

TNO PUBLIEK

Molengraaffsingel 8
2629 JD Delft

www.tno.nl

T +31 15 820 09 20

TNO-rapport

TNO 2022 R12614

Haalbaarheidsstudie Moerdijkbrugzone

Datum	3 april 2023
Auteur(s)	Elena Chochanova, Brian Brongers, Joost Adriaanse
Aantal pagina's	41 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	3
Opdrachtgever	Rijkswaterstaat
Projectnaam	RWS-I&W-TNO Digitalisering
Projectnummer	060.51312

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2022 TNO

TNO PUBLIEK

Inhoudsopgave

1	Naar de eerste toepassing van technieken ERP-SI in het fieldlab Moerdijkbrugzone	3
2	Technieken uit het Early Research Programme Structural Integrity (ERP-SI)	7
2.1	Modelkalibratie – constructieve herberekening a.d.h.v. Bayesian inference	8
2.2	Bridge Weigh in Motion – de brug als weegschaal	9
2.3	LoadMap – verkeersbelastingen op de kaart	11
2.4	Common Data Environment – dataaansluiting via een ‘Data Broker’ en verwerking middels FAIR principes	14
3	Toepassingsgebieden en potentiële waarde technieken	19
3.1	Herbeoordeling constructieve veiligheid	22
3.2	V&R prioritering stalen bruggen	24
3.3	Instandhouding bij issues	25
3.4	Structural Health Monitoring	26
3.5	Generieke data toegankelijkheid	27
4	Haalbaarheid 1^e toepassing	30
4.1	Haalbaarheidscriteria	31
4.2	Haalbaarheid per techniek	32
5	Conclusies en vooruitblik	35
5.1	Techniek-specifieke aanbevelingen	35
5.2	Algemene aanbevelingen	37
6	Ondertekening	38
	Bijlage 1 – TRL-niveaus	39
	Bijlage 2 – V&R toepassingsgebieden en procesoverzicht	40
	Bijlage 3 – Geïnterviewde personen	41

1 Naar de eerste toepassing van technieken ERP-SI in het fieldlab Moerdijkbrugzone

Door TNO is binnen het *Early Research Programme Structural Integrity* (ERP-SI) een aantal nieuwe technieken ontwikkeld ten behoeve van de primaire processen binnen de vervangings- en renovatieopgave (V&R) in Nederland. Dit vierjarige onderzoeksprogramma is gestart in 2019 en loopt af in 2022. Met het fieldlab Moerdijkbrugzone hebben TNO en Rijkswaterstaat (RWS) een proeftuin ingericht waar verdere ontwikkeling én eerste toepassing van de ontwikkelde technologie kan plaatsvinden.

De technieken in het ERP-SI zijn ontwikkeld met het oog op toepassing binnen assetmanagementprocessen van infrastructuurbeheerders, waaronder de processen gerelateerd aan de V&R-opgave. Hierbij kan onder andere gedacht worden aan het prioriteren van assets op basis van risico's en de (her)beoordeling van bruggen op constructieve veiligheid. De ontwikkeling van de technieken heeft binnen een onderzoekomgeving plaats gevonden en de technieken zijn qua ontwikkeling voorbij het stadium van verkenning. Er is echter nog onvoldoende inzicht in de toepasbaarheid en inpasbaarheid van de ontwikkelde technieken binnen de processen van beheerders zoals RWS. Daarom is het moeilijk een plan te ontwikkelen voor de verdere ontwikkeling, toepassing, implementatie en opschaling van de technieken in de RWS praktijk. Het fieldlab Moerdijkbrugzone geeft de mogelijkheid voor een eerste toepassing waarmee ervaring in een (operationele) praktijkomgeving kan worden opgedaan. Hiermee kunnen inzichten worden verworven die helpen bij verdere besluitvorming en planning van bredere toepassing en opschaling. Vervolgens kan een beeld gevormd worden over hoe de technieken geïmplementeerd kunnen worden. De centrale vraag van dit onderzoek is:

*Vraag-
stelling*

In welke mate kunnen de technieken die binnen het Early Research Programme Structural Integrity zijn ontwikkeld toegepast worden in een praktijkomgeving zoals de Moerdijkbrugzone, en welke stappen zijn nodig om te komen tot het inzetten en testen van deze technieken in een toepassing onder operationele omstandigheden?

Aanpak

Deze vraag is binnen de samenwerking tussen RWS en TNO in het kader van Vervanging & Renovatie (V&R) en Data & Digitalisering (D&D) geformuleerd. In deze haalbaarheidsstudie zijn de verschillende technieken hiertoe nader beschouwd. Met betrokkenen – binnen RWS en TNO – zijn interviews (zie Bijlage 3 – Geïnterviewde personen) gehouden om mogelijke toepassingsgebieden te identificeren en de toegevoegde waarde van de technieken voor deze toepassingsgebieden te duiden. Daarbij is specifiek gekeken naar de benodigde stappen, investeringen en aandachtspunten richting een eerste toepassing van die technieken in proeftuin Moerdijkbrugzone.

Conclusie

Alle technieken die in deze studie zijn beschouwd zijn technologisch gezien gereed voor eerste toepassing in de Moerdijkbrugzone en kunnen hierbij ook waarde genereren. Deze eerste toepassingen moeten ook het doel hebben om de technieken verder te ontwikkelen en toe te werken naar bredere toepassing en opschaling.

*Argumenten
& leeswijzer*

De conclusie wordt onderbouwd door de drie deelconclusies uit de drie volgende hoofdstukken, hieronder samengevat:

- Qua technologie zijn alle technieken het stadium van verkenning succesvol gepasseerd, en bevinden zich nu in het stadium van verdere ontwikkeling. Voor alle technieken is vastgesteld dat zij potentie hebben om waarde te leveren in verschillende toepassingsgebieden (zie ook *hoofdstuk 3*), ook nu de technieken nog in een stadium van ontwikkeling zitten. De technieken zijn verder qua ontwikkeling voldoende volwassen, zodat verdere ontwikkeling gepaard kan gaan met (experimentele) toetsing in de praktijk, parallel aan het huidige primaire proces. Toetsing in de praktijk wordt gezien als de manier om de ontwikkeling verder vorm te geven en te ondersteunen.
Zie *hoofdstuk 2* voor meer informatie.
- Alle technieken hebben één of meerdere toepassingsgebieden waar zij van waarde kunnen zijn. Voor deze studie is naar vijf toepassingsgebieden gekeken die allen relatie hebben met het proces van vervanging & renovatie. Met name in het herbeoordelen en prioriteren van stalen bruggen kunnen de technieken toegepast worden. Uit gesprekken met experts van TNO en RWS wordt toepassing van deze technieken ook als waardevol gezien, al wordt opgemerkt dat de technieken verschillen in de manier waarop zij waarde leveren.
Zie *hoofdstuk 3* voor meer informatie.
- Elke techniek bevindt zich nog in een stadium van ontwikkeling en de benodigde stappen om te komen tot een eerste toepassing verschillen per techniek en per toepassingsgebied. Aan de hand van drie dimensies van haalbaarheid (techniek, mensen, processen) is nader beschouwd wat de aandachtspunten zijn richting eerste toepassing.
Zie *hoofdstuk 4* voor meer informatie.

Aanbevelingen

In deze studie lag de nadruk op de haalbaarheid van een eerste toepassing van de technieken vanuit het ERP-SI buiten het fieldlab Moerdijkbrugzone op andere bruggen. Met andere woorden: de nadruk lag op de vraag 'of de technieken breder toepasbaar zijn en wat nodig is om deze toe te passen'. De uitkomsten van deze haalbaarheidsstudie bieden daarmee een basis voor een plan van aanpak voor deze eerste toepassing. Op basis van deze studie wordt voorgesteld om:

- De techniek 'Modelkalibratie a.d.h.v. Bayesian inference' toe te passen bij aanstaande herbeoordelingen in de Moerdijkbrugzone (Moerdijkbrug en Merwedeburg Papendrecht). Hiervoor is het nodig om voldoende expertise beschikbaar te stellen om de uitkomsten te beoordelen en de techniek verder te valideren. Toepassing van deze techniek kan parallel lopen aan de 'reguliere' herbeoordeling van de Moerdijkbrug, en eventueel de Merwedeburg Papendrecht en/of andere bruggen die binnenkort herbeoordeeld gaan worden. Samenwerking met de ingenieursbureaus die deze bruggen gaan herbeoordelen is hierbij nodig en geeft ook waardevolle inzichten over implementatie in de praktijk. Bij bruggen anders dan de Moerdijkbrug dient nauwe afstemming plaats te vinden over de uit te voeren meetcampagnes en constructieve rekenmodellen, en is het nodig dat TNO hier toegang tot krijgt.
- De techniek 'Bridge Weigh-in-Motion' op een breder gebied toepasbaar te maken door de techniek te gebruiken op verschillende typen brugdekken. De techniek is vrij vergevorderd en kan in veel gevallen al toegepast worden, maar

is nu alleen nog voor een beperkt type brugdek getest. Hier moet zoveel mogelijk gebruik gemaakt worden van de gevallen waar een meetsysteem al wenselijk is ten behoeve van een (aanstaande) herbeoordeling, bijvoorbeeld de Moerdijkbrug en de Merwedeburg Papendrecht. Verschillende marktpartijen hebben een vergelijkbare techniek of zijn geïnteresseerd om deze te ontwikkelen. Het is dan ook aanbevolen om de samenwerking met en de overdracht naar de markt te verkennen.

- De techniek 'LoadMap' nog verder te ontwikkelen voordat deze gebruikt kan worden voor een 1^e toepassing. Zodra dit gedaan is kan de techniek breed toegepast worden en levert met name meerwaarde in de aankomende herbeoordeling van bruggen in het Nederlandse hoofd- en onderliggende wegennet waar geen individuele metingen gedaan gaan worden. De hoofduitdaging van deze techniek zit momenteel in de betrouwbaarheid van de output door het gebrek aan mogelijkheid om onzekerheden (m.b.t. data input) toe te kennen aan de waardes. Verdere technische validatie is nodig om deze techniek naar een hoger TRL-niveau te tillen.
- De techniek 'Common Data Environment' (CDE) rondom monitoringsdata voort te zetten in de proeftuinomgeving Moerdijkbrugzone, en parallel, gebruikmakend van de ervaringen die daaruit komen met relevante RWS-ers (GPO, CIV), te onderzoeken in hoeverre en hoe e.e.a. goed ondergebracht kan worden in ontwikkelingen rondom de Centrale Toegangspunt Data (CTD) en Datagedreven Asset Management (DG-AM) binnen RWS. De CDE vindt aansluiting op een generieke uitdaging als het gaat om toegankelijkheid van data. De meerwaarde is potentieel heel groot. Daarnaast is ook het doel om de CDE-technologie te gebruiken om andere data toegankelijk te maken die voor de herbeoordeling van belang kan zijn om te delen. Denk hierbij aan inspectierapporten, BIM-modellen en GIS-modellen. Het hebben van een CDE met monitoringsdata van de proeftuinomgeving Moerdijkbrugzone van waaruit monitoringsdata makkelijk met andere partijen gedeeld kan worden, heeft ook waarde voor de toekomstige herbeoordeling van de brug en stimuleert innovatie door andere partijen in de proeftuin. Dit laatste bijvoorbeeld in het kader van het Nationale Groeifonds project Toekomst Bestendige Leefomgeving waarin de Moerdijkzone één van de proeftuinen wordt.

Gelijktijdig is ook opgemerkt dat bij vervolgstappen het aspect van '(op)schaalbaarheid' in toenemende mate van belang zal zijn. In hoofdstuk 5 wordt daarom een vooruitblik hierop gegeven. Om de innovaties te stroomlijnen en concrete stappen te maken wordt aanbevolen een gezamenlijk coördinerend en uitvoerend team op te zetten. In een vervolgstudie zal dit team belangrijke input kunnen leveren door het uitvoeren van een kosten-batenanalyse voor de technieken in de onderzochte toepassingsgebieden.

Terminologie

In de volgende alinea's zijn een aantal termen beschreven die gebruikt zullen worden om de haalbaarheid per techniek-toepassingsgebied-combinatie te kunnen omschrijven.

1. Haalbaarheid

Haalbaarheid betekent in het kort de mogelijkheid om iets volgens plan uit te voeren. Wanneer we het over haalbaarheid van het toepassen van een techniek hebben, dan bedoelen we de mate van operationele gereedheid van een techniek

gecombineerd met de voorwaarden en criteria binnen de organisatie die bepalend zijn voor de implementatie van deze techniek.

Een techniek wordt operationeel gevalideerd en (technisch) gereed gemaakt voor toepassing tussen TRL 7 en TRL 9¹, dat wil zeggen tussen het niveau waar het getest kan worden onder operationele omstandigheden en het niveau waar het helemaal klaar is voor de eerste echte toepassing in de praktijk.

Andere bepalende voorwaarden en criteria voor de haalbaarheid kennen meerdere categorieën, zoals bijvoorbeeld de gereedheid van de organisatie en van de technische systemen, maar ook de procesmatige of economische criteria die hier een rol in kunnen spelen.

2. Schaalbaarheid

De term schaalbaarheid betreft de mate tot welke een techniek operationeel breder toegepast kan worden, bijvoorbeeld in hoeverre de techniek, na een eerste toepassing op een asset, makkelijk geoptimaliseerd en toegepast kan worden op meerdere assets. De inschatting van de schaalbaarheid geeft inzicht in de mate van herhaalbaarheid en duurzame bruikbaarheid van een techniek in de hele organisatie.

3. Digital Twin (DT)

Er zijn op dit moment veel verschillende vigerende interpretaties binnen de bouwsector van wat een Digital Twin zou moeten zijn en welke functionaliteiten het zou kunnen omvatten. Binnen de context van deze studie definiëren wij een DT als een virtueel model met een feedback-lus naar de fysieke asset, waarmee de toestand, het gedrag en de prestaties van asset bewaakt, geanalyseerd, voorspeld en gecontroleerd kunnen worden². De feedback-lus tussen de digitale tweeling en de fysieke asset kan op vele manieren worden gerealiseerd, zoals via inbedrijfstellings- en inspectierapporten, bouwtekeningen, sensor- en meetdata, gebruikersklachten en operationele prestatie-indicatoren.

¹ Zie Bijlage 1 – TRL-niveaus.

² R. Sebastian, M. Böhms, and B. Luiten, "Developing a standardized approach of Asset Lifecycle Information Modelling for Semantic Digital Twin in the built environment," 2021. Conference paper

2 Technieken uit het Early Research Programme Structural Integrity (ERP-SI)

In het *Early Research Programme Structural Integrity* (ERP-SI) heeft TNO verschillende technieken ontwikkeld met het oog op toepassing binnen assetmanagement-processen van infrastructuurbeheerders, waaronder de processen gerelateerd aan het RWS-programma Vervanging en Renovatie (V&R). In de studie zijn vier technieken nader beschouwd: Modelkalibratie, Bridge WiM, Loadmap en Common Data Environment (CDE). Per techniek is bepaald in welk stadium van ontwikkeling de technieken zich bevinden. Hiervoor is gebruik gemaakt van *Technology Readiness Levels (TRL)*³. De TRL schaal is een middel om het inzichtelijk te maken waar een technologische innovatie zich bevindt in zijn technisch en functioneel ontwikkeling; hoe hoger de TRL cijfer, hoe beter ontwikkeld de technologie. TRL 9 is de hoogste cijfer binnen deze schaal en betekend dat de technologie klaar voor toepassing is.

