegepast. Hierbij worden kleine afwijkingen in de lijngeometrie verwijderd, terwijl de globale vorm van de kniklijn behouden blijft. In deze studie wordt hiervoor het **bend simplify**-algoritme (Wang & Müller, 1998) gebruikt dat specifiek gericht is op het gladstrijken van lokale buigingen zonder de hoofdstructuur van de lijn aan te tasten. De mate van vereenvoudiging wordt gestuurd door een tolerantiewaarde in meters. Een tolerantiewaarde van 8 meter blijkt in de praktijk een goede balans te bieden tussen het verwijderen van ruis en het behouden van relevante geometrische kenmerken. Bij een hogere waarde van 10 meter neemt het risico toe dat op- en afgangen niet worden gedecteerd (zie Bijlage A, Figuur 31). Tijdens deze simplificatie dienen topologische fouten te worden gecorrigeerd middels een 'resolve', dit is een aanvinkbare optie in de simplificatie tool. Het resultaat van deze stappen is een nauwkeurige en opgeschoonde extractie van kniklijnen in het bovenaanzicht van het dijklichaam (Figuur 11).



Figuur 11: Uit een digitaal hoogtemodel afgeleide kniklijnen, die hellingsovergangen representeren en de geometrie van een gronddijk definiëren.

4.1.3 Classificatie van kniklijnen

De uit het hoogtemodel afgeleide kniklijnen maken de geometrie van de dijk inzichtelijk. Hoewel deze kniklijnen overeenkomen met fysieke elementen zoals kruinen, bermen en tenen, kent de huidige workflow nog geen toewijzing van kruin-, berm- of teen-label aan individuele lijnen. Waar een mens de onderscheidingen tussen lijnen kan maken, is dit voor een computer zonder classificatie-logica niet vanzelfsprekend. Bovendien zorgen op- en afgangen ervoor dat kniklijnen van verschillende zones geometrisch met elkaar verbonden zijn, bijvoorbeeld doordat de kruin overgaat in het achterland via een overgang. Deze topologische verwevenheid bemoeilijkt de classificatie van de kniklijnen en vormt daarmee een beperking voor analyses die expliciete classificatie vereisen, zoals het bepalen van kruin- of bermbreedtes.

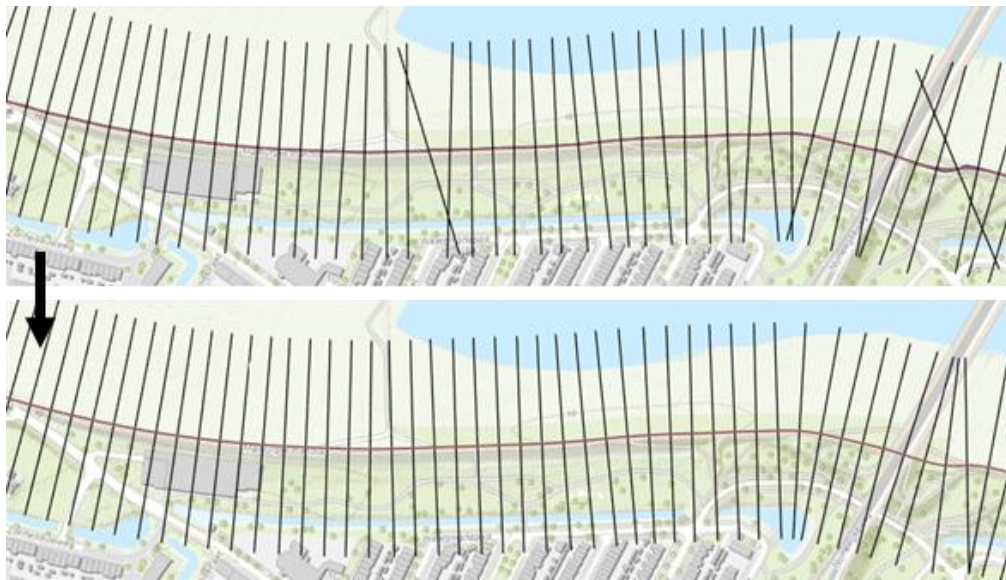
Classificatie in bovenaanzicht

De classificatie van kniklijnen gebeurt in twee complementaire stappen: een analyse in bovenaanzicht en een analyse in dwarsdoorsnede. Een analyse uitsluitend op basis van dwarsdoorsnede is onvoldoende, omdat daarin geen onderscheid kan worden gemaakt tussen bermkniklijnen en overgangskniklijnen die ontstaan door op- en afritten. Beide manifesteren zich in een dwarsdoorsnede als bermkniklijn (zie Figuur 14, IB of OB) en zouden daardoor ten onrechte worden geclassificeerd. In het bovenaanzicht is dit onderscheid wel te maken. In het bovenaanzicht worden daarom eerst overgangskniklijnen geïdentificeerd en gefilterd. Deze kniklijnen ontstaan door op- en afgangen op het dijklichaam en wijken in oriëntatie af van de dominante dijkrichting. Terwijl teen-, berm- en kruinlijnen onderling grotendeels parallel lopen, vertonen overgangskniklijnen een duidelijke afwijking. Door de oriëntatie van kniklijnen te vergelijken met de richting van de dijk centerlijn (bijvoorbeeld de feature class **Normtrajecten**), kunnen deze lijnen worden geïdentificeerd en als aparte klasse worden uitgesloten (Figuur 12).



Figuur 12: Illustratie van kniklijnen vóór en na filtering van overgangskniklijnen op basis van oriëntatie.

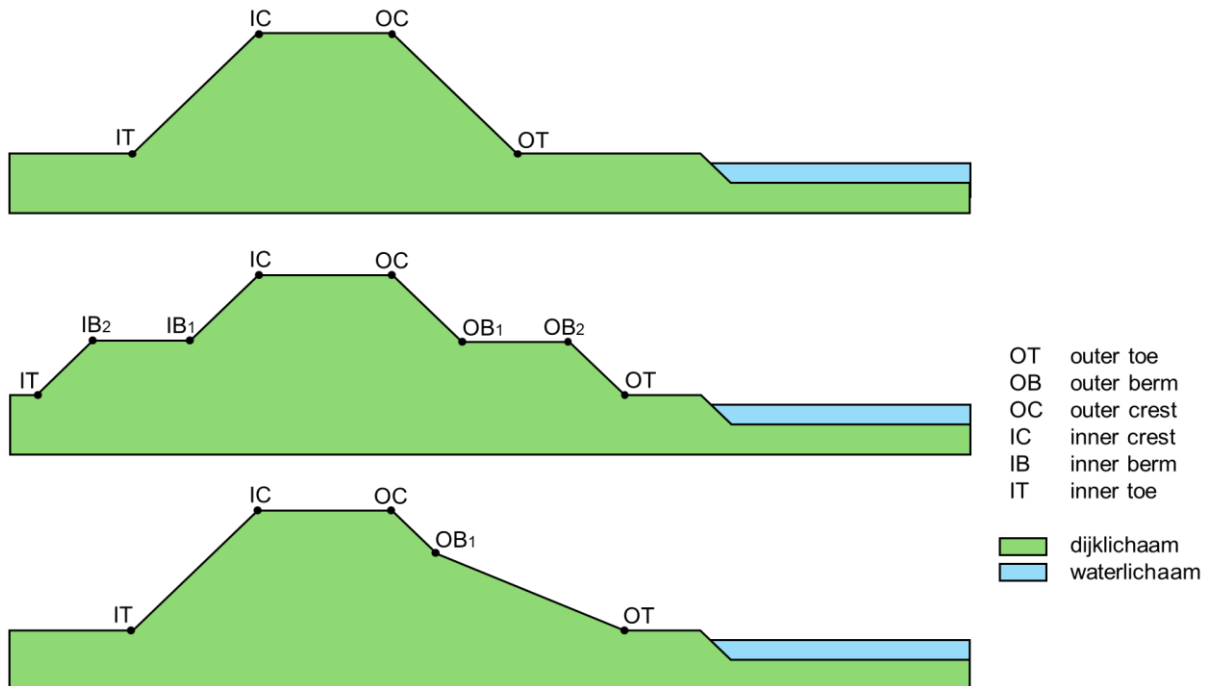
De resterende kniklijnen, met uitzondering van de overgangskniklijnen, worden vervolgens geïnterpreteerd op basis van een hoogteanalyse in het dwarsprofiel. Hiertoe wordt eerst een **Smooth Line**-algoritme toegepast op feature class **Normtrajecten**. Deze bewerking verwijdert scherpe hoeken in de aslijn van de dijk en resulteert in een vloeiend verlopende centerlijn. Een dergelijke vloeiende centerlijn is noodzakelijk voor het genereren van loodrechte transectlijnen met een consistente onderlinge oriëntatie. Indien de centerlijn scherpe richtingsveranderingen bevat, zullen transecten elkaar geregeld lokaal overlappen of kruisen, waardoor geen representatieve dwarsprofielen ontstaan (Figuur 13). Op basis van de gesmoothde centerlijn worden vervolgens loodrechte transectlijnen gegenereerd (**Generate Transects Along Lines**) met een onderlinge afstand van 20 m en een lengte van 200 m. Door het gebruik van de gesmoothde centerlijn staan deze transecten in een regelmatige, vrijwel parallelle configuratie, waardoor zij een consistente benadering vormen van dwarsprofielen langs het dijklichaam.



Figuur 13: Transecten gegenereerd vanuit oorspronkelijke Normtrajecten (boven) en vanuit gesmoothde Normtrajecten (onder).

Classificatie in dwarsdoorsnede

Een typische gronddijk kan worden onderverdeeld in zeven zones: het voorland, de buitenberm, de kruin, de binnenberm, het achterland, de kwelsloot en de taluds die deze zones met elkaar verbinden. Deze zones bestaan uit afwisselend vlakke en steile oppervlakken, waarbij de overgang tussen zones wordt gemarkeerd door een kniklijn. Met een doorsnee dijklichaam resulteert dit in zes unieke kniklijnen: de buitenteen (OT), buitenberm (OB), buitenkruin (OC), binnenkruin (IC), binnenberm (IB) en binnenteen (IT). De afkortingen zijn afgeleid van hun Engelse naamgenoot, zijnde; outer toe, outer berm, inner crest, etc. Terwijl de unieke teen- en kruinlijnen doorgaans één keer voorkomen, kunnen bermkniklijnen meerdere malen optreden, afhankelijk van het aantal bermen binnen een dijkprofiel (Figuur 14).



Figuur 14: Classificatie van kniklijnen in een gronddijk. Hellingsovergangen in het dijkprofiel worden vastgelegd als kniklijnen, waarbij tenen en kruinen uniek zijn en bermkniklijnen meerdere malen kunnen voorkomen.

Per transect wordt bepaald welke kniklijnen het profiel kruisen; deze lijnen worden per transect geknipt en gegroepeerd. De twee hoogstgelegen kniklijnen binnen een groep corresponderen altijd met de kruinlijnen. De laagstgelegen kniklijnen zijn echter niet zonder meer de teenlijnen, aangezien een binnendijkse teen lokaal hoger kan liggen dan een buitendijkse berm. Daarom wordt iedere groep opgesplitst in een rivierzijde en een landzijde, gescheiden door de centerlijn van de dijk. Per zijde wordt vervolgens de laagstgelegen kniklijn geclassificeerd als teenlijn. Alle overige lijnen binnen de groep worden geclassificeerd als bermkniklijnen, met inachtneming van het feit dat opritkniklijnen reeds zijn verwijderd (Figuur 12). Na classificatie worden de per transect gesegmenteerde kniklijnen opnieuw samengevoegd op basis van hun toegekende klasse. Dit resulteert in een consistente kniklijnkaart waarin alle lijnsegmenten zijn voorzien van een semantisch label.

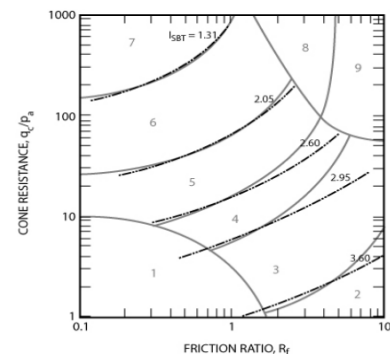
4.2 Component 2: constructie

Component 2 reconstrueert de opbouw van gronddijken door de materiaalsamenstelling te interpreteren op basis van sonderingen (Cone Penetration Tests, afgekort: CPT) en deze te koppelen aan de geometrie van de dijk. De constructie van gronddijken wordt in hoofdzaak bepaald door de gebruikte materialen en, waar aanwezig, aanvullende versterkingselementen zoals damwanden of geotextielen. Data over de materiaalsamenstelling zijn doorgaans systematischer en grootschaliger beschikbaar dan data over constructieve elementen, die vaak locatiespecifiek zijn en in lokale datasets (i.e. beheerregisters) worden vastgelegd. Om die reden vormt de materiaalanalyse de primaire basis voor deze component.

4.2.1 Materiële opbouw

De materiaalsamenstelling van de ondergrond wordt bepaald op basis van boringen en sonderingen. Boringen leveren directe lithologische beschrijvingen, terwijl sonderingen continue metingen registreren van onder meer conusweerstand (q_s), plaatselijke wrijvingsweerstand (R_f) en, indien beschikbaar, de poriënwaterdruk. Sonderingen zijn talrijker dan boringen en bieden een hoge verticale resolutie (typisch 2 cm).

Sonderingen leveren echter geen directe classificatie van grondsoorten, maar uitsluitend sondeerparameters. Interpretatie is daarom noodzakelijk. In deze workflow worden grondsoorten geïnterpreteerd met behulp van het Soil Behaviour Type-diagram (SBT) van Peter K. Robertson (1990), dat een breed geaccepteerde basis biedt voor het relateren van sondeerparameters aan grondgedrag en materiaaltype (Figuur 15). Hoewel in de praktijk artificiële neurale netwerken (ANN) steeds vaker worden toegepast om lokale bodemnuances te modelleren, vereisen deze methoden doorgaans omvangrijke trainingsdatasets en locatiespecifieke kalibratie. De SBT-benadering biedt daarom een robuuste en reproduceerbare basis die geschikt is voor grootschalige en overdraagbare toepassingen.



Figuur 15: Soil Behaviour Type (SBT) diagram van Robertson

De oorspronkelijke classificatie wordt voorzien van een Nederlandstalige interpretatie. Hierbij wordt geen vereenvoudiging of aggregatie van SBT-classes doorgevoerd. Wel wordt aanvullend een duiding gegeven van de potentiële erosiebestendigheid per klasse (Tabel 4). Voor de bepaling van erosiebestendigheid wordt een conservatieve interpretatie gehanteerd, waarbij uitsluitend klei en zeer compacte lagen als erosiebestendig worden beschouwd. Materiaalklassen zoals organische klei en siltmixtures kunnen in de praktijk enige erosiebestendigheid vertonen, maar worden in deze analyse niet meegenomen om overschatting van potentieel taai gedrag te voorkomen.

