



Plan van Aanpak Digital Dike

Definitief



Rapport: *Plan van Aanpak Digital Dike*
Kenmerk: BZ276c DigiShape seed money digital dike
Datum: 10-7-2026
Status: Definitief
Opdrachtgever: Deltares/DigiShape

Auteur(s): ing. Hagemans K. (BZ Ingenieurs & Managers)
Ir. Smyrniou E. (Deltares)

Vrijgave: ing. W.S. Zomer MSc. (BZ Ingenieurs & Managers)

BZ Ingenieurs & Managers

Onderzoek, advies en begeleiding van projecten rond waterveiligheid en (stedelijk) waterbeheer

Zutphenseweg 51
7418 AH Deventer

info@bzim.nl
www.bzim.nl



Inhoud

1. Inleiding.....	1
1.1. Aanleiding	1
1.2. Probleemstelling	1
1.3. Doelstelling.....	2
1.4. Ambitie, wensen en eisen HHNK	3
1.5. Onderzoekshypothese	3
1.6. Ontwikkelingsdoelen voor junior onderzoekers	3
1.7. Leeswijzer.....	4
2. Aanpak en werkwijze	5
2.1. Activiteit 1 – Data/datasystemen inventariseren en verzamelen	5
2.1.1. Literatuuronderzoek naar bestaande Digital Twin-oplossingen.....	5
2.1.2. Inventariseren en verzamelen van data- en datasystemen.....	5
2.1.3. Vraagarticulatie om basis vast te stellen voor de ontwikkeling van een Digital Twin prototype	6
2.2. Activiteit 2 – Functionerend Digital Twin prototype ontwikkelen	7
2.3. Activiteit 3 – Verzamelde data/datasystemen ontsluiten in Digital Twin die voor D-stability en DAM toepasbaar zijn	8
2.4. Activiteit 4 – Met de Digital Twin data kunnen genereren/interpoleren van 2D-profielen.....	9
2.4.1. Genereren/interpoleren van 2D-profielen en het bepalen van interpolatiemethoden.....	9
2.4.2. Het kunnen onderbouwen van de gegenereerde/geïnterpoleerde 2D-profielen.....	10
2.5. Activiteit 5 – Proof of Concept bepalen	10
2.6. Activiteit 6 – Perspectiefschets op vervolg	11
3. Beoogd eindproduct.....	12

Bijlagen

1. Bijlage 1: DAM en DAM live
2. Bijlage 2: Subsurface Schematisation Advice (Memo)



1. Inleiding

1.1. Aanleiding

Nederland kent een omvangrijke opgave op het gebied van waterveiligheid. Dijken vormen een belangrijke schakel in de bescherming tegen overstromingen, maar een integraal beeld van de toestand van dijken ontbreekt vaak. Daarbij spelen veranderende omstandigheden een belangrijke rol, onder andere door klimaatverandering. Droge en natte perioden duren langer en zijn extremer. Data is nodig om de impact op dijken te bepalen en om het dijkbeheer efficiënt en effectief vorm te geven. Data uit grondonderzoek, inspecties en meet- en monitoringsnetwerken zijn veelal gefragmenteerd en moeilijk te combineren.

Om optimaal gebruik te kunnen maken van beschikbare data, is het van belang om de meerwaarde van digitale technologieën, zoals Digital Twins, te onderzoeken en benutten. Een Digital Dike, als digitale tweeling van een fysieke dijk, kan helpen om gegevens te integreren in een 4D-systeem, waardoor een compleet en actueel beeld ontstaat van de dijkconditie. Dit project, een seed money project binnen het platform DigiShape, richt zich op het opstellen van een **plan van aanpak** waarmee de basis wordt gelegd voor het (verder) ontwikkelen van een proof of concept van een digitale dijk/Digital dike. Hierbij is expliciet aandacht voor de dijkopbouw in de Digital Twin. Hiermee wordt een basis gelegd voor een groter vervolgproject, waarin verdere ontwikkeling en opschaling mogelijk worden gemaakt. Het resultaat van dit seed money project is een plan van aanpak die in **dit rapport** is uitgewerkt.

1.2. Probleemstelling

Binnen Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier (HHNK) is een Digital Twin ontwikkeld voor de proeftuin Purmer. Deze Digital Twin is onder andere gebaseerd op geofysische elektromagnetische (EM) metingen, grondonderzoek en lidarmetingen. EM is toegepast om een gedetailleerd en meer volumedekkend inzicht te verkrijgen in de opbouw van de ondergrond van de waterkeringen. Deze EM-metingen leveren een zeer hoge resolutie aan data op, waarmee variaties in bodemopbouw in beeld kunnen worden gebracht. Hoewel de hoge resolutie van de elektromagnetische (EM-)metingen in eerste instantie als een voordeel werd beschouwd, bleek de toepasbaarheid in de praktijk beperkt. Door de aanwezigheid van kabels en leidingen kon de opbouw van de dijk zelf niet betrouwbaar in kaart worden gebracht, waardoor de metingen zich voornamelijk beperkten tot het achterland. Daarnaast had de aanwezige saliniteit invloed op de elektromagnetische metingen, wat de interpretatie van de ondergrond verder bemoeilijkte. Het eindresultaat was een driedimensionaal voxel-model van het achterland, maar de nauwkeurigheid hiervan bleek onvoldoende om de ondergrondschematisering voor stabiliteitsberekeningen betrouwbaar vast te stellen.

De huidige Digital Twin slaagt er niet in om de beschikbare meetgegevens te vertalen naar een betrouwbare driedimensionale weergave van de dijkopbouw. Hoewel boringen en sonderingen lokaal inzicht bieden in de ondergrond, blijft het een uitdaging om deze puntmetingen om te zetten naar een consistente 3D-schematisatie. Met name tussen de meettraaien, in de langsrichting van de waterkering, ontbreekt voldoende informatie om de bodemopbouw met voldoende betrouwbaarheid vast te stellen. Hierdoor kunnen geen betrouwbare schematisaties van de dijkopbouw worden opgesteld. Dit leidt tot onzekerheden in de invoer voor

sterkteberekeningen, waardoor de uitkomsten van dergelijke analyses mogelijk als onbetrouwbaar kunnen worden beschouwd.

Daarnaast ontbreekt een gestandaardiseerde methodiek om gegevens uit grondonderzoek, zoals sonderingen en boringen, te verwerken tot een ondergrondmodel dat aansluit bij de eisen van dijksterkte-analyses. EM-metingen kunnen hierbij als aanvullende informatie dienen. Hierdoor is er sprake van interpretatieverschillen en een gebrek aan reproduceerbaarheid. Dit vergroot het risico op inconsistente beoordelingen van de dijksterkte.

Als gevolg van deze beperkingen is de bestaande Digital Twin van de proeftuin Purmer niet geschikt gebleken voor toepassing binnen dijksterkteberekeningen.

De kern van het probleem ligt in de ruimtelijke interpolatie en extrapolatie van puntwaarnemingen uit grondonderzoek, zoals sonderingen en boringen, naar een continu 3D- (of 4D-) model van de waterkering en de ondergrond. Het is daarbij lastig om een model te realiseren dat de benodigde nauwkeurigheid voor met name de dijkopbouw behoudt en geschikt is voor stabiliteitsanalyses. Daarnaast ontbreekt een robuuste en eenvoudig te actualiseren werkwijze om nieuwe meetgegevens consistent in het model te verwerken. Hierdoor is een digitale tweeling van de ondergrond en dijkopbouw in de huidige vorm niet praktisch toepasbaar. Elektromagnetische metingen spelen hierin slechts een beperkte en ondersteunende rol en vormen geen kern van de problematiek.

1.3. Doelstelling

Het doel van dit project is het verkennen van de meerwaarde van een methode voor het ontwikkelen van een (gedetailleerde) Digital Twin voor het beheer van dijken en de zorgplicht. Voor de uitwerking van dit doel worden de volgende onderdelen uitgewerkt:

- Het ontwikkelen van een methode voor een Digital Twin van een dijksegment, waarbij expliciet aandacht is voor de vertaling van beschikbare (grond)gegevens naar een consistente en bruikbare representatie van de dijkopbouw binnen de Digital Twin.
- Het uitbreiden en verrijken van een ontwikkeld Digital Twin met (ondergrond)gegevens, zodat deze geschikt wordt voor toepassing binnen dijkbeheer en stabiliteitsanalyses.
- Het toetsen van de bruikbaarheid van deze methode in de praktijk van een waterschap (HHNK) doormiddel van een casestudy, waarbij wordt onderzocht wat de methode oplevert en in hoeverre deze geschikt is voor toepassing in de praktijk.

