Verkenning

Aan
SITO

Datum
20 december 2024

Aantal pagina's
1 van 11

Contactpersoon
Kin Sun Lam

Doorkiesnummer
+31(0)6 4682 6177

E-mail
KinSun.Lam@deltares.nl

Onderwerp
Verkenning toekomstbeelden Digital Twin, Remote Sensing & AI

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Er wordt veel verwacht van Digital Twin, Remote Sensing en AI (Artificial Intelligence). Het beeld is dat deze technieken onze wereld geheel gaan veranderen en dus ook wat betreft waterveiligheid. Keringbeheerders hebben in verschillende pilots met Digital Twins, Remote Sensing of AI kennisgemaakt en ervaring opgedaan. Desondanks constateren we dat keringbeheerders de mogelijkheden van deze technieken voornamelijk schetsen aan de hand van de huidige praktijk zoals de waterveiligheid nu is ingericht. Keringbeheerders noemen veelvuldig incrementele verbeteringen in de huidige praktijk die met de genoemde technieken te realiseren zijn. Daarnaast vergelijken keringbeheerders de potentiële verbeteringen door deze technieken met de over de jaren heen geoptimaliseerde huidige praktijk. Die combinatie geeft mogelijk een beperkt beeld en inschatting van het potentieel van dergelijke technieken voor de waterveiligheid.

De consequentie is dat de balans tussen kosten en baten voor dergelijke ontwikkelingen verkeerd wordt ingeschat. Daarmee blijft het daadwerkelijke potentieel van technieken als Digital Twin, Remote Sensing en AI onbenut voor waterveiligheid.

1.2 Doelstelling

Door het schetsen van zogenaamde “toekomstbeelden” voor de waterveiligheid met technieken als Digital Twin, Remote Sensing en AI willen we een ander gezichtspunt geven om naar het potentieel van deze technieken te kijken. Vanuit de toekomstbeelden kijken we terug naar het heden, waarbij we voor Digital Twin, Remote Sensing en AI aangeven welke specifieke technieken er nodig zijn (en zo mogelijk hoe ver deze technieken reeds beschikbaar zijn).

Keringbeheerders krijgen hiermee een bredere beeld van het potentieel van Digital Twin, Remote Sensing en AI. Mogelijk inspireert het hen om te bepalen wat deze technieken nog meer kan betekenen voor waterveiligheid. Zodat we het potentieel van Digital Twin, Remote Sensing en AI voor waterveiligheid daadwerkelijk zo optimaal mogelijk kunnen benutten.

1.3 Aanpak

Deze verkenning naar toekomstbeelden voor de waterveiligheid met Digital Twin, Remote Sensing en AI is in een beperkt tijdbestek in een aantal werksessies uitgevoerd door een

beperkt aantal adviseurs van Deltares: Eleni Smyrniou, Antonis Mavritsakis en Kin Sun Lam. Zij zijn de afgelopen jaar betrokken geweest bij verschillende pilots en ontwikkelingen met Digital Twin, Remote Sensing en AI op het gebied van waterveiligheid, geotechniek en constructies. Daarnaast zijn zij bekend met de huidige praktijk bij waterveiligheid. Het resultaat van de verkenning moet daarom niet gezien worden als een uitputtend en alomvattend beeld. We willen met deze verkenning de keringbeheerders en andere betrokken vooral een ander gezichtspunt meegeven om naar Digital Twin, Remote Sensing en AI voor waterveiligheid te kijken. En achterhalen wat er voor nodig is om te ontwikkelen richting die toekomstbeelden.

2 Achtergrond Digital Twin, Remote Sensing en AI voor waterveiligheid

2.1 Samenhang tussen Digital Twin, Remote Sensing en AI voor waterveiligheid

Een Digital Twin voor waterveiligheid wordt gezien als een “drager” voor Remote Sensing en AI. Hiermee wordt bedoeld dat Remote Sensing en AI binnen een Digital Twin voor waterveiligheid kan worden ingezet als onderdeel van een Digital Twin. Via de Digital Twin wordt daarmee een relatie gelegd tussen Remote Sensing en AI met de waterveiligheid.

Voor de achtergrond van Digital Twin, Remote Sensing en AI voor waterveiligheid wordt daarom hieronder de ontwikkelingen van Digital Twin voor waterveiligheid geschetst. Daarbinnen komen ook Remote Sensing en AI in voor. De geschetste samenhang gebruiken we ook bij het schetsen van de toekomstbeelden.

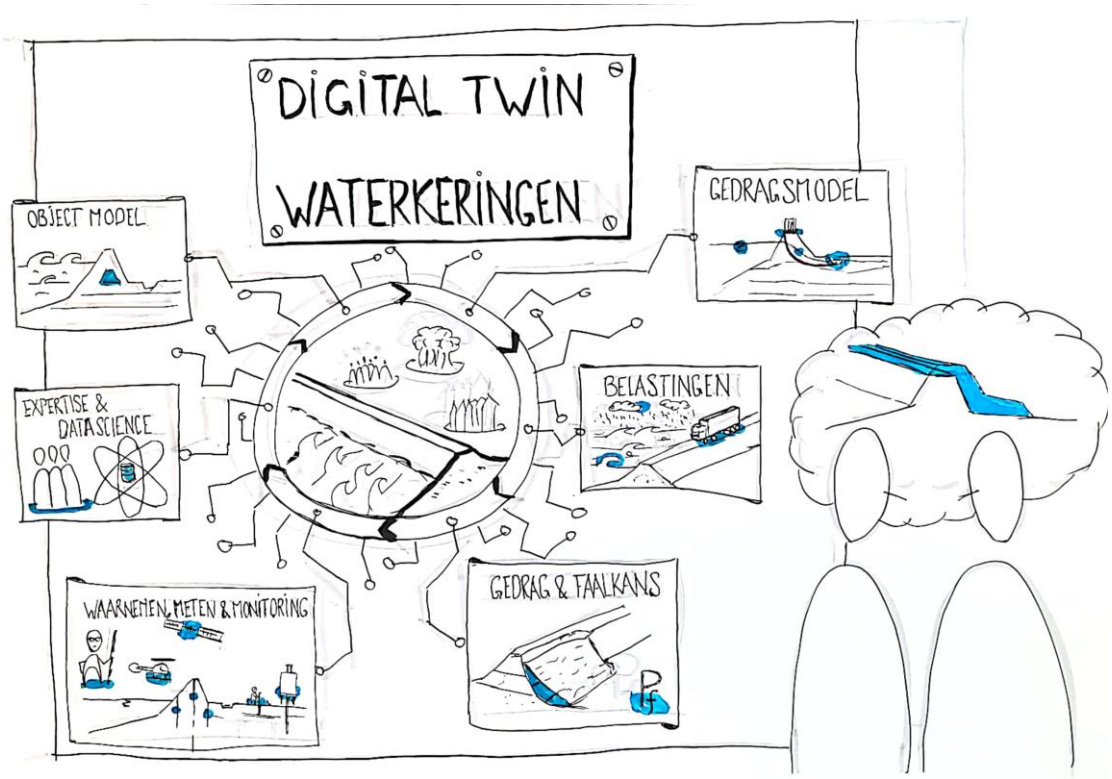
2.2 Ontwikkelingen Digital Twin voor waterveiligheid

In eerdere digital twin pilots, waarbij Deltares betrokken was, is invulling gegeven aan een digital twin voor waterkeringen en ondergrond zoals gepresenteerd in Figuur 2-1. “Digital twin” hebben we daarbij afgekort naar DigiTwin om te benadrukken dat dit een specifieke invulling is. Met deze invulling houden we rekening met onzekerheden die inherent zijn bij waterkeringen en ondergrond, waarbij (aanvullende) waarnemingen, metingen en monitoring worden beloond door een geüpdatete of verbeterde DigiTwin en meer inzicht in de waterkering en de ondergrond.

Een DigiTwin sluit aan bij de huidige werkwijze[1], kennis en modellen (zoals de faalmechanismemodellen), maar biedt een werkwijze om ook nieuwere, geavanceerdere ontwikkelingen mee te nemen zoals data science, data fusion, machine learning en meet-/data-inwintechnieken, zoals remote sensing, (meet)drones, IoT [2].

In de DigiTwin komen in een geautomatiseerde omgeving alle data, technieken en modellen samen, met als doel om te komen tot nieuwe real-time inzichten op basis van combinaties van deze zaken. Deze invulling voor DigiTwin waterkeringen en ondergrond is nog geen uitontwikkeld gegeven. Nieuwe ontwikkelingen en inzichten kunnen de invulling verder brengen.

[1] Met de huidige werkwijze wordt gerefereerd naar de gangbare aanpak in de geotechniek en waterkeringen om met metingen, grond- en laboratoriumonderzoek te komen tot schematisatie voor een (faal)mechanisme.
[2] IoT staat voor Internet of Things (in het Nederlands: “internet der dingen”. Wikipedia beschrijft dat als “het geheel aan apparaten ("dingen") dat via internetverbindingen met andere apparaten of systemen in contact staat en daarmee gegevens uitwisselt”.