Tabel 4: Soil Behaviour Type (SBT) diagram van Robertson (1990) en grondsoortinterpretaties

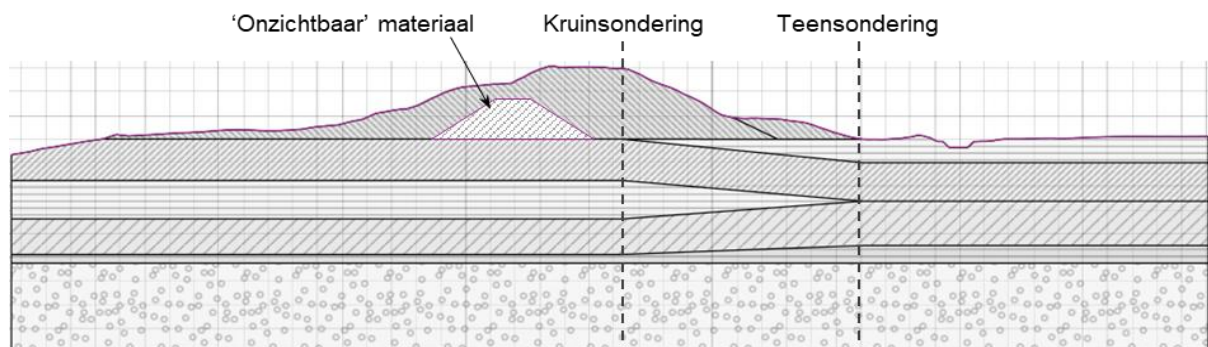
| Robertson zones | Beschrijving door Robertson | Interpretatieve aanduiding | Kleurcode | Potentieel erosiebestendig |
|-----------------|-----------------------------|----------------------------|-----------|----------------------------|
| 1 | Sensitive, fine grained | Gevoelige klei | #D3956F | |
| 2 | Clay organic | Veen | #8B4513 | ? |
| 3 | Clay & silty clay | Klei | #4B9B5E | ✓ |
| 4 | Silt mixtures | Silt / leem | #A9DB7B | |
| 5 | Sand mixtures | Kleilig zand | #E4D449 | |
| 6 | Sands clean and silty | Zand | #FFE600 | |
| 7 | Dense to gravelly sand | Grindig zand | #D4B36D | |
| 8* | Stiff sand to clay sand | Compact zand (verkit) | #9E8E75 | ✓ |
| 9* | Stiff fine grained | Compacte klei | #9E8E75 | ✓ |

* Komt niet voor in de Nederlandse dijken

Selectie en verwerking van sonderingen

Sondeerdata worden verzameld uit de Basisregistratie Ondergrond (BRO) in SQL-leesbaar formaat. Aangezien de BRO een breder toepassingsgebied heeft dan uitsluitend waterkeringen, worden sonderingen ruimtelijk gefilterd op een nieuwe Area of Interest, **AoI_CPT**, om uitsluitend metingen binnen dijklichamen te selecteren. Voor deze component wordt het AoI gelijkgesteld aan het eerdere **AoI_AHN** (zie §4.1), dat het dijklichaam (teen-tot-teen) omvat, inclusief een aanvullende buffer van 10 m in het voor- en achterland. Hiermee worden alle sonderingen geselecteerd die zich binnen of direct rondom het dijklichaam bevinden. Binnen deze selectie blijkt dat sonderingen het meest consistent voorkomen op de kruin van de dijk en in iets mindere mate bij de tenen. In recent grondonderzoek zijn vaak raaien beschikbaar met sonderingen op de kruin en de tenen, en soms aanvullende metingen in het voor- en achterland (zie bijv. Waaldijken van Waterschap Rivierenland). Het gebruik van meerdere sonderingen binnen één dwarsprofiel zou in principe een vollediger beeld van de dijkopbouw opleveren, maar vereist interpolatie tussen meetpunten. Dit introduceert aannames en onzekerheden die in deze studie expliciet worden vermeden.

Om deze reden wordt in een tweede stap de selectie beperkt tot kruinsonderingen. Deze worden geïdentificeerd op basis van kruinprofielgegevens uit *Component 1: Geometrie*. Deze keuze is inhoudelijk gemotiveerd: de kans op het aantreffen van een potentieel erosiebestendige drempel wordt het grootst geacht ter hoogte van de kruin. Daar bereikt ook meestal het 'oude' dijklichaam van voor de laatste versterking doorgaans zijn maximale hoogte. Door uitsluitend kruinsonderingen te gebruiken, wordt een conservatieve en methodologisch consistente inschatting verkregen, zonder afhankelijk te zijn van interpolatie tussen meetpunten. Hierbij dient te worden opgemerkt dat grondonderzoek per definitie steekproefsgewijs is en nooit een volledig beeld van de materiaalsamenstelling geeft (Figuur 16). Het beperken tot kruinsonderingen introduceert daarmee een zekere mate van onzekerheid, maar deze is niet groter dan bij benaderingen die interpolatie toepassen. Integendeel, door af te zien van interpolatie wordt voorkomen dat aanvullende aannames worden geïntroduceerd die de interpretatie kunnen vertekenen.



Figuur 16: Geotechnisch dwarsprofiel van de IJsseldijk (HHSK), opgebouwd uit een interpolatie van twee sonderingen

Dataverwerking

De verwerking van de sondeerdata vindt plaats in een Python-gebaseerde workflow. In deze workflow worden de individuele sondeermetingen omgezet naar interpreteerbare grondsoorten. De verwerking omvat drie stappen:

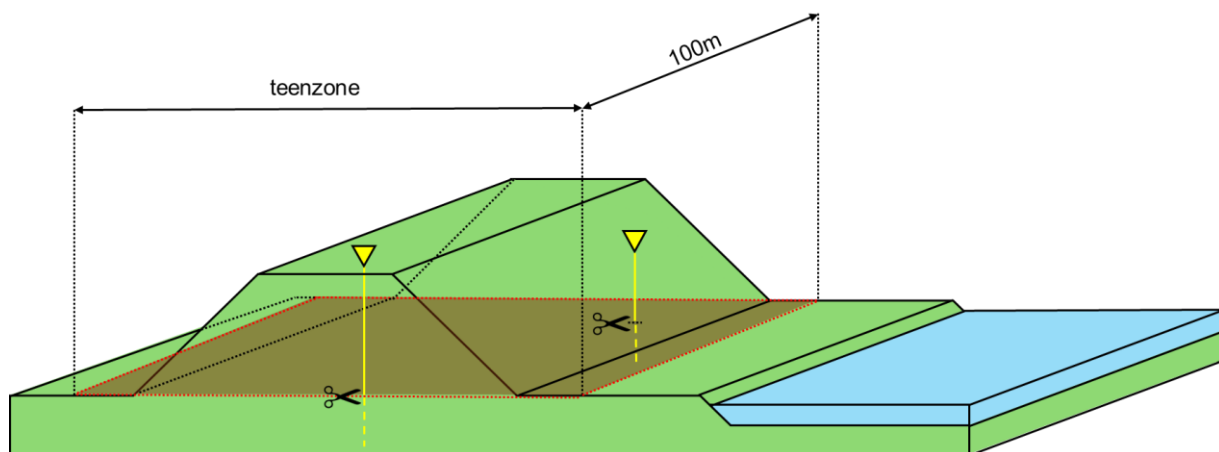
1. het berekenen van afgeleide sondeerparameters;
2. het toekennen van soil behaviour types met behulp van het gecomputeerde SBT-diagram;
3. het filteren van metingen die verouderd zijn of onder het actuele maaiveld liggen.

De uitkomst is een geclassificeerde dataset waarin per meetpunt een grondsoortinterpretatie beschikbaar is per 2 cm hoogte van de sondering, die als basis dient voor verdere analyse.

Afbakening tot het dijklichaam

De geselecteerde sonderingen worden vervolgens verticaal begrensd op basis van de teenhoogte, zodat uitsluitend de materiële opbouw van het dijklichaam wordt beschouwd boven maaiveld (zie Figuur 17). Weliswaar is de ondergrond geotechnisch van groot belang, maar hier gaat het om de bepaling van de eventuele drempelhoogte boven maaiveld die na dijkfalen de overstromingsvolumes kan beperken. De teenhoogte wordt per dijkstrekking van 100 m bepaald. Hiertoe worden de teenlijnen, afgeleid uit *Component 1: Geometrie*, geprojecteerd op het AHN4, waarbij aan elke vertex een hoogtewaarde wordt toegekend. Per strekking wordt vervolgens de laagste waarde van de binnen- of buitenteen geselecteerd als representatieve teenhoogte.

Aan elke sondering wordt de teenhoogte van de bijbehorende strekking gekoppeld. Door deze hoogte (ten opzichte van NAP) af te trekken van de maaiveldhoogte van de sondering, wordt de effectieve diepte van de sondering binnen het dijklichaam bepaald. Gezien de hoge verticale resolutie van sonderingen (typisch 2 cm) kan hiermee nauwkeurig worden vastgesteld hoeveel meetpunten (rijen sondeerdata) binnen het dijklichaam vallen. De meetpunten onder de teenhoogte worden niet meegenomen in de bepaling van hoeveelheid erosiebestendig materiaal binnen het dijklichaam (Figuur 17).



Figuur 17: Sonderingen worden per 100 m strekking afgeknipt op basis van de laagste binnen- of buitenteenhoogte.

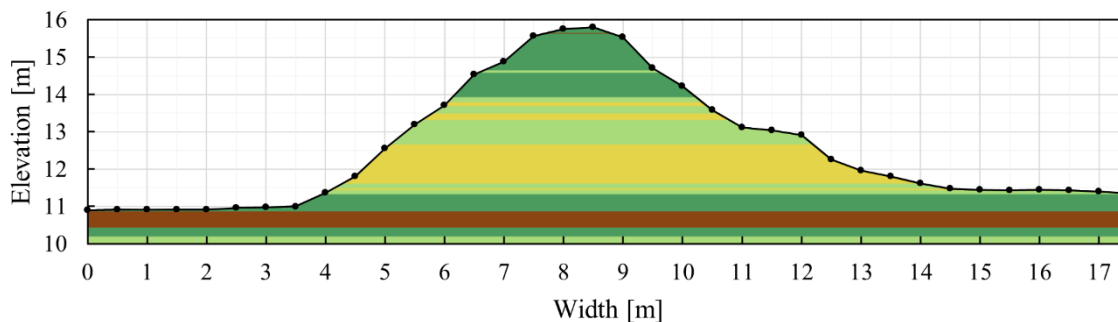
Bepaling van de erosiebestendige drempel

Op basis van deze begrenzing wordt per sondering bepaald hoe hoog de erosie bestendige drempel in het profiel is. Hierbij worden de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- **Aandeel erosiebestendig materiaal bepalen:** Per sondering wordt het aantal meetpunten dat als erosiebestendig is geclassificeerd bepaald. Door dit aantal te vermenigvuldigen met de verticale resolutie (2 cm) kan worden bepaald welk deel van het profiel bestaat uit erosiebestendig materiaal.
- **Deklaagcorrectie:** Elke dijk wordt verondersteld te beschikken over een erosiebestendige deklaag van 60 cm. Deze wordt niet meegenomen in de bepaling van de intrinsieke erosiebestendigheid van het dijklichaam (i.e. de drempel na dijkfalen) en wordt daarom in mindering gebracht op de totale dikte van erosiebestendig materiaal.
- **Verticale samenhang:** Erosiebestendig drempelmateriaal wordt verondersteld aaneengesloten voor te komen, doorgaans aan de onderzijde van het dijklichaam (bijvoorbeeld als restant van een historisch kleilichaam). Dit impliceert dat alle als erosiebestendig geclassificeerde lagen bijdragen aan één effectieve drempel. Deze aanname is gerechtvaardigd, aangezien dijken in de praktijk niet zijn opgebouwd uit fijn gelaagde afwisselingen van zand en klei.

Door combinatie van deze drie stappen kan de effectieve hoogte van de erosiebestendige drempel berekend.

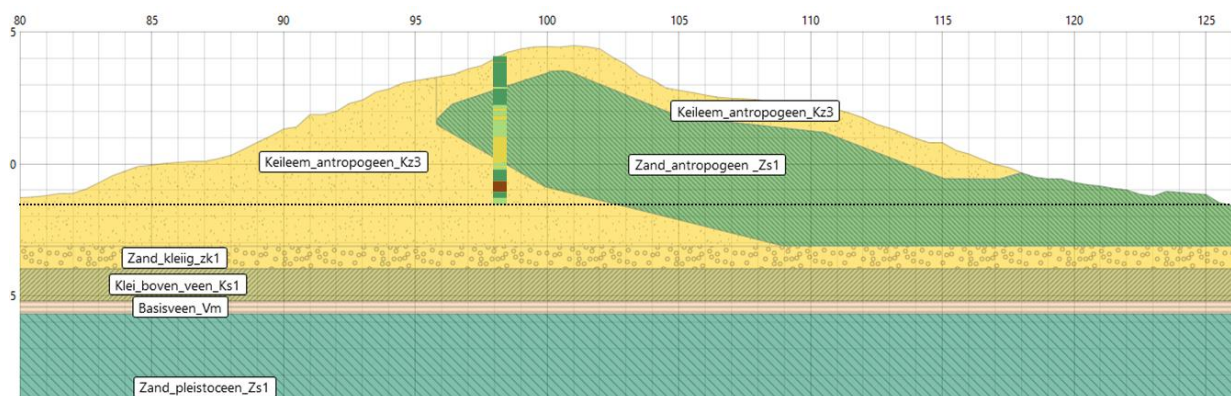
De workflow resulteert in een geclassificeerde representatie van de materiaalsamenstelling van de dijk en genereert schaalbare vectorafbeeldingen (Scalable Vector Graphics, SVG) van de geïnterpreteerde grondsoorten voor visuele integratie met het DEM-dwarsprofiel (Figuur 18).



Figuur 18: Dijkdwarsprofiel met grondsoortinterpretatie onder het maaiveldprofiel, afgeleid uit het AHN4 hoogtemodel.

Validatievoorbeeld

Ter illustratie toont Figuur 19 een geotechnische dwarsdoorsnede van de Wieringermeerdijk (bron: HHNK), waarin de grondsoortinterpretatie van een nabijgelegen sondering (CPT000000102456) is geprojecteerd. De interpretatie sluit aan bij de verwachte opbouw, waarbij keileem als erosiebestendig wordt geclassificeerd en zandige lagen als niet-erosiebestendig. In dit voorbeeld bestaat circa 3 m van het profiel uit klei en daarmee potentieel erosiebestendig materiaal. Na toepassing van de deklaagcorrectie resteert een effectieve erosiebestendige drempel van circa 2,4 m boven maaiveld. Deze waarde wordt op kaart weergegeven in Figuur 22.



Figuur 19: Geotechnische dwarsdoorsnede van de Wieringermeerdijk met geïnterpreteerde grondsoorten uit CPT

4.2.2 Constructieve elementen

Naast de materiële opbouw worden dijklichamen lokaal versterkt met constructieve elementen, zoals damwanden, keerwanden en verankeringen. Hoewel deze constructies primair zijn aangebracht om falen te voorkomen, blijkt uit praktijkproeven dat ze tijdens het faalproces en zelfs na bezwijken nog kunnen functioneren als een drempel. Een sprekend voorbeeld is de Eemdijkproef binnen de Projectoverstijgende Verkenning (POV) Macrostabieleit. In deze proef werd een 60 m lange en 5,5 m hoge proefdijk voorzien van een stalen damwand, waarna de belastende waterstand geleidelijk werd verhoogd tot circa 3,2 m en aanvullende belasting werd aangebracht met watergevulde containers. Tijdens het bezwijkproces bleef de damwand functioneren als een fysieke drempel, waarmee het belang van constructieve elementen als reststerkte duidelijk werd aangetoond (Figuur 20). Dit is illustratief voor taai gedrag.