De doelstelling in dit plan van aanpak wijkt af van de doelstelling uit het oorspronkelijke projectvoorstel, omdat in het projectvoorstel is opgenomen dat er eerst een plan van aanpak wordt opgesteld met als doel de planvorming voor de verdere uitwerking van de Digital Twin te beschrijven. Dit plan van aanpak vormt daarmee het beoogde eindproduct van het projectvoorstel. Om die reden wordt direct invulling gegeven aan de inhoudelijke doelstelling en uitwerking van de genoemde onderdelen.

1.4. Ambitie, wensen en eisen HHNK

De ambitie van HHNK is het opstellen van een methode om een 3D schematisatie van de ondergrond te maken vanuit bestaand grondonderzoek (boringen, sonderingen, etc.). Het uiteindelijke product moet geschikt zijn om op een willekeurige plek een 2D schematisatie te trekken die logisch aanvoelt, actualiseerbaar is én werkbaar is in D-stability en leidt tot een betrouwbare stabiliteitsanalyse die recht doet aan de complexiteit van de ondergrond.

Vanuit HHNK worden wensen en eisen gesteld aan de betrouwbaarheid en toepasbaarheid van de Digital Twin.

- Het Digital Twin model moet leiden tot reproduceerbare en transparante schematisaties die aansluiten bij de gangbare geotechnische werkwijze. Keuzes in data-analyse en modellering moeten daarbij goed onderbouwd en navolgbaar zijn.
- Ten aanzien van interpolatie van geotechnische parameters is HHNK terughoudend. Sterkte-eigenschappen van grondlagen worden beschouwd als materiaaleigenschappen die representatief zijn voor een gehele laag en worden bepaald op basis van laboratoriumproeven. Ruimtelijke interpolatie van deze parameters is daarom in principe niet wenselijk. Een uitzondering geldt voor toestandsparameters zoals POP/OCR, waarvoor interpolatie (bijvoorbeeld met Kriging) wel toepasbaar kan zijn.
- HHNK heeft de prioriteit gelegd bij het ontsluiten van bestaande statische data (zoals CPT's en boringen) als basis voor het Digital Twin prototype, omdat het goed moet aansluiten op onder andere D-Stability en DAM. Er kan hiervoor in een later stadium bepaald worden of dynamische data toegevoegd kan worden.

1.5. Onderzoekshypothese

Een 3D-model van een dijkstrekking, opgebouwd op basis van bestaand grondonderzoek, kan zodanig worden ontwikkeld dat hieruit op consistente en navolgbare wijze een 2D- of 3D-profiel kan worden afgeleid dat geschikt is voor toepassing in D-Stability zonder aanvullende handmatige verwerkingsstappen.

1.6. Ontwikkelingsdoelen voor junior onderzoekers

- Data integratie en databronnen begrijpen
 - Kunnen inventariseren, beoordelen en combineren van verschillende databronnen (sonderingen, boringen, sensordata, inspecties).
- 3D-modellering en Digital Twin concepten toepassen
 - Inzicht krijgen in hoe een fysieke dijk vertaald wordt naar een digitale representatie (geometrie + eigenschappen).
- Systematisch uitvoeren van casusonderzoek
 - Werken met een concreet dijksegment als praktijkcase.
- Analyseren en interpreteren van resultaten
 - Vertalen van concrete resultaten naar bruikbare inzichten voor HHNK als de eindgebruiker.

1.7. Leeswijzer

Dit Plan van Aanpak beschrijft de stappen die worden doorlopen om te komen tot een werkbare Digital Twin voor dijksterkteberekeningen en de onderbouwing daarvan. In hoofdstuk 2 wordt de aanpak en werkwijze uiteengezet aan de hand van zes opeenvolgende activiteiten. Activiteit 1 richt zich op het inventariseren en beoordelen van beschikbare data en datasystemen. In activiteit 2 wordt een functionerend Digital Twin prototype ontwikkeld. Activiteit 3 beschrijft hoe de verzamelde data wordt ontsloten en geïntegreerd in het prototype, zodat deze toepasbaar is binnen D-Stability. In activiteit 4 wordt ingegaan op het genereren en interpoleren van 2D-profielen en de onderbouwing daarvan. Activiteit 5 behandelt de validatie en toetsing van het prototype middels een Proof of Concept. Tot slot wordt in activiteit 6 een perspectief geschetst voor verdere ontwikkeling en opschaling.

In hoofdstuk 3 wordt het beoogde eindproduct van het project beschreven. Hoofdstuk 4 gaat in op de projectorganisatie en de rolverdeling tussen de betrokken partijen. Afsluitend geeft hoofdstuk 5 een overzicht van de planning van de verschillende activiteiten.

2. Aanpak en werkwijze

In dit hoofdstuk wordt de aanpak en werkwijze beschreven die wordt gevolgd om te komen tot een werkbare Digital Twin voor dijksterkteberekeningen. De werkwijze bestaat uit een stapsgewijze aanpak waarin de volgende activiteiten toegelicht worden:

- data/datasystemen verzamelen
- het ontwikkelen van een functionerend Digital Twin prototype
- de verzamelde data/datasystemen in het prototype Digital Twin ontsluiten zodat een export kan worden gegenereerd met de benodigde informatie voor toepassing binnen D-Stability en DAM,
- met de Digital Twin data kunnen interpoleren/genereren van 2D-profielen,
- Proof of Concept bepalen
- en tot slot een perspectief schetsen op een vervolg.

2.1. Activiteit 1 – Data/datasystemen inventariseren en verzamelen

2.1.1. Literatuuronderzoek naar bestaande Digital Twin-oplossingen

Voordat de benodigde data en datasystemen worden geïnventariseerd, wordt een literatuuronderzoek uitgevoerd naar bestaande Digital Twin-oplossingen voor dijken en ondergrondmodellering. Het doel van dit onderzoek is om inzicht te verkrijgen in de huidige stand van de techniek, bestaande methodieken en de functionele en technische eisen die aan een Digital Twin worden gesteld. Hierbij wordt gebruikgemaakt van wetenschappelijke literatuur, bestaande projecten, technische rapporten en eerdere onderzoeken.

Het literatuuronderzoek richt zich onder andere op de wijze waarop Digital Twins zijn opgebouwd, welke databronnen en datasystemen worden toegepast, hoe ondergrondgegevens worden geïntegreerd en welke methoden worden gebruikt voor het genereren van ondergrondschematisaties en 2D-profielen. Daarnaast wordt onderzocht welke randvoorwaarden en succesfactoren in eerdere projecten zijn geïdentificeerd en hoe deze kunnen worden toegepast binnen de beoogde Digital Twin voor HHNK.

De resultaten van het literatuuronderzoek vormen het inhoudelijke kader. Op basis hiervan wordt vastgesteld welke functionaliteiten het prototype moet bevatten en welke data en datasystemen noodzakelijk zijn om deze functionaliteiten te realiseren. Hiermee wordt de inventarisatie van data en datasystemen uit de volgende paragraaf onderbouwd en wordt voorkomen dat data wordt verzameld zonder een duidelijk beeld van de uiteindelijke toepassing. Het literatuuronderzoek vormt daarmee de basis voor de vraagarticulatie en de verdere ontwikkeling van het Digital Twin-prototype.