Qua technologie zijn alle technieken het stadium van verkenning succesvol gepasseerd (TRL 1-2), en bevinden zich nu in het stadium van verdere ontwikkeling (zie onderstaande tabel). Echter in het ERP-SI zijn geen producten geleverd boven TRL niveau 6, dat wil zeggen: die binnen operationele omstandigheden als prototype getest zijn geweest. Voor alle technieken is vastgesteld dat zij potentie hebben om waarde te leveren in verschillende toepassingsgebieden (zie ook hoofdstuk 3), ook nu de technieken nog in een stadium van ontwikkeling zitten. De technieken zijn verder qua ontwikkeling voldoende volwassen dat verdere ontwikkeling gepaard kan gaan met (experimentele) toetsing in de praktijk. Toepassing in de praktijk wordt gezien als de manier om de ontwikkeling verder vorm te geven en te ondersteunen. Met andere woorden kunnen eerste toepassing en ontwikkeling hand in hand gaan. De technieken zijn in onderstaande tabel beschreven met aan nadere toelichting in de hierop volgende paragrafen.

Tabel 1: De vier technieken ontwikkeld binnen ERP-SI en hun corresponderende TRL-niveau

Techniek	TRL-niveau
Modelkalibratie a.d.h.v. Bayesian Inference Een constructieve beoordeling op basis van een model dat enige aannames bevat, die vervolgens verkleind wordt door gebruik te maken van de combinatie van meetdata en Bayesian Inference. Zie par 2.1	TRL 3/4
Bridge Weigh in Motion (WiM) Systeem dat verkeersbelastingen op een brug kan bepalen op basis van rekmetingen met data-verwerkende algoritmes. Zie par 2.2	TRL 5/6
LoadMap De LoadMap is een tool die de verkeersbelastingen en de effecten daarvan op wegen en kunstwerken kan voorspellen en weergeven op een landelijke digitale kaart. Zie par 2.3	TRL 3/4

³ Zie Bijlage 1 voor een toelichting en gehanteerde werkwijze.

Techniek	TRL-niveau
Common Data Environment (CDE) De CDE is een digitale data omgeving waar relevante data over beheerobjecten wordt ontsloten en minimaal vindbaar of benaderbaar wordt gesteld. Zie par 2.4	TRL 3/4 ⁴

2.1 Modelkalibratie – constructieve herberekening a.d.h.v. Bayesian inference

2.1.1 Probleembeschrijving

De constructieve herbeoordeling is momenteel een lang proces (twee tot drie jaar) dat erg arbeidsintensief is (heeft een team nodig van zo'n tien personen). Door het gebruik van simulaties kan in minder tijd meerdere situaties beschouwd worden dan conventioneel mogelijk met experimenten en metingen. Echter om nauwkeurige simulaties te doen is er een nauwkeuriger model nodig dat de werkelijkheid goed beschrijft, het kalibreren van een dergelijk model is veel handmatig werk. De kalibratie kan via Bayesian inference op een gestructureerde en snellere manier plaatsvinden. Bovendien heeft het ook het voordeel dat (meet- en model)onzekerheden mee worden genomen door het hele proces. Een beoordeling met Bayesian inference kan op twee manieren: een snelle beoordeling op basis van een (relatief) simpel model, en een meer omvangrijke beoordeling met een meer gedetailleerd model. Het voordeel bij het gedetailleerde model ten opzichte van de standaard constructieve herbeoordeling is het inzichtelijk brengen van onzekerheden in de parameters van het rekenmodel. In het maken van een rekenmodel zitten altijd enkele aannames, bijvoorbeeld over bepaalde afmetingen, materiaaleigenschappen of in welke mate een oplegging scharnierend is. Dit komt omdat het ontwerp vaak niet vergelijkbaar is met de daadwerkelijke (staat van de) brug. Deze aannames geven een bepaalde onzekerheid, omdat dit in veel gevallen afhankelijk zijn van expert judgement. Met gebruik van Bayesiaanse gevolgtrekking (inference) kunnen deze onzekerheden verkleind worden door gebruik te maken van het gemeten gedrag van een brug.

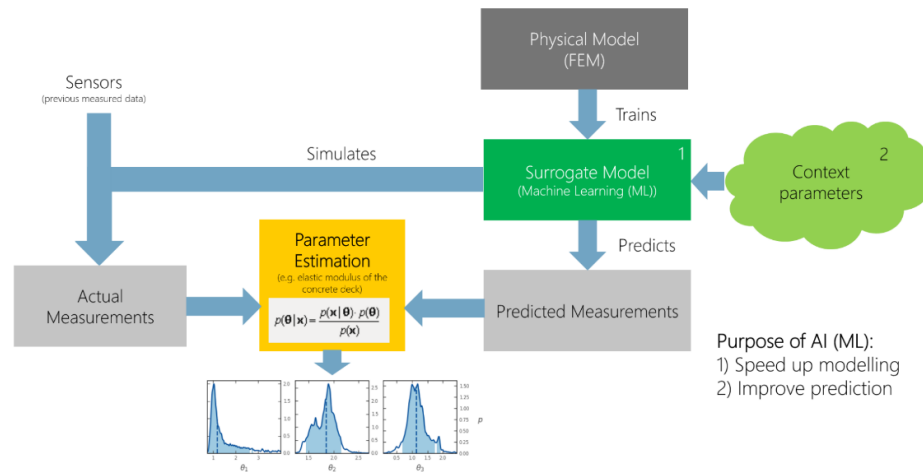
2.1.2 Techniekbeschrijving & context

TNO heeft in samenwerking met BAM (Bundesanstalt für Materialforschung und prüfung) een open source tool ontwikkeld voor de parameter schatting van statistische problemen genaamd ProbEye. De tool koppelt model (e.g. eindige elementen model) en meetdata om vervolgens een schatting te kunnen maken voor de model(input)parameters. Het maakt gebruik van Bayesiaanse gevolgtrekking om de waarschijnlijkheid te bepalen dat de meetdata gevonden wordt gegeven de modelparameters. Hieruit volgt niet een enkel antwoord, maar een verdeling met bijbehorende waarschijnlijkheden op deze mogelijke modelparameters.

Het model moet voor de verschillende permutaties van gekozen modelparameters herhaaldelijk uitgerekend worden en voor een model met een lange rekentijd duurt dit als nog erg lang. Om dit te verhelpen kan een surrogaat model gemaakt worden van een fysische model. Het surrogaat is een simpele analytische functie die ideaal gezien dezelfde output geeft als het fysische model gegeven dezelfde input. Het surrogaat model wordt getraind aan de hand van input-output combinaties van het

⁴ De totale geïntegreerde CDE heeft een niveau van PoC en daarom een lagere TRL-niveau. De gebruikte softwareoplossingen zijn veel volwassenere en hebben een veel hogere TRL-niveau van 8/9

fysische model. In de Bayesiaanse gevolgtrekking kan het fysische model vervangen worden door de getrainde surrogaat en omdat het een analytische functie is kan het veel sneller geëvalueerd worden dan een eindige elementen model.



Figuur 1 ProbEye parameter schatting in relatie tot EEM en Surrogaat modelleren

2.1.3 Toegevoegde waarde

Met deze techniek kunnen onzekerheden in parameters worden gekwantificeerd. Partiele factoren kunnen omlaag als je onzekerheden weg kunt nemen. Hierdoor is het model ook minder afhankelijk van (subjectieve) individuele keuzes van de ingenieur. Daarnaast is het een iteratief proces: het model kan nog verder aangescherpt worden met nieuwe data.

2.1.4 Randvoorwaarden en aandachtspunten bij het toepassen

Voor het gebruik van deze techniek zijn er enkele vereisten op het gebied van datagebruik en beschikbare rekencapaciteit. Dit houdt in dat voor breder gebruik een platform nodig is waarop allerlei soorten data opgeslagen kunnen worden, zoals meetdata en analyseresultaten. Deze data moet goed bereikbaar, traceerbaar en identificeerbaar zijn. Daarnaast is het essentieel dat (een deel van) de dataverwerking afgelost kan worden naar de cloud. Er is een grote rekenkracht behoefte voor het trainen van het surrogaat waardoor het niet praktisch is deze lokaal te draaien, maar parallel in de cloud. Dit geeft ook praktische problemen in de vorm van benodigde licenties.

2.1.5 Technische gereedheid

Er is een proof-of-concept van de techniek in het gebruik op meerdere bruggen (Brug 705, IJsselbrug, en nu Moerdijkbrug). Voor de Moerdijkbrug is de techniek toegepast op een gesimplificeerd rekenmodel, en wordt de casus voor een gedetailleerd model nu uitgewerkt. De techniek wordt hiermee ingeschaald op TRL-niveau 3/4.

2.2 Bridge Weigh in Motion – de brug als weegschaal

2.2.1 Probleembeschrijving

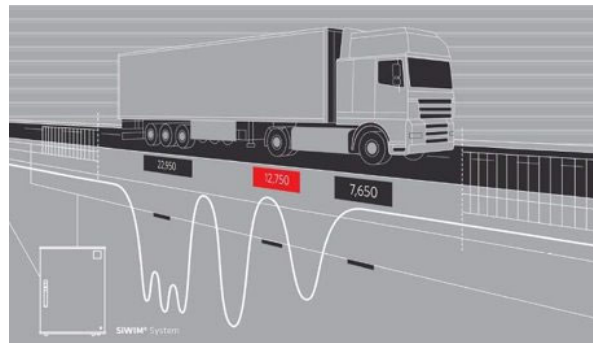
Voor het beoordelen van bruggen en viaducten is het van belang om informatie te hebben van de verkeersbelastingen op deze bruggen en viaducten. Voor het

bepalen van de belastingen wordt uitgegaan van normen of van metingen. Deze metingen worden over het algemeen niet op de brug zelf uitgevoerd, hierdoor kan het daadwerkelijke verkeer over de brug afwijken van de metingen. Bridge-Weigh in Motion (WiM) is een techniek om de verkeersbelasting op de brug zelf te meten. Hierdoor worden de metingen brug-specifiek.

2.2.2 *Techniekbeschrijving & context*

Bridge-WiM is een systeem dat de brug als een weegschaal gebruikt. Door middel van rekstrookmetingen en een data-verwerkend algoritme kan het systeem de verkeersbelasting op een specifieke brug bepalen en de overbelading van vrachtwagens vaststellen. Het systeem kan met behulp van groepen rekstroken met verschillende lengte- en dwarsposities:

1. De snelheid van verkeer afleiden (d.m.v. een correlatie algoritme);
2. Controleren of er activiteit plaatsvindt (d.m.v. een rek drempel);
3. Het aantal assen, onderlinge as afstand en aslast bepalen;
4. Het aantal vrachtwagens vastleggen;
5. De dwarspositie van passerend verkeer bepalen;



Figuur 2 Bridge-WiM: een brug als weegschaal

2.2.3 *Toegevoegde waarde*

Het Bridge-WiM systeem heeft een aantal grote voordelen tegenover het gebruik van conventionele WiM-stations. Allereerst kan het Bridge-WiM systeem nauwkeuriger en meer betrouwbaar beeld geven van de exacte belasting op een brug in het hoofdwegennet dan een normaal WiM-station. De afstand tot een nabijgelegen WiM-station kan groot zijn, en dat kan betekenen dat de data hiervan niet volledig representatief is voor de brug. Daarnaast is het met Bridge-WiM mogelijk om sensoren bij specifieke details te plaatsen en zo doelgerichter te meten. Hiermee kan ook veel winst behaald worden bij bruggen buiten het snelwegennet.

Een ander groot voordeel is dat het systeem minder onderhoud nodig heeft, en wanneer er onderhoud nodig is, kan dit zonder de weg af te sluiten.

2.2.4 *Randvoorwaarden en aandachtspunten bij het toepassen*

Het systeem is nu uitgebreid getest voor een stalen brug met een HSB-druklaag en een troggendek. Om meer vertrouwen te krijgen in het systeem en de algoritmes die het systeem gebruikt zouden er ook een validatie gedaan moeten worden op een brug met asfalt, omdat de lastspreiding in dat geval meer temperatuurafhankelijk is. En bij een brug met plaatverstijvers zoals bulbs in plaats van troggen. In verband met opstartkosten is het wenselijk om bij een meetcampagne van een dergelijke brug aan te sluiten.

Een belangrijke randvoorwaarde voor de toepassing van Bridge-WiM is vrijheid in het bepalen van de sensorlocaties. De hoeveelheid informatie die ingewonnen kan worden is hier afhankelijk van. Het is dan ook essentieel dat het invloedsvlak goed bepaald is. Hiervoor is een ballasttest een pre, maar niet noodzakelijk bij aanwezigheid van een EE-model.

2.2.5 *Technische gereedheid*

De techniek is ver gevorderd. Het systeem is in staat twijfelachtige data te markeren en de resultaten die gevonden zijn voor de Moerdijkbrug komen overeen met het nabijgelegen WiM-station. Zoals eerder genoemd is het essentieel voor een brede toepassing binnen RWS om de techniek te testen bij andere brugdektypen, bijv. een brugdek met asfalt.

2.3 **LoadMap – verkeersbelastingen op de kaart**

2.3.1 *Probleembeschrijving*

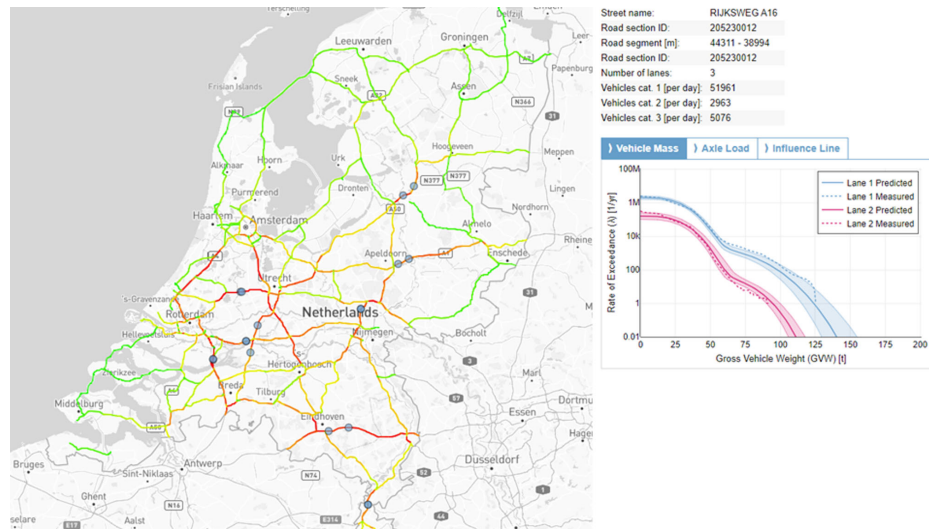
Het Nederlandse hoofdwegenet wordt steeds meer belast door zwaardere en grotere aantallen verkeer. RWS wil iedere 5 tot 10 jaar deze verkeersbelastingen (door TNO laten) vergelijken met de belastingmodellen van de Eurocodes voor UGT verificatie om, indien nodig, de waarden van deze modellen bij te stellen. De TNO methodiek is gebaseerd op het opstellen van probabilistische modellen voor de verkeersbelastingen op basis van de meest zware locatie in Nederland (snelweg A16 bij de Moerdijkbrug) en aannames voor trends in verkeersbelasting(effect)en in de toekomst en voor variaties van verkeersbelastingen op verschillende plekken in Nederland. De resulterende eventuele aanpassingen van de belastingmodellen van de Eurocodes gelden voor het gehele Nederlandse hoofdwegenet, onafhankelijk van type, lengte en locatie van de bruggen.