Figuur 20: Vervormde stalen damwand fungeert als drempel, Eemdijkproef (foto: POV Macrostabiliiteit).

De precieze informatie over aanwezigheid van constructieve elementen is opgenomen in de beheerregisters van waterschappen en is daardoor slechts beperkt publiek beschikbaar. Binnen deze studie wordt gebruikgemaakt van het Informatiemodel Water (IMWA), dat een momentopname (2018) bevat van constructieve elementen binnen Nederlandse waterkeringen. Deze dataset omvat onder andere damwanden, keerwanden, verankeringen, duikers en kwel- en stabiliteitsschermen, die niet-geharmoniseerd zijn vastgelegd als lijnelementen. De beschikbare data zijn echter heterogeen en onvolledig. Tabel 5 geeft een overzicht van het aantal geregistreerde constructies en de totale lengte per waterschap, waaruit blijkt dat de dekking sterk varieert.

Tabel 5: Constructies in dijken uit het Informatiemodel Water, snapshot uit 2018

| Waterschap | Aantal constructies | Lengte constructies in m |
|--------------------------------|----------------------------|---------------------------------|
| Rivierenland | 604 | 399.009 |
| Schieland en de Krimpenerwaard | 211 | 12.200 |
| Zuiderzeeland | 36 | 2.525 |
| Vallei & Veluwe | 3 | 3.851 |
| Delfland | 1 | 46 |

Er is een aanzet gemaakt tot het opschonen en harmoniseren van de dataset (Bijlage B), waaronder het corrigeren van geometrische inconsistenties en het selecteren van relevante attribuuvtelden. Deze stap is echter niet volledig doorgevoerd, aangezien in deze studie uitsluitend de ligging van constructieve elementen wordt gebruikt.

De damwanden van de vijf waterschappen zijn samengevoegd tot één feature class. In geen van de beschikbare datasets is informatie opgenomen over de boven- of onderkant van de damwand. Om deze leemte te overbruggen wordt als uitgangspunt gebruikt dat de damwanden tot net onder maaiveld reiken. Met maaiveld wordt hier bedoeld: de bovenzijde van het dijksprofiel ter plaatse van de damwand in het dwarsprofiel. Het gelijkstellen van de drempelhoogte en het maaiveld. De hoogte van het maaiveld wordt afgeleid uit het AHN4. Door de eerder bepaalde teenhoogte per 100 m strekking af te trekken van de maaiveldhoogte wordt een indicatie verkregen van de effectieve drempel boven maaiveld.

Deze benadering levert een eerste-orde schatting van de geometrische drempelhoogte van constructieve elementen ten opzichte van het maaiveld. Daarbij dient te worden opgemerkt dat deze maat geen directe representatie vormt van de hydraulische of mechanische werking van de constructie. De effectiviteit van een constructieve drempel wordt bepaald door de verhouding tussen constructiehoogte en optredende belasting, zijnde waterstanden en stijghoogtes. Een drempelhoogte ten opzichte van waterniveau kan in dat opzicht een meer fysisch relevante maat zijn. Binnen deze studie wordt echter gekozen voor een

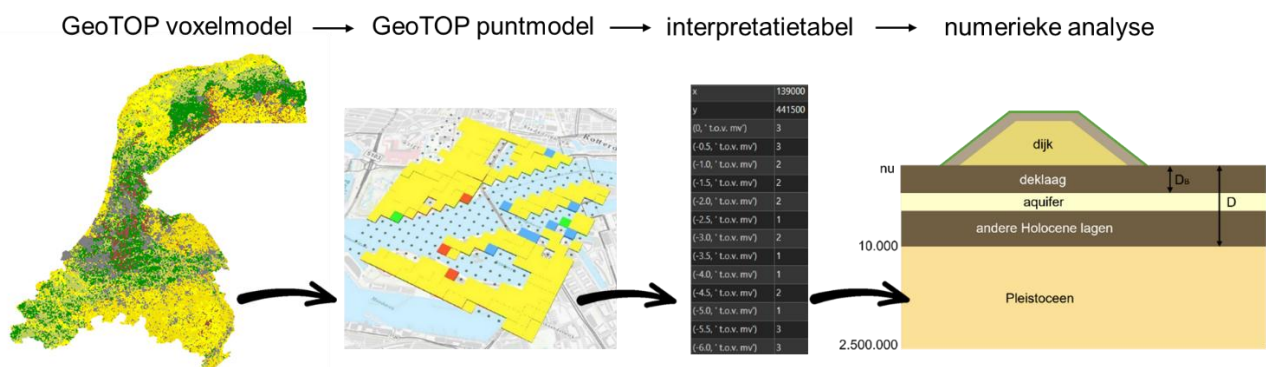
maaiveldreferentie, vanwege de consistente beschikbaarheid van hoogtegegevens en de wens om een landsdekkende en reproduceerbare analyse uit te voeren.

4.3 Component 3: ondergrond

Component 3 reconstrueert de ondergrondse eigenschappen onder dijken door lithologische voxelmodellen te vertalen naar puntdatasets die geschikt zijn voor ruimtelijke en geotechnische analyse. De bodemopbouw in de ondergrond wordt doorgaans weergegeven in driedimensionale lithologische modellen opgebouwd uit boringen en sonderingen. Deze modellen worden vaak gepubliceerd als voxelmodellen (bijv. GeoTOP, DK Model) of als volumetrische rasters (bijv. BGS LithoFrame, USGS Hydrogeological Framework). In veel landen worden dergelijke datasets beschikbaar gesteld door nationale geologische diensten. Ze reiken tot circa 30 - 50 m onder maaiveld. Hoewel deze volumetrische datasets voor iedere voxel lithologische informatie bevatten, bieden de meeste GIS-omgevingen slechts beperkte ondersteuning voor voxelgebaseerde analyse. Voor ruimtelijke integratie met de dijkgeometrie en constructie-informatie uit de voorgaande componenten wordt daarom een workflow toegepast waarin voxels worden getransformeerd naar punten.

Voor deze analyse wordt een specifiek Area of Interest (Aoi) gedefinieerd op basis van de dijkligging. In tegenstelling tot de Aoi's van component 1 en 2 wordt hierbij een ruimer analysegebied gehanteerd, omdat faalmechanismen, met name piping, zich niet beperken tot het dijklichaam zelf, maar zich uitstrekken tot in het voor- en achterland. Het Aoi wordt daarom gedefinieerd als een buffer van 300 m rondom de feature class **Normtrajecten**. Deze ruimere afbakening maakt het mogelijk om ook laterale ondergrondprocessen expliciet mee te nemen in de analyse. Binnen dit Aoi wordt het GeoTOP-ondergrondmodel benaderd in NetCDF-formaat via TNO's OPeNDAP Hyrax-service (TNO, 2025) en geconverteerd naar een puntdataset. Dit gebeurt door het extraheren van de centerpunten en lithologische attributen van individuele voxels. Deze conversie wordt uitgevoerd met behulp van een aangepaste Python-script, dat het driedimensionale voxelraster comprimeert tot diepte-gerefereerde puntobjecten. De workflow ondersteunt daarnaast het classificeren van lithologische klassen uit het voxelmodel naar de grondsoortinterpretaties die in component 2 worden gehanteerd, zodat consistente grondsoortklassen worden gebruikt voor zowel constructie als ondergrond. De resulterende puntdatasets (in .csv of .xyz formaat) kunnen als XY-puntdata in een GIS omgeving worden geïmporteerd, aan het juiste coördinatenreferentiesysteem worden gekoppeld en vervolgens ruimtelijk worden geanalyseerd met dijkgeometrieën uit Component 1.

Figuur 21 toont een voorbeeld van de resulterende puntdataset, inclusief een visualisatie waarbij de helft van de punten in het GeoTOP puntmodel als voxelcellen is weergegeven om hun volumetrische oorsprong te benadrukken (midden-links). De bijbehorende attributentabel (midden-rechts) illustreert het voordeel van een puntdatasetbenadering: lithologische informatie is opgeslagen als diepte-afhankelijke records, waarbij grondsoorten zijn georganiseerd in één attribuutkolom. Deze datastructuur maakt eenvoudige numerieke identificatie van watervoerende pakketten en laagdiktes mogelijk, en vormt daarmee een geschikt uitgangspunt voor analyses gericht op kwel-, piping- en andere ondergrondgerelateerde faalmechanismen.



Figuur 21: Workflow die de transformatie van GeoTOP voxelmodel naar puntmodel beschrijft

4.4 Risicokaarten

Taai gedrag heeft het grootste potentieel voor risicoreductie op locaties waar het risico van een dijkdoorbraak groot is. Hierbij wordt risico gedefinieerd als de vermenigvuldiging van de kans op een overstroming en de mogelijke gevolg daarvan. De risico's van overstromingen in Nederland zijn systematisch vastgelegd in het Landelijk Informatiesysteem Water en Overstromingen (LIWO), een nationaal informatiesysteem waarin onder meer gegevens over overstromingskansen, verwachte schade en slachtoffers worden samengebracht (WMCN, 2025).

In het kader van dit project is via Helpdesk Water een uitvraag gedaan naar alle LIWO-overstromingsscenario's voor primaire waterkeringen. In totaal zijn 5098 overstromingsscenario's aangeleverd in multiTIF-formaat, waarvan 1878 overstromingen van primaire keringen (aangeduid met Type B). Elke multiTIF bevat meerdere rasterbanden met overstromingsinformatie. Daarnaast is metadata per scenario beschikbaar gesteld, zowel geïntegreerd in de multiTIF-bestanden als afzonderlijk in het bestand *scenario_list.csv*. Deze CSV bevat metadata van alle binnen LIWO beschikbare scenario's. Scenario's die betrekking hebben op doorbraken van primaire waterkeringen worden geselecteerd door te filteren op het veld "Type overstroming"; doorbraken van primaire keringen zijn hierin aangeduid als type B. Het bestand bevat tevens ruimtelijke metadata, waaronder de X- en Y-coördinaten van de breslocaties, waardoor de scenario's direct in een GIS-omgeving kunnen worden ingelezen en geanalyseerd.

De aangeleverde data omvat momenteel onder meer:

- Scenario-ID en scenario-metadata
- X- en Y-coördinaten van de breslocatie
- Band 1: Waterdiepte
- Band 2: Stroomsnelheid
- Band 3: Stijgsnelheid
- Band 4: Schade (economisch)
- Band 5: Slachtoffers
- Band 6: Getroffenen
- Band 7: Aankomsttijd

De LIWO-scenario's zijn ruimtelijk gekoppeld aan de taaie dijkenkaart. Hierdoor kan per overstromingsscenario worden vastgesteld of de betreffende waterkering is geclassificeerd als broos, taai of zeer taai, op basis van de aanwezigheid en hoogte van erosiebestendige kleidrempels en damwanden (hierna: erosiebestendige drempels). Voor iedere potentiële doorbraaklocatie is binnen een vaste zoekstraal van 250 m de gemiddelde hoogte van nabij gelegen erosiebestendige drempels bepaald. Hiervoor zijn cirkelvormige **buffers** rondom de doorbraaklocaties gegenereerd. Binnen iedere buffer zijn alle beschikbare sonderingen geselecteerd en is per doorbraaklocatie de gemiddelde, minimale en maximale drempelhoogte berekend middels **spatial join**. De gemiddelde drempelhoogte binnen de buffer is vervolgens gebruikt als representatieve erosiebestendige drempelhoogte voor de betreffende potentiële breslocatie. Op basis van deze gemiddelde drempelhoogte zijn de LIWO-scenario's vervolgens ingedeeld in drie klassen van potentiële taaigheid:

- broos gedrag, met een gemiddelde drempelhoogte kleiner dan 1 m;
- taai gedrag, met een gemiddelde drempelhoogte tussen 1 en 3 m;
- zeer taai gedrag, met een gemiddelde drempelhoogte groter dan 3 m.

Vervolgens zijn de waterdieptes uit de overstromingsscenario's ruimtelijk gevisualiseerd per taaigheidsklasse. Hierbij zijn niet de absolute overstromingsdieptes vergeleken, maar de verschillen in ruimtelijke inundatie tussen de verschillende taaigheidsklassen. Door de overstromingsscenario's van broos, taai en zeer taai gedrag over elkaar heen te projecteren ontstaat inzicht in de mate waarin een hogere erosiebestendigheid leidt tot een afname van het overstroomde oppervlak.

5 RESULTATEN

In dit hoofdstuk worden de resultaten gepresenteerd van de landsdekkende, reproduceerbare inventarisatie van kenmerken die bijdragen aan potentieel taai gedrag in Nederlandse dijken. Deze kenmerken betreffen de hoogte van erosiebestendige drempels binnen het dijklichaam, afgeleid uit sonderingsdata, aangevuld met de aanwezigheid van constructieve elementen (met name damwanden) uit het IMWA. Beide worden in deze studie expliciet opgevat als erosiebestendige drempels die de overstroming vertragen en beperken. De combinatie van materiële opbouw en constructieve elementen vormt daarmee een indicator voor potentieel taai gedrag. Geometrie en andere factoren zijn in deze analyse niet meegenomen. De resultaten geven daarmee specifiek inzicht in de constructieve component van taai gedrag, en laten zien waar in Nederland dijken beschikken over materiële eigenschappen met een vertragende werking op bresgroei.

5.1 Landelijk beeld van potentieel taai gedrag

Op nationale schaal ontstaat een heterogeen beeld waarin duidelijke regionale verschillen zichtbaar zijn in de aanwezigheid en dikte van erosiebestendige drempels. De kaart in Figuur 22 toont de uitkomst van de inventarisatie van erosiebestendige drempels in de Nederlandse primaire dijken. De weergegeven punten representeren individuele sonderingen, waarbij de kleurcodering onderscheid maakt tussen locaties met en zonder significante drempel. Gele punten duiden op afwezigheid van een erosiebestendige drempel. Groene punten geven locaties aan waar een erosiebestendige drempel aanwezig is. Hoe donkerder groen, hoe hoger de drempel.

De kaart laat zien dat erosiebestendige drempels ruim verspreid voorkomen, maar zich duidelijk clusteren in specifieke regio's. Grote aaneengesloten trajecten met groene punten wijzen op trajecten waar de materiële opbouw van het dijklichaam consistent bijdraagt aan weerstand tegen erosie. Daartegenover staan trajecten met een overwegend geel patroon, waar dergelijke drempels schaars of afwezig zijn.

Belangrijk is dat deze resultaten een ondergrens representeren. Door veen- en leemachtige grondsoorten niet als erosiebestendig te classificeren, is de analyse bewust conservatief. Het landelijk beeld moet daarom worden geïnterpreteerd als een indicatie van aantoonbare drempels, en niet als een volledige representatie van alle mogelijke vormen van taaiheid.