2.1.2. Inventariseren en verzamelen van data- en datasystemen

In deze activiteit wordt alle beschikbare, relevante data van de pilotlocatie geïnventariseerd en verzameld die nodig zijn voor het opbouwen van een werkbare Digital Twin. Naast het verzamelen van de data zelf, richt deze activiteit zich ook op het in kaart brengen van de gebruikte datasystemen en databronnen waarin deze informatie is opgeslagen. Hierbij wordt gekeken naar de toegankelijkheid, structuur, kwaliteit en consistentie van de data. Eventuele verschillen in formats, resoluties en interpretaties worden geïnventariseerd, evenals mogelijke

onzekerheden in de beschikbare datasets. Aan het einde van deze activiteit wordt in een vraagarticulatie beoordeeld of de geïnventariseerde data en datasystemen voldoende basis bieden voor de ontwikkeling van een prototype Digital Twin, op basis van criteria zoals datakwaliteit, ruimtelijke dekking, actualiteit en de mate waarin de data geschikt is voor het opstellen van een betrouwbaar 3D-ondergrondmodel.

Onderstaand is een eerste inventarisatie voor de beoogde **datatypen** en datasystemen opgesteld. Er is met HHNK vastgesteld welke datatypen en datasystemen in het Digital Twin prototype ontsloten dienen te worden. Hierbij heeft HHNK de prioriteit gelegd bij het ontsluiten van bestaande statische data (zoals CPT's en boringen) als basis voor het Digital Twin prototype.

Datatypen:

- AHN, voor het hoogteprofiel van de dijk en de omgeving van de dijk
- Lidar (drones), voor het hoogteprofiel van de dijk en de omgeving van de dijk
- Boringen + labonderzoek, puntdata voor informatie van de ondergrond
- CPT-sonderingen, puntdata voor informatie van de ondergrond
- Geofysica, zoals EM-metingen

Datasystemen:

- *D-Stability* wordt gebruikt om berekeningen uit te voeren voor de toetssporen binnenwaartse- en buitenwaartse stabiliteit van een dijk.
- Digital Twin aan laten sluiten op *DAM* (Dijksterkte Analyse Module). Hierbij worden de 2D-profielen die uit de Digital Twin geëxporteerd kunnen worden aangesloten op *DAM* om vervolgens dijksterkte-analyses te kunnen uitvoeren. In Bijlage 1: *DAM* en *DAM live* is een schematische weergave van *DAM*, *DAM live* en de fragility curves van *D-stability* weergegeven. Daarbij vormt de eerder genoemde data de input voor *DAM*.
- Mogelijke **toekomstige** aansluiting op *DAM live* door de toevoeging van **dynamische data**, zoals waterstanden en stijghoogten. Hierbij wordt de Digital Twin uitgebreid door dynamische data toe te voegen aan de 2D-profielen als een extra input voor *DAM live*. In Bijlage 1: *DAM* en *DAM live* is een schematische weergave van *DAM*, *DAM live* en de fragility curves van *D-stability* weergegeven. Daarbij vormen dynamische data, zoals GWS en BWS extra input voor *DAM live*.

2.1.3. Vraagarticulatie om basis vast te stellen voor de ontwikkeling van een Digital Twin prototype

In deze paragraaf wordt beoordeeld of de onderzochte literatuur en de geïnventariseerde data en datasystemen voldoende basis bieden voor de ontwikkeling van een prototype Digital Twin. Hierbij staat de vraag centraal of de beschikbare datasets, in termen van type, kwaliteit, dekking en toegankelijkheid, toereikend zijn om betrouwbare ondergrondmodellen en schematisaties op te stellen.

In deze vraagarticulatie wordt gekeken naar de aanwezigheid van databronnen (zoals CPT's en boringen), de mate van digitalisering en de onderlinge consistentie tussen de data. Daarnaast wordt beoordeeld of de ruimtelijke spreiding en dichtheid van de data voldoende zijn voor het genereren van een 3D model en daaruit representatieve 2D- of 3D-profielen en of de

geschiktheid van de data voor integratie in een Digital Twin-omgeving, met de mogelijkheid tot uitbreiding naar een 4D-model.

Indien blijkt dat de gekozen methode onvoldoende in staat is om de beschikbare data te vertalen naar een bruikbaar model, wordt inzichtelijk gemaakt waar de belangrijkste onzekerheden liggen en welke aanvullende bewerkingen of methodische verbeteringen nodig zijn. Het resultaat van deze stap is een onderbouwde conclusie over de geschiktheid van de beschikbare data en datasystemen, inclusief een advies over eventueel aanvullend onderzoek om tot een betere dataset te komen en zo tot een werkbaar prototype van de Digital Twin te komen.

2.2. Activiteit 2 – Functionerend Digital Twin prototype ontwikkelen

De ontwikkeling van het Digital Twin-prototype volgt een gefaseerde en iteratieve werkwijze. Hierbij wordt eerst onderzocht of de beschikbare data en systemen voldoende basis bieden voor de opzetten van een betrouwbaar en reproduceerbaar 3D-model van de kering en ondergrond. Pas wanneer deze basis is aangetoond, wordt het prototype verder uitgebreid met functionaliteiten voor dataontsluiting, visualisatie en integratie met andere systemen.

De eerste stap binnen deze activiteit is het vaststellen van een methode voor het opbouwen van een 3D-model van de kering en ondergrond. Hierbij wordt onderzocht welke bestaande modellen, databronnen en methodieken reeds beschikbaar zijn en in hoeverre deze geschikt zijn voor toepassing binnen een Digital Twin. Er wordt beoordeeld hoe beschikbare gegevens, zoals CPT's, boringen, geofysische metingen, AHN-gegevens en lidar-data, kunnen worden vertaald naar een consistente en navolgbare 3D-schematisatie van de kering en ondergrond. Daarnaast wordt vastgesteld welke eisen worden gesteld aan nauwkeurigheid, reproduceerbaarheid en actualiseerbaarheid van het model, zodat het model in een later stadium bruikbaar is voor toepassing binnen D-stability en DAM.

Vervolgens wordt een kleinschalige Proof of Concept (PoC) uitgevoerd waarin de gekozen modelleringsaanpak wordt toegepast op een beperkt deel van de pilotlocatie. Het doel van deze stap is om te toetsen of de beschikbare gegevens daadwerkelijk kunnen worden omgezet naar een bruikbaar en onderhoudbaar 3D-model van de kering en ondergrond. Tevens wordt onderzocht in hoeverre nieuwe gegevens eenvoudig aan het model kunnen worden toegevoegd en welke onzekerheden of beperkingen hierbij optreden. De resultaten van deze Proof of Concept vormen de basis voor de verdere ontwikkeling van het Digital Twin-prototype.

Na afronding van de Proof of Concept wordt beoordeeld of verdere ontwikkeling van het Digital Twin-prototype voldoende perspectief biedt.

Na een positieve beoordeling wordt het conceptuele kader en de doelarchitectuur van het Digital Twin-prototype vastgesteld. Hierbij worden de scope, functionaliteiten en technische randvoorwaarden bepaald. Ook wordt onderzocht welke bestaande oplossingen kunnen worden hergebruikt en welke technische architectuur het beste aansluit bij de behoeften van HHNK. Daarbij wordt een afweging gemaakt tussen open-source en commerciële technologieën, waarbij aspecten zoals transparantie, beheerbaarheid, uitbreidbaarheid en toekomstige opschaalbaarheid worden meegenomen. Tevens wordt rekening gehouden met mogelijke integratie met bestaande data- en informatieplatformen van HHNK.

Vervolgens wordt de technische inrichting van het prototype uitgewerkt. Hierbij worden de datastructuur en dataontsluiting ingericht, zodat gegevens op een consistente en navolgbare wijze kunnen worden opgeslagen, beheerd en geraadpleegd. Daarnaast wordt een eenvoudige viewer ontwikkeld waarmee de beschikbare data en de opbouw van het 3D-model kunnen worden gevisualiseerd en gecontroleerd. Deze omgeving dient primair om de werking van het prototype en de samenhang tussen modellering, data en visualisatie te valideren.

Het resultaat van deze activiteit is een gevalideerd Digital Twin-prototype met een eerste 3D-representatie van de kering en ondergrond. Dit prototype vormt de basis voor de verdere ontsluiting van data, het genereren van profielen en de toepassing binnen D-stability en DAM.