Voor optimale beslissingen over V&R maar ook voor verbouw en ontwerp van bruggen, is het noodzakelijk dat er een goed overzicht beschikbaar is van de verkeersbelastingtrends en belastingeffecten op de wegennet, ook voor locaties waar geen meetsystemen, zoals WiM stations, beschikbaar zijn. Door heel Nederland zijn er slechts 9 weegpunten⁵ die informatie over voertuigen (bijv. aslasten en as afstanden, snelheid en tijdstip van passage) kunnen meten. Dat betekent dat maar een magere bandbreedte van de landelijke verkeersbelastingdata op de rijkswegen meetbaar en beschikbaar is. Daarnaast is er op dit moment geen uitgebreide tool beschikbaar die verkeersbelastingdata, samen met de verkeersintensiteitsdata en de uitkomsten van constructieve berekeningen in één overzicht kan tonen.

2.3.2 *Techniekbeschrijving & context*

De LoadMap is een tool die de verkeersbelastingen en de effecten daarvan op wegen en kunstwerken kan voorspellen en weergeven op een landelijke digitale kaart. Het is in essentie een hulpmiddel waarmee de object- of corridor-specifieke belastingmodellen kunnen worden afgeleid. De eerste ontwikkelingsfase van de LoadMap focust op verkeersbelastingmodellen voor de beoordeling van bruggen en viaducten met betrekking tot UGT condities. In principe kan de methodiek van de LoadMap ook uitgebreid worden voor vermoeiing van stalen bruggen en voor wegen.

⁵ [Kaart van weegpunten in Nederland | Publicatie | Inspectie Leefomgeving en Transport \(ILT\) \(ilent.nl\)](#). Op het moment van schrijven zijn niet alle 9 stations actief en/of gekalibreerd.



Figuur 3: Impressie van de LoadMap online hulpmiddel

De huidige versie van de LoadMap (gericht op UGT van bruggen) hangt af van twee databronnen:

- 1) Data over de verkeersbelastingen afkomstig van de WiM stations in Nederland.
- 2) Data over de verkeersintensiteit op het gehele wegennet afkomstig van het INWEVA (INtensiteiten op WEgVAkken) data-inwinningsstelsel van RWS, gebaseerd op data van NDW.

De LoadMap gebruikt probabilistische (Weibull) modellen voor de verkeersbelastingen (bijv. voertuiggewicht en aslasten) en voor de relaties tussen de verkeersbelastingen en de verkeersintensiteit. Deze modellen en relaties zijn noodzakelijk om de verkeersbelastingen op andere locaties van het wegennet, waar er geen meetsysteem is, te voorspellen. Met behulp van invloedslijnen kunnen vervolgens belastingeffecten bepaald worden (en een locatiegebonden belastingfactor afgeleid worden).

2.3.3 Toegevoegde waarde

De LoadMap levert inzicht in de verkeersbelastingen op locaties in het gehele wegennet in Nederland ongeacht of er een WiM station in de buurt is of niet. Door het feit dat de LoadMap WiM-data combineert met data uit constructieve modellen, is het in staat om een voorspelling van de verkeersbelastingeffecten te maken, die nauwkeuriger is dan die op basis van de ontwerpbelastingmodellen van de huidige normen voor bruggen.

De techniek heeft als doel het afleiden van object- of corridor-specifieke belastingfactoren voor de belastingmodellen in NEN-EN 1991-2. De Eurocodes, die normaalgesproken hiervoor gebruikt worden, zijn representatief voor heel Nederland en daarom niet locatie-specifiek en (naar verwachting) aan de conservatieve kant. Met de LoadMap zullen ingenieurs een object- of corridor-specifieke verkeersbelasting kunnen gebruiken voor de beoordeling van de constructieve veiligheid van een brug/viaduct.

De LoadMap heeft het potentieel om ook de effecten van de verkeersbelasting bij bijvoorbeeld afsluiten van een weg weer te geven door het uitvoeren van een scenario-analyse. Dit is ook interessant voor provincies en gemeentes die minder middelen hebben voor het monitoren van verkeer op provinciale en gemeentelijke wegen. Bovendien, met een jaarlijkse update van de Loadmap, door het toevoegen van de meest recente informatie over verkeersbelastingen en verkeersintensiteiten, kunnen gemeentes, provincies en RWS beter en nauwkeuriger voorspellingen maken voor de V&R plannen. Deze techniek is niet alleen toepasbaar voor Nederland maar heeft ook potentie voor toepassing in het buitenland. Gezien de constructieve veiligheid van bruggen een strategisch onderwerp op nationaal niveau is, is de toepassing van de LoadMap in andere landen vermoedelijk alleen mogelijk door de samenwerking met lokale onderzoeksinstituten.

2.3.4 *Randvoorwaarden en aandachtspunten bij het toepassen*

Gegeven dat de LoadMap volledig gebaseerd is op WiM data is deze methodologie afhankelijk van de aanwezigheid van de WiM stations. Dit geldt voor zowel rijkswegen als provinciale en lokale wegen. Verder is de kwaliteit van de WiM data cruciaal om de belastingen veilig en verantwoord te kunnen voorspelen. Voor de “quality check” van de WiM data is op dit moment nog geen automatische controle beschikbaar (zoals controle van afwijkende voertuigen met foto's).

Wederom moet het spectrum van voertuigen representatief zijn om het model te laten kloppen. Op dit moment is WiM data beschikbaar voor meerdere rijstroken bij de WiM stations op de hoofdsnelweg. Dit betekent dat het gebruik van de LoadMap op gebieden waarvan er geen WiM data beschikbaar is (bijv. gemeentes) mogelijk tot onbetrouwbare resultaten leidt.

Het model dat in de huidige ontwikkelingsfase door Loadmap gegenereerd wordt gebruikt analytische invloedslijnen en niet de echte invloedslijnen van kunstwerken. Om de techniek breed te kunnen toepassen is verdere validatie nodig bijvoorbeeld door middel van een vergelijking met verschillende bruggen waar al rekmetingen uitgevoerd zijn (m.b.v. de invloedslijnen van die bruggen).

2.3.5 *Technische gereedheid*

De methodiek van de Loadmap is nog in de ontwikkelingsfase en is geïmplementeerd in een tool die op dit moment deels geautomatiseerd is en gebruik maakt van de hele dataset van de WiM stations (voor verkeersbelasting) en INWEVA-lussen (voor verkeersintensiteit) als input. Hierdoor is de kwaliteit sterk afhankelijk van de aanwezigheid van WiM stations en de datakwaliteit daarvan, het is momenteel ook (nog) niet mogelijk enige mate van onzekerheid aan te geven wanneer resultaten opgevraagd worden voor een gebied waar te weinig data beschikbaar is. De verkeersintensiteit (aantal voertuigen) wordt gehaald uit INWEVA data, een mogelijke verandering in de voertuig decompositie zit hier (nog) niet in. Daarnaast gebruikt het model alleen de analytische invloedslijnen en niet de echte invloedslijnen.

Om deze techniek op een hogere gereedheidsniveau te tillen is het van belang dat verdere technische validatie uitgevoerd wordt, bijvoorbeeld op basis van simulaties direct met ROAD-WiM-data voor verschillende invloedslijnen en overspanningen. Deze technische validatie heeft als doel om aan de ene kant de betrouwbaarheid van het systeem te tonen en aan de andere kant mogelijke verbeteringen van de LoadMap te implementeren.

Daarnaast zijn op dit moment alle informatiebronnen die binnen de Loadmap gebruikt worden (zoals bijv. de invloedslijnen, WiM data, etc.) versnipperd. Voor het

goed functioneren van deze techniek is een platform nodig om een automatische datastroom te kunnen verzorgen.

2.4 Common Data Environment – dataontsluiting via een ‘Data Broker’ en verwerking middels FAIR principes

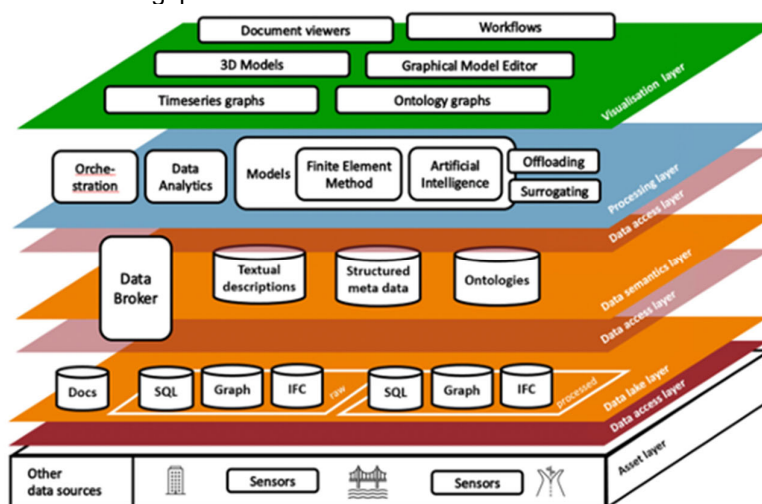
2.4.1 Probleembeschrijving

Digitale data is vaak versnipperd bij verschillende stakeholders en zelfs afdelingen binnen hetzelfde bedrijf. De data is daardoor niet makkelijk vindbaar of benaderbaar (findable & accessible volgens de FAIR⁶ data principes). Door het in afzonderlijke silo's te bewaren is de data ook lastig uit te wisselen en te hergebruiken voor bijvoorbeeld het uitvoeren van experimenten, demonstraties en onderzoek. Hierdoor worden de processen binnen de V&R-opgave vertraagd en vatbaar voor fouten.

2.4.2 Techniekbeschrijving & context

Digital Twins (DT's) brengen de verbinding aan tussen een fysieke asset en de digitale representatie daarvan, waardoor het beheerproces efficiënter en doelmatiger kan plaatsvinden.⁷

Om te komen tot implementatie van DT's, is in eerste instantie gekeken naar benodigde functionaliteit voor de processing van modellen (zoals surrogate modelling, physics informed AI en Bayesian inference). Binnen het ERP-SI wordt het principe van een DT-vorm gegeven (zie Figuur 4) met een referentie systeemarchitectuur, waarin de ontwikkelde deeloplossingen en functionaliteiten als bouwblokken worden geplaatst.



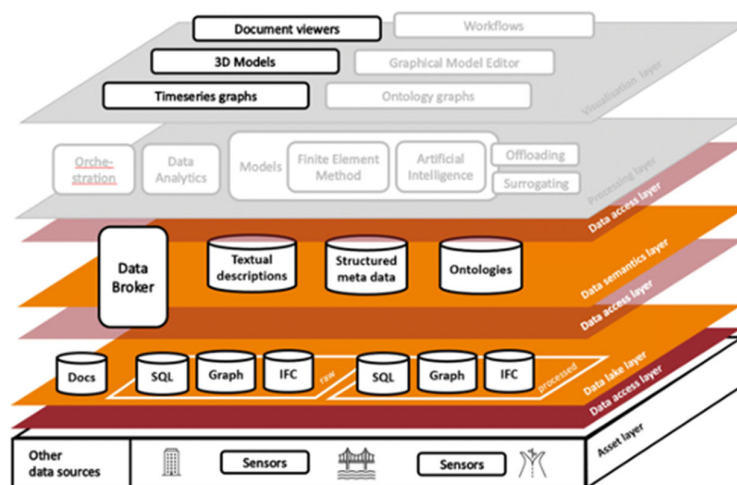
Figuur 4: Digital Twin referentie-architectuur

Daarnaast is in ERP-SI een Common Data Environment (CDE) architectuur ontwikkeld waarbij met name aandacht besteed is aan type data, gebruik van ontologieën, de semantische beschrijving en opslag van data en het gebruik van meta data (voor zowel data als modellen). In het kort is de CDE een digitale data

⁶ FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable), voor meer informatie zie het GO FAIR Initiative: www.go-fair.com

⁷ Zie ook TNO memo "Advies invulling RWS DT_Basisvoorziening n.a.v. SotA DT-ontwikkelingen"

omgeving waar relevante data over de beheerobjecten opgeslagen en ontsloten kan worden.



Figuur 5: De CDE lagen binnen de Digital Twin referentie-architectuur

In Figuur 5 zijn de lagen binnen de Digital Twin referentie-architectuur benadrukt weergegeven waarop de componenten voor een CDE zich bevinden. De architectuur toont de essentiële bouwblokken die nodig zijn om te komen tot een Digital Twin. De voor de CDE relevante lagen en componenten zijn (van onder naar boven gezien):

- “Asset layer” – de laag met alle fysieke assets en andere data bronnen waar de data in de volgende lagen om gaat.
- “Data lake layer” – deze laag bevat alle data bronnen, incl. documenten zoals o.a. Docs, Excel files, IFC (BIM data) en databases zoals o.a. SQL, Graph. Toegang tot de “data lake” laag wordt verzorgd via een “data access” laag.
- “Data semantics layer” – deze laag bevat de beschrijvingen van de structuur en betekenis van data in de bronnen op de onderliggende laag. Dat zijn zowel tekstuele beschrijvingen voor mensen, als gestructureerde meta-data die door een computer kan worden gelezen en zogenaamde ontologieën waarmee de onderlinge relatie van semantische concepten voor een computer applicatie kan worden vastgelegd.
- “Data broker” – maakt het mogelijk om te weten (door mens en machine) welke data er beschikbaar is en hoe er toegang gekregen kan worden conform de FAIR principes voor data.
- “Visualisation layer” – in de visualisatie-laag zijn componenten zoals document en 3D model viewers voor het bekijken van opgezochte data, bijvoorbeeld een 3D representatie van een brug of specifieke data vanuit een aantal sensoren.

De genoemde CDE referentie architectuur zal zoveel mogelijk middels bestaande commerciële en/of open-source softwarepakketten ingevuld moeten worden, aangezien voor de meeste functionaliteiten van genoemde lagen al software-componenten bestaan (ook vaak als open-source). Voorbeelden hiervan zijn de

software-componenten zoals genoemd door de “Cloud Native Computing Foundation (CNCF)”⁸.