Erosiebestendige drempels binnen primaire keringen in Nederland

Gebaseerd op de relatieve drempelhoogte ten opzichte van de laagste dijkteen.
Drempels zijn afgeleid uit informatie over kleikernen en constructieve elementen.



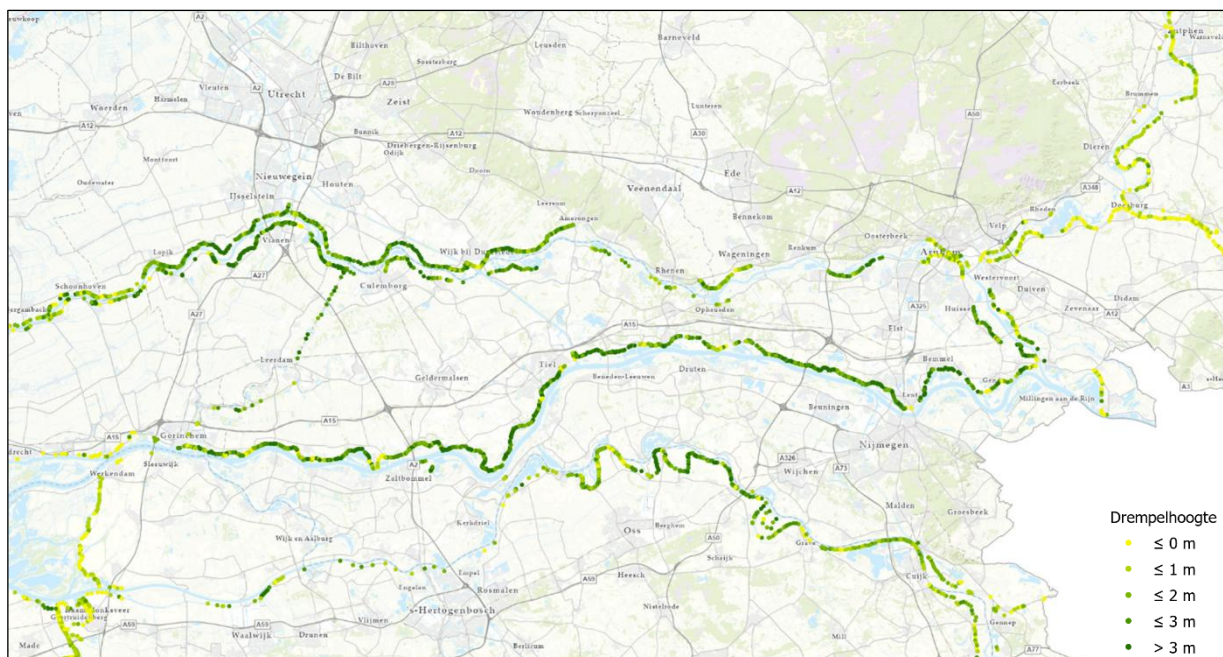
Figuur 22: Landsdekkende inventarisatie van erosiebestendige drempels in primaire waterkeringen.

In de volgende paragrafen wordt dit landelijke beeld verder toegelicht op regionale schaal.

5.2 Rivierengebied

In het midden-rivierengebied wordt een duidelijke concentratie van erosiebestendige drempels aangetroffen. De uitsnede in Figuur 25 laat een relatief continu patroon van groene punten zien, wat wijst op een consistente aanwezigheid van kleige of compacte lagen binnen het dijklichaam. Dit patroon hangt samen met zowel de ontstaansgeschiedenis van de dijken als de geologische opbouw van het rivierengebied. De dijken langs de Neder-Rijn en Waal zijn ontstaan door geleidelijke ophoging en versterking van bestaande keringen sinds de middeleeuwen. In deze iteratieve opbouw zijn oudere dijklichamen vaak niet volledig verwijderd, maar opgenomen in latere versterkingen. Hierdoor kunnen kleirijke materialen uit eerdere fasen behouden zijn gebleven in de kern van het dijklichaam. Daarnaast zijn dijken in het rivierengebied traditioneel opgebouwd met lokaal beschikbare rivierklei uit uiterwaarden, wat bijdraagt aan een relatief hoog aandeel erosiebestendig materiaal. Deze combinatie van historische opbouw en materiaalgebruik vergroot de kans op het voorkomen van interne, erosiebestendige zones binnen het dijklichaam, die kunnen functioneren als drempel voor bresgroei en daarmee bijdragen aan gevolgbeperving bij falen.

Langs de IJssel wordt daarentegen een overwegend patroon van gele punten waargenomen, wat wijst op een relatief beperkte aanwezigheid van dergelijke drempels. Dit verschil kan deels worden verklaard door de geologische context. Hoewel de IJssel het pleistocene zandlandschap van Oost-Nederland doorsnijdt, bestaat het directe rivierengebied langs de IJssel grotendeels uit holocene rivierafzettingen (WDOD, 2018) met een relatief hoger aandeel zandige pakketten dan langs de Waal en Neder-Rijn. Dit vertaalt zich in een groter aandeel erosiegevoelig materiaal in zowel ondergrond als dijkopbouw.

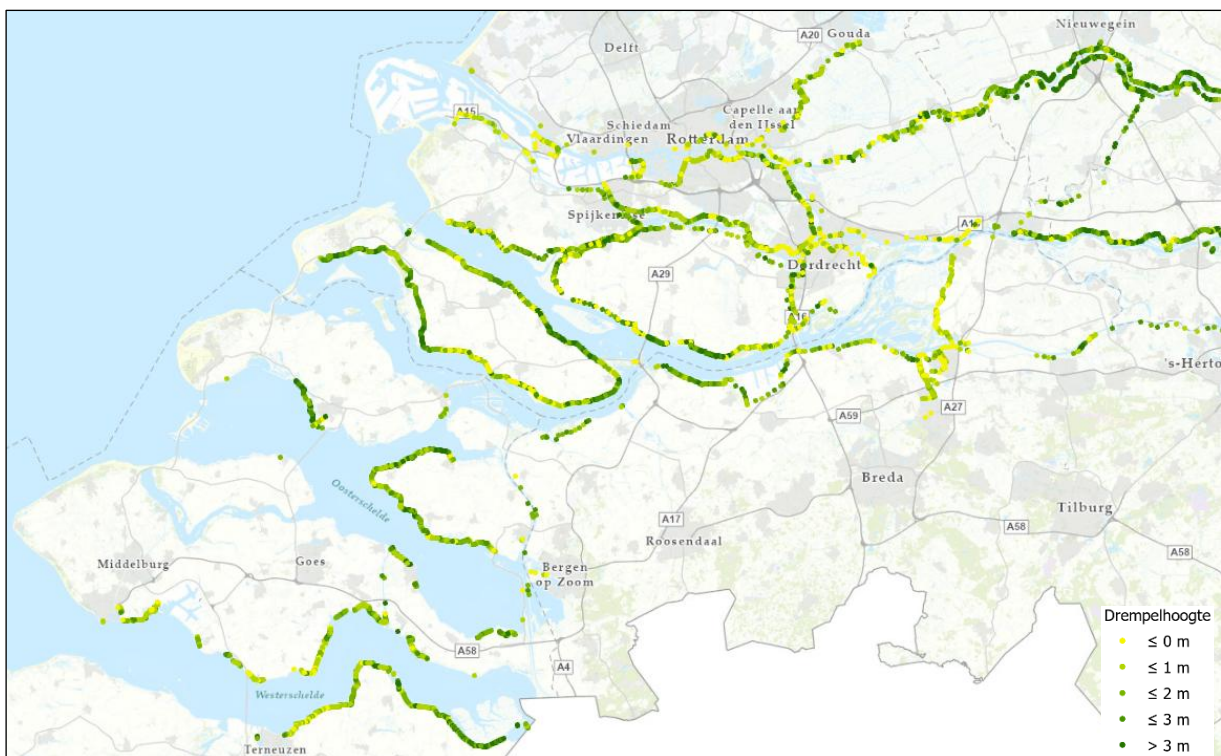


Figuur 23: Ruimtelijke verdeling van erosiebestendige drempels in het midden-rivierengebied

5.3 Zuidwestelijke delta

Ook in de Zuid-Hollandse delta en de Zeeuwse estuaria worden ruimschoots erosiebestendige drempels aangetroffen, zoals de uitsnede van Figuur 24 laat zien. Met name in Zeeland zijn lange trajecten zichtbaar met een relatief hoge dichtheid aan drempels. Dit patroon hangt nauw samen met de geologische en historische ontwikkeling van het deltagebied. De Zuidwestelijke delta wordt gekenmerkt door een afwisseling van getijdegeulen, slikken en schorren, waarin gedurende het Holoceen grootschalige sedimentatie van fijne klei- en slibfracties heeft plaatsgevonden (Vos, 2015). Deze mariene afzettingen vormden een natuurlijke en lokaal beschikbare bron van cohesief materiaal.

Dijken in Zeeland en Zuid-Holland zijn historisch grotendeels opgebouwd uit lokaal gewonnen klei, vaak direct afkomstig uit aangrenzende schorren, slikken of uitgravingen langs de dijk (Zeeuwse Ankers, 2023). In contrast vertonen overgangszones tussen rivier- en estuariumdynamiek, met name rondom de Biesbosch en de verstedelijkte gebieden rond Rotterdam en Dordrecht, een lagere dichtheid aan erosiebestendige drempels. Deze gebieden worden gekenmerkt door een heterogene sedimentaire opbouw, waarin zandige en kleiige pakketten elkaar afwisselen. Daarnaast speelt verstedelijking en infrastructurele aanpassingen van dijken mogelijk een rol in het gebruik van zand. Dit leidt tot een minder consistente materiële opbouw en daarmee tot een lagere en meer gefragmenteerde aanwezigheid van potentiële drempels.



Figuur 24 Ruimtelijke verdeling van erosiebestendige drempels in de Zuidwestelijke delta

5.4 Noord-Nederland

In Noord-Nederland is het beeld meer heterogeen, zoals te zien is in de Figuur 25. Langs delen van de Waddenzeekust, met name tussen het Lauwersmeer en de Eems-Dollard, is een relatief aaneengesloten patroon van drempels zichtbaar. In het traject tussen het Lauwersmeer en de Afsluitdijk is de aanwezigheid van erosiebestendig materiaal beduidend minder consistent. In het IJsselmeergebied en langs de riviersystemen richting Zwolle is het patroon uitgesproken gefragmenteerd. Hier wisselen trajecten met en zonder drempels elkaar frequent af, zonder duidelijke regionale samenhang. Dit wijst op een sterk variërende materiële opbouw van dijken, waarbij de aanwezigheid van erosiebestendige lagen lokaal bepaald lijkt te zijn.



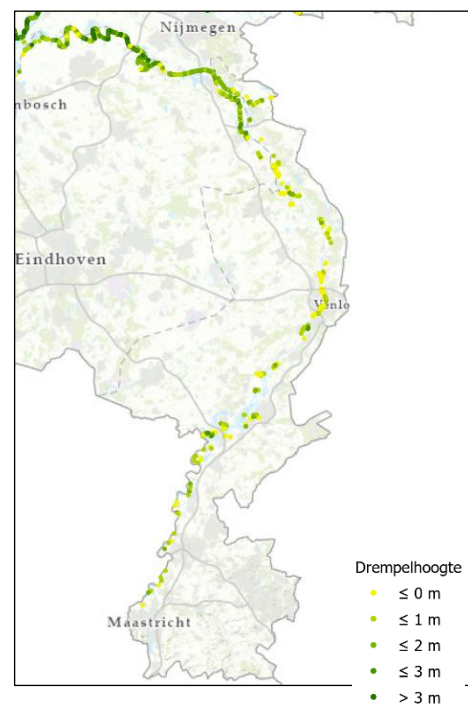
Figuur 25: Ruimtelijke verdeling van erosiebestendige drempels in Noord-Holland

5.5 Limburg

Langs de Maas in Limburg laat de uitsnede in Figuur 26 een overwegend geel en relatief gefragmenteerd patroon zien. Erosiebestendige drempels komen slechts sporadisch voor en beperkt tot geïsoleerde locaties. Dit wijst op een geringe en inconsistente aanwezigheid van erosiebestendig materiaal binnen het dijklichaam.

Veel trajecten in dit gebied bestaan uit zanddijken of bevatten slechts een dunne kleibekleding. Hierdoor ontbreekt in de meeste gevallen een significante interne drempel die de overstroming kan beperken. Waar wel groene punten voorkomen, betreft dit doorgaans lokale afwijkingen en geen structurele eigenschap van het traject.

De resultaten suggereren dat Maasdijken in Limburg, vanuit constructief oogpunt, beperkt intrinsieke weerstand bieden tegen snelle bresgroei. Dat is begrijpelijk want Limburg heeft een ondergrond van voornamelijk zand en grind. Daarmee onderscheidt deze regio zich duidelijk van gebieden met kleigronden. Potentieel taai gedrag lijkt hier geen systeemkenmerk, maar eerder een lokale uitzondering.



Figuur 26: Ruimtelijke verdeling van erosiebestendige drempels in Limburg

5.6 Interpretatie van potentieel taai gedrag

Op basis van bovenstaande inventarisatie van erosiebestendige drempels wordt een aanvullende interpretatie gegeven van potentieel taai gedrag. Hierbij wordt verondersteld dat de aanwezigheid en hoogte van erosiebestendige drempels, al dan niet in combinatie met constructieve elementen zoals damwanden, een vertragende werking kunnen hebben op erosieprocessen en daarmee op bresgroei. Potentieel taai gedrag wordt daarom benaderd als een afgeleide eigenschap van de constructieve opbouw van het dijklichaam. Dijken waarin zowel significante erosiebestendige drempels als aanvullende constructieve elementen aanwezig zijn, worden geïnterpreteerd als relatief taaier in het vertragen van bezwijkprocessen dan dijken waarin deze kenmerken ontbreken, bijvoorbeeld zanddijken met een kleikap. Hierbij wordt benadrukt dat deze interpretatie is gebaseerd op een conservatieve classificatie van materiaalgedrag, waarbij uitsluitend duidelijk erosiebestendige grondsoorten (i.e. klei) als zodanig zijn meegenomen.

Op basis van deze benadering wordt circa 580 km primaire kering geïnterpreteerd als potentieel taai en circa 530 km als potentieel zeer taai (Figuur 27 & Tabel 6). Dit duidt erop dat in een substantieel deel van het Nederlandse dijkareaal constructieve eigenschappen aanwezig zijn die kunnen bijdragen aan het vertragen van bresgroei. De ruimtelijke verdeling van deze eigenschappen is niet uniform. Met name het midden-rivierengebied, de estuaria en noord-oostelijke waddenzeedijken laten een hoge dichtheid aan erosiebestendige drempels zien, terwijl in het Maasgebied, langs de IJssel en in delen van het IJsselmeergebied dergelijke kenmerken minder frequent voorkomen.