2.3. Activiteit 3 – Verzamelde data/datasystemen ontsluiten in Digital Twin die voor D-stability en DAM toepasbaar zijn

In deze activiteit wordt de verzamelde data vertaald en geïntegreerd in het Digital Twin prototype die geschikt is om een export te genereren met de benodigde informatie voor toepassing binnen D-stability en DAM. De focus ligt hierbij op het ontsluiten, structureren en harmoniseren van verschillende databronnen, zodat deze op een consistente en bruikbare manier kunnen worden toegepast binnen het model.

Allereerst wordt bepaald hoe de verschillende datasets (zoals sonderingen, boringen en overige ondergrondinformatie) technisch kunnen worden ingelezen en gekoppeld binnen het Digital Twin prototype. Hierbij wordt aandacht besteed aan datastandaarden, bestandsformaten en de onderlinge samenhang tussen datasets. Hierbij is het mogelijk dat ondergrondinformatie alleen in een rapport wordt beschreven. In dit geval zou bepaald kunnen worden of AI gebruikt kan worden om deze informatie in een ander bestandsformat te krijgen, waardoor de informatie beter ingezet en ontsloten kan worden.

Vervolgens wordt een vertaalslag gemaakt van ruwe data naar een gestructureerde modelrepresentatie. Dit houdt in dat de beschikbare informatie wordt omgezet naar een eenduidige en logisch opgebouwde ondergrondschematisatie die aansluit bij de gestelde kwaliteitseisen, met een passend detailniveau voor toepassing in stabiliteitsanalyses binnen D-stability en DAM. Hierbij gaat het met name om het vertalen van puntwaarnemingen naar een 3D-model dat recht doet aan de heterogeniteit van de ondergrond en voldoende representatief is voor gebruik in berekeningen. Daarnaast is een geotechnische beoordeling door het geotechnisch team van HHNK noodzakelijk om de werking van de aanpak te valideren, onder andere door te toetsen of de resultaten vergelijkbaar zijn met de huidige werkwijze en geschikt als input voor stabiliteitsanalyses.

Daarnaast wordt binnen deze activiteit aandacht besteed aan de inrichting van de datastructuur binnen de Digital Twin. Hierbij wordt vastgelegd hoe data wordt opgeslagen, beheerd en geraadpleegd, zodat het model transparant, reproduceerbaar en toekomstbestendig is. Ook wordt gekeken naar de mogelijkheden om updates of aanvullingen van data eenvoudig door te voeren.

Het resultaat van deze activiteit is een werkend Digital Twin prototype waarin de verzamelde data op een gestructureerde en consistente manier is ontsloten en die geschikt is voor verdere verwerking en goed een export kan gegenereerd met informatie voor toepassing binnen D-stability en DAM-analyses.

2.4. Activiteit 4 – Met de Digital Twin data kunnen genereren/interpoleren van 2D-profielen

2.4.1. Genereren/interpoleren van 2D-profielen en het bepalen van interpolatiemethoden

In deze activiteit wordt op basis van de ontsloten data in de Digital Twin een 3D-model van de dijk en ondergrond opgebouwd, waaruit afhankelijk van het beoogde rekenmodel en de toepassing representatieve 2D- of 3D-representaties kunnen worden geëxtraheerd.

Het doel is om vanuit beschikbare puntdata (zoals CPT's en boringen) en aanvullende databronnen te komen tot consistente, interpreteerbare en voor D-Stability en DAM toepasbare doorsneden van de ondergrond. Hierbij wordt gebruikgemaakt van richtlijnen en aanbevolen methoden zoals beschreven in Bijlage 2: Subsurface Schematisation Advice (Memo), waarin per datasituatie geschikte interpolatietechnieken zijn vastgesteld.

De keuze voor een interpolatiemethode is afhankelijk van de beschikbare data, de ruimtelijke spreiding en de complexiteit van de ondergrond.

op basis van onderstaande Tabel 1 uit bijlage 2 worden de volgende situaties en bijbehorende methoden gehanteerd:

Situatie	Aanbevolen methode(n)	Toelichting
Alleen CPT-data beschikbaar	Diepte-afhankelijke interpolatie of gewogen volledig signaal	Stabiele, goed interpreteerbare en beproefde methoden
Veel heterogene datasets	Datafusie, geomorfologie + CPT's	Integreert alle beschikbare data
Weinig gestructureerde data, maar veel rapporten	Soft data AI-workflow	Vult datagaten op met informatie uit grijze literatuur
Behoeftte aan snelle generatie + onzekerheidskaarten	SchemaGAN	Snelle, probabilistische machine learning interpolatie

Tabel 1: Aanbevolen interpolatie methoden/modellen

Om tot de juiste keuze van methode en toepassing te komen, wordt een stapsgewijze aanpak gevolgd:

1. Inventarisatie van alle beschikbare, relevante datasets

De resultaten van deze stap worden in **activiteit 1 en 3** al bepaald.

2. Ontwikkelen van een gelaagde (tiered) workflow

- Tier 1: interpolatie op basis van alleen CPT-data
- Tier 2: uitbreiding met geomorfologische informatie
- Tier 3: toepassing van datafusie en/of machine learning

3. Opstellen van selectiecriteria

Op basis van datadichtheid, geologische complexiteit en gewenste nauwkeurigheid wordt bepaald welke methode het meest geschikt is per locatie of profiel. Verder wordt hierbij door HHNK beoordeeld welke interpolatiemethode het beste aansluit bij de gestelde eisen en wensen.

4. Validatie en benchmarking

De gegenereerde 2D-profielen worden getoetst aan referentielocaties met hoogwaardige data, om de nauwkeurigheid en betrouwbaarheid van de gekozen methode te evalueren. Deze stap wordt in **activiteit 5** uitgevoerd waarbij het Proof of Concept bepaald wordt.

2.4.2. Het kunnen onderbouwen van de gegenereerde/geïnterpoleerde 2D-profielen

Aanvullend op deze activiteit wordt binnen de Digital Twin een functionaliteit opgenomen waarmee per gegenereerd 2D-profiel inzichtelijk wordt gemaakt op welke onderliggende databronnen dit profiel is gebaseerd. Hierbij wordt weergegeven welke CPT's, boringen, laboratoriumproeven en eventuele andere gegevens zijn gebruikt bij de opbouw van het profiel. Daarnaast wordt vastgelegd welke data is gebruikt voor de afleiding van specifieke parameters, zodat de herkomst en onderbouwing van het profiel transparant en navolgbaar zijn. Dit draagt bij aan de reproduceerbaarheid en controleerbaarheid van de resultaten. In lijn met de eisen en wensen van HHNK geldt daarbij dat **sterkte-eigenschappen** van grondlagen primair worden bepaald op basis van boringen en bijbehorend laboratoriumonderzoek. Deze vormen de leidende bron voor het vaststellen van materiaaleigenschappen, waarbij de Digital Twin deze informatie ondersteunt en ontsluit, maar niet vervangt door interpolatie.

Het resultaat van deze activiteit is een set van consistente en onderbouwde 2D-profielen, waarbij per profiel is vastgelegd welke interpolatiemethode is toegepast en waarom. Deze profielen vormen de basis voor verdere schematisatie en toepassing binnen dijksterkteberekeningen.

2.5. Activiteit 5 – Proof of Concept bepalen

In deze activiteit wordt vastgesteld in hoeverre de ontwikkelde Digital Twin prototype daadwerkelijk functioneert als een werkbaar en betrouwbaar instrument voor het ondersteunen van dijksterkteberekeningen. Het doel van de proof of concept (PoC) is om de ontwikkelde methodiek en resultaten te toetsen in de praktijk en de meerwaarde ten opzichte van bestaande werkwijzen inzichtelijk te maken.

- Allereerst wordt aanvullend (virtueel) grondonderzoek en/of geofysisch onderzoek uitgevoerd op de pilotlocatie van de Digital Twin prototype. Deze **nieuwe** data wordt gebruikt als onafhankelijke validatie om de nauwkeurigheid van het model te toetsen. Door de resultaten van de Digital Twin te vergelijken met deze nieuwe meetgegevens kan de precisie van het model kwantitatief worden vastgesteld.
- Daarnaast wordt het ontwikkelde prototype vergeleken met 2D-schematisaties die door het geotechnisch team van HHNK zijn opgesteld, en verder met de bestaande Digital Twin van de Purmerringdijk. Deze vergelijking biedt inzicht in de prestaties, verschillen in aanpak en mogelijke verbeterpunten van het nieuwe model. Hiermee kan worden beoordeeld in hoeverre de ontwikkelde methodiek aansluit bij of beter presteert dan bestaande toepassingen.