2.4.3 *Toegevoegde waarde*

Door het gebruik van de CDE referentie-architectuur worden, naast de wens van FAIR data, ook eisen als snelheid, schaalbaarheid, herhaalbaarheid en traceerbaarheid ingewilligd. Bij centrale implementatie van het concept binnen een bedrijf of organisatie wordt interoperabiliteit en hergebruik gestimuleerd en zal ontwikkeling van Digital Twins ook goedkoper worden en sneller gaan. Essentieel hierbij is dat gebruik gemaakt wordt van gemeenschappelijke ontologieën en generiek bruikbare analyses en algoritmes. Door zoveel mogelijk gebruik van generieke standaarden voor data en interfaces ontstaat ook de mogelijkheid om data en analyses met andere stakeholders binnen en buiten een organisatie uit te wisselen.

Het wordt verwacht dat de in het TNO ERP-SI programma ontwikkelde referentie-systeemarchitectuur en de hiervoor reeds ontwikkelde componenten goed gebruikt kunnen worden in een mogelijke 1^e toepassing bij een V&R-project van RWS. De referentie-systeemarchitectuur moet daarbij als een middel om data te structureren worden gezien. De ervaringen bij de ontwikkeling van de architectuur en logische componenten (o.a. het fieldlab Moerdijkbrugzone) kunnen later ook gebruikt worden binnen het RWS-domein. Ook kan zo'n project inzicht geven in verdere ontwikkeling en innovaties op gebied van beheer monitoringdata, Centraal Toegangspunt Data (CTD) en 3D-BIM/GIS.

Een CDE is een manier om op een beheersbare manier grip te krijgen en te houden op de data die nodig is voor een Digital Twin. Op het gebied van data(management) lopen binnen RWS al initiatieven. De CDE zoals gedemonstreerd bij TNO in 2022 moet dan ook niet als een vervanging daarvan worden gezien, maar meer als een toevoeging die gaat helpen bij het tot stand komen van een Digital Twin. Het bijkomende voordeel is dat het zaken op een gestructureerde wijze aanpakt. Zaken als data beter vindbaar maken, data goed beschrijven op meta-niveau en data toegankelijk maken.

2.4.4 *Randvoorwaarden en aandachtspunten bij het toepassen*

Bij het realiseren van de CDE zullen keuzes moeten worden gemaakt voor de te gebruiken infrastructuur en de te gebruiken softwarecomponenten. Door de keuze van zoveel mogelijk native cloud oplossingen kan de CDE en het Digital Twin Platform eenvoudig worden geplaatst op eigen hardware servers of op virtuele servers in de cloud. Hierbij is het van belang dat platform beheer (governance) goed wordt ingericht om te zorgen dat software en data ook beschikbaar zijn en blijven (bijvoorbeeld met back-ups en/of redundante opslag).

Bij de implementatie van een CDE kan gebruik gemaakt worden van de kennis en expertise van personeel dat eerdere CDE heeft gerealiseerd, waarbij mogelijk ook de al bestaande CDE kan worden opgeschaald om extra gebruikssituaties te kunnen ondersteunen. Hierbij is het wel essentieel dat personeel beschikbaar is met benodigde expertise voor de installatie, beheer en gebruik van de geselecteerde software-componenten en ook budget gereserveerd is voor gebruik van de commerciële software en de gebruikte cloud omgeving (inclusief voorziene processing capaciteit).

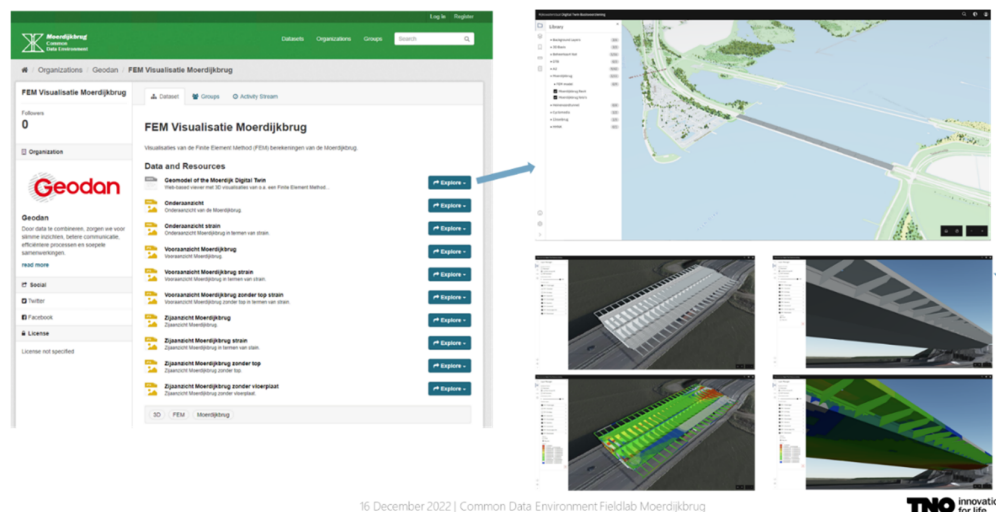
⁸ Zie o.a.: <https://landscape.cncf.io>

Omdat oplossingen en gemaakte keuzes voor invulling van de componenten nog niet uitvoerig zijn gevalideerd met concrete gebruikssituaties binnen de toepassingsgebieden van de V&R opgave, zullen verdere testen en validatie informatie moeten leveren op basis waarvan keuzes eventueel zullen moeten worden bijgesteld.

2.4.5 Technische gereedheid

Op basis van de uitkomsten van de ERP-SI is in 2022 een Proof of Concept (PoC) gedemonstreerd van een CDE voor (meet)data op de Moerdijkbrugzone. Op de onderste laag ('data lake layer') bevindt zich de ruwe en verwerkte opgeslagen data, op de laag daarboven ('data semantics layer') de meta-data. Beide lagen zijn verbonden via een zogenaamde Data Broker die functionaliteit biedt om op basis van meta-data bepaalde datasets te vinden. Dit CDE gedeelte overlapt op abstract- en/of conceptueel niveau met het CTD van RWS. Net als een DT in zijn geheel op meerdere manieren kan worden geïmplementeerd, kan dat ook met het implementeren van de CDE. In de context van het fieldlab Moerdijkbrug heeft TNO voor de bovenste CDE-laag gebruik gemaakt van het open source Data Management System (DMS) pakket 'CKAN'⁹. Dat biedt de mogelijkheid om web-based beschrijvingen van data gestructureerd op te slaan en te laten vergezellen met verwijzingen naar databronnen. Denk daarbij aan 3D-BIM, 3D-GIS, 3D puntenwolken, tijdreeksen van rekstrookjes, etc. Merk op dat in de context van het fieldlab Moerdijk bepaalde functionaliteit van CKAN en de databronnen zich op de 'visualisation layer' van de referentie-architectuur bevinden. Het gaat om het in beeld brengen van meet- en/of ontwerpdata. Doel van de architectuur is om op een zo efficiënt en generiek mogelijke manier resultaten van het platform te kunnen benaderen. Dit heeft overlap met de dashboards die voor de CTD worden ontwikkeld.

De PoC toont hoe op een eenvoudige manier vanuit één portaal verschillende data bronnen te vinden en te benaderen zijn. Ter illustratie staat in Figuur 6 meerdere screenshots die laten zien hoe vanuit de CKAN-omgeving 'doorgeklikt' kan worden naar een FEM Visualisatie die te zien is binnen een Geodan-omgeving.



Figuur 6: CDE Proof of Concept van de Moerdijkbrug m.b.v. CKAN.

⁹ <https://ckan.org/> - 'Comprehensive Knowledge Archive Network'

In deze PoC zijn op dit moment de volgende databronnen opgenomen:

- Rekstrook data van de sensoren op de Moerdijkbrug (opgeslagen in een timeseries database op een TNO cloud).
- 3D model Moerdijkbrug (Geodan platform en data) inclusief FEM integratie (TNO data).
- 3D inspectiefoto's van de Moerdijkbrug (GEOZicht dronedata op Twinspect platform).
- Inspectie data inclusief schaderapporten (RWS data, kopie van de RWS Excel).
- AIRBIM-OTL (Metadata beschrijving van RWS).
- BIM model Moerdijkbrug (link naar een AnteaGroep Revit model).

Met uitzondering van de inspectiedata en de screenshots bij de beschrijvingen in de CKAN-omgeving, is er zoveel als mogelijk gewerkt vanuit het uitgangspunt 'single-source-of-truth'. De CKAN-omgeving bevat geen kopieën van data, maar levert een referentie naar originele databronnen. Daarmee is de PoC tevens een voorbeeld van een gedistribueerde CDE: de databronnen staan organisatorisch verspreid. Met deze PoC wordt getoond dat data eenvoudig vindbaar ("Findable") gemaakt kan worden en er toegang toe kan worden gekregen ("Accessible") conform de FAIR principes voor data. Er is op dit moment voor CKAN gekozen omdat deze de functionaliteit biedt via open-source die voor een CDE nodig is, daar kan uiteraard (op termijn) een andere software oplossing voor gekozen worden.

De verwachting is dat niet alle gebruikssituaties alle of steeds dezelfde componenten van de CDE zullen gebruiken, maar dat er wel een raamwerk is opgezet, waarbij keuze is gemaakt voor de beste componenten voor specifieke functionaliteiten, waarbij integratie is uitgevoerd voor de koppeling van specifieke componenten.

Samenvattend kan gezegd worden dat de software voor invulling van de lagen in de CDE architectuur al beschikbaar is en op een zeer hoge technische gereedheidsniveau ligt, maar ervaring met de software nog beperkt is en de implementatie van enkele zeer specifieke zaken voor toepassing binnen het SI-domein (zoals verdere ontwikkeling van ontologieën) nog niet gereed zijn. Ook zijn de benodigde beheerprocessen (governance) nog niet uitgewerkt en zullen in vervolgtrajecten (waarbij mogelijk meerdere implementaties worden gemaakt van de architectuur) de items verder moeten worden uitgewerkt en geprofessionaliseerd.

3 Toepassingsgebieden en potentiële waarde technieken

De technieken leveren de meeste waarde wanneer zij toegepast worden in de huidige of toekomstige werkwijze van infrastructuurbeheerders. Het is daarmee van belang om goed zicht te hebben op de toepassingsgebieden die er zijn, en hoe de hiervoor beschreven technieken daarin een plek kunnen krijgen. Daarbij is van belang dat de technieken zorgen voor toegevoegde waarde voor de taken van de infrastructuurbeheerders.

Scope (binnen dit onderzoek beschouwde toepassingsgebieden)

Voor het identificeren van toepassingsgebieden is met name gekeken naar de verschillende processen die spelen rondom de V&R opgave, omdat de technieken in het ERP-SI zijn ontwikkeld met als primaire focus de herbeoordeling van stalen bruggen. Toch wordt de waarde in de mogelijke verbreding van deze focusgebied gezien en in acht genomen.

Voor dit onderzoek kijken we zodoende naar vijf toepassingsgebieden binnen Rijkswaterstaat:

1. *Constructieve herbeoordeling* – in kaart brengen van de sterkte en belasting van een kunstwerk m.b.v. gedetailleerde rekenmodellen, voortschrijdende inzichten, metingen en inspecties. De herbeoordeling wordt vaak uitbesteed aan externe ingenieurbureaus.
2. *V&R prioritering stalen bruggen* – binnen het V&R-Uitvoeringsprogramma een prognose opstellen voor (de voorbereiding op) de renovatie en vervanging van de assets van een areaal op basis van inspectieresultaten, bouwjaar, en quick scan resultaten.
3. *Instandhouding bij issues* – het bepalen van de mitigerende maatregelen voor een geconstateerde specifieke probleem bij een bestaande asset (door een reguliere inspectie en/of een constructieve herbeoordeling).
4. *Structural Health Monitoring* – langdurige metingen en inspecties ter controle van de constructieve staat van een kunstwerk. Dit wordt nu voornamelijk naar aanleiding van een geconstateerd probleem gedaan, maar kan ook vooraf structureel opgezet worden ten behoeve van trendanalyse.
5. *Generieke Data Toegankelijkheid* – centrale punt van waaruit assetinformatie uit verschillende bronnen makkelijk terug te vinden is. Dit toepassingsgebied faciliteert (onder andere) de processen die plaatsvinden binnen de andere vier toepassingsgebieden.

Generieke uitdagingen voor deze toepassingsgebieden

Uit de interviews met betrokkenen van RWS bij de bovengenoemde toepassingsgebieden zijn er een aantal gemeenschappelijke uitdagingen uitgesproken. Deze worden in de onderstaande lijst samengevat:

- Gebrek aan complete, consistente en/of tijdige informatie over de betreffende asset zoals:
 - Ontwerpinformatie van de asset (BIM-modellen en tekeningen).
 - Doorzoekbare digitale informatie over de geschiedenis van de asset (bv. historische insectierapporten, renovatiewerkzaamheden en aantal voertuigpassages).

- Langdurige en betrouwbare meetdata op karakteristieke meetpunten.
- De meeste assets zijn uniek en vragen daarom ook een unieke aanpak.
- Geen standaard voor het vastleggen, verzamelen en beheren van informatie.
- De kwaliteit en juistheid van data uit archieven, lopende systemen en eventueel aanwezige meetsystemen (bijv. WiM stations).

Conclusies potentiële waarde voor beschouwde toepassingsgebieden

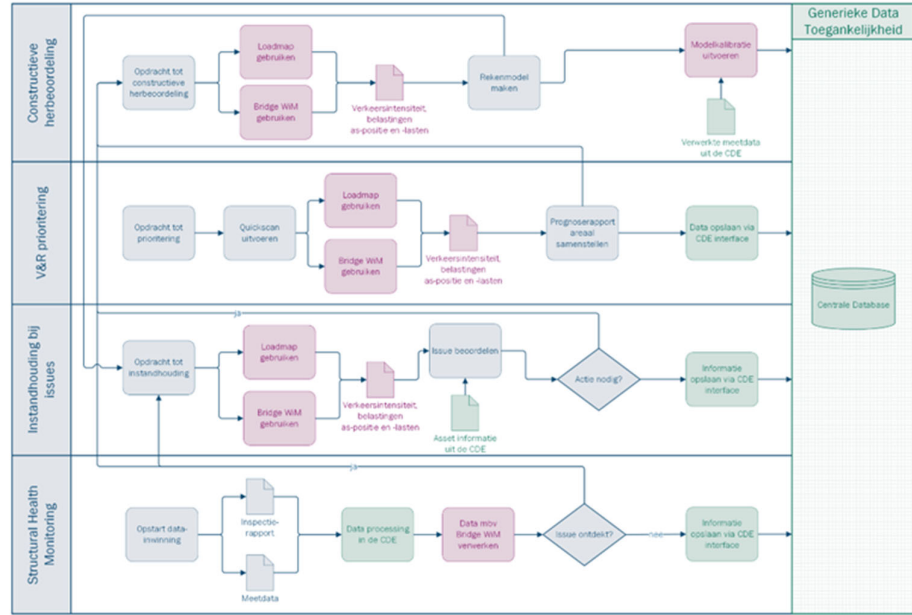
Onderstaand overzicht laat zien of er een aansluiting wordt gezien tussen een toepassingsgebied en één of meerdere technieken. Uit deze studie en de gevoerde interviews kan geconcludeerd worden dat alle technieken kunnen toegepast worden bij constructieve herbeoordelingen en de meeste technieken kunnen ook van toegevoegde waarde zijn bij de prioriteren van stalen bruggen en bij de instandhouding bij issues. Op te merken valt dat de vier technieken verschillen en elk op een eigen wijze meerwaarde heeft:

- Er wordt meerwaarde gezien in het toepassen van Modelkalibratie omdat hiermee onzekerheden weggenomen kunnen worden uit herbeoordeling van grote (complexe) kunstwerken met behulp van reeds geplande metingen.
- Bij de Bridge WiM wordt meerwaarde gezien door brug-specifieke informatie metingen uit te kunnen voeren ten aanzien van de verkeersbelasting en de (vermoeiings)levensduur van het kunstwerk.
- De Loadmap kan bijdrage leveren in het herbeoordelingsproces van de vele kleinere bruggen die binnenkort beoordeeld moeten worden. Dit zijn bruggen die niet in rijkswegen liggen, waar naar alle waarschijnlijkheid geen meetcampagnes voor uitgezet gaan worden. De Loadmap geeft de gebruiker inzicht in de verkeersbelasting op deze bruggen als alternatief voor de (vrij conservatieve) opgelegde norm belasting.
- De meerwaarde van de CDE is terug te vinden als een overkoepelende techniek die het proces in alle vijf beschouwde toepassingsgebieden kan bevorderen. Data (her)vindbaarheid en toegankelijkheid is een grote uitdaging, waar momenteel mee geworsteld wordt. De CDE biedt een relatief eenvoudige oplossing om dit proces te verbeteren.