Figuur 2-1: Invulling van een digital twin (DigiTwin) voor waterkeringen en ondergrond. De invulling gaat uit van het modelleren van het fysieke object en de omgeving op basis van waarnemingen, metingen en monitoring met behulp van expertise en data science (linkerkant van de cirkel). Gegeven het fysieke objectmodel in combinatie met het gedragsmodel is het mogelijk om bij verschillende belastingen en situaties het gedrag (en faalkans) van de waterkering te voorspellen (rechterkant van de cirkel). Deze gedragsvoorspellingen van de werkelijkheid worden geverifieerd met waarnemingen, metingen en monitoring, zodat de modellen zijn te verfijnen (de term "updating" wordt hier ook wel voor gebruikt). Hiermee is de cirkel rond. Deze invulling van een DigiTwin voor waterkeringen en ondergrond houdt rekening met de onzekerheden die inherent zijn aan waterkeringen en ondergrond die met continue waarnemingen, metingen en monitoring zorgent voor het verfijnen van de modellen en het vergroten van de inzicht in de waterkering en het gedrag van de waterkering. De mensen rechts in het figuur geven tot slot aan dat de DigiTwin een hulpmiddel is die voor inzicht in de waterkering en het gedrag van de waterkering zorgen bij het nemen van besluiten door (kering)beheerders.

Naast de bovenstaande meer specifieke ontwikkeling op het gebied van digital twins voor waterkeringen en ondergrond waarbij Deltares betrokken is, zijn er binnen Deltares in andere domeinen ook ontwikkelingen in digital twins. Om de ontwikkelingen van de verschillende digital twins meer in relatie tot elkaar te zien en van elkaar te leren heeft Deltares een position paper over digital twins[3] opgesteld. Deltares identificeert in de paper zes aspecten die een digital twin kenmerken, zie Figuur 2-2.

Voor de ontwikkeling van DigiTwins voor waterkeringen en ondergrond is deze benadering een waardevolle uitbreiding. In de hierboven gepresenteerde DigiTwin invulling komen met name de aspecten 'real data', 'real physics' en 'integration' naar voren.
Een aspect als 'photorealism' wat een digital twin juist heel herkenbaar maakt bij gebruikers en stakeholders is daarin onderbelicht. Met deze meer omvattende benadering kunnen we de

[3] Digital Twins, Promising tools for water & subsurface management. The Deltares perspective. https://www.deltares.nl/en/expertise/projects/digital-twins.

ontwikkeling van DigiTwins in het vervolg versterken tot evenwichtige tool voor de beheerders.

Figuur 2-2: Deltares identificeert zes aspecten die digital twins kenmerken. Een gedetailleerde beschrijving van deze aspecten met betrekking tot digital twins is te vinden op https://www.deltares.nl/en/expertise/projects/digital-twins.

Het bovenstaande geeft een beeld waar we staan met betrekking tot Digital Twin, Remote Sensing en AI voor waterveiligheid, maar ook wat er nog ontbreekt of minder ontwikkeld zijn. Bij het schetsen van de toekomstbeelden willen we ons hiervan bewust zijn.

3 Toekomstbeelden van de waterveiligheid over 10 jaar

3.1 Uitgangspunten

Bij het schetsen van de toekomstbeelden hebben we onszelf een horizon opgelegd van ongeveer 10 jaar. Dit is genoeg ver in de toekomst om geen rekening te houden met de huidige praktijk, maar niet zodanig ver dat de kennis van de nu geavanceerde technieken onbruikbaar zijn.

Daarnaast hebben we met een schuin oog gekeken naar de relevante en voorziene trends in de waterveiligheid:

- Menselijke capaciteit ↓ (vergrijzing, krappe arbeidsmarkt)
- Menselijke vaardigheden ↑ (wetenschap, ondersteunende technologie)
- Uitdagingen ↑ (klimaatsveranderingen, geconcentreerde economische en bevolkingsgroei in delta's)
- Ruimte voor oplossingen ↓ (ruimtelijke beperkingen, meervoudig gebruik en belangen)

Tot slot, denk we dat de doelen, functies en daarmee de taken voor waterveiligheid niet noemenswaardig zullen veranderen. Taken van de keringbeheerder voor waterveiligheid blijven in de kern:

- Inspectie
- Toetsen/beoordelen
- Onderhoud

- Versterken
- Calamiteitenzorg (inclusief oefening/training)

De verwachting is dat er wel meer afstemming en uitwisseling is met andere disciplines en behoeftes. In de huidige taken van een keringbeheerder valt dat onder vergunningverlening, toezicht en handhaving (VTH).

In bredere zin vallen deze punten onder beheer (of wat nu “zorgplicht” wordt genoemd?) of asset management. Al heeft de laatste term veelal een veel bredere betekenis en specifieke doelen (zoals het optimaliseren van de totale beheerkosten in het Engels “total cost of ownership”).

3.2 Schetsen van de toekomstbeelden

Voor het schetsen van de toekomstbeelden hebben we gekeken hoe keringbeheerders in hun handelen in de toekomst kunnen worden ondersteund (in hardware en software). Hieronder geeft een beeld waar we aan denken:

- Observeren
    - Hoe?
        - Remote sensing
        - Monitoringstechnieken
            - Drones
        - Indirecte data?
    - Wat?
        - Verplaatsing?
        - Grasconditie?
        - Gaten/holtes
        - Dierlijke graverijen
- Uitvoering
    - Hoe?
        - Drones
        - Autonoom opererende machines
        - Robots
    - Wat?
        - Maaien?
        - In situ testen?
        - Noodmaatregelen nemen?
- Data/informatie verwerking, beslissingsondersteunend
    - Hoe?
        - Data science
        - Kunstmatige Intelligentie (Artificial Intelligence)
        - Cloud
        - Data delen/versturen
        - Rekenkracht/-snelheid
        - Quantum computing
    - Wat?
        - Ordenen, opslag, rekenen, enz
        - Modelleren
        - Scenario’s

Voor de toekomstbeelden hebben we per taak van de keringbeheerder gekeken wat nu de “zwakke” punten zijn. Dit zou in de toekomst afgevangen moeten zijn:

- In inspectie (trigger voor onderhoud, handhaving)
    - Onvoldoende capaciteit
        - Periodiek
        - Verschillende expertise nodig
    - Onvoldoende kwaliteit
        - Missen schadebeelden/info
        - Niet consistent
    - Geen link met toetsen/beoordelen
        - Geen link met modellen
- In toetsen/beoordelen/versterken
    - Geen link met inspectie
    - Zwakke link met werkelijkheid
- In onderhoud
    - Periodiek of alleen gebaseerd op inspectie/schadebeelden?
    - Beperkte optimalisatie (kosten, effectiviteit, enz)
- In calamiteitenzorg
    - Beperkte inzicht in staat van kering tijdens calamiteit
    - Effectiviteit maatregelen beperkt

Op basis van het bovenstaande hebben we ons toekomstbeelden gevormd die we globaal geschetst hebben in een presentatie voor de onderscheiden taken van de keringbeheerder, zie bijlage A.

Het zijn globale niet uitputtende schetsen van toekomstbeelden, maar we constateren daarin wel dat data, met name inspectiegegevens, een cruciale rol spelen. Zonder continue inspectie-, meting- en sensorgegevens zijn er geen actuele besluiten worden genomen en sturing worden gegeven. Daarnaast valt op dat de data automatisch/autonoom moet worden ingewonnen en verwerkt. De rol van de keringbeheerder is op basis van haar expertise en ervaringen meer de duider van resultaten en de beslisser.

3.3 Technieken bij de toekomstbeelden

Op basis van de geschetste toekomstbeelden per taak van een keringbeheerder is er gekeken welke technologieën, technieken en tools nodig zijn. Het resultaat is globaal geschetst in bijlage B.

Deze verkenning van de benodigde technologieën, technieken en tools is eveneens niet uitputtend. Het geeft ons wel het beeld dat de technieken, waaronder AI, verder gevorderd en beschikbaar zijn dan dat we nu met waterveiligheid ervoor staan. Uiteraard moeten deze technieken nog wel geschikt worden gemaakt voor de waterveiligheid, maar om de brug te slaan naar de toekomst lijkt de techniek niet de belemmerende factor.

3.4 Inrichting van de toekomst

Als laatste stap in de verkenning hebben we gekeken de inrichting van de toekomst en relatie met het heden.

We komen tot de conclusie dat we zowel in de toekomst als het heden vanuit de doelen en functies moeten denken. Hiervoor hebben we een schema gemaakt waarin we vanuit de functies een globaal raamwerk voor het systeem hebben geschetst. Daarin heeft monitoring (o.a. Remote Sensing), modellen (engineering calculation framework), voorspellingen en beslissingsondersteuning een plek, zie bijlage C.

Om het meer tastbaar te maken en ook een relatie te leggen met de huidige praktijk, hebben we dit schema ingevuld voor een paar cases: een dijk en een damwand langs het Amsterdam-Rijnkanaal, zie bijlage C.

Het schema, dat uitgaat van de doelen en functies, zou het heden en de toekomst met elkaar kunnen verbinden. Het geeft de aanknopingspunten voor ontwikkeling weer om vanuit de heden richting de toekomst te ontwikkelen. Het schema moet nog verder worden uitgewerkt, maar we verwachten dat we hiermee de brug kunnen slaan tussen het heden en de toekomst.