- Vervolgens wordt de bruikbaarheid van de Digital Twin voor HHNK geëvalueerd en beoordeeld. Hierbij wordt gekeken naar aspecten zoals toepasbaarheid binnen bestaande werkprocessen, reproduceerbaarheid, gebruiksgemak en de mate waarin het model voldoet aan de eisen voor betrouwbare ondergrondgegevens aansluitend op dijksterkteberekeningen. Ook wordt aandacht besteed aan de implementatiemogelijkheden binnen de organisatie.
- Tot slot wordt de meerwaarde van de ontwikkelde aanpak onderbouwd en vastgelegd. Hierbij worden de resultaten van de validatie met aanvullend grondonderzoek, de vergelijking met de Digital Twin van de Purmerringdijk en de praktische toepasbaarheid samengebracht in een eindbeoordeling en rapportage.

Het resultaat van deze activiteit is een onderbouwde conclusie over de effectiviteit en inzetbaarheid van de Digital Twin binnen HHNK.

2.6. Activiteit 6 – Perspectiefschets op vervolg

In deze activiteit wordt het perspectief voor de verdere ontwikkeling en toepassing van de Digital Twin binnen HHNK uitgewerkt. Hierbij ligt de focus op opschaling, doorontwikkeling en de toekomstige inzet binnen operationele processen binnen HHNK.

- Allereerst wordt de reproduceerbaarheid van de ontwikkelde Digital Twin-methodiek getest. Dit houdt in dat wordt onderzocht in hoeverre de aanpak, zoals toegepast op de pilotlocatie, consistent kan worden herhaald op andere locaties. Hiermee wordt bepaald of de Digital Twin geschikt is voor bredere uitrol binnen het beheergebied van HHNK. Eventuele knelpunten in data, processtappen of interpretatie worden hierbij geïdentificeerd en geadresseerd.
- Daarnaast wordt het perspectief voor verdere ontwikkeling van het prototype vastgesteld. Hierbij wordt specifiek gekeken naar de mogelijkheden om dynamische data te integreren in de Digital Twin. In tegenstelling tot de huidige, voornamelijk statische datasets, biedt dynamische data de mogelijkheid om veranderingen in de tijd te volgen en het model continu te actualiseren. Dit vormt een belangrijke stap richting een meer realistische en actuele representatie van de dijk.
- Een belangrijke ontwikkelrichting hierin is het toevoegen van real-time of near real-time data, bijvoorbeeld door gebruik te maken van sensoren en handheld Lidar-technologie. Door deze data te integreren in de Digital Twin kan actueel inzicht worden verkregen in zowel de sterkte van de dijk als mogelijke schadebeelden, zoals vervormingen of erosie. Deze inzichten kunnen worden ingezet binnen de calamiteitenorganisatie van HHNK. Door de Digital Twin te koppelen aan operationele processen kan deze dienen als ondersteunend hulpmiddel bij monitoring, besluitvorming en crisisbeheersing. Dit vergroot de slagkracht en reactietijd bij calamiteiten en draagt bij aan een proactieve benadering van waterveiligheid.

Het resultaat van deze activiteit is een helder toekomstperspectief voor de Digital Twin, inclusief concrete ontwikkelrichtingen en aanbevelingen voor implementatie en opschaling binnen HHNK.

3. Beoogd eindproduct

Een functionerend Digital Twin prototype die betrouwbare 2D- en 3D- profielen van de dijkopbouw kan genereren die zonder extra verwerkingsslagen in D-stability kunnen worden gebruikt. Verder wordt de meerwaarde van deze prototype getest en onderbouwd om tot een Proof of concept te komen.

Dit Proof of concept wordt samen met een theoretische onderbouwing van de Digital Twin en een perspectiefschets voor een verdere ontwikkeling en uitrol beschreven in een eindrapportage.