Tabel 2: Overzicht dat aangeeft wanneer een aansluiting en mogelijke toegevoegde waarde gevonden is van één of meerdere van de technieken binnen een toepassingsgebied

		Technieken			
		Modelkalibratie	Bridge WiM	LoadMap	CDE
Toepassingsgebieden	Constructieve herbeoordeling	☐	☐	☐	☐
	V&R prioritering stalen bruggen	☐	☐	☐	☐
	Instandhouding bij issues		☐	☐	☐
	Structural Health Monitoring		☐		☐
	Generieke Data Toegankelijkheid				☐

In het onderstaande stroomschema zijn de processen binnen de vijf toepassingsgebieden en hun onderlinge relaties in grote lijnen weergegeven. Daarin zijn de vier technieken gepositioneerd op de plek waar ze mogelijke toegevoegde waarde kunnen hebben voor het proces.



Figuur 7: Toepassingsgebieden en processen binnen de V&R opgave voor stalen bruggen. Zie voor grotere afbeelding en legenda Bijlage 2 – V&R toepassingsgebieden en procesoverzicht.

3.1 Herbeoordeling constructieve veiligheid

3.1.1 *As-is situatie beschrijving – Hoe ziet het huidige proces eruit?*

RWS hanteert een eigen prognoserapport voor de bepaling welke bruggen en viaducten, in welke volgorde, beoordeeld moeten worden (zie ook 3.2). Als een brug 'aan de beurt is' voor een constructieve herbeoordeling wordt deze op de markt aanbesteed aan een ingenieursbureau. De reden voor een constructieve herbeoordeling is in veel gevallen het bereiken van het einde van de technische levensduur of het vermoeden dat het kunstwerk ergens rekenkundig niet aan voldoet. Dit vermoeden kan ontstaan uit inspecties of voortschrijdende inzichten (uit onderzoeken, constatering bij andere bruggen) op zowel de sterkte van de constructie als de hoogte van de belasting. RWS weet echter dat de constructie is gebouwd volgens de destijds geldende normen, waarin diverse veiligheidsfactoren in beschouwing zijn genomen. Ondanks dat de huidige normen waaraan getoetst moet worden over het algemeen 'strenger' zijn, is de werkelijke belasting en sterkte van de brug vaak 'gunstiger'. Met behulp van gedetailleerde rekenmodellen, voortschrijdende inzichten (t.o.v. het oorspronkelijke ontwerp), metingen en inspecties is het mogelijk de sterkte en belasting van de brug beter in kaart te brengen. Hiermee wordt getoetst of de constructie rekenkundig voldoet aan de gestelde eisen, en daarmee voldoende veilig is en voldoet aan de gewenste restlevensduur (vaak 30 jaar). Als dit niet het geval is behoort ook het opstellen van varianten voor versterking en vervanging, keuze voor een variant, en uitwerken van een ontwerp voor de gekozen variant tot deze processtap.

Voor het opzetten van een dergelijk herbeoordeling met een gedetailleerd rekenmodel zijn nog additionele stappen nodig. Het proces start met het bestuderen van tekeningen en uitvoeren van uitgebreide inspecties om de geometrie en de toestand van de brug (onderdelen) vast te stellen en vast te leggen in een 3D BIM-model. Op basis hiervan wordt een rekenmodel opgesteld van de gehele brug ter bepaling van de krachtswerking, met vaak nog gedetailleerdere modellen van complexe onderdelen en het rijdek. Bij het opstellen van deze modellen zijn er bepaalde constructieparameters die niet eenvoudig vastgesteld kunnen worden. Dit kan zijn omdat er geen gegevens beschikbaar zijn (uit bouwtekeningen, metingen), of omdat de parameters mogelijk veranderd zijn ten opzichte van het ontwerp. Een paar voorbeelden hiervan zijn de mate van inklemming van een oplegging, de daadwerkelijke verkeersbelasting, en de verbinding van een betonnen deklaag met een stalen rijdekplaat. Bij twijfel wordt hier uitgegaan van een conservatieve optie.

In dit geval is het betreffende ingenieursbureau de uitvoerende partij en RWS is de informatieverstrekken- en controlerende partij die de uitvraag specificeert en de uitgangspunten oplegt. In veel gevallen wordt hierbij nog een derde (onafhankelijke) partij betrokken die naast RWS het uitgevoerde werk kan controleren.

De huidige scope van deze actie zijn (grotere) kunstwerken welke theoretisch het einde van hun levensduur bereikt hebben. Hierbij is RWS zich ervan bewust dat deze scope over een aantal jaar vergroot zal worden om ook de kleinere kunstwerken te omvatten. Hierbij spelen unieke uitdagingen door de grote hoeveelheid kunstwerken en de beperkte beschikbare capaciteit. Hierdoor zal het nodig worden om kunstwerken in sets (ofwel 'batches') te beoordelen in plaats van de individuele beoordeling die nu uitgevoerd wordt.

3.1.2 *To-be scenario beschrijving – Wat willen we toevoegen?*

In interviews met staalexperts bij RWS zijn een aantal wensen uitgesproken ten aanzien van constructieve herbeoordelingen. Dit zijn wensen voor meer bruikbare meetdata en een (inhoudelijke) kwaliteitsslag in het proces. Deze kwaliteitsslag kan geïnterpreteerd worden als een verbetering in het proces waar nu nog steeds onzekerheden zitten in de beoordeling of waar nu expert judgement nodig is. Dit betekent dat er mogelijk een beter resultaat te halen valt uit de beoordeling en/of dat er ondanks de herbeoordeling nog steeds conservatieve aannames noodzakelijk zijn.

De wens voor meer bruikbare meetdata is tweeledig. Enerzijds is meetdata nodig voor de verificatie van de rekenmodellen, anderzijds voor het aanscherpen van de actuele verkeersbelasting. Dit laatste is met name voor de vermoeiingsproblematiek relevant. De mening van de staalexperts bij RWS is dat er in het algemeen te weinig gemeten wordt momenteel. Door meer te gaan meten (zowel hoeveelheid metingen als soorten metingen) hopen zij ook beter in staat te zijn trendanalyses uit te gaan voeren en langetermijneffecten inzichtelijk te kunnen maken.

Daarnaast verwacht RWS een toekomstige uitdaging met de herbeoordeling van een groot aantal kleine(re) stalen bruggen. De herbeoordeling van een brug is momenteel een arbeidsintensieve opdracht, en het is niet realistisch om alle stalen bruggen op dezelfde manier te beoordelen omdat hier simpelweg niet de capaciteit voor is, zowel bij RWS als bij de ingenieursbureaus die de herberekening uit moeten voeren. Hieruit volgt de behoefte om het herbeoordelingsproces het versnellen en vereenvoudigen. Met de introductie van enkele technieken kan de herbeoordeling zowel verbeterd (met minder conservatisme) als vereenvoudigd (sneller uit te voeren) worden.

3.1.3 *Technieken toepassing – Hoe worden de technieken hiervoor gebruikt?*

Alle vier de technieken beschreven in hoofdstuk 2 leveren waarde op de wensen van RWS-specialisten. BridgeWiM vergroot de output en inzichten die uit de meetdata gehaald worden (verkeersbelasting, -intensiteit en -decompositie) en resulteert daarmee in meer bruikbare data over de verkeersbelastingen dan in de huidige situatie. De extra output die met BridgeWiM gegenereerd wordt kan zowel voor de herbeoordeling van de specifieke brug in kwestie gebruikt worden en ook als extra databron ("WiM-station") binnen het netwerk.

Modelkalibratie is een techniek die de gebruiker in staat stelt een kwaliteitsslag te maken in de constructieve herbeoordeling. Rekmetingen, kunnen samen met een eindige elementenmodellen uit het huidige herbeoordelingsproces gebruikt worden door de ProbEye tool om constructieve parameters in de modellering beter en probabilistisch af te schatten. Door de onzekerheden op deze parameters in de modellering te verkleinen kan de partiële factor onderbouw verlaagd worden. Hiermee kunnen we specifieke onderdelen van de modellering, en daarmee de gehele herberekening, minder conservatief maken. Toepassing van deze techniek i.c.m. de eindige elementenmodellen die nu in het huidige proces gebruikt worden verhoogt de nauwkeurigheid van de berekening en niet de arbeid en doorlooptijd. Als het doel is de arbeid en doorlooptijd te verlagen zou op zoek gegaan moeten worden naar combinaties van eenvoudiger op te stellen rekenmodellen en meetdata, de nauwkeurigheid neemt dan waarschijnlijk af. Kortom hier speelt een afweging tussen arbeid, doorlooptijd en nauwkeurigheid.

Met de Loadmap kan het een stuk makkelijker worden om de representatieve verkeersbelasting te bepalen, ook voor de kleinere stalen bruggen die niet op het hoofdwegennet liggen. De normen voor verkeersbelasting zijn in veel gevallen conservatief voor het onderliggende wegennet. Brugspecifieke belastingen die uit de Loadmap komen geven hiermee een realistischer beeld van de daadwerkelijk optredende verkeersbelastingen en zijn mogelijk minder conservatief.

Een van de problemen die speelt bij dit proces is eigenaarschap van informatie. Een voorbeeld genoemd door de staalexperts bij RWS is dat voor enkele kunstwerken onder een DBFM-contract (Design, Build, Finance and Maintain) geen tekeningen beschikbaar zijn, omdat deze pas aan het eind van het contract worden opgeleverd. In enkele gevallen worden deze tekeningen zelfs na afloop van dit contract niet opgeleverd (ondanks een boeteclausule), waardoor deze en andere informatie compleet verloren gaat voor RWS. Een andere uitdaging die bij dit proces speelt is het vaststellen van de kwaliteit die uit de databronnen vandaan komt, zoals bijvoorbeeld metingen t.a.v. de verkeersbelasting. De CDE kan hierin helpen door een workflow te introduceren van de processen, die plaatsvinden tussen het inwinnen en het opslaan van data. Deze workflow zal ervoor zorgen dat aan bepaalde datakwaliteitsnormen (zoals traceerbaarheid en uniformiteit) gehouden wordt. Hierdoor wordt gegarandeerd dat meetdata van verschillende metingen op dezelfde manier wordt opgeslagen en deze ook op dezelfde manier kan worden verwerkt. Ook als de metingen door verschillende bedrijven uitgevoerd worden of vele jaren na elkaar plaatsvinden. De CDE kan de omgeving zijn waar naar alle informatie voor een kunstwerk verwezen wordt die in de organisatie verzameld is, zodat voor een volgende herbeoordeling al deze informatie weer hervindbaar en bruikbaar is.

3.2 V&R prioritering stalen bruggen

3.2.1 *As-is situatie beschrijving – Hoe ziet het huidige proces eruit?*

RWS stelt een prognose op van haar areaal op basis van een aantal aspecten. Dit zijn aspecten als inspectieresultaten, bouwjaar, en quick scan resultaten. De quick scan tool voor stalen bruggen stelt de gebruiker in staat om een vereenvoudigde constructieve beoordeling uit te voeren. De tool kan op basis van een aantal eenvoudig te achterhalen kenmerken bepalen of een brug kritisch is en dus in aanmerking komt voor een gedetailleerde herberekening. Uit de quick scan kan bijvoorbeeld komen dat een bepaald onderdeel van een brug (rekenkundig) niet meer voldoet aan de geldende norm, omdat de betreffende brug is ontworpen volgens een oudere (minder zware) norm. De hoeveelheid onderdelen die niet voldoen en de mate waarin deze niet voldoen, in combinatie met inspectieresultaten en het bouwjaar van de brug, helpt RWS met het opstellen van de prioritering binnen de bruggen in haar areaal.

3.2.2 *To-be scenario beschrijving – Wat willen we toevoegen?*

De quick scan is een goede tool voor het opstellen van een prioritering, maar heeft ook enkele beperkingen. Deze beperkingen komen voort uit de versimpelingen/conservatieve aannames die de tool maakt ten opzichte van een volledige constructieve herberekening. Het prioriteringsproces kan verbeterd worden door een betere eerste inschatting te maken van de actuele

verkeersbelasting. Daarnaast zien we potentie in het gebruik van meetdata voor een snelle (versimpelde) beoordeling.

RWS ziet ook winst in het beter bij elkaar brengen van opgedane kennis, zo zijn enkele experts bezig met het opzetten van een RWS kennis wiki. Op deze manier kennis bij elkaar brengen op één centrale locatie kan nog breder toegepast worden door alle tekeningen, berekeningen, modellen, meet- en inspectieresultaten op eenzelfde manier te verzamelen. Door al deze gegevens tezamen toegankelijk en uniform beschikbaar te maken zal het makkelijker worden om bijvoorbeeld inspectieresultaten over de tijd inzichtelijk te maken.

3.2.3 *Technieken toepassing – Hoe worden de technieken hiervoor gebruikt?*

De Loadmap is een techniek die gebruikt kan worden om relatief eenvoudig de verkeersbelasting in te schatten voor een brug. Dit is belangrijke informatie, zeker voor een eerste prioritering. Een alternatief hiervoor is gebruik te maken van een BridgeWiM systeem, dit geeft nauwkeuriger de brug-specifieke verkeersbelasting dan de Loadmap, maar is (kostentechnisch) minder makkelijk inzetbaar dan de Loadmap. Daarnaast kan modelkalibratie op twee verschillende manieren in dit proces gebruikt worden. Allereerst is het mogelijk op basis van meetdata en een vereenvoudigd mechanica model af te tasten wat kritieke onbekenden/onzekerheden zijn voor de daadwerkelijke herberekening. Een tweede bijkomstigheid hier is dat als dit model eenmaal gemaakt is, het eenvoudig is om nieuwe meetdata te gebruiken voor een volgende beoordeling. Opgemerkt wordt dat een vereenvoudigd model i.c.m. metingen en modelkalibratie waarschijnlijk niet de volledigheid en nauwkeurigheid gaat halen die nodig is voor een volledige herbeoordeling. Bovenstaand oordeel geldt dus nadrukkelijk voor prioritering en niet ter vervanging van een volledige herbeoordeling.