Deze resultaten moeten worden geïnterpreteerd als een systematisch en landsdekkend beeld van constructieve eigenschappen die relevant zijn voor gevolgbeperking. Hoewel de analyse is gebaseerd op indirect afgeleide indicatoren en geen expliciete modellering van faalgedrag omvat, maakt zij voor het eerst op consistente wijze inzichtelijk waar in Nederland dijken beschikken over eigenschappen die potentieel bijdragen aan vertraagd bezwijken. Daarmee bieden de resultaten een waardevolle basis voor het gericht identificeren van kansrijke trajecten, het onderbouwen van vervolgonderzoek en het verder ontwikkelen van ontwerprichtingen waarin gevolgbeperking expliciet wordt meegenomen. In die zin vormt deze interpretatie een belangrijke stap richting een meer integraal begrip van dijkgedrag, waarin niet alleen het voorkomen van falen, maar ook het beheersen van falen centraal staat.

Tabel 6: Combinatie van erosiebestendige drempel- en damwandhoogtes.

| Damwandhoogte boven maaiveld [m] ↓ | Erosiebestendige kleidrempel boven maaiveld [m] | | | | | Legenda |
|---------------------------------------|---|------|-----|-----|-----|----------------------|
| | ≤ 0 | 0–1 | 1–2 | 2–3 | > 3 | |
| ≤ 0 | 706 | 1031 | 846 | 567 | 443 | Potentieel bros |
| 0–1 | 2 | 1 | 1 | 0 | 0 | Potentieel taai |
| 1–2 | 4 | 4 | 2 | 4 | 1 | Potentieel zeer taai |
| 2–3 | 2 | 2 | 2 | 1 | 4 | |
| > 3 | 15 | 16 | 15 | 15 | 16 | |
| Totaal | 3700 km | | | | | |

Classificatie van taai gedrag binnen primaire keringen in Nederland

Gebaseerd op de relatieve drempelhoogte ten opzichte van de laagste dijkteen.
Drempels zijn afgeleid uit informatie over kleikernen en constructieve elementen.



Figuur 27: De taaie dijkenkaart: een landsdekkende interpretatie van potentieel taai gedrag in primaire waterkeringen

5.7 Overlay van risicokaarten

Van 1878 LIWO-overstromingsscenario's voor primaire waterkeringen zijn 1147 scenario's ingedeeld in drie taaheidsklassen: bros gedrag bij een drempelhoogte < 1 m (n = 534), taai gedrag bij een drempelhoogte 1–3 m (n = 539) en zeer taai gedrag bij een drempelhoogte > 3 m (n = 74). Deze classificatie is gebaseerd op de gemiddelde hoogte van erosiebestendige drempels binnen een straal van 500 m rondom iedere LIWO doorbraaklocatie. Voor de overige 731 overstromingsscenario's kon geen klasse worden bepaald, omdat binnen de gehanteerde zoekstraal geen data over dijkopbouw beschikbaar waren. Dit hangt samen met het ontbreken van nabijgelegen kruinsonderingen. De gekozen zoekstraal van 500 m is gehanteerd om de classificatie te baseren op lokale kenmerken van de dijkopbouw. De gevoeligheid van de classificatie voor de gekozen 500 m straal verdient nader onderzoek. Hierbij kan bijvoorbeeld worden gekeken naar het middelen van drempelhoogtes over een deel van het dijktraject waar een doorbraaklocatie voor representatief is.

Error! Reference source not found. in Bijlage E toont de ruimtelijke spreiding van de geclassificeerde overstromingsscenario's binnen het studiegebied. In essentie is deze kaart gebaseerd op dezelfde ruimtelijke informatie als Figuur 27, maar dan met een focus op de LIWO-doorbraaklocaties, hier geclassificeerd op basis van de mate van taai gedrag van de omliggende waterkering. Waar Figuur 27 de ruimtelijke spreiding van erosiebestendige drempels weergeeft, laat Figuur 28 zien hoe deze informatie zich vertaalt naar potentiële overstromingsgebieden. De ruimtelijke patronen in de geclassificeerde overstromingsscenario's sluiten grotendeels aan bij de analyse uit het voorgaande hoofdstuk. Voor een inhoudelijke interpretatie van de ruimtelijke spreiding van de taaheidsklassen kan daarom worden teruggegrepen op de analyse in 5.1 tot 5.6.

De classificatie van overstromingsscenario's maakt het mogelijk om verschillen in overstromingsscenario's te relateren aan de erosiebestendigheid van de doorgebroken waterkering. Figuur 28 toont hiervoor de ruimtelijke spreiding van de overstromingsgebieden behorende bij alle bresse, alle taaie en alle zeer taaie doorbraaklocaties. De weergegeven waterdieptes zijn afkomstig uit LIWO. Echter, deze LIWO-scenario's bevatten geen modellering van taai bezwijkgedrag of beperkte bresgroei. Hierdoor wordt het potentiële effect van erosiebestendige drempels op de beperking van inundatie waarschijnlijk onderschat. Wanneer taai bezwijkgedrag of beperkte bresgroei expliciet zou worden meegenomen in de LIWO-overstromingsscenario's, wordt verwacht dat het inundatiegebied afneemt.

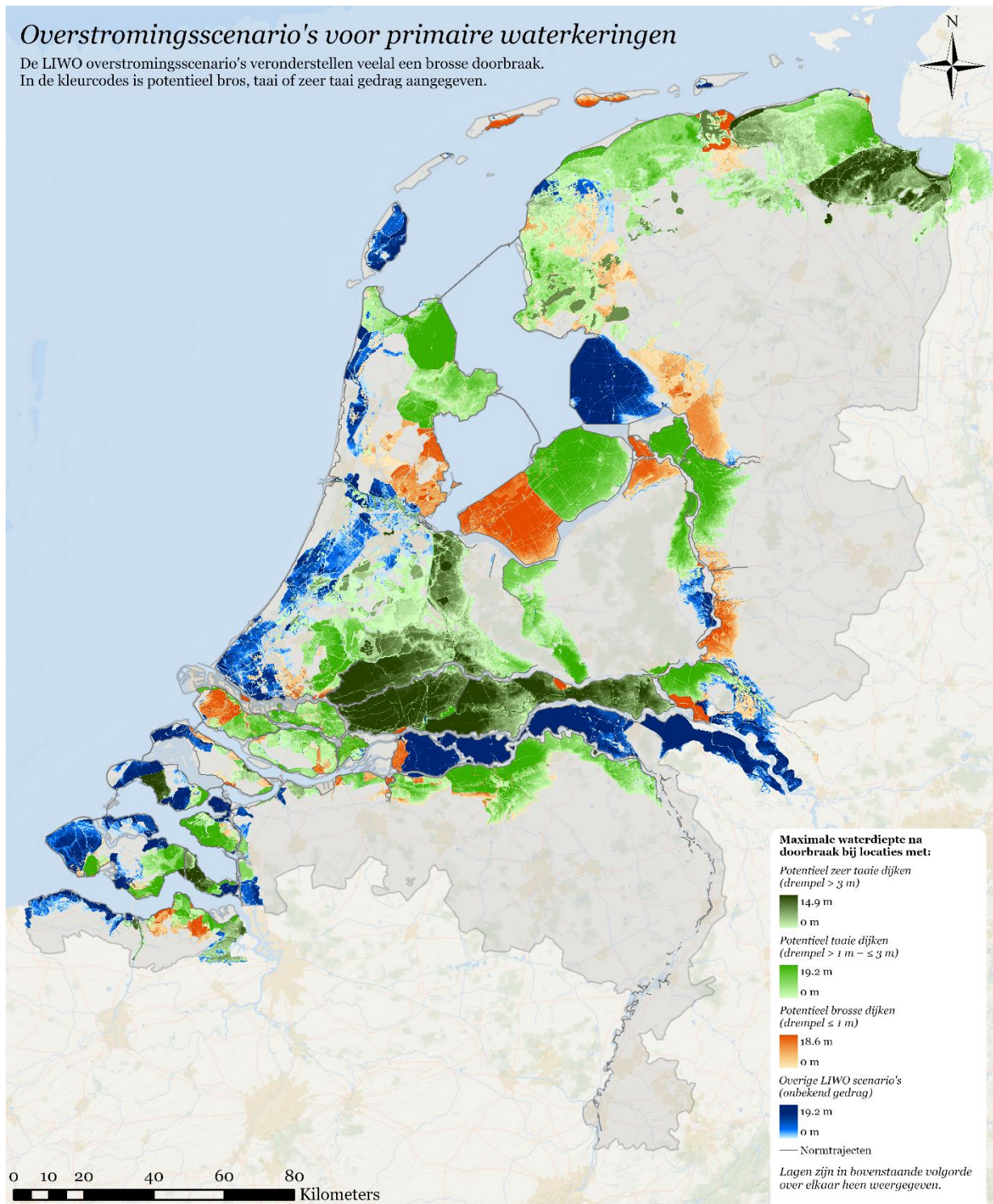
De resultaten moeten worden geïnterpreteerd als een eerste verkenning van de relatie tussen taai dijkgedrag en overstromingsrisico. De gebruikte LIWO-scenario's zijn gebaseerd op 'brosse' overstromingsscenario's en houden geen rekening met de invloed van erosiebestendige drempels op de ontwikkeling van de bres. Om de daadwerkelijke risicoreductie als gevolg van taai gedrag te kwantificeren zijn aanvullende hydraulische berekeningen noodzakelijk waarbij de invloed van erosiebestendige drempels expliciet wordt meegenomen in de modellering van het doorbraakproces.

Desondanks kan uit de beschikbare informatie al relevante conclusies worden getrokken. Uit de overlay blijkt dat de oranje inundatiegebieden samenhangen met overstromingsscenario's die zijn geclassificeerd als behorend bij bros gedrag, de lichtgroene als behorend bij taai gedrag en de donkergroene als behorend bij zeer taai gedrag. De omvang van het overstroomde gebied heeft een directe relatie met de gevolgen van een overstroming (*Rekenmethode, cases en stresstest*; Rapport No. 2026.176). Een groter inundatiegebied leidt in het algemeen tot hogere schade, getroffen en slachtoffers. Hoewel in deze studie geen nieuwe hydraulische doorbraakberekeningen zijn uitgevoerd, suggereren de resultaten dat erosiebestendige drempels een potentieel belangrijke bijdrage kunnen leveren aan de beperking van overstromingsoppervlak in grote gebieden en daarmee aan de reductie van overstromingsrisico's.

Met name in het centrale rivierengebied komen relatief veel overstromingsscenario's voor die zijn geclassificeerd als behorend bij potentieel zeer taaie dijken, wat samenhangt met de aanwezigheid van oude kleidijken (donkergroen in Figuur 28). Daarnaast worden in een veel groter gebied overstromingsscenario's beïnvloed door doorbraaklocaties die zijn geclassificeerd als potentieel taai (lichtgroen). Dit suggereert dat erosiebestendige drempels in grote delen van Nederland een relevante rol kunnen spelen bij het beperken van de gevolgen van overstromingen.

Overstromingsscenario's voor primaire waterkeringen

De LIWO overstromingsscenario's veronderstellen veelal een brosse doorbraak.
In de kleurcodes is potentieel bros, taai of zeer taai gedrag aangegeven.



Figuur 28: Overstromingsscenario's bij doorbraken in potentieel brosse, taai en zeer taai primaire waterkeringen

6 DISCUSSIE EN CONCLUSIES

6.1 Taai gedrag als fysisch kenmerk

Het vertrekpunt van deze studie is dat de aanwezigheid van erosiebestendige drempels in het dijklichaam een indicator zijn van potentieel taai gedrag van dijken. Deze drempels bestaan uit zowel materiële kleidrempels, als uit constructieve drempels zoals damwanden. Taai gedrag wordt daarmee benaderd als een fysisch en observeerbaar kenmerk van de dijk zelf. Deze benadering maakt het mogelijk om de indicator van taai gedrag te operationaliseren op basis van openbare data, en levert daarmee een concreet en schaalbaar alternatief voor meer lokale, modelmatige benaderingen.

Er zijn andere factoren die van invloed zijn op het (initiële) faalgedrag, zoals geometrie, ondergrond, hydraulische belasting of (na initieel falen) interacties tussen faalpaden. Het is een bewuste keuze om deze buiten beschouwing te laten, en om één component uit het risicopad expliciet zichtbaar te maken: de mate waarin het dijklichaam zelf weerstand biedt tegen bresgroei en zo de gevolgen van falen beperkt.

6.2 Ruimtelijke variatie en bepalende factoren

De resultaten laten zien dat erosiebestendige drempels geen uitzonderlijk verschijnsel zijn, maar op brede schaal voorkomen binnen het Nederlandse dijkenstelsel. Tegelijkertijd is de ruimtelijke verdeling ervan sterk heterogeen. Het patroon volgt in belangrijke mate de ontstaansgeschiedenis van de Nederlandse dijken.

In het rivierengebied en de estuaria, waar dijken historisch zijn opgebouwd uit talrijk aanwezig lokaal gewonnen klei, wordt relatief vaak erosiebestendig materiaal aangetroffen. Deze dijken beschikken veelal over historische kleikernen die bijdraagt aan vertraagd bresgroei gedrag. Daartegenover staan systemen waarin zandige materialen domineren, zoals langs de Maas en in delen van het IJsselgebied. In deze gebieden is de aanwezigheid van erosiebestendige drempels beperkter, waardoor de dijk kern intrinsiek minder weerstand biedt tegen erosie en het bresgroei gedrag naar verwachting sneller verloopt.

Naast deze materiaalverschillen spelen ook constructieve elementen een rol. Damwanden functioneren als niet-erodeerbare drempels en kunnen lokaal een bijdrage leveren aan taai gedrag. Hoewel deze elementen niet landsdekkend in de dataset voorkomen, laten zij zien dat taai gedrag ook constructief kan worden ingebracht in het ontwerp van een dijk.

De combinatie van deze factoren maakt duidelijk dat het Nederlandse dijkenstelsel kan worden opgevat als een mozaïek van trajecten met uiteenlopende eigenschappen. Sommige dijken beschikken over meerdere, elkaar versterkende drempels, terwijl andere dijken vrijwel volledig afhankelijk zijn van de deklaag. Taaiheid manifesteert zich daarmee niet als een uniforme eigenschap, maar als een resultaat van constructieve en historische context.

6.3 De rol van de ondergrond

Een belangrijke voorwaarde voor het taai gedrag in deze benadering is dat de ondergrond of aanvullende constructieve maatregelen zorgen voor stabiliteit. Dit faalgedrag van dijken niet expliciet is meegenomen. Hoewel erosiebestendige drempels binnen het dijklichaam de voortschrijdende erosie en daarmee bresgroei kunnen vertragen, is hun effectiviteit in sterke mate afhankelijk van de eigenschappen van de ondergrond. In situaties waarin de ondergrond bestaat uit slappe of erosiegevoelige lagen, kunnen faalmechanismen piping of macrostabiliteit dominant worden. Het bezwijkgedrag ontwikkelt zich in dergelijke gevallen grotendeels buiten het oude dijklichaam, waardoor de invloed van een erosiebestendige drempel in de dijk beperkt(er) kan zijn, doordat bijvoorbeeld de gehele oude kern verzakt of instabiel wordt.