4 Conclusies en aanbevelingen

In deze verkenning werden we gedwongen om verder te kijken dan de huidige situatie en de nabije toekomst. We werden uitgedaagd om buiten de bestaande kaders voor waterveiligheid en technieken te denken. Dit werd als ongemakkelijk ervaren, omdat we in ons achterhoofd wisten dat we ook weer de link naar de huidige praktijk moesten maken. Uiteindelijk was het heel bevrijdend om zo vrij te mogen denken en zijn er de volgende inzichten opgedaan.

- Om optimaal te kunnen profiteren van geavanceerde technieken zoals Digital Twin en AI is het ook noodzakelijk om de bestaande processen en beschikbare modellen los te laten. De toekomstbeelden laten zien dat technieken als Digital Twin, Remote Sensing en AI potentieel een veel grotere rol kunnen spelen en van belang zijn om keringbeheerders in de toekomst te ondersteunen op het gebied van waterveiligheid.
- Doelen en functies zijn leidend. Deze veranderen niet in de toekomst ten opzichte van de huidige situatie, alleen de invulling zal anders zijn. Dit is ook de link tussen heden en toekomst. In de toekomst zal het systeem optimaal worden ingericht voor dezelfde doelen en functies, maar dan met de op dat moment beschikbare technieken, modellen en bijbehorende processen. De (bestaande) invulling voor een digitale tweeling voor waterkeringen en ondergrond lijkt op hoofdlijnen aan te sluiten op de toekomst, maar zal wel een duidelijkere relatie moeten hebben met de doelen en functies.
- Kijkende naar de toekomst dan vormt de beschikbaarheid van technieken niet een obstakel. In andere vakgebieden zijn reeds er technieken ontwikkeld die bruikbaar zijn voor waterveiligheid. Deze technieken moeten mogelijk nog wel voor waterveiligheid geschikt worden gemaakt. Dit is uiteraard een kleinere ontwikkelstap dan dat er iets ontbreekt en ontwikkeld moet worden.
- Het beschikbaar hebben van data, met name meet- en inspectiegegevens, is cruciaal. De kracht van geavanceerde technieken zoals Digital Twin en AI kan alleen worden benut als er continu data/tijdseries beschikbaar zijn. Ten opzichte van de huidige situatie is er dus veel meer data nodig: meet-, inspectie, sensorgegevens.
- Data (maar ook technieken en modellen) moeten gerelateerd worden aan de doelen en functies. Data wat niets betekent voor de doelen en functies heeft maar beperkte waarde. Dit betekent dat de huidige inspectiegegevens (via modellen) meer (gekwantificeerd) moeten zeggen over de doelen en functies (bijvoorbeeld de faalkans). In de toekomst zal de data die nodig zijn om te profiteren van geavanceerde technieken waarschijnlijk inspectiedata zijn. Dit is wat er dagelijks gemeten kan worden en dus iets kan zeggen over de mate waarin de doelen worden bereikt of de kering functioneert.
- Om Remote Sensing te benutten zal in de hierboven lijn een (kwantificeerbare) relatie gelegd moeten worden met de doelen en functies.

De verkenning en de bovenstaande conclusies geven veel aanknopingspunten voor verder uitwerking en ontwikkeling. Daarbij wordt benadrukt dat deze verkenning met beperkte deelnemers en tijd is uitgevoerd. Gezien onze achtergrond (toegepast kennisinstituut) kunnen

we een bepaalde bias hebben (bijvoorbeeld de noodzaak voor fysische modellen bij het gebruiken van AI). We bevelen aan de bovenstaande conclusies te verifiëren bij een grotere groep stakeholders met verschillende achtergronden. Nog beter zou zijn om een dergelijke sessie te herhalen met grotere groep stakeholders.

Op basis van de conclusies bevelen we aan om bij een vervolgstap in de ontwikkeling van Digital Twin, Remote Sensing en AI te richten op remote sensing. De ontwikkeling van Remote Sensing voor waterveiligheid lijkt minder ver te zijn dan voor Digital Twin en AI. De ontwikkeling van Remote Sensing zou zich moeten richten op (kwantificeerbare) relatie met de doelen en functies voor waterveiligheid. Meet-, Inspectie- en sensordata is in de toekomst immers de basis voor het gebruik van geavanceerde technieken in de waterveiligheid. Daarbij kan een Digital Twin als “drager” van de techniek worden ingezet en AI om de “vertaling” tussen Remote Sensing en waterveiligheidsinformatie te ondersteunen.

A Presentatie van de toekomstbeelden

Deltares

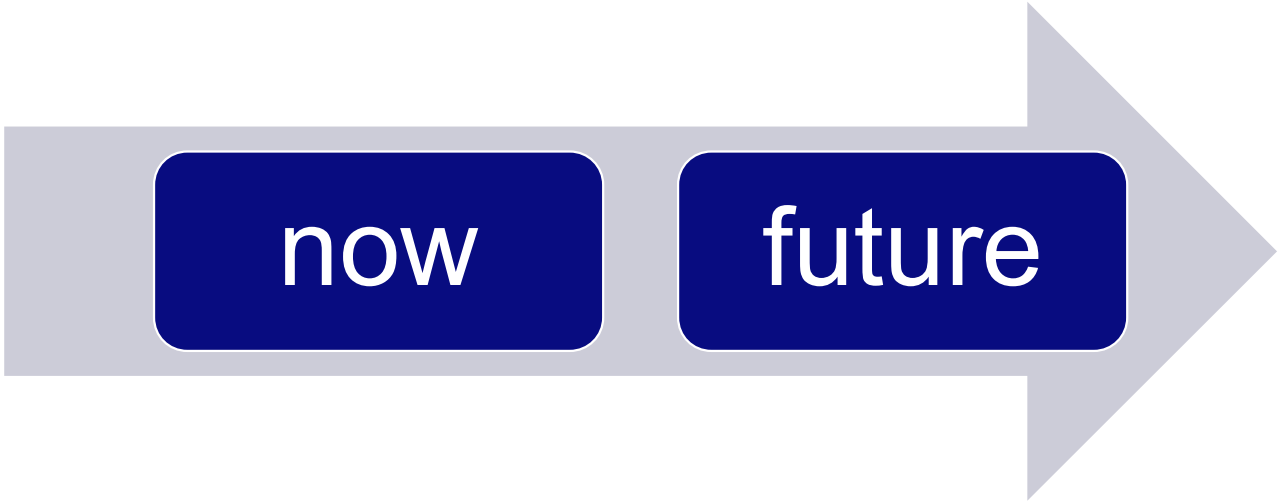
DigiTwin/Remote Sensing/AI for flood defences
(geotechnical structures)
Pictures of the future

November 11th, 2024

Background

- Asset managers oversee the near future based on their actual duties
- DigiTwin/Remote Sensing/AI are pictured on the actual state
- Expectation of the added value/potential of DigiTwin/Remote Sensing/AI is therefore limited

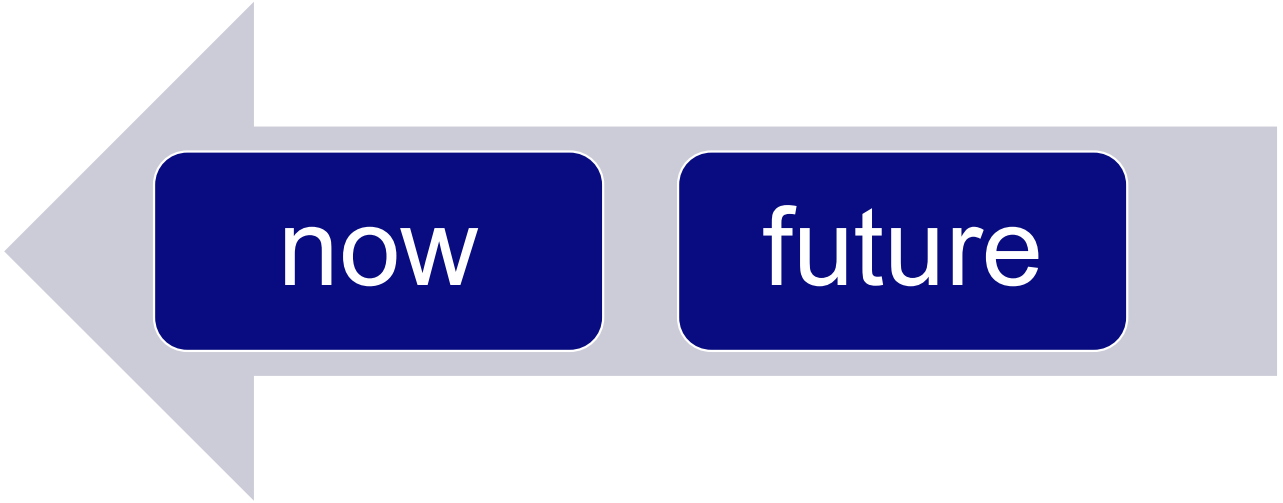
- Pilot/demo's/showcases are also based on the actual state



Objective

- Scatching pictures of the future of DigiTwin/Remote Sensing/AI for flood defences (geotechnics)
  - Based on the duties of asset managers

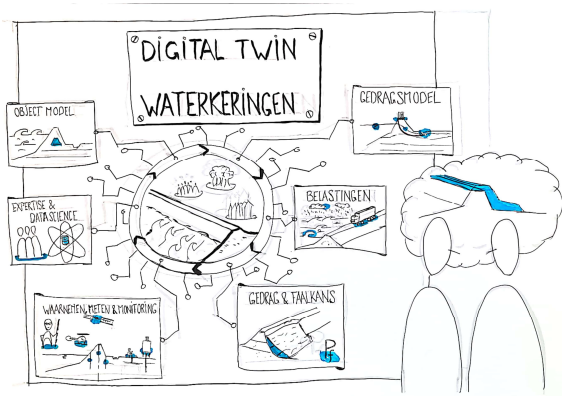
- Reasoning from these pictures of the future back to now
  - What steps do we need to make?
  - What kind of technologies is missing/need to be developed?