De CDE kan tot slot ook nog een grote bijdrage leveren aan het prioriteringsproces van stalen bruggen. Door alle relevante informatie voor een brug vanuit één locatie te kunnen vinden en benaderen wordt het makkelijker om bijvoorbeeld meerjarige inspecties met elkaar te vergelijken en deze als input te gebruiken voor berekeningen. Met de CDE zal de data beter vindbaar zijn en hebben de juiste mensen toegang tot deze data.

3.3 Instandhouding bij issues

3.3.1 *As-is situatie beschrijving – Hoe ziet het huidige proces eruit?*

RWS zorgt voor de instandhouding van het hoofdwegennet (HWN). Binnen de instandhouding maakt RWS onderscheid tussen enerzijds Beheer en Onderhoud (B&O) en anderzijds Vervanging en Renovatie (V&R). B&O is gericht op het behalen van de beoogde levensduur van de infrastructuur, waar V&R gaat over het vervangen van een object of het verlengen van de levensduur van een bestaand object. Instandhouding gaat niet over de aanleg van nieuwe of uitbreiding van bestaande infrastructuur. De instandhoudingsopgave wordt bepaald door de staat van de infrastructuur die in vijf criteria wordt uitgedrukt: Veiligheid, Levensduur, Betrouwbaarheid, Beschikbaarheid, en Technische conditie.

Calamiteiten, of issues, volgen grotendeels uit geplande inspecties of meldingen waarin een (direct) probleem is geconstateerd ten aanzien van een van deze vijf criteria. Ook kunnen calamiteiten en issues volgen uit een constructieve herbeoordeling waar een groot gebrek is geconstateerd. Vervolgens moet

beschouwd worden of het geconstateerde probleem inderdaad tot een direct gevaar kan leiden, en wat voor mitigerende maatregelen eventueel getroffen moeten worden. Informatie moet verzameld worden over het betreffende kunstwerk zoals tekeningen, berekeningen, en eerdere inspectieresultaten. Tevens moeten deskundigen aanwezig zijn om mogelijke maatregelen te bedenken en waar nodig door te rekenen.

3.3.2 *To-be scenario beschrijving – Wat willen we toevoegen?*

Het proces bij dit soort issues loopt nog niet altijd vloeiend. Experts bij RWS geven aan dat het proces veel tijd kost, vooral informatie verzamelen gaat moeizaam. Met name aan de kant van informatie verzamelen is een behoefte aan tijdswinst en verbetering in kwaliteit. Daarnaast is er een behoefte om het technisch inhoudelijke beoordelingsproces te versnellen waarin RWS kan beoordelen of er daadwerkelijk een probleem is.

3.3.3 *Technieken toepassing – Hoe worden de technieken hiervoor gebruikt?*

De Loadmap is een techniek die zou kunnen helpen met de beoordeling of de belasting op de brug met een issue lager ligt dan waarmee gerekend is. Mogelijk zorgt deze lagere belasting voor verlichting of wegnemen van het issue, of geeft het inzicht of brug specifieke belasting(effect) metingen nuttig zijn.

Bij het verzamelen van relevante informatie kan de CDE helpen door sneller de beschikbare informatie die relevant is terug te vinden. Daarnaast kan de CDE ook helpen door een workflow te introduceren die plaatsvindt tussen het inwinnen en het opslaan van data die zal zorgen dat er aan een bepaalde datakwaliteitsnorm behouden wordt. Dit betekent dat de informatie goed terug te vinden is, voor de juiste mensen toegankelijk, en uniform opgeslagen staat. In plaats van informatie van verschillende bronnen bij elkaar te moeten zoeken, met de kans dat een informatiebron niet meegenomen wordt, is er één locatie waar alle noodzakelijke informatie gevonden kan worden.

3.4 **Structural Health Monitoring**

3.4.1 *As-is situatie beschrijving – Hoe ziet het huidige proces eruit?*

Langdurig en permanent monitoren doet RWS momenteel zeer beperkt. Monitoring wordt nu deels gefaciliteerd door reguliere inspecties (inspecties met een vast inspectie-interval) en deels door metingen. De metingen zijn vaak beperkt tot kortere metingen op kritieke/karakteristieke plekken. Hierin is RWS de uitvager die data wil verzamelen voor herbeoordelingen. In veel gevallen zijn dit metingen of inspecties die worden ingezet nadat er een probleem is geconstateerd. In het geval van inspecties kunnen deze onderdeel worden van het vaste inspectieregime. De staalspecialisten die bij de inspecties betrokken zijn, zijn vaak ook betrokken bij de prioritering en herbeoordeling van de bruggen.

De monitoringdata staat in het merendeel van de gevallen opgeslagen bij de uitvoerende partijen, waarvan RWS periodiek inzichten krijgt. In veel gevallen krijgt RWS momenteel niet een complete datadump met ruwe (of bewerkte) data, enkel meetrapportages. Hierdoor wordt het lastiger om meetresultaten van verschillende meetcampagnes te vergelijken omdat deze bijvoorbeeld anders verwerkt kunnen zijn.

3.4.2 *To-be scenario beschrijving - Wat willen we toevoegen?*

Experts bij RWS geven aan dat ze meer behoefte hebben aan (meer) langdurige(/permanente) (rekstrook)metingen. Dit zou moeten helpen voor de bepaling van verkeersbelasting, en zou ook kunnen leiden tot inzichten in trends of voorspelling over wanneer het kunstwerk over het veiligheidsniveau komt.

RWS geeft ook aan momenteel bezig te zijn met een verkenning naar het gebruik van het glasvezelnetwerk van COMPASS dat nu gebruikt wordt voor matrixborden om rekstrook data te versturen via dit netwerk.

De beschikbaarheid van informatie is een probleem waar RWS tegenaan loopt. Door een centrale plek te creëren om deze informatie op te slaan wordt RWS beter in staat gegevens terug te vinden. De CDE zou hierin een grote rol kunnen spelen.

Met de wens voor meer langdurige metingen lijkt ons de koppeling met BridgeWiM praktisch. Als er eenmaal een meettraject gestart gaat worden is het vrij eenvoudig om een aantal rekstroken toe te voegen zodat het BridgeWiM systeem ook meteen operationeel is.

3.4.3 *Technieken toepassing - Hoe worden de technieken hiervoor gebruikt?*

Een directe link is hier te maken met de CDE, zowel in de uitdaging van omgaan met de grote hoeveelheid data die hierbij binnenkomt als in hoe goed is deze terug te vinden. Door de informatie in één omgeving te ontsluiten te maken wordt die beter vindbaar en meer toegankelijk.

Het BridgeWiM-systeem werkt op basis van metingen uit rekstroken. Deze zouden goed gecombineerd kunnen worden met andere rekstroken, aangebracht voor langdurige monitoring. Anderzijds is het ook goed mogelijk om bij de aansluiting van een BridgeWiM-systeem extra rekstroken aan te brengen voor langdurige monitoring. Het zou daarbij ook goed mogelijk moeten zijn om op basis van de data trendanalyses te maken, ervan uitgaande dat hier lang genoeg gemeten wordt.

3.5 **Generieke data toegankelijkheid**

3.5.1 *As-is situatie beschrijving – Hoe ziet het huidige proces eruit?*

Binnen de V&R herbeoordelingsprojecten van RWS wordt op dit moment data ad hoc verzameld uit de verschillende datasystemen binnen RWS (zoals bijv. Kerngis, Disk, Ultimo en de archieven), en vervolgens (deels) beschikbaar gemaakt aan de gebruikers binnen en buiten RWS. Data en/of documenten worden vaak gekopieerd in een aparte map per asset of project verzameld waardoor meerdere “waarheden” kunnen ontstaan. Daarnaast is het zoeken naar de juiste informatie een lange en moeizame proces terwijl de samenhang tussen de verschillende databronnen nog niet gelegd is.

3.5.2 *To-be scenario beschrijving – Wat willen we toevoegen?*

Vanuit de verschillende toepassingsgebieden binnen de V&R-opgave is er een sterke behoefte naar een eenduidige informatie voorziening als ondersteuning voor de primaire processen. Het is o.a. belangrijk dat informatie over beheerobjecten (incl. historische data en documenten) goed vindbaar en toegankelijk is voor de specialisten om hun werk te faciliteren. Daarnaast is er een behoefte aan een

systeem dat nieuwe data en inzichten die gedurende de processen verzameld worden (zoals bijv. meetdata of data analyses), borgt. Daarnaast om data beter te kunnen analyseren is het goede beheer en ontsluiting van informatie van belang zodat specialisten degelijke analyses en verbanden kunnen leggen over het betreffende beheerobject.

Om aan deze behoeften te voldoen wordt binnen RWS een Centraal Toegangspunt Data (CTD) ontwikkeld dat bedoeld is om op een centraal punt data te kunnen ontsluiten door het te publiceren. Het doel van de CTD is om zowel intern- als extern-RWS gebruikers in staat te stellen de benodigde data te vinden, begrijpen en gebruiken.

Hierbij wordt ofwel een directe koppeling gelegd met de brondata ofwel een kopie gemaakt van de brondata, die wordt opgeslagen in een centrale database (binnen het RWS-domein). Momenteel worden op deze wijze ongeveer 40 databronnen ontsloten m.b.v. een centrale database van Greenplum. Het doel is om uiteindelijk 140 databronnen op te nemen in de CTD en daarmee te publiceren voor gebruik binnen en later ook buiten RWS. Verder binnen de CTD zal metadata opgeslagen kunnen worden om de data te kunnen vinden op basis van aparte zoekopdrachten die specifieke informatie opvragen over eigenaarschap, kwaliteit en beheer van de data. Verder zal de CTD specifieke dashboards voor toegang tot de data of links naar bestaande/externe dashboards kunnen bieden.

Deze doelen van de CTD zijn al sinds aantal jaren bekend gemaakt in verschillende strategische plannen van RWS. Echter is de CTD nog niet standaard in gebruik (intern of extern) binnen de primaire V&R processen.

Verschillende datasets (van de interne RWS systemen of externe databronnen) komen bij elkaar in de CTD. Dat zijn op dit moment replica's en geen verwijzingen naar de bronnen. Bij sommige RWS-systemen is hierdoor niet mogelijk om de metadata automatisch mee te nemen in de datareplica's. Daarnaast moeten de processen rondom het inwinnen, verwerken, beheren van metadata en de kwaliteit ervan horen nog uitgewerkt worden met de juiste rollen en verantwoordelijkheden binnen de organisatie.

De verschillende datasets ontsloten in de CTD behouden hun eigen unieke decomposities en betekenis bij het repliceren. Dat maakt het lastig voor de specialisten om de data uit verschillende bronnen over een asset bij elkaar te brengen. De CTD zal hiervoor op termijn gebruik kunnen maken van semantische technologieën of modellen, zoals de in het AIRBIM programma van RWS ontwikkelde Object Type Library (OTL) voor asset management.

De CTD architectuur heeft voorzieningen voor het traceren van wijzigingen in de datasets tussen twee upload-momenten

De architectuur van de CTD bevat een zoekportaal, dat uitgebreid zal kunnen worden met een visualisatie-laag voor het weergave van bijv. timeseries grafieken of (3D) modellen naast de resultaten van de zoekopdrachten. Er zijn (zover wij weten) geen voorzieningen (of plannen) voor de werkelijke dataverwerking ter ondersteuning van de processen waar gebruikt gemaakt wordt van grote hoeveelheden meetdata, zoals bij de herbeoordeling van constructieve veiligheid (hoofdstuk 3.1), de V&R prioritering (hoofdstuk 3.2), de instandhouding bij issues (hoofdstuk 3.3), en de structural health monitoring (hoofdstuk 3.4). Dit hangt onder meer samen met het vraagstuk rond cloud-processing en de wens van RWS om hun data momenteel nog niet in een externe cloud op te slaan. Verder zal de netwerkcapaciteit van de huidige CTD oplossing uitgebreid moeten worden om

grote hoeveelheid data te kunnen verwerken (bijv. vanuit een locatie extern van de CTD waar dataprocessing wordt geleverd).

3.5.3 *Technieken toepassing – Hoe worden de technieken hiervoor gebruikt?*

De huidige versie van de CDE referentie-architectuur kan gebruikt worden om binnen RWS met deze technologie te experimenteren in het fieldlab Moerdijkbrug en daar te leren wat de toegevoegde waarde is van een dergelijke aanpak en om te zien of en hoe deze technologie aangesloten op en gebruikt kan worden in samenhang met RWS-systemen, zoals het CTD. Voor de 1^e toepassing zal de CDE door RWS opgepakt dienen te worden en zullen stap-voor-stap RWS- en externe databronnen aangesloten kunnen worden. Dit zal een aantal verbeteringen op de beoogde proces kunnen bieden.

Binnen de CDE referentie-architectuur passende oplossingen, zoals de CKAN technologie, is er geen noodzaak om data te repliceren want die refereert direct naar de originele databronnen. Hierdoor kunnen meerdere soorten databronnen ontsloten en gevisualiseerd worden zoals bijv. 3D-BIM/GIS modellen, puntenwolken en meetdata (zoals beschreven in de PoC in hoofdstuk 2.4.5).

De huidige CTD-omgeving zou kunnen worden uitgebreid met een semantische laag, zoals in de referentie-architectuur van de CDE, die de data beschrijft in gegevens en attributen die de specialisten kunnen gebruiken en zo integratie van verschillende databronnen verbetert en vereenvoudigt.

Het huidige CTD bevat al wel functionaliteiten om data vindbaar op te slaan maar nog geen functionaliteit om algoritmes of modellen ten behoeve van beoordelingen op te slaan of (grootschalige) algoritmes en modellen uit te voeren of te herhalen.

De CDE kan ondersteuning bieden in het vindbaar vastleggen van modellen en algoritmes, het herhaaldelijk uitvoeren van complexe en grootschalige analyses en het vastleggen van resultaten van deze analyses.

Ook zou gekeken kunnen worden hoe meta-data gemodelleerd wordt in de CTD en of we extra functionaliteiten vanuit de CDE zouden kunnen toevoegen. Voor opslag van de verschillende soorten data zouden we ook kunnen kijken in hoeverre de huidige Greenplum oplossing (en meta data tool) van de CTD voldoet voor opslag en uitvraag van grote hoeveelheden ruwe (time series) data, meta data en semantische data en wat er te leren valt van de huidige CDE-oplossing en tools.

Verder zou een processing-laag kunnen worden toegevoegd voor het draaien van grootschalige data-analyses, doen van complexe visualisatie, het draaien van complexe algoritmes en het opslag en verwerken van rekenmodellen Voor processing zal ook specifiek gekeken moeten worden welke technologie en implementatie van zowel dataopslag als processing het best kan worden gerealiseerd, rekening houdend met zaken als netwerk capaciteit (met name tussen opslag en processing), security en vertrouwelijkheid van de gebruikte data.