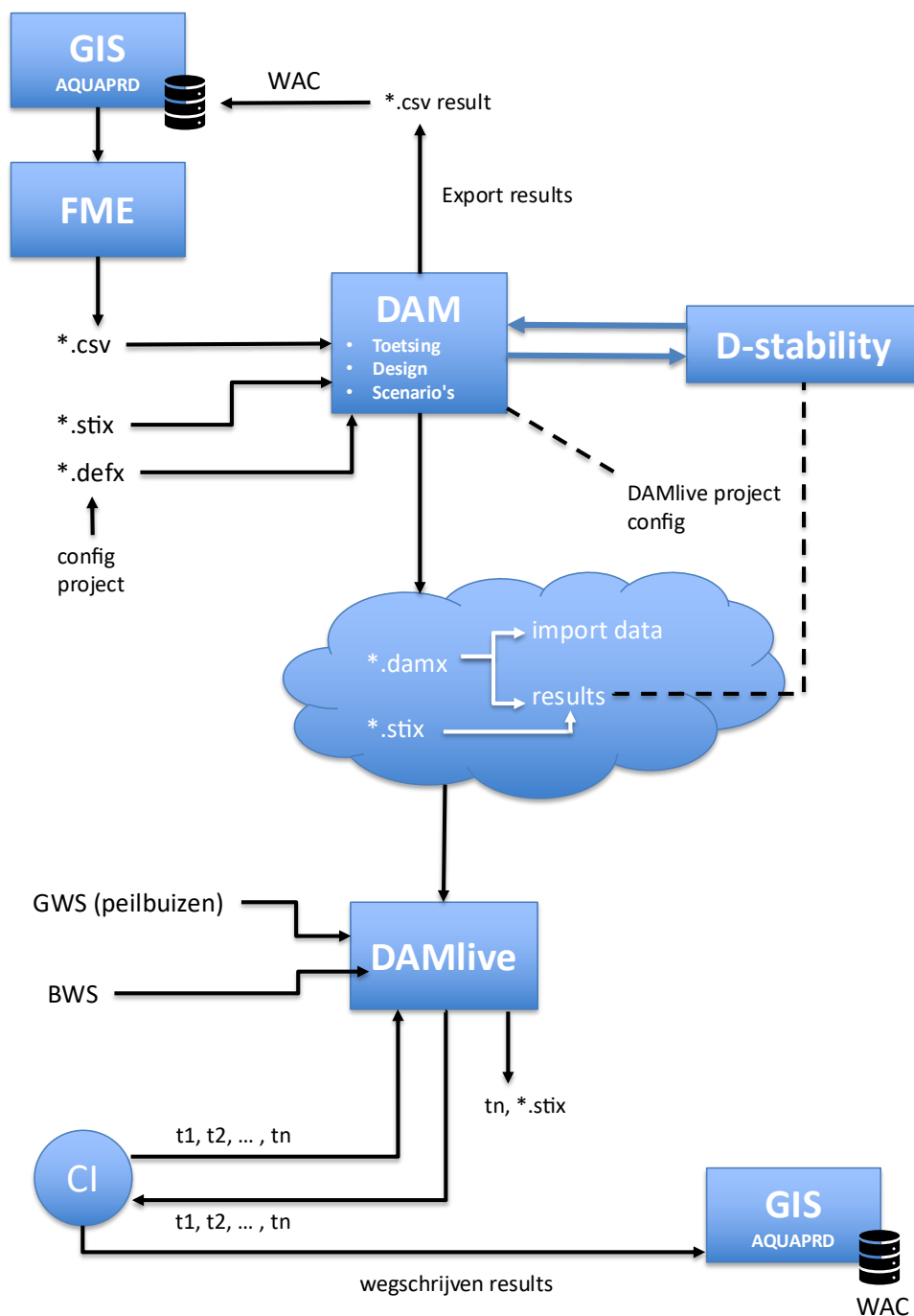


Bijlagen

Bijlage 1: DAM en DAM live

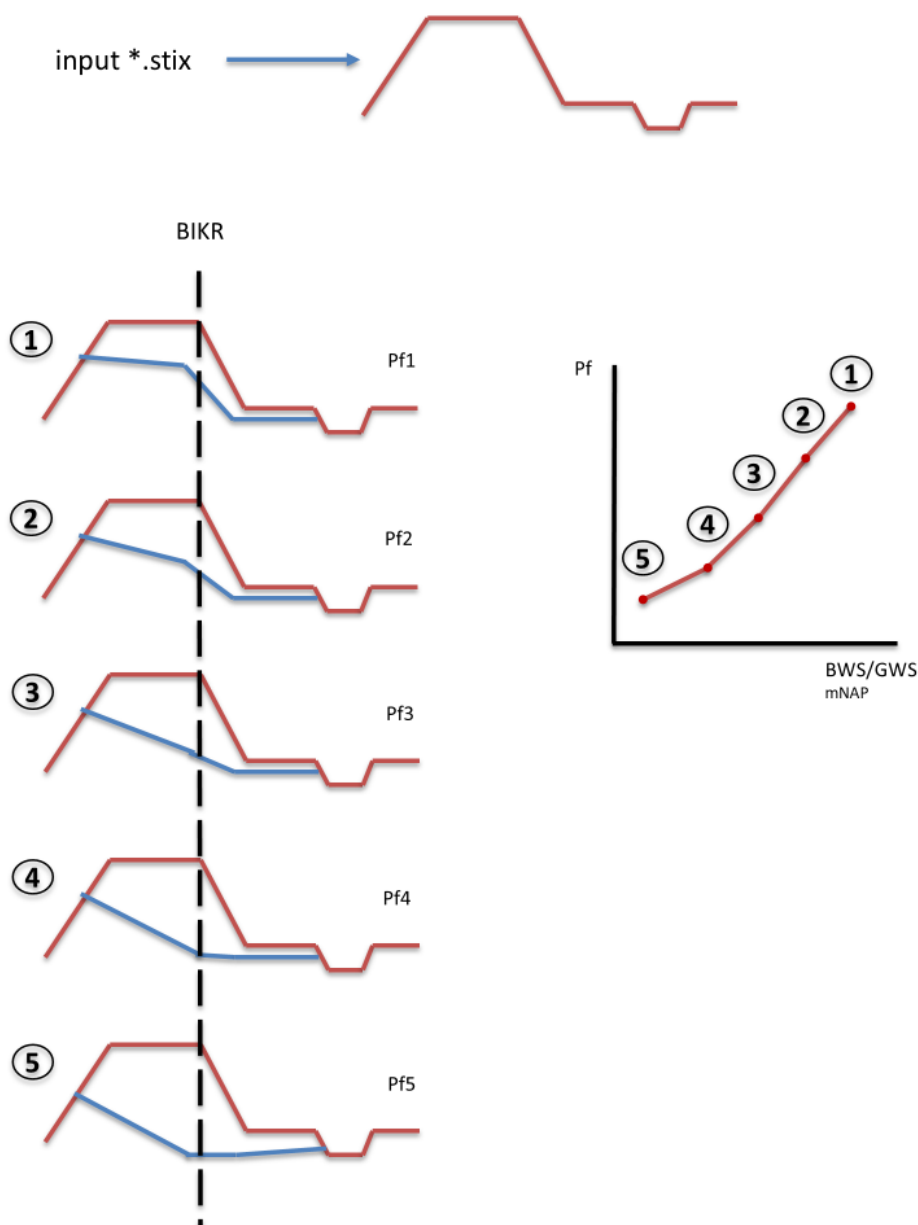


DAM en DAMlive



Figuur 1: DAM en DAM live

Fragility curve uit D-stability



Figuur 2: Fragility curves

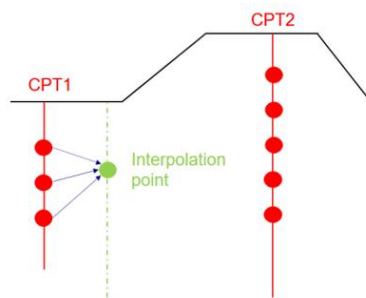
Bijlage 2: Subsurface Schematisation Advice (Memo)

CPT based interpolation approaches

The first development track focuses on methods that rely primarily on CPT (Cone Penetration Test) data. The central question is how CPTs should contribute to interpolated subsurface models in a way that is both spatially meaningful and geotechnically consistent.

Coordinate naïve interpolation

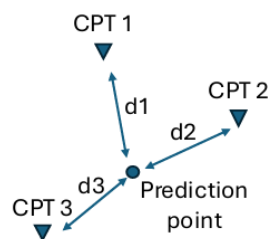
Earlier applications, such as in the Digital Twin Purmer project, used a pointwise interpolation in depth. The interpolation method at the time was done in a depth pointwise manner, which is an oversimplified approach for CPT data interpolation. Since the distance between CPTs is in the order to 10 meters, and the vertical inter-distance between CPT measurements is typically 2cm, the value of the interpolated point is usually only calculated from a one CPT only. This is illustrated in Figuur 3 which shows for the green interpolation that the three closest measurement points are from CPT1, and all information from CPT2 is discarded. The weight is in this case the inverse distance between the interpolation point and the CPT1. This holds for every interpolation point in the vicinity of CPT1, resulting in a flawed interpolation 2D map.



Figuur 3: Example of coordinate-naïve interpolation showing loss of information from the second CPT.

Weighted sum of the whole CPT signal

This method uses the entire depth profile of each CPT. Each CPT is treated as a single signal. Nearby CPTs are weighted relative to each other to generate a consistent interpolation (Figuur 4). This approach ensures that all depth information contributes to the schematisation rather than only isolated measurement points. This approach has been developed and applied in OURS (Coelho, 2020).

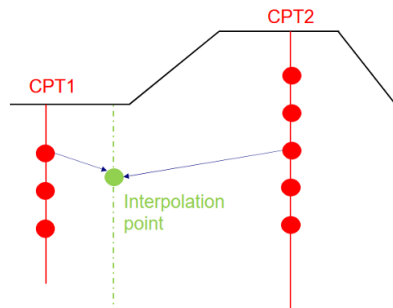


Figuur 4: Illustration of weighted CPT signal interpolation and the applied weighting equation.

Depth aware CPT interpolation

The RESET project introduced a more refined method: inverse distance interpolation carried out at the specific depth of the interpolation point. This ensures that CPTs are compared at equal

elevations. For depths not captured by some CPTs, values are extrapolated from the nearest available CPT. This avoids discarding CPTs with differing start or end depths, such as CPTs beginning below embankment level (Figuur 5).



Figuur 5: Schematic of depth-aware interpolation.