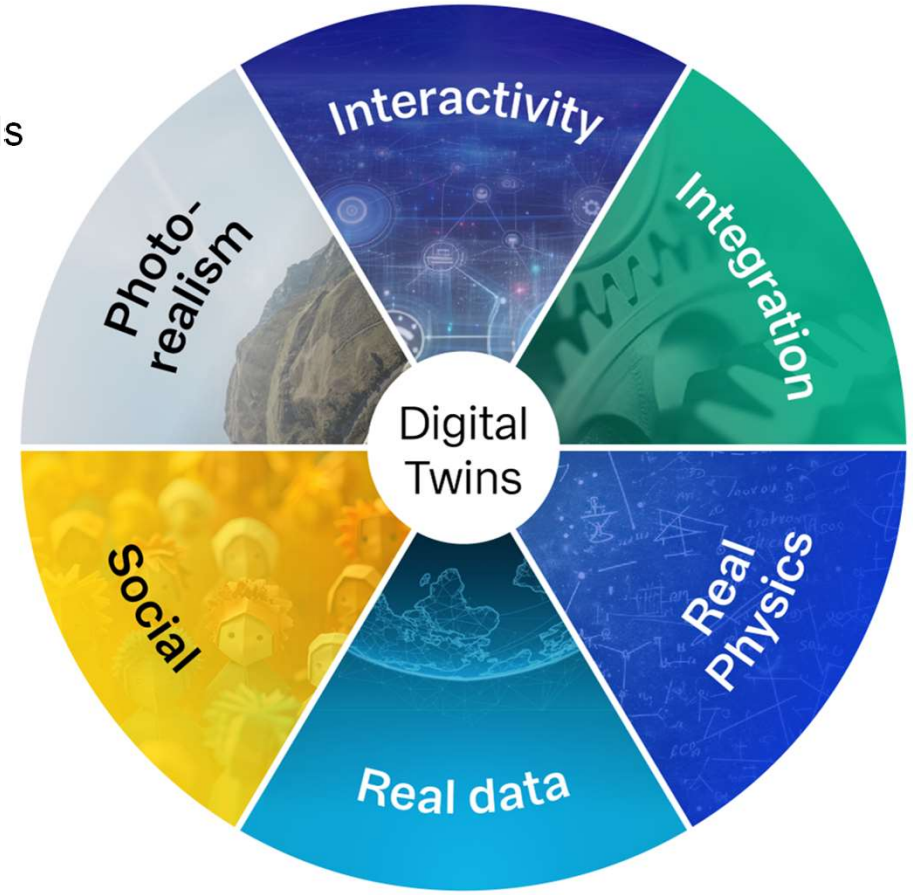


Technology Digital Twin, AI, Remote sensing

- Digital Twin – “carrier of the technology”
- AI – underlying *integrated* technology/models/tools
- Remote sensing – part of *Real data*

- *Photorealism* – visualisation
- Decision support – *interactivity* and *social*
- *Real physics*





Deltares

Flood risk management / Dike management > 10y

- Human capacity ↓ (aging population, low labour market)
- Human capability ↑ (science, supporting technology)
- Challenges ↑ (climate change, concentrated economic and population growth in deltas)
- Room for solutions ↓ (spatial limitations, multiple use and interests)

In general the tasks flood risk management /dike management remain the same:

- Inspection
- Assessment
- Maintenance
- Reinforcement
- Calamity control

More gearing and exchanging with other interests/disciplines

Flood risk management / Dike management > 10y

Supporting technology (hardware and software)

- Observing
  - Remote sensing
  - Monitoring techniques
- Executing
  - Drones
  - Autonomous machines
  - Robots
- Data/information processing, decision making
  - Data science
  - Artificial Intelligence

Flood risk management / Dike management > 10y

Inspection

- Using air drones to regularly inspect dikes to detect damages/anomalies
  - Grass covering, revetment, wet spots, wash outs, leakages, displacements, holes
- Using surface drones to do more advance inspections or tests based on air drone information
  - Grass assessment, wash outs on revetments, cracks assessment, hole assessment
- Using boat drones to do the inspections from the water
- Damages will be assessed and prioritise for repair/further actions
  - Submitted to an asset manager for approval
  - If needed (in case of uncertainties) an asset manager is requested to judge
- Anomalies and trends are monitored
  - Trends on daily (weather) and seasonal effects on dikes are known
  - If needed an asset manager is requested to judge

Flood risk management / Dike management > 10y

Assessment

- Based on risk assessment
- Based on inspection data and long-term monitoring of variables like phreatic lines/waterpressures
- Daily assessment based on daily situations (water levels, weather conditions, external loads)
- Predictions can be made based on learning models (updated by daily situations over an extended period)
- Collecting data is based on limiting risk (uncertainties in flood risk, not uncertainties in data)
- Development of (geotechnical) models is also based on limiting risk (instead of uncertainties in models)
- Exchange of information with other interests/disciplines (policies, operational)

Flood risk management / Dike management > 10y

Maintenance

- Maintenance is based on risk assessment
- Execution of maintenance is optimised in costs and capacity

Flood risk management / Dike management > 10y

Reinforcement

- Reinforcements is based on risk assessment of whole (flood risk) area (not a single dike stretch)
- Execution of reinforcements is optimised in costs and capacity

Flood risk management / Dike management > 10y

Calamity control

- Remote sensing to detect damages/anomalies
- Sensoring in dike to detect actual status in relation with the safety
- Predictions of safety based on predictions of calamity conditions (weather, water levels)
- Support on determine effective measures if safety is at stake (based on capacity, execution time, weather condition)

- Digital Twin can be used for training purpose

B Technieken bij de toekomstbeelden

Inspection

1. Using air drones to regularly inspect dikes to detect damages/anomalies
    a. Grass covering, revetment, wet spots, wash outs, leakages, displacements, holes
2. Using surface drones to do more advance inspections or tests based on air drone information
    a. Grass assessment, wash outs on revetments, cracks assessment, hole assessment
3. Using boat drones to do the inspections from the water
4. Damages will be assessed and prioritise for repair/further actions
    a. Submitted to an asset manager for approval
    b. If needed (in case of uncertainties) an asset manager is requested to judge
5. Anomalies and trends are monitored
    a. Trends on daily (weather) and seasonal effects on dikes are known
    b. If needed an asset manager is requested to judge

1. **Using air Drones for regular Inspections**
    a. **Imaging and remote sensing and surface scanning:**
        i. **High-Resolution Cameras:** To identify visual anomalies such as cracks, holes, or washouts.
        ii. **Infrared and Thermal Imaging:** To identify heat differences in the ground, which could indicate wet spots, leaks, or structural issues related to erosion or piping.
        iii. **LiDAR:** For precise 3D modelling of the dike, identifying irregular surfaces, or displacements.
        iv. **InSAR:** For long term vertical displacements. Is this technology ready to detect with high accuracy these changes?
        v. **Ground Penetrating Radar (GPR):** For detecting subsurface anomalies like erosion or voids under the surface of the dike.
    b. **AI and machine learning for damage detection**:
        i. **Automated Damage Detection Algorithms:** To automatically categorize anomalies found in imaging (such as washouts or cracks), machine learning is used.
        ii. **Change Detection Algorithms:** To compare current data with past inspections and highlight new damages or changes over time.
        iii. **Automated Severity of Damage Detection:** Algorithms to identify and assess the severity of cracks, holes, and washouts based on drone-collected data. Here techniques like data fusion are important.
        iv. **Predictive Maintenance Algorithms:** Based on surface drone data, algorithms can forecast potential damage progression or failure points over time.
2. **Damage Assessment and Prioritization**

Integrated Dashboard:

a. **Damage Classification System:** Categorize damage severity (minor, moderate, severe) based on drone inspections, and assign repair priorities.
b. **Decision Support System:** Use AI to assess urgency and allocate resources efficiently for repairs, considering factors like location, severity, and impact.
c. **Automated Reports:** Generate damage reports with images, location data, and severity assessments for submission to asset managers.

Asset Management Integration:

d. **Workflow Integration:** Directly integrate with asset management software, allowing asset managers to approve, reject, or request further assessment.
e. **Uncertainty Handling:** If damage assessments are uncertain, automatically request review by an asset manager with supporting data.