4 Haalbaarheid 1^e toepassing

In de voorgaande hoofdstukken is ingegaan op de technieken, waar deze toegepast kunnen worden, en wat daar de mogelijke toegevoegde waarde van is. Omdat alle technieken zich nog in een bepaald stadium van ontwikkeling bevinden, zijn er nog stappen te zetten richting een eerste toepassing en latere bredere toepassing. De vraag is hoe groot deze stappen zijn en hoe eenvoudig is het om tot een eerste toepassing te komen. Met andere woorden: hoe haalbaar is het om de technieken voor de beoogde toepassingsgebieden op relatief korte termijn te testen onder operationele omstandigheden (TRL 7). Dit in nauw verband maar nog parallel (niet op het kritieke pad) aan het huidige primaire proces op de genoemde toepassingsgebieden. Voor deze haalbaarheid zijn zowel technische als mede menselijke en organisatorische aspecten van belang.

In hoofdstuk 3 werden de toepassingsgebieden binnen de V&R opgave omschreven en de meest prominente uitdagingen binnen het huidige proces naar voren gehaald. Op basis daarvan is gekeken naar de vier verschillende technieken (beschreven in hoofdstuk 2) en hun toegevoegde waarde voor RWS. In de onderstaande samenvattende tabel wordt deze waarde per techniek op een schaal van *laag* tot *zeer hoog* weergegeven naast het haalbaarheidsniveau toegespitst in drie relevante dimensies: *technisch*, *menselijk* of *procesmatig*. Deze samenvatting is gebaseerd op de informatie verkregen tijdens de interviews met TNO en RWS experts en hun expert judgement over technische gereedheid van de technieken (als input voor de technische dimensie), huidige kennis van RWS processen (voor de menselijke en procesmatige dimensies) en de waarde van de technieken binnen deze processen (voor de waardebepaling).

Aan de hand van de bevindingen van hoofdstuk 2 en 3 kunnen we concluderen dat alle vier technieken een relatief hoge toegevoegde waarde kunnen hebben binnen de processen die spelen in de verschillende toepassingsgebieden binnen de V&R opgave. Echter, het niveau van haalbaarheid van de technieken op de drie haalbaarheidsdimensies loopt vrij sterk uiteen, zie Tabel 3. *Bridge WiM* scoort hoog op het gebied van waarde en haalbaarheid terwijl *Modelkalibratie* op dit moment nog een lage haalbaarheidsscore heeft maar een hoge ingeschatte waarde kent.

Tabel 3: Niveau van waarde en haalbaarheid (toegespitst op drie dimensies) richting een 1^e toepassing van de 4 technieken ontwikkeld binnen ERP-SI

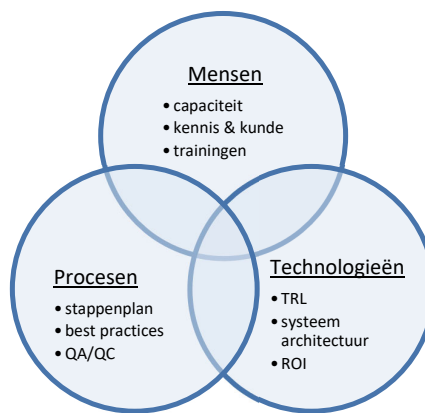
Techniek	Waarde	Haalbaarheid		
		Technisch	Menselijk	Procesmatig
Modelkalibratie				
Bridge-WiM				
Loadmap				
CDE				

Tabel 4: Legenda – niveaus van haalbaarheid

Laag	Middel	Hoog	Zeer hoog
------	--------	------	-----------

4.1 Haalbaarheidscriteria

Om de haalbaarheid van de technieken goed in kaart te brengen is ervoor gekozen om de driedeling van het bekende PPT (people, process, technology) raamwerk¹⁰ te gebruiken als haalbaarheidscriteria. Dit raamwerk kan gezien worden als een methode voor het balanceren van de drie drijvende dimensies in een organisatie, namelijk de mensen, de technologieën en de processen. Alleen met deze dimensies in balans kan een technische innovatie de gewenste uitkomsten binnen een taak of project realiseren, zoals snellere uitvoering, efficiënter werkproces of verbeterde kwaliteit van de output. In de volgende alinea's worden deze dimensies verder toegelicht met de haalbaarheidscriteria en corresponderende risico's die van belang zijn voor deze haalbaarheidsstudie.



Figuur 8: PPT-raamwerk met driedeling van de haalbaarheidscriteria voor de technieken beschreven in dit rapport

4.1.1 Technische dimensie

Technische haalbaarheidscriteria:

- Is de technologie op een hoog genoeg TRL-niveau voor implementatie binnen de huidige processen?¹¹
- Hoe is de systeemarchitectuur en het IT-landschap van de organisatie ingericht?
- Blijft de data hiermee bruikbaar en betrouwbaar?
- Kunnen data en datamodellen hiermee hergebruikt worden?

Technische risico's:

- Ongeschikte systeemarchitectuur en IT-landschap.
- Geen (volledig) zicht op de technische systeemeisen voor inkoop.
- Gesloten (of op een andere manier vergrendelde) systemen die dataontsluiting onmogelijk maken.
- Geen zicht op de terugverdientijd.

¹⁰ De "people, process, and technology" (PPT) raamwerk is gebaseerd op het Diamond model van Harold Leavitt, die voor het eerst gepubliceerd werd in zijn boek uit 1965: "Applied Organizational Change in Industry: Structural, Technological, and Humanistic Approaches"

Meer info: [Complete Guide to the PPT Framework | Smartsheet](#)

¹¹ Voor de 4 technieken die beschouwd worden in dit rapport zijn de TRL-niveaus verder toegelicht in Hoofdstuk 2.

4.1.2 *Menselijke dimensie*

Menselijke haalbaarheidscriteria:

- Is er voldoende capaciteit van de mensen aanwezig?
- Is er voldoende kennis en kunde beschikbaar binnen de organisatie?
- Zijn de benodigde kennisdragers beschikbaar om leidende rol te nemen bij implementatie?
- Hoe loopt de communicatie en samenwerking tussen de verschillende stakeholders?

Menselijke risico's

- Gebrek aan capaciteit voor implementatie.
- Gebrek aan kennis en kunde voor implementatie.
- Gebrek aan interesse en wil van de stakeholders om de innovaties te implementeren.
- Gebrek aan of vroegtijdig vertrek van kennisdragers die een sleutelrol hebben in de implementatie.
- Gebrek aan eigenaarschap van de innovatie.
- Onvoldoende communicatie tussen de stakeholders.

4.1.3 *Procesmatige dimensie*

Procesmatige haalbaarheidscriteria:

- Zijn er duidelijke rollen en verantwoordelijkheden gedefinieerd binnen de organisatie?
- Is er duidelijkheid van de stappen in het beoogd proces?
- Is er een afhankelijkheid en/of aansluiting op huidige processen?
- Is er ruimte voor het borgen en delen van best practice?
- Is een beoordelings- en kwaliteitssysteem aanwezig met de juiste rollen verantwoordelijkheden?

Procesmatige risico's:

- Onduidelijkheid in de rollen, verantwoordelijkheden en/of taken.
- Benodigde kwaliteitssysteem en processen niet ingericht of niet aanwezig.
- Geen prioriteit gesteld voor de innovatie vanuit management.
- Afrekencultuur.

4.2 **Haalbaarheid per techniek**

4.2.1 *Modelkalibratie a.d.h.v. Bayesian Inference*

Modelkalibratie a.d.h.v. Bayesian inference helpt om de onzekerheden in het rekenmodel van een brug die voortvloeien uit het maken van bepaalde aannames te verkleinen. Deze techniek biedt een grote meerwaarde, voornamelijk bij een herbeoordeling van een brug om tot een nauwkeuriger rekenmodel te komen die het daadwerkelijke gedrag van de brug met minimale onzekerheden vertegenwoordigd. Een technische uitdaging bij deze techniek is de grote hoeveelheid rekenkracht die nodig is voor het gebruik van surrogaat modelleren in een cloud omgeving. Daarnaast zijn er ook voldoende FEM software licenties nodig om deze parallele berekeningen te kunnen uitvoeren.

Deze techniek eist ook een uniek soort gebruiker(s) met zowel kennis van het algoritme en de achterliggende statistiek als voldoende kennis om de nauwkeurigheid van het model te beoordelen. Met andere woorden, de techniek

vereist een leercurve die extra inspanning vraagt van mensen binnen een organisatie.

Procesmatig vraagt deze techniek aan de ene kant beschikking over FEM-model en meetdata van derden en aan de andere kant complexe afspraken met (derde) partijen, zoals bijv. ingenieursbureaus, die de herbeoordeling uitvoeren.

Op basis hiervan heeft deze techniek een score 'middel' gekregen op technische haalbaarheid, 'laag' op menselijke haalbaarheid, en 'laag' op procesmatige haalbaarheid.

4.2.2 *Bridge WiM*

De Bridge WiM techniek biedt een manier om een betere inschatting te maken van de daadwerkelijke verkeersbelasting op een brug op basis van rekmetingen en data-verwerkende algoritmes. De techniek levert meerwaarde in vier van de vijf toepassingsgebieden die onderdeel maken van de V&R opgave binnen RWS, namelijk *Constructieve herbeoordeling*, *V&R prioritering stalen bruggen*, *Instandhouding bij issues* en *Structural Health Monitoring* (zie Figuur 7 in Hoofdstuk 3).

Technisch gezien is Bridge WiM vrij ver gevorderd (TRL 5/6, zie ook hoofdstuk 2.2), het systeem heeft minder onderhoud nodig dan traditionele meetsystemen voor verkeersbelastingen (Weigh in Motion) en in combinatie met een rekmeetcampagne zoals die in de huidige praktijk ook al uitgevoerd worden kan de techniek snel en met minimale extra inspanning ingezet worden.

De inzet van deze techniek vereist nauwe afstemming tussen het bedrijf/team dat de meetcampagne voorbereid en uitvoert en het team dat de Bridge WiM analyse uitvoert. Met name over de positionering van de sensoren, instellingen van het meetsysteem en de uitvoering van kalibratietesten.

Inbedding van de inzet van deze techniek in bestaande V&R processen is relatief eenvoudig.

Op basis hiervan heeft deze techniek een score 'zeer hoog' gekregen op technische haalbaarheid, 'middel' op menselijke haalbaarheid, en 'hoog' op procesmatige haalbaarheid.

4.2.3 *Loadmap*

De LoadMap levert beter inzicht in de verkeersbelastingen op het volledige wegennetwerk in Nederland en is in staat om een vrij nauwkeurige voorspelling van de verkeersbelasting te genereren.

Ingenieurs kunnen via de Loadmap makkelijk bij de data komen en krijgen automatisch de waarde die nodig is voor de berekening van de constructieve veiligheid en vermoeiingslevensduur. Hierdoor biedt de Loadmap een toegevoegde waarde bij meerdere toepassingsgebieden, namelijk *Constructieve herbeoordeling*, *V&R prioritering stalen bruggen* en *Instandhouding bij issues*. De Loadmap biedt een manier om het proces voor het uitvoeren van een technisch-inhoudelijke beoordeling bij een asset te versimpelen door relatief eenvoudig verkeersbelastingen in te schatten.

De datakwaliteit van de Loadmap sterk afhankelijk is van de aanwezigheid van WiM stations en de datakwaliteit daarvan. Daarnaast is verdere technische validatie een belangrijk aandachtspunt dat invloed heeft op de technische haalbaarheid van deze techniek. Voor een implementatie binnen RWS is de Loadmap sterk afhankelijk van de mate van coördinatie tussen de betrokkenen afdelingen. Dit heeft invloed op zowel de procesmatige als de menselijke haalbaarheidsdimensies.

Op basis hiervan heeft deze techniek een score 'middel' gekregen op technische haalbaarheid, 'middel' op menselijke haalbaarheid, en 'hoog' op procesmatige haalbaarheid.

4.2.4 CDE

De CDE is een digitale data omgeving waar relevante data over beheerobjecten ontsloten kan worden om deze beschikbaar te maken voor de gebruikers bij de verschillende toepassingsgebieden binnen de V&R opgave van RWS.

In de ontwikkelde CDE referentie-architectuur ligt de aandacht met name op het ontsluiten van de verschillende data bronnen, het gebruik van ontologieën, de semantische beschrijving van de data, het gebruik van metadata (voor zowel data als modellen), de toegang en rechten tot de databronnen via datareferenties en de visualisaties van de opgezochte data.

De technische haalbaarheid van de afzonderlijk softwareoplossingen voor de invulling van de bouwblokken in de CDE referentie-architectuur is zeer hoog gezien dat het vaak om beschikbare oplossingen uit de markt gaat. De uitdaging ligt vooral bij het integreren van deze oplossingen die de beoogde functies kan vervullen.

Over de menselijke dimensie van haalbaarheid, is de adoptie van deze techniek sterk afhankelijk van de acceptatie en gereedheid van de hoofdgebruikers (RWS intern of extern) in de V&R processen.

De hoofdfunctionaliteit van de CDE is om verschillende databronnen te ontsluiten, maar het heeft verder geen functie om de datakwaliteit te borgen. Data kwaliteitsbeoordeling en -cleaning moet hierbij door domeinexperts en andere data gebruikers gedaan worden. Voor het CTD is het proces rondom zowel datakwaliteitsborgen als meta-datamanagement een belangrijke aandachtspunt dat nog niet opgepakt is. De implementatie van een (meerdere) CDE bouwblokken is hier ook van afhankelijk. Daarom is het noodzakelijk dat er goed gedefinieerde rollen t.b.v. eigenaarschap en verwerking van data toegekend zijn binnen RWS. Dat kan door het uitwerken en vastleggen van degelijke databeheerprocessen, zoals data kwaliteitsmanagement en meta-data management.

Op basis hiervan heeft deze techniek een score 'middel' gekregen op technische haalbaarheid, 'middel' op menselijke haalbaarheid, en 'middel' op procesmatige haalbaarheid.

5 Conclusies en vooruitblik

In de vorige hoofdstukken zijn vier technieken en vijf toepassingsgebieden beschreven. Hierbij is aangegeven waar in het proces van de verschillende toepassingsgebieden deze technieken een meerwaarde kunnen bieden. Vervolgens is aangegeven wat de staat van deze technieken is, hun toegevoegde waarde en de mate van haalbaarheid van deze technieken verdeeld over de drie dimensies techniek, mens en proces. Dit om een antwoord te geven op de centrale vraag van dit onderzoek:

In welke mate kunnen de technieken die binnen het Early Research Programme Structural Integrity zijn ontwikkeld toegepast worden in een praktijkomgeving zoals de Moerdijkbrugzone, en welke stappen zijn nodig om te komen tot het inzetten en testen van deze technieken in een toepassing onder operationele omstandigheden?

Alle technieken die in deze studie zijn beschouwd zijn technologisch gezien gereed voor eerste toepassing in de Moerdijkbrugzone en kunnen hierbij ook waarde genereren. Deze eerste toepassingen moeten ook het doel hebben om de technieken verder te ontwikkelen en toe te werken naar bredere toepassing en opschaling.

In dit hoofdstuk staan aanbevelingen voor bredere toepassing, de verdere opschaling van deze technieken en de eerste stappen die genomen kunnen worden om de technieken naar een hoger TRL-niveau te tillen. De volgende innovatiestap, na experimenteren in het fieldlab Moerdijkbrug, is de 1^e toepassing, bijv. bij de herbeoordeling van een stalen brug.