Dit betekent dat de in deze studie geïdentificeerde drempels moeten worden geïnterpreteerd als een noodzakelijke, maar niet volledige voorwaarde voor potentieel taai gedrag. De aanwezigheid van een drempel is relevant wanneer deze onder overstromingsomstandigheden stabiel is.

De resultaten van deze studie geven inzicht in de potentiële bijdrage van het dijklichaam aan vertraagd bresgroeigedrag na falen, maar doen geen uitspraak over het integrale faalgedrag van dijken. Voor een meer complete beoordeling van taai gedrag, wordt voor vervolgonderzoek aanbevolen om deze resultaten te combineren met informatie over ondergrondopbouw, waarvoor een aanzet is gedaan in *component 3* en bijbehorende faalmechanismen.

6.4 Methodologische keuzes en datadekking

Een methodologisch uitgangspunt is dat op locaties waar geen sonderingsdata of informatie over constructieve elementen beschikbaar is, ook geen erosiebestendige drempel is vastgesteld. De analyse doet geen uitspraken over onbekende situaties. Afwezigheid van data wordt niet geïnterpreteerd als onzekerheid. Alleen aantoonbare drempels worden meegenomen. Het ruimtelijke beeld is daarmee geen interpolatie of schatting, maar een afspiegeling van beschikbare waarnemingen.

Tegelijkertijd blijft de analyse afhankelijk van de beschikbaarheid van sondeerdata. Sonderingen vormen een steekproef van de ondergrond en zijn ruimtelijk ongelijkmatig verdeeld, en ook constructieve elementen zijn niet volledig geregistreerd. Dit leidt opnieuw niet tot een grotere onzekerheid in de uitkomsten, maar tot een incompleet beeld, waarin alleen die drempels zichtbaar zijn die daadwerkelijk zijn aangetoond. Naarmate de datadekking toeneemt, zal dit beeld zich verder vullen en verfijnen.

6.5 Implicaties voor waterveiligheid

De resultaten impliceren dat bestaande dijken mogelijk al in aanzienlijke mate beschikken over eigenschappen die bijdragen aan taai gedrag, zonder dat deze expliciet worden meegenomen in huidige beoordelings- en ontwerpkaders.

De aanwezigheid van erosiebestendige drempels suggereert dat het faalgedrag van dijken in de praktijk minder abrupt kan zijn dan vaak wordt aangenomen. De werkelijke overstromingsvolumes en overstromingsdieptes zouden in dat geval lager kunnen zijn dan momenteel in het Landelijk Informatiesysteem Water en Overstromingen (LIWO) worden verondersteld. LIWO-data vormen een belangrijke basis voor de bepaling van overstromingsrisico's en hebben daarmee indirect bijgedragen aan de afleiding van de huidige normen voor waterveiligheid.

De analyse met de LIWO-overstromingsszenario's ondersteunt deze bevinding dat er mogelijk al veel dijken zijn met taai gedrag, omdat het oppervlak van overstromingsszenario's die zijn geclassificeerd als behorend bij een dijk met puur bros faalgedrag een kleiner inundatiegebied bestrijken (Figuur 35) dan scenario's die zijn gekoppeld aan dijken met taai of zeer taai gedrag (Figuur x en 36). Deze omvang van het overstroomde gebied en de bijbehorende waterdieptes zijn belangrijke bepalende factoren voor economische schade, getroffen en slachtoffers. Hoewel de gebruikte LIWO-szenario's geen expliciete modellering bevatten van taai bezwijkgedrag of beperkte bresgroei, kan de mate waarin het effect heeft hier niet op worden gebaseerd, maar het suggereert wel dat taai gedrag in een groot gebied relevant kan zijn voor de uiteindelijke gevolgen van een overstroming.

Wanneer taai bezwijkgedrag expliciet wordt meegenomen in toekomstige hydraulische modelleringen, ligt het daarom in de verwachting dat de berekende overstromingsrisico's op sommige locaties lager zullen uitvallen dan momenteel wordt aangenomen.

Samenvattend laat deze studie zien dat het 'vertaaien' van dijken niet uitsluitend een ontwerpogave is, maar in belangrijke mate het benutten van de bestaande materiële en constructieve opbouw van dijken bij de beoordeling en prioritering. De ruimtelijke variatie daarin weerspiegelt de historische ontwikkeling van het Nederlandse dijkenstelsel en de onderliggende geologische context. Door potentieel taai gedrag expliciet in kaart te brengen, ontstaat een aanvullend en fysisch onderbouwd perspectief op het gedrag van dijken na falen, dat kan bijdragen aan een meer genuanceerde benadering van waterveiligheid.

REFERENTIES

- Aquo. (2016, June 24). *Damo Objectenhandboek*.
<https://damo.hetwaterschapshuis.nl/DAMO%201.3/Objectenhandboek%20DAMO%201.3/HTML/DAMO%20Watersysteem%20Objectenhandboek.html?KenmerkendeProfiellijn.html>
- Deltares. (2022). *Waterveilige landschappen: Gebiedsgerichte ontwikkeling met meerwaarde*. Deltares.
<https://www.deltares.nl/expertise/onze-expertises/overstromingen/waterveilige-landschappen-gebiedsgerichte-ontwikkeling-met-meerwaarde>
- den Heijer, F. (2021). *Adaptive flood defence management with ductile dikes* (pp. 471–478).
<https://doi.org/10.1201/9780429343292-60>
- den Heijer, F., & Kok, M. (2024). Risk-based portfolio planning of dike reinforcements. *Reliability Engineering & System Safety*, 242, 109737. <https://doi.org/10.1016/j.res.2023.109737>
- 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*, 18(4), e70134.
<https://doi.org/10.1111/jfr3.70134>
- HWBP. (2019, November 20). *Kennis- en innovatieagenda Hoogwaterbeschermingsprogramma* [Webpagina]. Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat.
<https://www.hwbp.nl/documenten/2019/11/19/kennis--en-innovatieagenda>
- HWH. (2025, November 27). *Waterschappen Keringen IMWA | Data overheid*.
<https://data.overheid.nl/en/dataset/54478-waterschappen-keringen-imwa>
- Informatiehuis Water. (2026). *Waterveiligheidsportaal*. Waterveiligheidsportaal.
<https://waterveiligheidsportaal.nl/home>
- Kok, M., Jongejan, R., Nieuwjaar, M., & Tanczos, I. (2017). *Grondslagen voor hoogwaterbescherming*. Rijkswaterstaat. Rijkswaterstaat Publicatie Platform. <https://open.rijkswaterstaat.nl/open-overheid/onderzoeksrapporten/@113748/grondslagen-hoogwaterbescherming/>
- Nationaal Waterplan 2016-2021. (2016). *Nationaal Waterplan*. Ministerie van Infrastructuur en Milieu & Ministerie van Economische Zaken.
- Pleijster, E.-J. (2014). *Dijken van Nederland*. naiOIO uitgevers.
- Podt, M., Bron, C., den Heijer, F., & Rijke, J. S. (2026). *Building large-scale flood defence datasets with open data*. 10th International Conference on Flood Management.
- Ruimte voor de Rivier 2018-2026. (2026). *Ruimte voor de rivier* [Webpagina]. Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. <https://www.ruimtevoordrivier.nl>
- TNO. (2025, May 7). *OPeNDAP Hyrax*. TNO. <https://www.dinodata.nl/opendap/>
- verslag workshop 1. (2026, October 26). *Partnerbijeenkomst voor workshop 1*. Hogeschool van Arnhem en Nijmegen.
- verslag workshop 2. (2024, January 10). *Partnerbijeenkomst voor workshop 2*. Hogeschool van Arnhem en Nijmegen.
- verslag workshop 3. (2024, April 16). *Partnerbijeenkomst voor workshop 3*. Hogeschool van Arnhem en Nijmegen.
- Vos, P. C. (2015). *Origin of the Dutch coastal landscape. Long-term landscape evolution of the Netherlands during the Holocene, described and visualized in national, regional and local palaeogeographical map series*. Utrecht University. <http://hdl.handle.net/1874/315553>
- Wang, Z., & Müller, J.-C. (1998). Line Generalization Based on Analysis of Shape Characteristics. *Cartography and Geographic Information Systems*, 25(1), 3–15.
<https://doi.org/10.1559/152304098782441750>
- WDOD. (2018). *Het verhaal van de dijk tussen Zwolle en Olst*.
https://www.wdodelta.nl/_flysystem/media/magazine-over-de-ijsseldijk-januari-2018.pdf
- WMCN. (2025, October 30). *LIWO*. Rijkswaterstaat. <https://basisinformatie-overstromingen.nl/#/maps>
- WSRL. (2025, September 2). *Legger en Werkingsgebieden Waterkeringen Vastgesteld*.
<https://experience.arcgis.com/experience/ff9e6ee747524d3cbce7712338ad0e89>
- Zeeuwse Ankers. (2023, August 24). *Dijken. Zeeuwse Ankers*.
<https://www.zeeuwseankers.nl/verhaal/dijken>

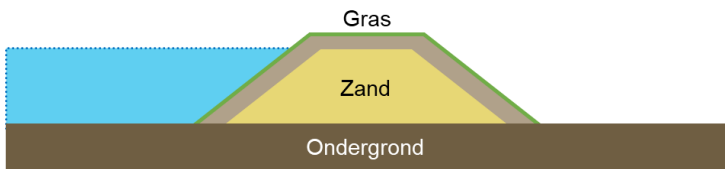
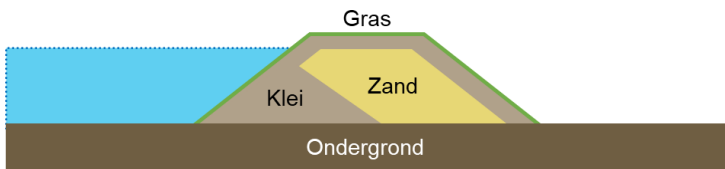
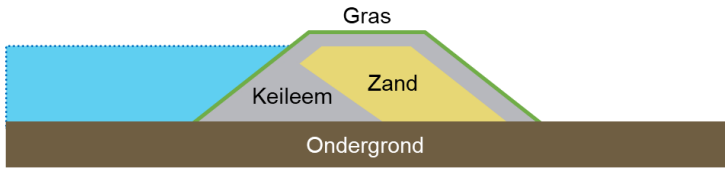
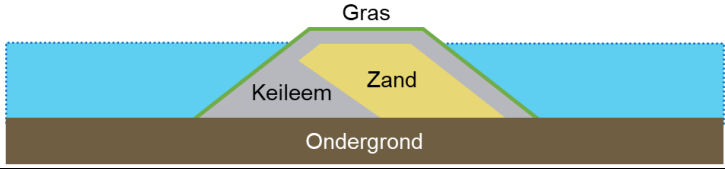
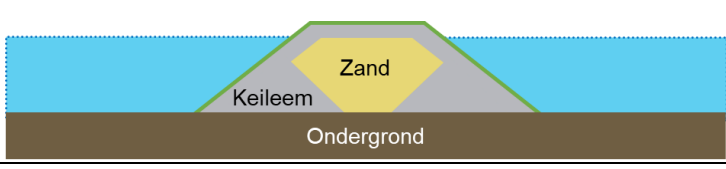
BIJLAGE A. EXERCITIE ARCHETYPEN

Van sommige dijken staan geotechnische dwarsprofielen op het Waterveiligheidsportaal. Deze zijn te categoriseren in een serie vooraf opgestelde archetypen.

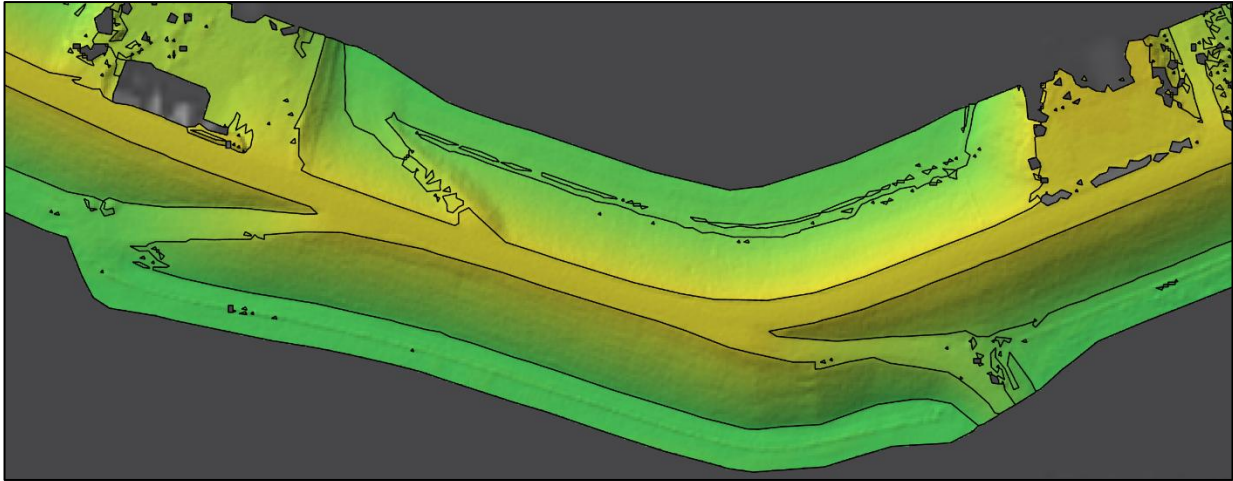
Aanpak archetypen:

1. Maak van de *Normtrajecten* feature class een kopie met de **Copy Features** tool. Noem de nieuwe feature class *Archetypen*.
2. Open de attribute table of data engineering van *Archetypen* en maak een nieuw veld aan genaamd Type, met data type Text.
3. Open de Symbology van *Archetypen* en onderscheidt op de unique values van Type.
4. Wijs nu voor elk dijktraject handmatig een archetype toe. Gebruik hiervoor een combinatie van gevonden/ontvangen geotechnische dijkprofielen, oude bouwtekeningen, ontwerprapportages, simpelweg een zoekopdracht naar de dijknaam, expert judgement en goed verstand.
5. In **Error! Reference source not found.** zijn een aantal archetypen opgesteld. Geef in het veld Type van feature class *Archetypen* de code (Z1, Z2, ...) die het beste bij de dijk past. In het geval van een unieke dijkconstructie die nog niet in Tabel 2 staat, maak dan een nieuwe code aan.