3. **Automated Alerts and Recommendations:**
   a. **Alert System:** Notify asset managers or maintenance teams when trends suggest imminent risks (e.g., significant erosion or cracks).
   b. **Proactive Monitoring:** Continuously monitor dike conditions and trigger requests for human evaluation in case of emerging risks.
4. **Technology Integration and Data Management**
   Cloud-Based Storage and Data Sharing:
   a. **Centralized Data Hub:** Use cloud platforms for storing and sharing all inspection data, including images, sensor readings, and repair logs.
   b. **Data Fusion:** Combine data from various drone types (air, surface, boat) to create a comprehensive overview of the dike's condition.
   c. **Geospatial Data Visualization:** Create interactive maps and 3D models of the dike to help asset managers better understand the data and make informed decisions.
5. **Communication and Collaboration Tools**
   Real-Time Communication with Asset Managers:
   a. **Live Streaming:** Allow asset managers to view drone footage in real-time during inspections.
   b. **Collaboration Platforms:** Enable discussions and decision-making between field operators and asset managers directly within the platform.

Technology	Development Approach/Tools
Air Drone Inspection	High-resolution imaging (RGB cameras), thermal and infrared imaging, LiDAR, InSAR, Ground Penetrating Radar (GPR).
AI for Damage Detection	Automated detection algorithms, change detection (e.g., deep learning CNNs, unsupervised learning), data fusion models.
Damage Assessment and Prioritization	Integrated dashboards, AI-driven damage classification and prioritization, automated reporting pipelines.
Asset Management Integration	Workflow automation tools, decision-support algorithms, uncertainty quantification techniques.
Automated Alerts and Recommendations	Alert systems (e.g., IoT-based), anomaly trend detection models, proactive maintenance triggers.
Surface Drone Inspection	Advanced imaging tools for cracks and holes, machine learning for specialized assessments (grass, revetment washouts).

Boat Drone Inspection	Underwater imaging (sonar, side-scan), real-time condition monitoring systems.
Cloud-Based Storage and Sharing	Centralized cloud data hubs, data fusion frameworks, interactive geospatial visualization platforms.
Communication and Collaboration Tools	Real-time streaming tools, integrated collaboration platforms (e.g., Slack APIs, Microsoft Teams integrations).
Predictive Maintenance Models	Progression forecasting using AI, reinforcement learning models for pre-emptive repair actions.

Assessment

- Based on risk assessment
- Based on inspection data
- Daily assessment based on daily situations (water levels, weather conditions, external loads)
- Predictions can be made based on learning models (updated by daily situations over a extended period)
- Collecting data is based on limiting risk (uncertainties in flood risk, not uncertainties in data)
- Development of (geotechnical) models is also based on limiting risk (instead of uncertainties in models)
- Exchange of information with other interests/disciplines (policies, operational)

1. **Risk-based assessment**
   Dynamic risk assessment framework
   a. **Real-time risk assessment model** that incorporates various data sources (weather, water levels, dike conditions) to calculate the potential risk of failure. Here this implies that we can run calculations dynamically with the same frequency as the change if the various data sources.
   b. **Risk prioritization algorithms:** Based on risk levels and available resources (e.g., probability of failure, impact on surrounding areas), prioritize inspection and repair tasks. Here we need to know what the impact of a certain failure mode occurring is on the surroundings more like a unified approach to resilience calculations and failure assessments.

   Inspection data integration
   c. Integrate inspection data from drones (air, surface, and boat) into risk assessment models. Use machine learning techniques to weigh the importance of different types of damage (e.g., cracks, erosion) in terms of their risk to dike stability.
2. **Daily Situational Assessment and Predictive Analytics Based on Learning Models**
   Environmental Monitoring System:
   a. Set up **sensors** (e.g., water level, temperature, precipitation) along the dike to collect real-time data. This implies that we know the correlations between the monitored parameters and the parameters of the model (phreatic levels, strength of the materials) and how these are extended along the length of the dike stretch.

b. The time series of the sensors are forecasted to determine whether the dike stretch is" future or calamity proof". These models should evolve over time, being updated with new inspection data and changing environmental conditions to refine predictions.
c. Use data collected over time (daily weather, water levels, and inspection data) to train models that predict future dike conditions. These models should identify trends (e.g., erosion rates, increasing crack sizes) and provide warnings about potential issues before they occur.
d. This all implies that we use a continuous feedback loop from inspection and situational data to automatically update the learning models, improving accuracy and responsiveness to changing conditions.

3. **Limiting Risk through Data Collection and Geotechnical Models and Risk Mitigation**
    a. TODO
4. **Interdisciplinary Information Exchange**
    a. Set up systems to exchange information between different stakeholders (e.g., policymakers, operational teams, engineers) in a streamlined way. Use a **centralized data platform** to share real-time data and risk assessments, enabling faster decision-making.
    b. Create interfaces that allow operational teams to input real-time observations or conditions from inspections, enhancing risk assessments and ensuring that critical factors (such as unforeseen changes in dike conditions) are incorporated into the decision-making process.
    c. Generate automated **reports** based on inspection data, including risk assessments and suggested actions, for various stakeholders. These reports can be tailored to the needs of each group (asset managers, policymakers, engineers) and include interactive visualizations or decision support tools.

Technology	Development Approach/Tools
Dynamic Risk Assessment Framework	Real-time data integration models (e.g., dynamic Bayesian networks, time-series analysis), unified risk models.
Risk Prioritization Algorithms	Multi-criteria decision analysis (MCDA), optimization algorithms for resource allocation, resilience and impact models.
Inspection Data Integration	Machine learning models for damage classification (e.g., CNNs for image data), data fusion methods.
Environmental Monitoring System	IoT sensors, spatiotemporal models for correlation (e.g., Kalman filters, regression), predictive analytics tools.
Predictive Learning Models	Time-series forecasting (e.g., LSTMs, GANs), continuous learning models, reinforcement learning for adaptive updates.
Risk Mitigation Models	Analytical geotechnical models, probabilistic simulations (e.g., Monte Carlo methods, FORM), coupled hydro-mechanical models.
Interdisciplinary Information Exchange	Centralized data platforms (e.g., cloud-based systems), REST APIs, and real-time dashboards with visualization libraries.
Automated Reporting Systems	Automated pipelines using natural language generation (NLG), interactive visualization tools (e.g., Plotly, Tableau), and agentic workflows.

Maintenance

- Maintenance is based on risk assessment
- Execution of maintenance is optimised in costs and capacity

1. **Risk-Based Maintenance Planning**
    a. Develop an algorithm that ranks dike sections based on the calculated risk of failure, potential damage, and impact. This helps allocate resources efficiently, focusing on high-risk areas before they become critical.
2. **Optimizing Maintenance Execution**
   Predictive Maintenance
    a. Use predictive analytics powered by machine learning models to predict when and where maintenance should be carried out based on historical data and current risk levels. By predicting failures before they occur, maintenance can be scheduled proactively, reducing downtime and costs.
    b. Develop optimization models that balance the cost of maintenance with available resources (e.g., labor, equipment). These models should prioritize maintenance activities in the most cost-efficient manner, while considering factors such as material availability and labor capacity.
    c. Create a system that schedules maintenance tasks based on risk priorities and resource availability. This could involve generating maintenance plans that align with seasonal weather conditions (e.g., performing high-risk maintenance before heavy rains) or resource constraints (e.g., contractor availability).

Data Based

a. Incorporate a cost-benefit analysis for each maintenance task, factoring in the potential cost of failure (e.g., flood damage, dike breach) versus the cost of preventative maintenance. This analysis will help prioritize maintenance activities based on both financial and safety considerations.
b. Track historical maintenance data to identify trends, recurrent issues, and cost patterns. This information can help forecast future maintenance costs and adjust plans accordingly.

Automated Inspection and Maintenance Robotics

a. Use drones (air, surface, boat) for routine inspections, while employing robotics for light maintenance tasks, reducing the need for manual labour in hazardous areas and improving maintenance efficiency.
b. Deploy robots or autonomous systems for specific maintenance tasks such as sealing cracks, reinforcing weak spots, or removing debris, reducing human intervention and costs.

Continuous Improvement Loop

a. Continuously feed data from maintenance outcomes back into the predictive models, improving their accuracy and helping to refine risk assessments over time.