De aanbevelingen voor vervolg zijn opgesplitst in techniek-specifieke aanbevelingen en algemene aanbevelingen. De techniek-specifieke aanbevelingen leggen de focus op de stappen die nodig zijn om de technieken naar een hoger TRL-niveau te tillen en de algemene aanbevelingen zijn gericht op menselijke en procesmatige vraagstukken.

5.1 Techniek-specifieke aanbevelingen

Voor de modelkalibratie is een eerste concept experimenteel aangetoond, in de toepassingen bij Brug 705, de IJsselbrug, en nu de Moerdijkbrug. Om deze techniek verder te ontwikkelen zal het nodig zijn om meer technische ervaring op te doen. Door de techniek te gebruiken bij een van de herbeoordelingen die gepland zijn, zoals de Moerdijkbrug of de Merwedeburg bij Papendrecht, kan de techniek verder doorontwikkeld worden. Over het algemeen schatten de experts bij RWS de waarde van deze techniek hoog in, maar de techniek is minder gedragen door de grote complexiteit die het heeft. Door de techniek verder experimenteel toe te passen en de RWS-experts hier goed bij te betrekken kan er meer begrip worden gevormd voor de techniek om zo ook het draagvlak voor de techniek te verhogen. De kosten die benodigd zijn om modelkalibratie van het huidige TRL te verhogen tot een concrete toepassing/deelbare applicatie zijn op dit moment nog onbekend. Modelkalibratie is een aanvulling op het huidige proces voor constructieve herbeoordeling, en daarmee lijkt de inpasbaarheid in orde. De risico's bij de

modelkalibratie zijn bekend, deze zijn voornamelijk gericht op onzorgvuldig gebruik van de techniek bij onvoldoende kennis van de techniek, dit in combinatie met de waargenomen complexiteit van de techniek.

De Bridge-WiM techniek heeft het hoogste TRL-niveau van de vier technieken gepresenteerd in deze haalbaarheidsstudie. Er zijn al enkele vervolgstappen gepland voor deze techniek binnen het V&R onderzoeksprogramma, ter verdere validatie van de techniek en het onderzoeken van de werking onder andere omstandigheden. Hiertoe worden metingen gedaan aan zowel de Merwedeburg bij Papendrecht als de Van Brienenoordbrug. Hier zijn een aantal redenen voor: de techniek heeft een hoge meerwaarde en wordt gedragen door meerdere experts bij RWS. De techniek past goed bij de wens voor meer monitoring, en door het gevorderde niveau zijn de verwachte kosten en risico's bij deze techniek relatief laag. Naast de geplande vervolgstappen zijn er nog meer opties voor aanvullend onderzoek. Deze zijn voornamelijk gericht op extra functionaliteit, zoals de detectie van files aan de hand van de metingen en de toepassing op andere brugdekken (bijv. meta asfalt i.p.v. hoge sterktebeton).

De Loadmap is een breed toepasbare techniek, die voornamelijk voor bruggen in het hoofd- en onderliggende wegennet zeer waardevol kan zijn. Met de doorkijk op de aankomende opgave voor RWS met de herbeoordeling van vele kleinere bruggen zijn er een aantal opties voor de verdere ontwikkeling van deze techniek. Een van deze opties is verdere validatie aan de hand van al beschikbare rekmetingen. Een andere optie is onderzoek doen naar het gebruik van camerabeelden om de typologie van voertuigen nader vast te leggen. De verwachting bij RWS-experts is dat voor de aankomende herbeoordeling voor een groot aantal kleinere bruggen geen individuele metingen gedaan gaan worden. Op basis hiervan alleen al zal de verwachte waarde van de Loadmap hoog zijn. Dit wordt over het algemeen ook gedragen door de staaexperts binnen RWS, hoewel de focus bij sommigen nu nog ligt op de huidige opgave (grotere stalen bruggen). De techniek is momenteel nog in een vroeg stadium, het concept van de individuele onderdelen is experimenteel aangetoond maar moet nog verder ontwikkeld worden voordat de technologie klaar voor toepassing is. De totale kosten die benodigd zijn om de techniek tot dit niveau te brengen zijn dan ook nog niet bekend. De risico's verbonden aan deze techniek zitten momenteel nog aan de kant van de betrouwbaarheid, hieruit ook de noodzaak voor verder onderzoek ter validatie.

De beschikbaarheid en de bruikbaarheid van data zijn thema's die terugkeren bij alle vijf toepassingsgebieden die beschouwd zijn binnen deze studie. Het huidige CTD-programma biedt een basisoplossing voor een deel van de huidige problematiek. Uitbreiding zal nodig zijn om het toekomstbestendig te maken. Bijvoorbeeld om direct naar de originele databronnen te kunnen refereren i.p.v. repliceren zal een van de binnen de CDE referentie-architectuur passende oplossingen, zoals de CKAN database, toegepast moeten worden. Naast de mogelijkheid om meerdere soorten databronnen te ontsluiten en te visualiseren zal het beheer van metadata ook hierdoor gefaciliteerd zijn. Daarnaast zal wijzigingsbeheer van de data niet meer nodig zijn. Een logische vervolgstap is om aan tafel met RWS CIV (zowel CTD als de RWS Datalab) de meerwaarde van de CDE-bouwblokken te bespreken en de mogelijkheden tot uitbreiding van de huidige systemen met deze blokken in kaart te brengen. Bovendien de mogelijkheid om zowel de Moerdijkbrugzone als andere

bruggen die vallen onder de V&R opgave als pilots te gebruiken voor het uitbreiden van de CTD met nieuwe en/of verbeterde functionaliteiten moet goed overwogen worden.

5.2 Algemene aanbevelingen

Uit gesprekken met RWS-experts is naar voren gekomen dat het gebruik van bepaalde terminologie gerelateerd aan digitale technologische ontwikkelingen niet uniform is. Dit geldt niet alleen voor RWS-intern, maar ook voor TNO-intern. Hierdoor kan een wildgroei ontstaan, waardoor bepaalde termen hun eigen leven gaan leiden. Zo kunnen verschillende verwachtingen ontstaan bij het gebruik van deze termen. Dit gebeurt al op enige schaal wanneer men het heeft over bijvoorbeeld Digital Twin technologie. Het zou daarom bevorderlijk zijn om samen overeenstemming te vinden over de terminologie die TNO en RWS gebruiken voor technieken die zij samen ontwikkelen en gebruiken.

Voor het verder ontwikkelen en implementeren van innovaties zoals de technieken genoemd in dit rapport is het van belang dat RWS intern overeenstemming zoekt met afdelingen en stakeholders die een bijdrage kunnen leveren, zoals de RWS Datalab. Dit is een belangrijke voorwaarde om de schaalbaarheid toekomstbestendigheid van technische oplossingen te kunnen verzorgen.

Tevens om de innovatie leercurve te bevorderen, zal het inrichten van een vast, gezamenlijk team nuttig zijn om coördinatie van activiteiten (zoals bijv. pilots) en (tussentijdse) evaluaties uit te kunnen voeren. In een vervolgstudie zal dit team belangrijke input kunnen leveren voor het uitvoeren van een kosten-batenanalyse op een passend niveau voor de verschillende innovaties en techniek-implementaties.

Daarnaast zal het stroomlijnen van ontwikkelingen ervoor zorgen dat de juiste prioriteiten gesteld worden en dat structurele uitdagingen, die bij meerdere toepassingsgebieden tegelijkertijd spelen, op een systematische en duurzame manier opgelost kunnen worden. Denk hierbij aan een RWS-brede systeemarchitectuur waarop deze ontwikkelingen dusdanig kunnen landen dat ze herbruikbaar zijn voor andere projecten. Hiervoor is het noodzakelijk dat de CIV nauw betrokken wordt bij de voorbereiding van de 1^e toepassing van deze technieken, zodat het niet meer TNO-technieken zijn, maar RWS-bouwblokken.

6 Ondertekening

Delft, 3 april 2023

TNO

Dr.ir. J.M. Tang
Research Manager

Dr.ir. G.T. Luiten
Projectleider

Bijlage 1 – TRL-niveaus

TRL (Technology Readiness Level) is een wereldwijd bekende schaal waarmee het ontwikkelingsstadium van een bepaalde technologie op een eenduidige wijze gecommuniceerd kan worden ^{12 13 14}. De schaal kent 9 niveaus van ontwikkeling:

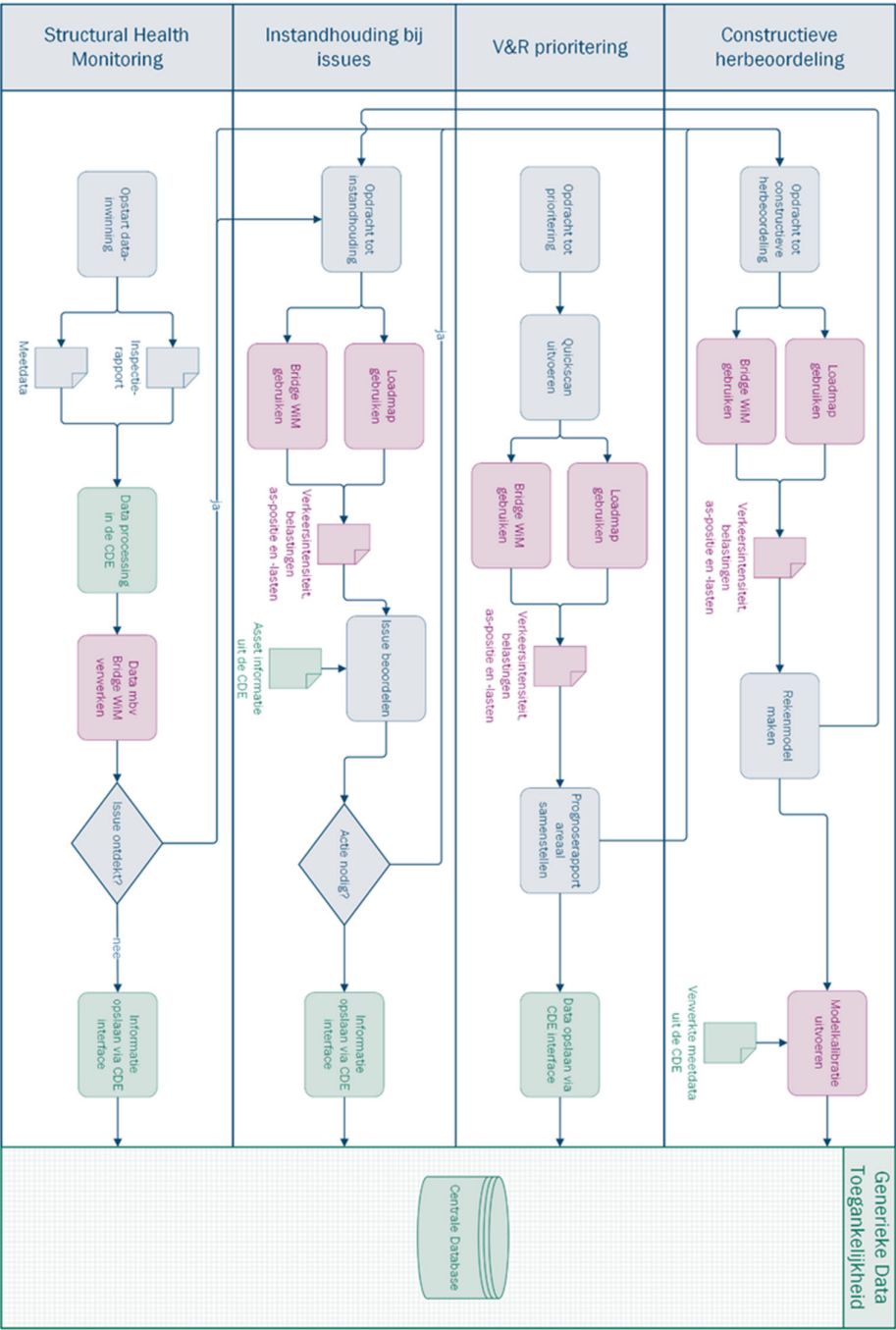
- TRL 1: Basisprincipes van de benodigde technologieën zijn bekend*
- TRL 2: Het technologisch concept van de sleutelcomponenten is geformuleerd*
- TRL 3: Het technologisch concept van sleutelcomponenten is experimenteel aangetoond*
- TRL 4: De technologie van alle sleutelcomponenten werkt onder laboratoriumcondities*
- TRL 5: De voor het prototype benodigde technologieën werken onder relevante omstandigheden*
- TRL 6: Een prototype werkt onder relevante omstandigheden*
- TRL 7: Een prototype kan getest worden onder operationele omstandigheden*
- TRL 8: Het systeem is getest en gevalideerd onder de operationele omstandigheden*
- TRL 9: Klaar voor toepassing*

¹² [Technology Readiness Levels \(TRL\) \(rvo.nl\)](https://www.rvo.nl/en/topics/energy/innovation/technology-readiness-levels)

¹³ [h2020-wp1415-annex-g-trl_en.pdf \(europa.eu\)](https://ec.europa.eu/energy/en/technology-readiness-levels)

¹⁴ [Technology Readiness Level - Rijkswaterstaat innoveert \(rwsinnoveert.nl\)](https://www.rwsinnoveert.nl/technology-readiness-level)

Bijlage 2 – V&R toepassingsgebieden en procesoverzicht



Legenda

- Processtap uit huidige situatie
- Processtap m.b.v. techniek
- Processtap m.b.v. de CDE techniek
- Data of bestand

Bijlage 3 – Geïnterviewde personen

Naam	Afdeling	Betrokken bij fieldlab onderwerpen
Rob Jansen	TNO – Optics	Modelkalibratie, BridgeWiM, Loadmap, CDE
Sjors van Es	TNO – Staalconstructies	Modelkalibratie, BridgeWiM
Johan Maljaars	TNO – Staalconstructies	Modelkalibratie, BridgeWiM
Stefan Verdenius	TNO – Staalconstructies	Modelkalibratie, BridgeWiM
Jorrit Rodenburg	TNO – Staalconstructies	BridgeWiM
Ioannis Koune	(ex-)TNO – Risico & Betrouwbaarheid	Modelkalibratie
Shang Jen Wang	TNO – Risico & Betrouwbaarheid, nu Digital Built Environment	Modelkalibratie
Arthur Slobbe	TNO – Betonconstructies	Modelkalibratie
Diego Allaix	TNO – Risico & Betrouwbaarheid	Loadmap
Frank Christiaansen	RWS – Centrale Informatievoorziening	CDE
John Schobben	RWS – Centrale Informatievoorziening	CDE
Remco Verschoor	RWS – Centrale Informatievoorziening	CDE
Caroline den Besten	RWS – Grote Projecten & Onderhoud	BridgeWiM, Loadmap, CDE
Martin Nijgh	RWS – Grote Projecten & Onderhoud	Modelkalibratie, BridgeWiM, Loadmap
Bas Wijnbeld	RWS – Grote Projecten & Onderhoud	Modelkalibratie, BridgeWiM, Loadmap