Interpolation methods

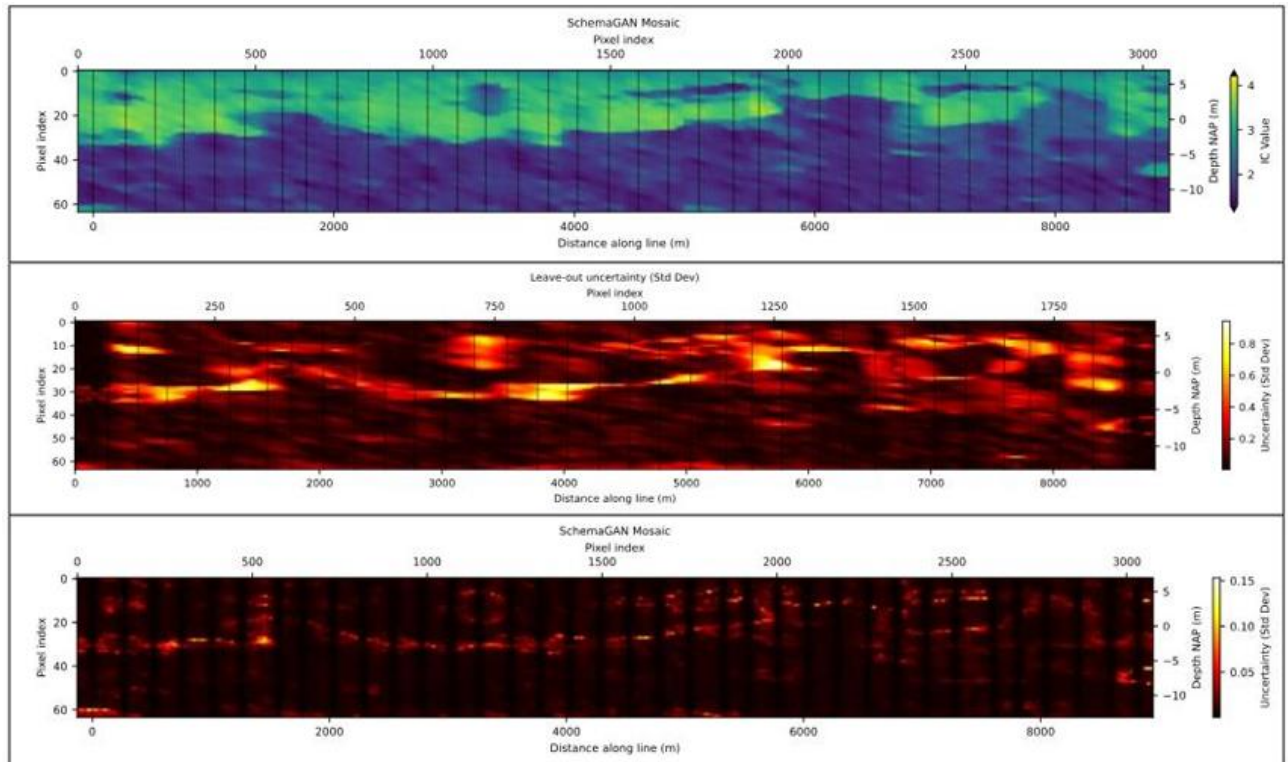
Once the contribution of each CPT has been defined, several interpolation techniques may be applied to generate subsurface properties such as tip, friction ratio or IC. Typical methods include:

- Nearest Neighbour
- Inverse Distance Weighting
- Kriging
- Machine Learning Techniques

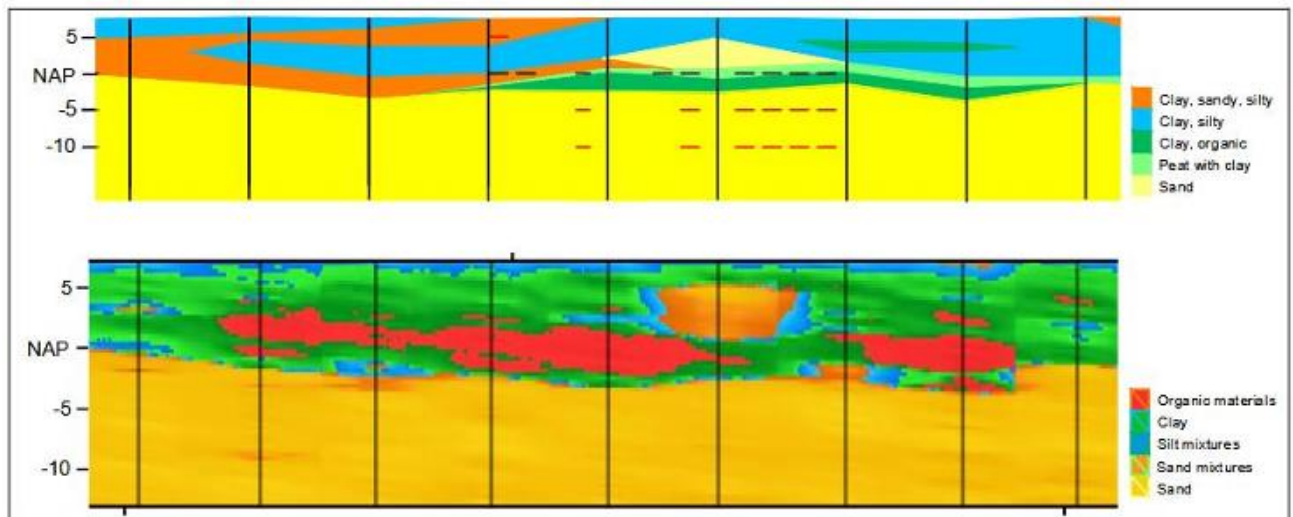
Nearest Neighbour, Inverse Distance Weighting (IDW) and Kriging are common spatial interpolation methods that differ mainly in complexity and realism. Nearest Neighbour is the simplest and fastest, preserving original values but producing unrealistic, blocky surfaces because it ignores gradual spatial change. IDW offers a smoother result by weighting nearby points more heavily, is easy to apply, and computationally light, but it assumes spatial variation is smooth and isotropic, making it less reliable when patterns are complex or irregular. Kriging is the most advanced, using statistical models of spatial dependence to produce optimal, realistic predictions and uncertainty estimates, but it requires more data, expertise in variogram modelling, and greater computational effort.

Machine learning techniques for interpolation

Nowadays there is a lot of research on how machine learning can be used to interpolate between CPT values. The model learns underlying geological rules and generates subsurface schematisations rapidly (Figuur 6). Uncertainty can be quantified through Monte Carlo dropout. A real-world application in 2025 for the Amsterdam–Rhine Canal demonstrated that schemaGAN (Campos Montero, 2025; Bremer, 2025) could produce schematisations comparable to those used by experts (e.g. Rijkswaterstaat, Arcadis for levee assessments), while also providing spatial and model uncertainty estimates.



Figuur 6: Uncertainties of the SchemaGAN schematization for the western Betuwe section (top). Middle: spatial uncertainty based on the leave-out strategy. Bottom: model uncertainty from the Monte Carlo dropout analysis.



Figuur 7: Middle section of the eastern Betuwe section dike, starting at approximately 2,000 m on the left side, with the Arcadis schematization at the top and the SchemaGAN schematization at the bottom

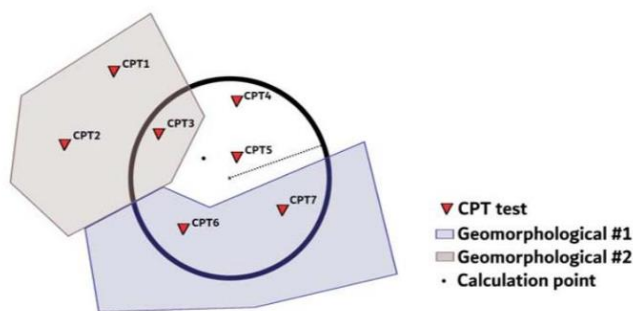
Interpolation Using Multiple Data Sources

Data fusion

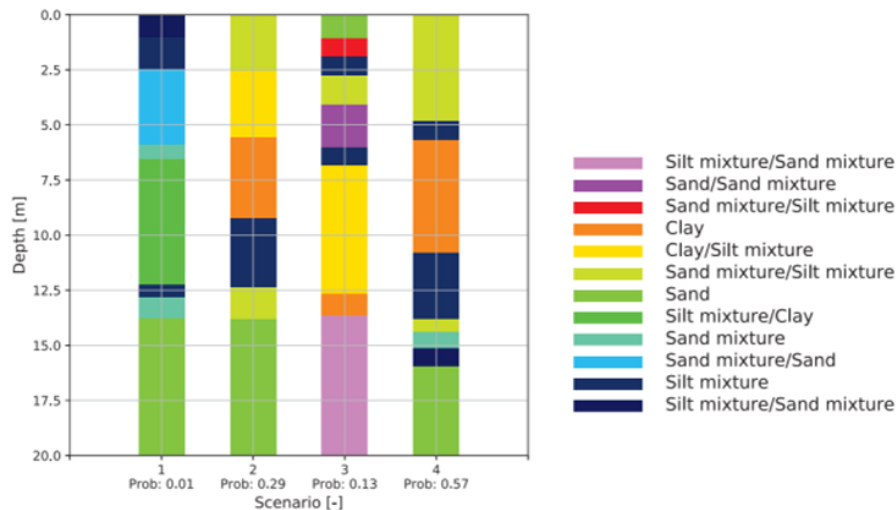
Data fusion integrates geotechnical, geological, and geophysical datasets using machine learning algorithms such as neural networks or random forests. It has been successfully tested both along a long flood defence line and in a smaller polder area (Zuada Coelho, 2022). In both cases, model performance was validated using independent data.