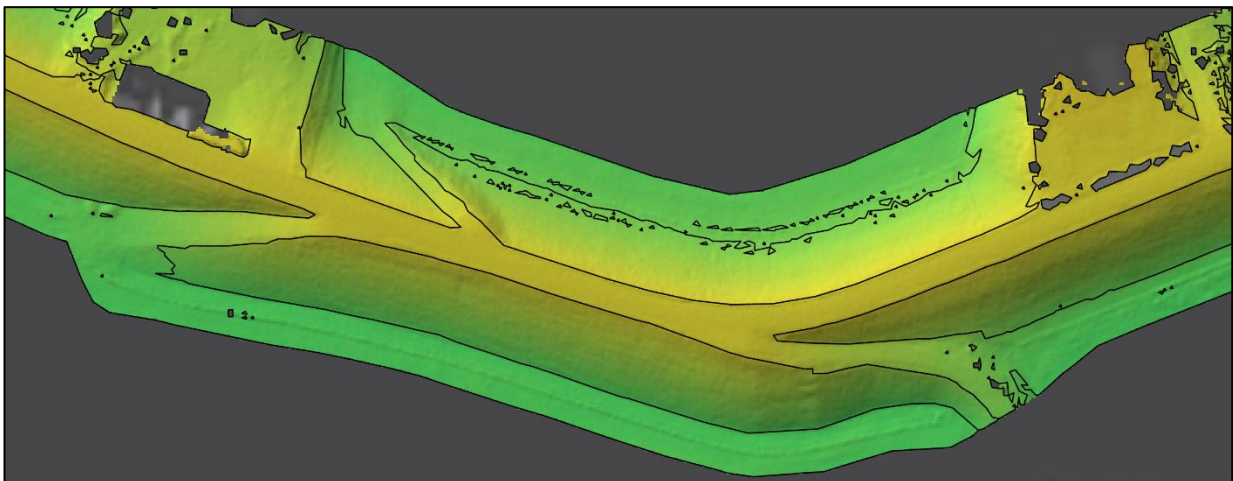
Tabel 7: Vooraf gedefinieerde dijkarchetypen

| Zanddijken | | |
|------------|------------------------------|--|
| Code | Omschrijving | Schematisatie |
| Z1 | Zanddijk |  |
| Z2 | Zanddijk met klei lichaam |  |
| Z3 | Zanddijk met keileem lichaam |  |
| Z4 | Zanddam met keileem lichaam |  |
| Z5 | Zanddam met keileem lichamen |  |

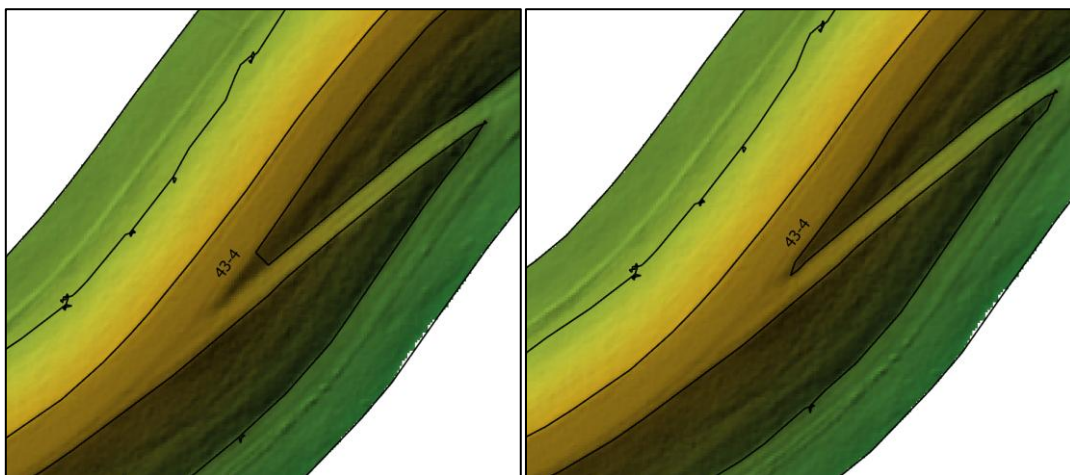
BIJLAGE B. EFFECT VAN BREAKPOINT



Figuur 29: Tweeklassen taludonderscheiding met breakpoint op 10 graden. De op- en afritten worden niet goed meegenomen, de teenlijnen wel.



Figuur 30: Tweeklassen taludonderscheiding met breakpoint op 12 graden. De op- en afritten worden wel goed meegenomen, de teenlijnen meer ruis



Figuur 31: 10 graden tolerantie (links) en 8 graden tolerantie (rechts)

BIJLAGE C. OPSCHONING CONSTRUCTIES

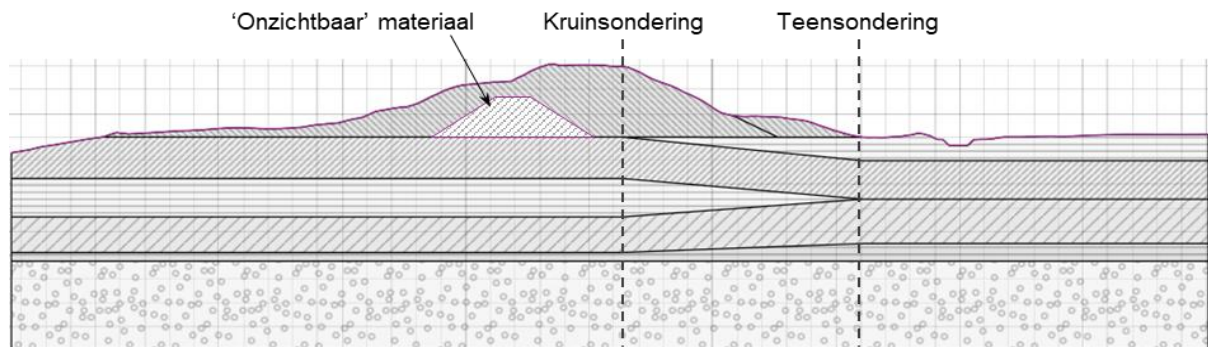
1. Het IMWA is een niet-geharmoniseerde verzameling van datasets van verschillende waterschappen. Dit betekent dat de feature classes van wandconstructies per waterschap zonder enige bewerking zijn samengevoegd via een **Spatial Join**. Open de attribute table van de IMWA feature class *Wandconstructies*, en zie de vele <Null> waarden en dubbelzinnige data fields.
2. Harmonisatie moet geautomatiseerd plaatsvinden. Hierdoor kunnen eventuele wijzigingen in de brondataset, bijv. door updates van IMWA, zonder veel extra handwerk worden doorgevoerd in de geharmoniseerde dataset. De ModelBuilder in ArcGIS Pro is hiervoor geschikt.
3. De ruwe dataset moet eerst worden gecontroleerd op verschillen en hiaten. Gebruik de **Table to Excel** tool om de attribute table van *Wandconstructies* te exporteren. Aan de hand van deze spreadsheet worden de kolommen één voor één langsgelopen.
4. In Tabel 8 staan de data fields die relevant zijn voor de atlas. Alle andere data fields worden als niet relevant beschouwd en kunnen worden verwijderd. Let op, het verwijderen gebeurt later via de ModelBuilder, niet handmatig.

Tabel 8: Relevante datavelden in ruwe data van feature class Wandconstructies

| Data field | Beschrijving | Actie |
|------------------|---|--|
| OBJECTID_1 | Unieke object ID per dataset | Niet aanpasbaar |
| GmIID | Unieke gemeente identificatie ID | Behouden |
| Naam | Beschrijving van constructie, toegepast door meeste waterschappen behalve ZZL | Samenvoegen met andere omschrijvende data fields |
| Materiaal | ZZL datafields met materiaalcodes. Enkele vermelding van Delfland. | |
| STATUSLEGGERWAT. | Geeft | Behouden |
| WS_TYPEWAND | Type wand | Behouden |
| CODE | Uit DAMO? | Behouden |
| WS_JAARVANAANLEG | Aanlegjaar van constructie, mogelijk relevant voor latere analyses. | Behouden en 9999 waarden naar <null> |
| Object | HHSK datafield voor type wandconstructie | Samenvoegen met andere omschrijvende data fields |
| Type_Object | HHSK datafield voor type wandconstructie | Samenvoegen met andere omschrijvende data fields |
| OPMERKING | Aanvullende beschrijving voor WV&V en Zuiderzeeland | Behouden |
| KWKDATUM | Vermoedelijk de aanlegdatum van constructies van Zuiderzeeland | Behouden |
| Omschrijving | Type wandconstructie Zuiderzeeland | Samenvoegen met andere omschrijvende data fields |
| Type_kering | Specifiek veld voor Zuiderzeeland | Behouden |

BIJLAGE D. ACHTERHALEN VAN BOUWJAAR

Vanouds worden dijken van klei gebouwd. Pas sinds grofweg 1970 werd zand geïntroduceerd als bouw materiaal, mede vanwege lagere aanlegkosten en de drainerende eigenschappen. Voor de atlas kunnen we daarom de vuistregel hanteren dat dijken van vóór 1970 van klei zijn, tenzij er specifieke redenen zijn om anders aan te nemen.



Figuur 32: Geotechnisch dwarsprofiel van de IJsseldijk (HHSK), opgebouwd uit een interpolatie van twee sonderingen

Aanpak bouwjaar < 1970:

1. De Rijkdienst voor het Cultureel Erfgoed heeft de dataset RCE-Dijkenkaart openbaar beschikbaar gesteld. Dit is een landelijke kartering van dijken en kaden in Nederland waarin ook een indicatieve ouderdom is aangegeven. Voeg deze feature layer toe aan de map.
2. De RCE-Dijkenkaart bevat ook regionale en verdwenen waterkeringen. De atlas beschouwd enkel primaire waterkeringen met waterkerende functie. Alle lijnen met een status anders dan 'waterkerend' dienen dus uit de dijkenkaart te worden verwijderd. Open de attribute table van *RCE-Dijkenkaart* en klik op select by attributes. Geef hier de expressie "Status" – is not equal to – "waterkerend" AND "Status" – is not equal to – "Waterkerend". Delete de selectie. Het overslaan van deze stap kan in een latere stap problemen geven bij de spatial join.
3. De informatie uit de waterkerende lijnen in de RCE-Dijkenkaart moet worden geëxtraheerd naar *Polygon_100m*. Gebruik **Spatial Join** met target feature *Polygon_100m* en join feature *RCE-Dijkenkaart*. Selecteer hierbij join one to one en de match option largest overlap. De spatial join resulteert in een nieuwe versie van de 100m polygonen feature class.
4. In het dijkenbestand wordt een indicatie gegeven van de ouderdom van het betreffende dijksegment. De exacte datering is vaak niet bekend, en veel keringen lijken vaak jonger dan ze daadwerkelijk zijn. Het attributenveld 'Aanleg_ind' geeft de ouderdomsindicatie.
5. Sommige velden in 'Aanleg_ind' bevatten nog ranges van jaartallen of teksten zoals 'voor' of 'na' een jaartal. Open de data engineering view van de nieuwe *Polygon_100m* en klik op add field. Dit wordt een veld voor de opgeschoonde jaartallen, dus noem deze *bouwjaar_ind* met field type Text. Maak op dezelfde wijze nog een veld aan genaamd *Bouw_periode*, eveneens in type Text.
6. Open de attribute table van *Polygon_100m*, selecteer de nieuwe kolom *bouwjaar_ind* en klik op calculate field. In de expression bar plak je de onderstaande Python line. Dit vult de kolom met nette, 4-digit jaartallen.

```
"join([char for char in !aanleg_ind! if char.isdigit()])[-4:] if !aanleg_ind! else None
```

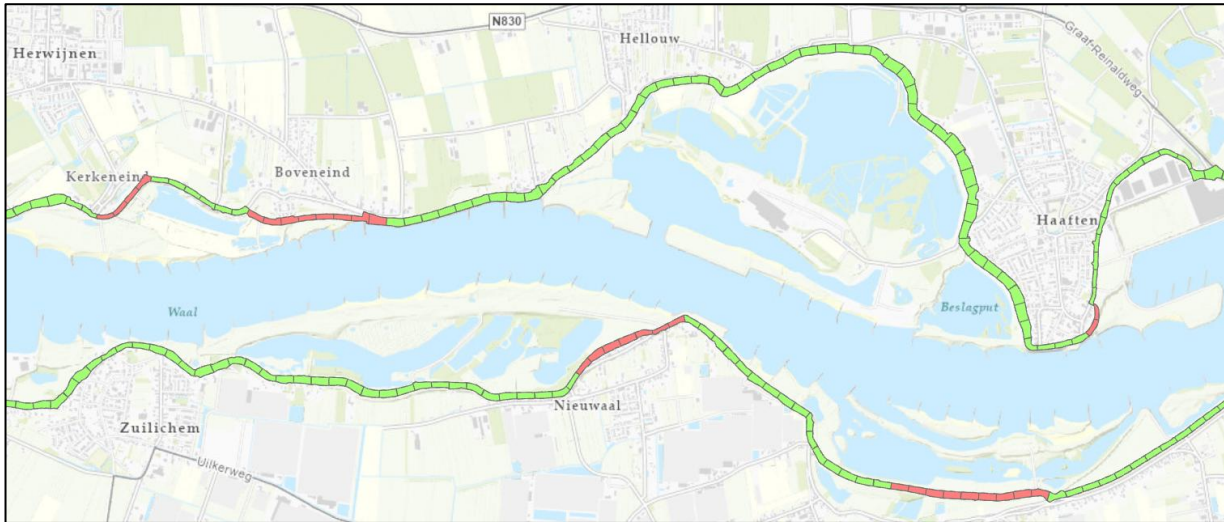
7. Selecteer nu de andere nieuwe kolom *Bouw_periode* en klik ook hier op calculate field. In de expression bar plak je de volgende Python line. Dit vertaalt de 4-digit jaartallen uit de vorige stap naar ofwel 'Voor 1970' dan wel 'Na 1970'. Polygonen waarvan geen jaartal bekend is, worden beschouwd als van na 1970. In de volgende stappen voeren we hierop een controle uit.

```
'Na 1970' if !bouwjaar_ind! is None or !bouwjaar_ind! == " or int(!bouwjaar_ind!) >= 1970 else 'Voor 1970'
```

8. Uit de controle blijkt dat 'Aanleg_ind' niet altijd is ingevuld, terwijl soms wel een range van begin tot einde aanleg bekend is. De huidige code moet dus

| | |
|------------|------|
| aanleg_beg | 1672 |
| aanleg_ein | 1700 |
| aanleg_ind | |

- aangevuld worden met IF-statement die controleert of `aanleg_beg` en `aanleg_ein` gegeven zijn.
9. Via de symbology van `Polygon_100m` kunnen nu simpelweg de unique values van Voor 1970 en Na 1970 worden gepresenteerd.