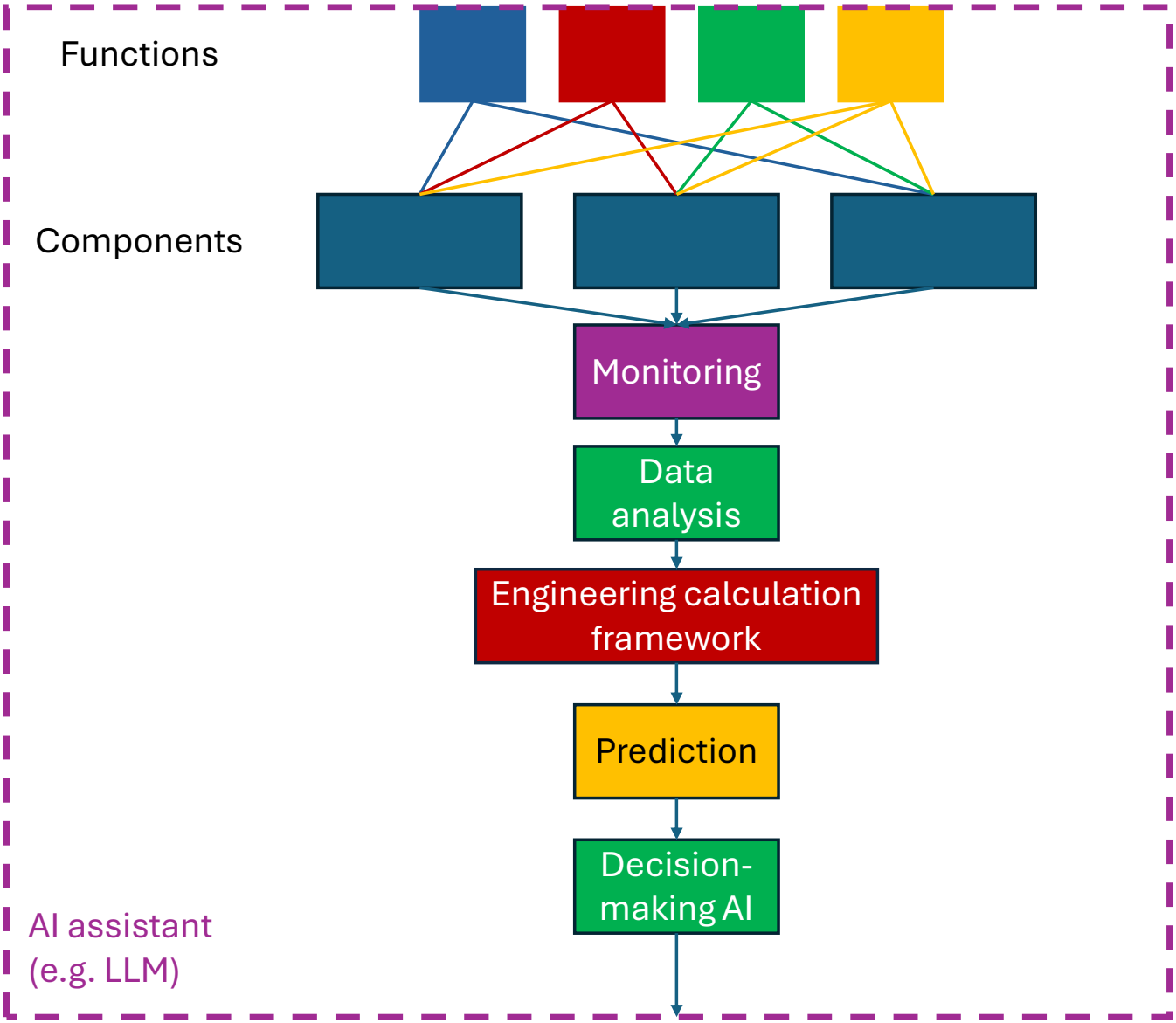
Geospatial mapping

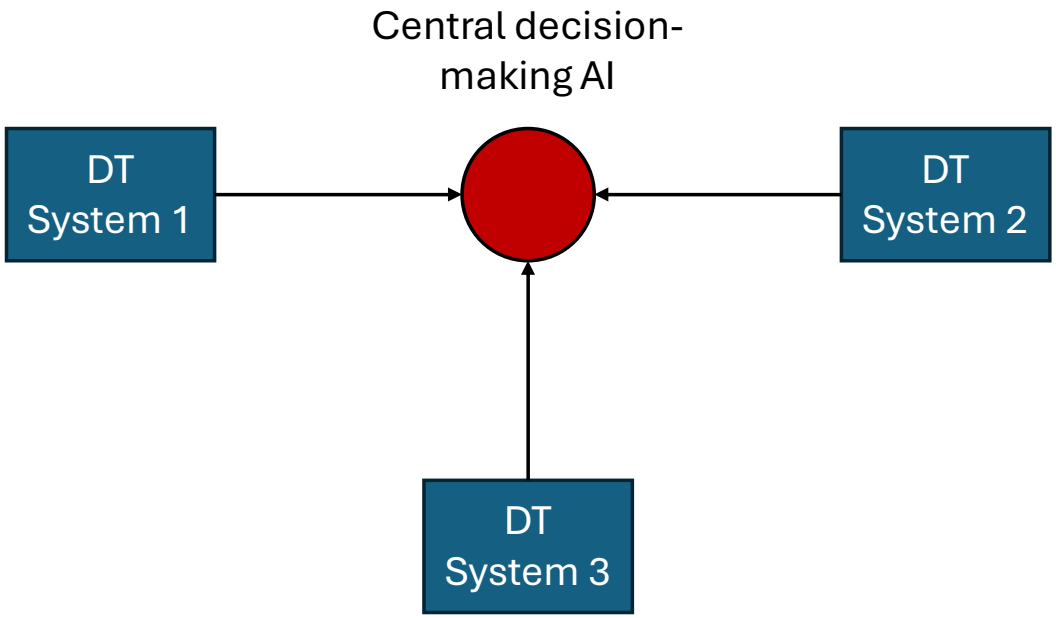
b. Use 3D models of the dike, incorporating inspection and maintenance data, to simulate and visualize potential risk scenarios, aiding in decision-making for both maintenance planning and execution. Here also spatial planning can be taken into account.

Technology	Development Approach/Tools
Risk-Based Maintenance Planning	Risk-ranking algorithms (e.g., decision trees, MCDA), impact modelling for prioritizing high-risk areas.
Predictive Maintenance Analytics	Time-series forecasting models (e.g., LSTMs, ARIMA), machine learning for failure prediction, optimization frameworks.
Cost-Effective Maintenance Execution	Cost-benefit analysis models, resource allocation algorithms, seasonal scheduling tools (e.g., constraint optimization).
Data-Driven Trend Analysis	Historical data analysis tools, trend forecasting models, maintenance tracking databases.
Automated Inspection and Robotics	Drone-based inspection tools (air, surface, boat), autonomous robots for crack sealing, debris clearing, and reinforcement.
Continuous Improvement Loop	Feedback systems for updating predictive models, closed-loop analytics for risk and maintenance refinement.
Geospatial Mapping for Planning	3D geospatial visualization tools (e.g., GIS software, LiDAR processing), spatial modelling for risk and resource planning.