Using geomorphological information together with CPT data

In the OURS project, geomorphological units around the analysis location (within 600 m) are used to define subsoil scenarios with associated probabilities. CPTs inside each geomorphological entity determine the soil properties of that scenario. An important requirement for OURS is consistency and independence from expert judgement.



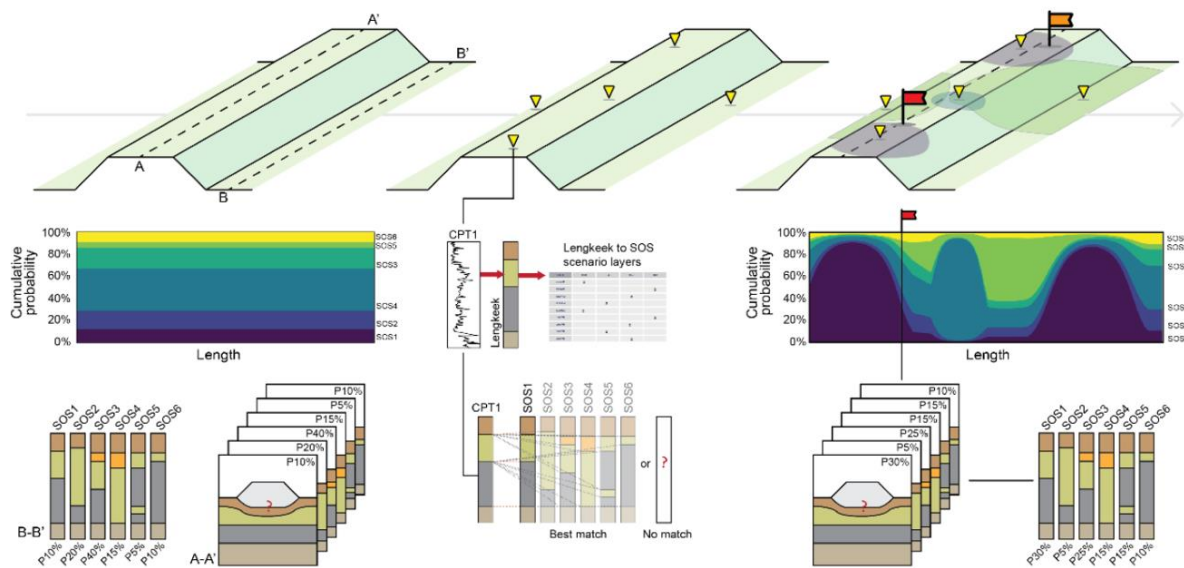
Figuur 8: Example of the subsoil scenario schematisation.



Figuur 9: Example scenarios from OURS

Using CPT data to refine the SOS scenario probabilities

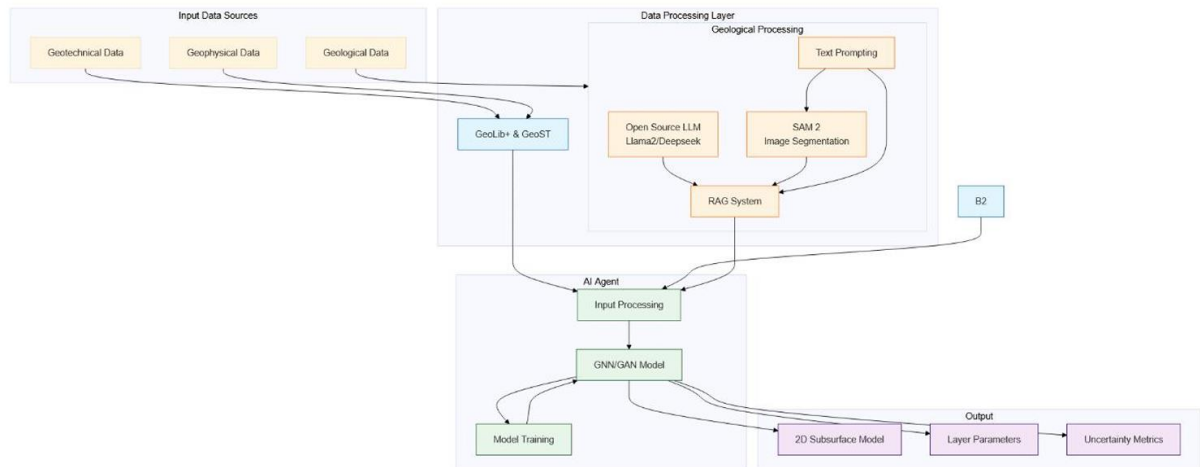
This method tested in the RESET project uses local CPT data to refine the scenario probabilities of a segment of the stochastic subsurface models (SOS). The current SOS model provide constant probabilities along a given segment (Figuur 10 left) and can be spatially refined with local CPT data resulting in a variable scenario probabilities according to the new data available, the prior scenarios probabilities and the influence length of the units (Figuur 10 right). This results in a better delimitation of areas within the segment which have favourable and unfavourable subsurface conditions, which translates to more accurate subsurface models and their subsequent stability analysis. This refinement process relies heavily on local data and will become more impactful as more site investigation is carried out around the rail embankments.



Figuur 10: Schematic representation of the data-driven SOS refinement. On the left side is the current approach, in the middle the improve to the CPT to SOS mapping and on the right the improvement to the SOS probabilities of occurrence.

Incorporating soft data (e.g. reports) to create subsoil schematisations

In 2026-2027 Deltares is developing a new subsoil schematisation approach based on grey literature. This workflow shows how we turn scattered geotechnical, geophysical, and geological data into a coherent and reliable subsurface schematization. The process begins by bringing all data together and standardizing it. AI tools then help interpret this information, extracting geological features from text and images, checking consistency, and enriching the data using built-in domain knowledge. All this processed information is fed into an advanced AI model that constructs a 2D subsurface model, estimates key soil and layer properties, and quantifies uncertainty.



Figuur 11: Workflow overview: From soft data acquisition to final subsurface schematisation.

Most promising directions and implementation path

Selecting the most suitable subsurface schematisation for HHNK depends primary in data availability, required spatial detail and the goal of the Digital Twin. With data availability we refer to the types of data that are available (e.g. CPTs, boreholes, previous studies documents) as well as the degree of digitalisation. For example, to use the CPTs in a Digital Twin, they should be stored in a xml or gef format and be stored in an accessible cloud environment. Spatial detail is also an important parameter for subsurface schematisation. For example, for a macro stability analysis requires data on either side of the levee (perpendicular direction) as well as on the body of it. Providing information only along the top of the levee will result in an inaccurate prediction from the interpolation. The final constrain is the intended use of the generated schematisation. The levee could be schematised slightly differently for different applications and different failure mechanisms. For example, considering uplift or not or testing against backwards erosion piping requires different schematisation and parameters. During the development of SchemaGAN the method was compared with other types of interpolation methods. SchemaGAN is about 65% more accurate than IDW in MAE and nearly 90% more accurate in MSE. Nearest neighbour improves accuracy by around 60% (MAE) and 83% (MSE), while Kriging gives moderate gains of 30–55%.

Practical Guidance for Method Selection

Given all previous consideration a table is created with the recommended interpolation method per case.

Situation	Recommended Method(s)	Rationale
Only CPT data available	Depth-aware interpolation or weighted full-signal	Stable, interpretable, mature approaches
Many heterogeneous datasets	Data fusion, Geomorphology + CPTs	Incorporate all available data
Sparse structured data but many reports	Soft data AI workflow	Fills data gaps from grey literature
Need rapid generation + uncertainty maps	SchemaGAN	Fast, probabilistic ML interpolation

General Next Steps

To set up the full Digital Twin workflow the following steps should be followed:

- Map all available datasets (CPTs, boreholes, reports, geo maps, geophysics).
- Develop a tiered workflow:
 - Tier 1: CPT-only interpolation
 - Tier 2: CPT + geomorphology
 - Tier 3: Data fusion / ML
- Create selection criteria based on data density, geological complexity, and desired accuracy.
- Set up evaluation benchmarks using known high-quality sections.