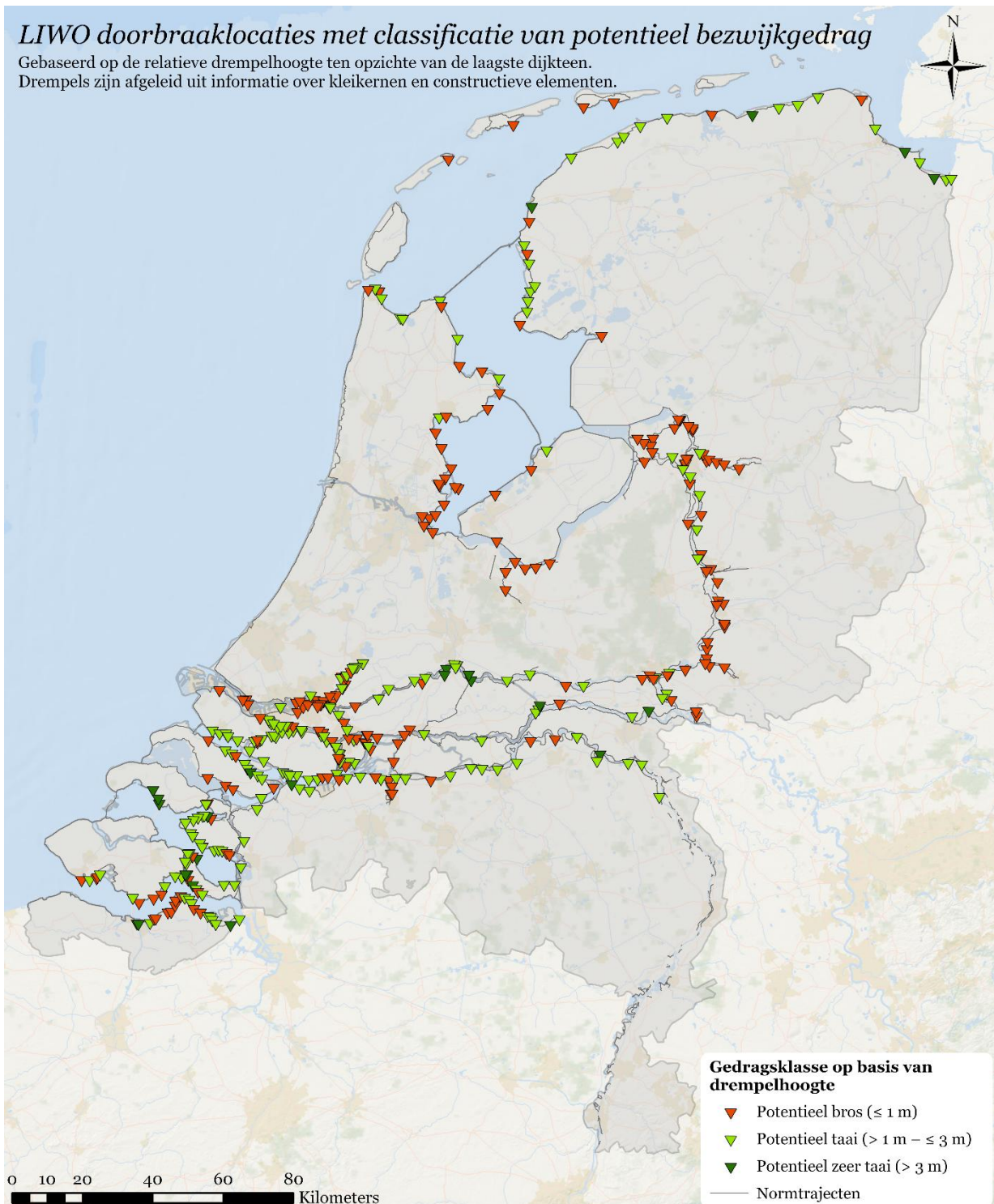


Figuur 33: Inventarisatie van dijken die vóór 1970 (groen) en ná 1970 (rood) voor het laatst zijn versterkt. Recent versterkte dijken hebben een grotere kans op zand in de dijk.

BIJLAGE E. DOORBRAAKLOCATIES MET TAAIHEIDSClassificatie

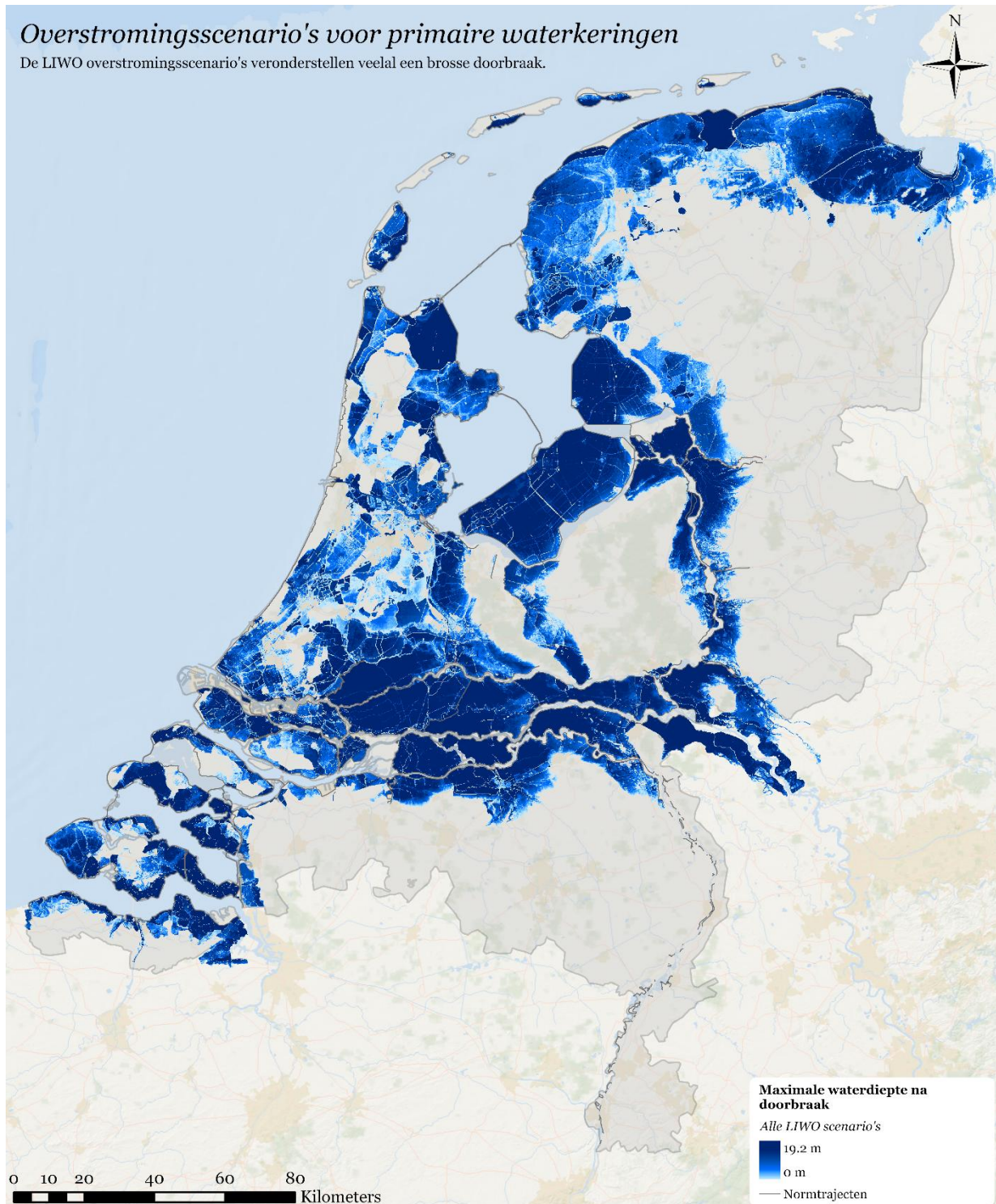
LIWO doorbraaklocaties met classificatie van potentieel bezwijkgedrag

Gebaseerd op de relatieve drempelhoogte ten opzichte van de laagste dijkteen.
Drempels zijn afgeleid uit informatie over kleikernen en constructieve elementen.

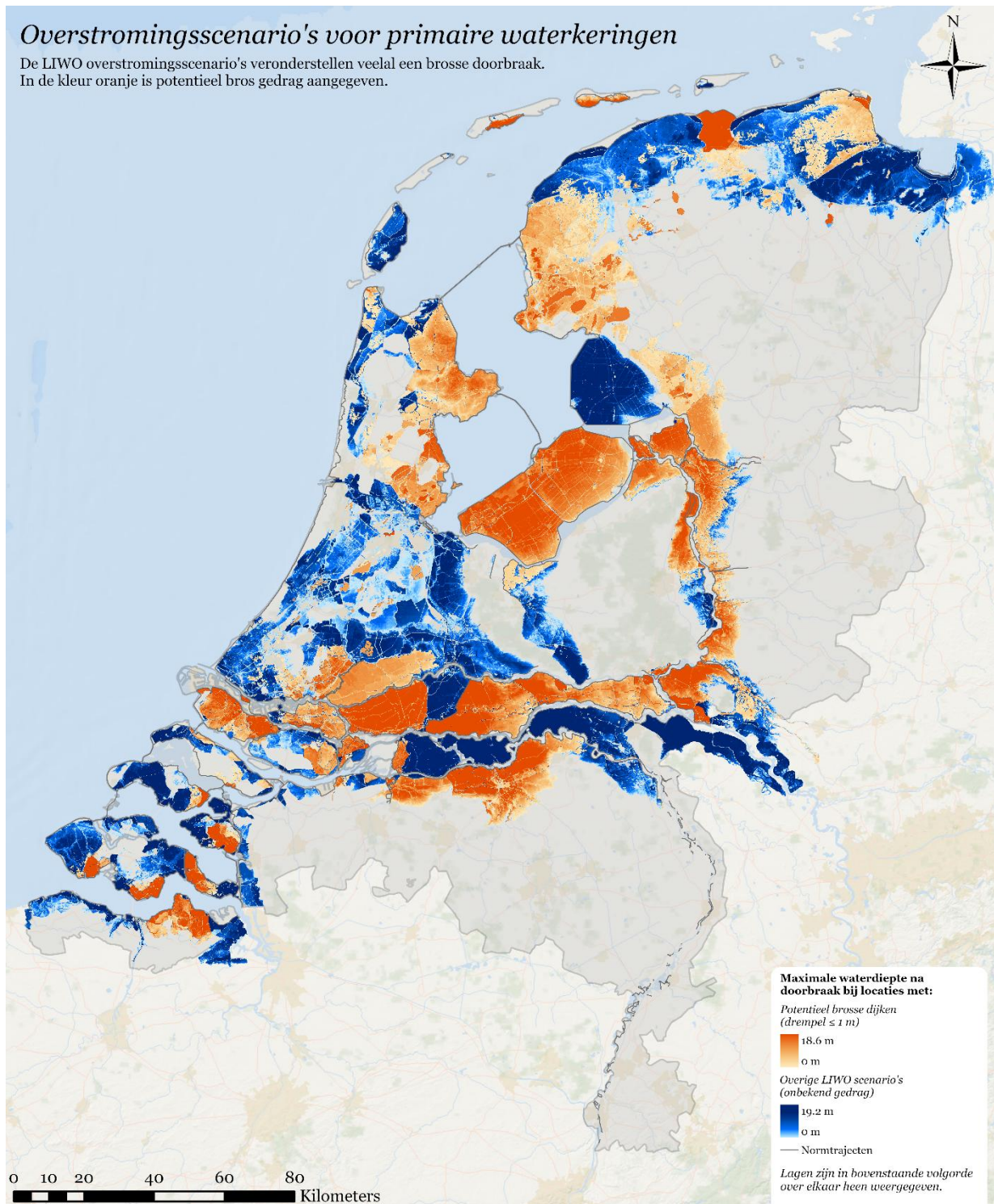


Figuur 34: LIWO doorbraaklocaties voorzien van een taaiklasse, op basis van erosiebestendige drempelhoogtes van kleidrempels en constructieve elementen

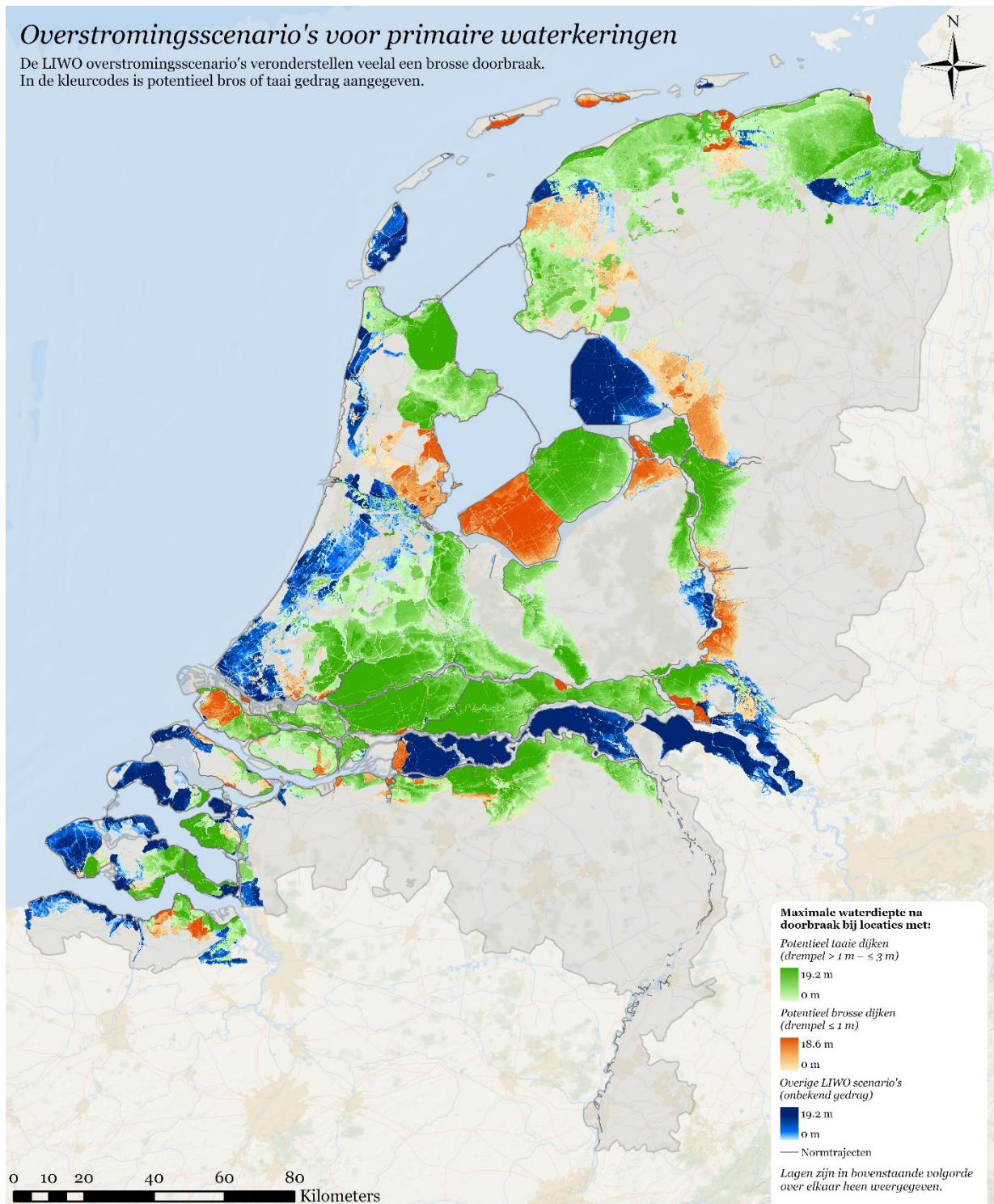
BIJLAGE F. RISICOKAARTEN



Figuur 35: Maximale waterdiepte behorend bij alle LIWO overstromingsscenario's bij doorbraken in primaire waterkeringen



Figuur 36: Overstromingsscenario's bij doorbraken in potentieel brossie primaire waterkeringen



Figuur 37: Overstromingsscenario's bij doorbraken in potentieel brosse en taai primaire waterkeringen

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