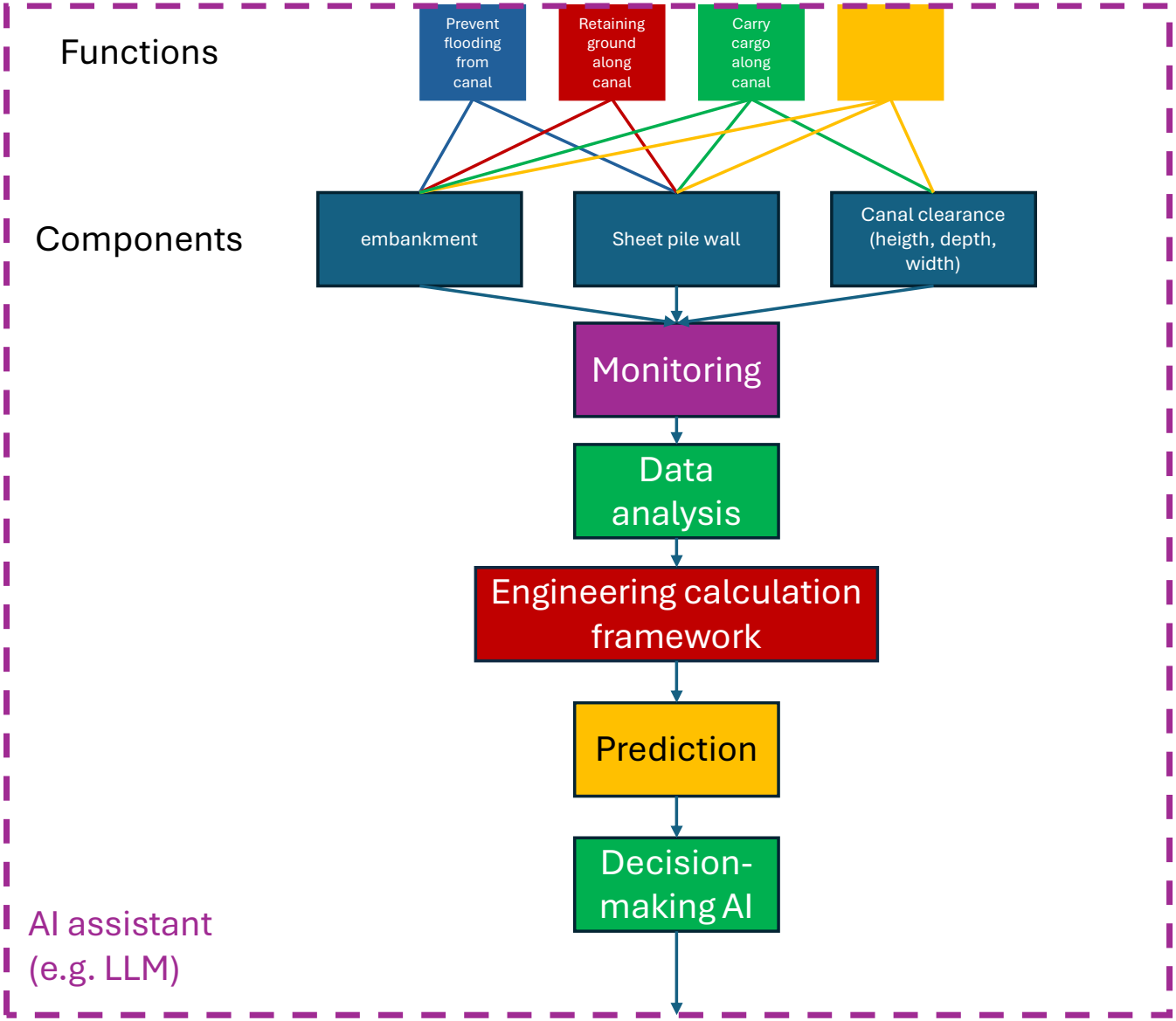
C Inrichting van de toekomst

Digital twin for a system

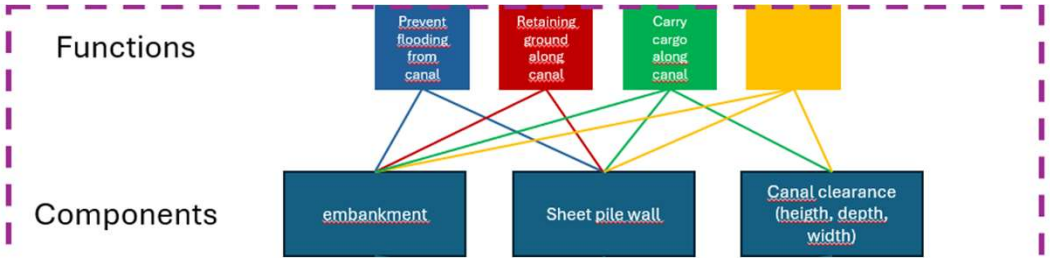



Central decision-making AI
DT System 1
DT System 2
DT System 3

Digital twin for a system - ARK



Functions and values



- Preventing flooding from the canal
  - Standard x
  - Failure probability/risk appetite y
- Retaining grond along canal
  - Standard xx
  - Failure probability/risk appetite yy
- Carry cargo along canal
  - Capacity z
  - Availability

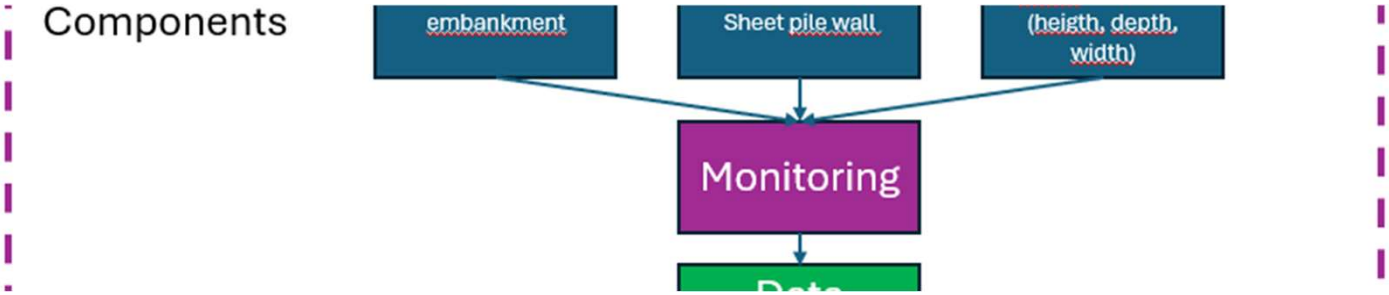
- Stakeholder needs
  - Discomfort/hindrance n?

Component == solution?

What it does (Function)	How well it does it (Value)
How it does it so well (Solution)	

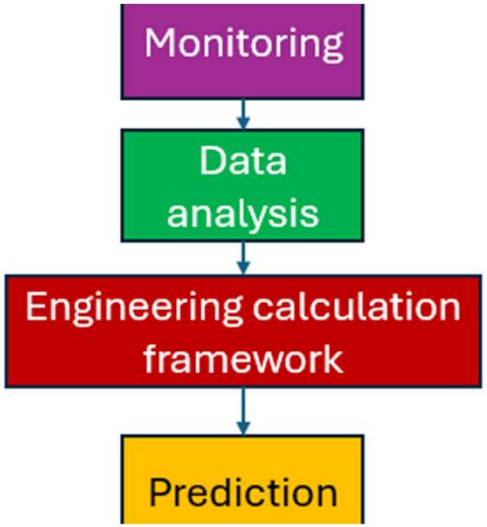
Monitoring

- Embankment
  - Stability
    - Displacement
    - Water pressure/pore pressure
- Sheet pile wall
  - Displacement
  - Deformation
  - Corrosion
- Canal clearance
  - Canal bottom level

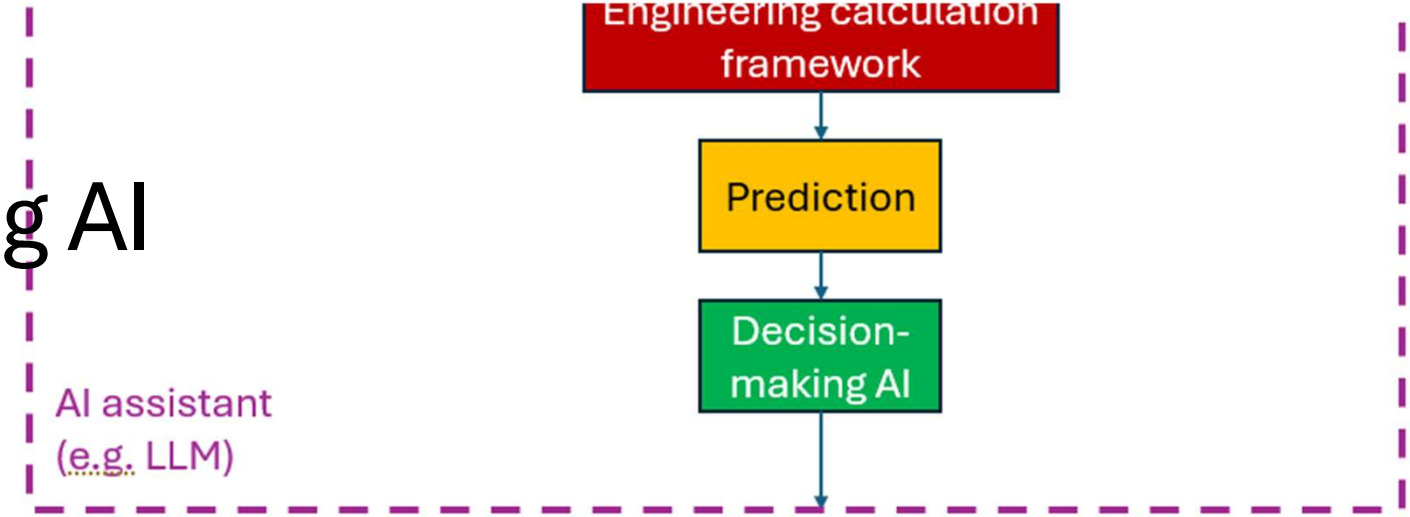


Data analysis / Engineering calculation framework

- Data analysis
  - Based on monitoring
- Engineering calculation framework
  - Fysical models



Prediction / Decision making AI

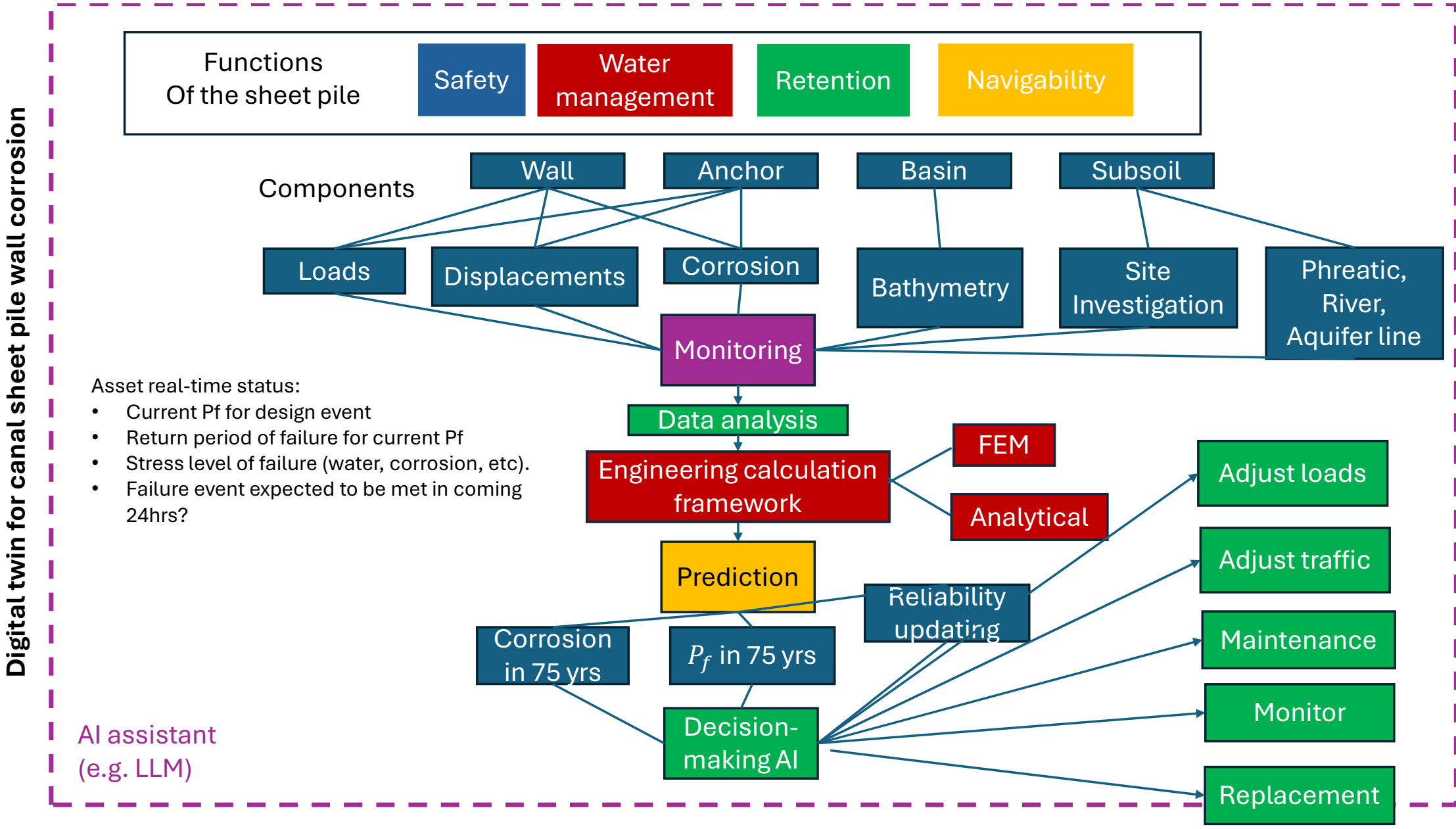


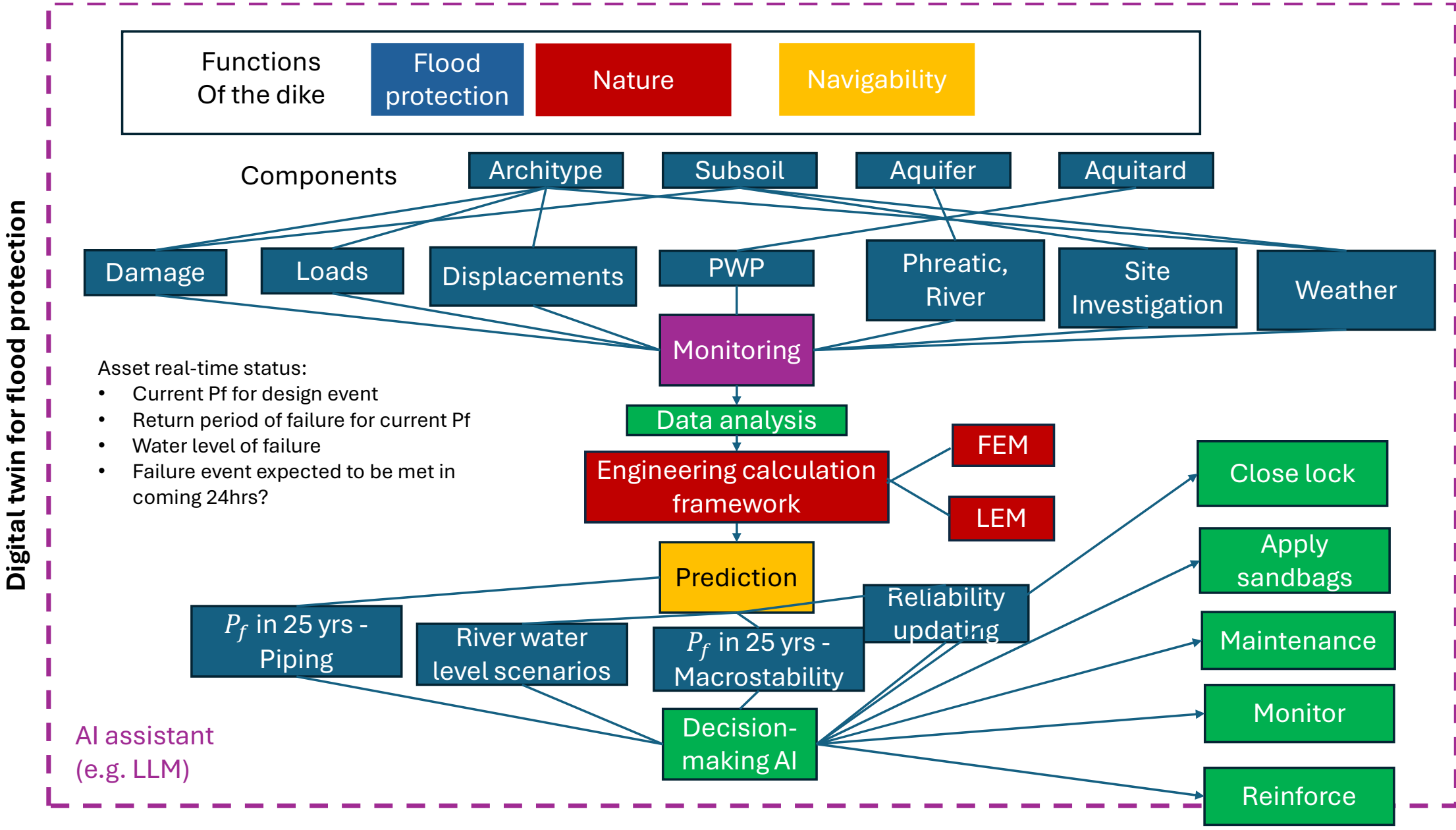
- Predicting decline of quality regarding the values

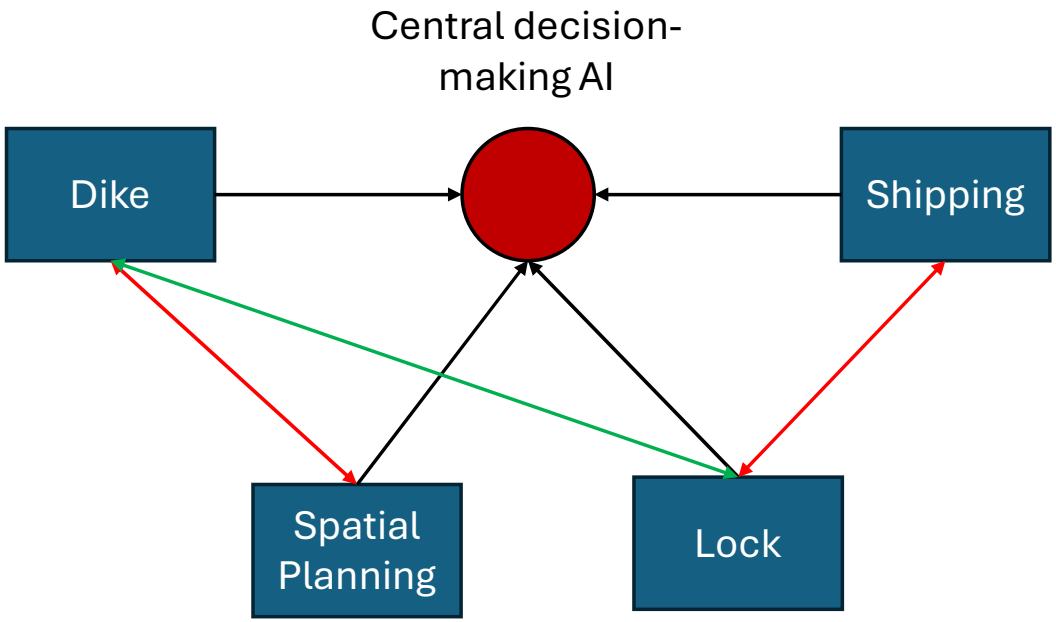
Decision making AI

- Optimal use of rescources (budget, time, etc.) and maximizing values

AI assistant to extract information from data in the system


Digital twin for canal sheet pile wall corrosion
Functions
Of the sheet pile
Safety
Water management
Retention
Navigability
Components
Wall
Anchor
Basin
Subsoil
Loads
Displacements
Corrosion
Bathymetry
Site Investigation
Phreatic, River, Aquifer line
Monitoring
Asset real-time status:
• Current Pf for design event
• Return period of failure for current Pf
• Stress level of failure (water, corrosion, etc).
• Failure event expected to be met in coming 24hrs?
Data analysis
Engineering calculation framework
FEM
Analytical
Prediction
Reliability updating
Corrosion in 75 yrs
P_f in 75 yrs
Decision-making AI
Adjust loads
Adjust traffic
Maintenance
Monitor
Replacement
AI assistant
(e.g. LLM)


Digital twin for flood protection
Functions
Of the dike
Flood protection
Nature
Navigability
Components
Architype
Subsoil
Aquifer
Aquitard
Damage
Loads
Displacements
PWP
Phreatic, River
Site Investigation
Weather
Monitoring
Asset real-time status:
• Current Pf for design event
• Return period of failure for current Pf
• Water level of failure
• Failure event expected to be met in coming 24hrs?
Data analysis
Engineering calculation framework
FEM
LEM
Prediction
P_f in 25 yrs - Piping
River water level scenarios
P_f in 25 yrs - Macrostability
Reliability updating
Decision-making AI
AI assistant
(e.g. LLM)
Close lock
Apply sandbags
Maintenance
Monitor
Reinforce


Central decision-making AI
Dike
Shipping
Spatial Planning
Lock