GEONOVUM

Verkenning interoperabiliteit van rekenmodellen en digitale tweelingen

Michel Grothe, Eric Koomen

Versie v1.0
Status definitief
Datum 6 juni 2025

Inhoudsopgave

Dankwoord 3

Managementsamenvatting 4

Lijst van afkortingen 6

1. Inleiding verkenning 8
   - 1.1 Inleiding 8
   - 1.2 Deze verkenning 8
   - 1.3 Dutch Metropolitan Innovations 9
   - 1.4 Aanpak opdracht 10
   - 1.5 Leeswijzer 10

2. Digitale tweelingen 12
   - 2.1 Digitale tweelingen voor de fysieke leefomgeving 12
     - 2.1.1 Toepassingsvoorbeeld 1 - Onderhoud brug 12
     - 2.1.2 Toepassingsvoorbeeld 2 – Aanleg woonwijk Brainport Smart district 13
     - 2.1.3 Toepassingsvoorbeeld 3 - Simulatie wateroverlast en overstromingen 14
     - 2.1.4 Definities van digitale tweelingen 15
   - 2.2 De opbouw van digitale tweelingen 17
     - 2.2.1 Digitale tweelingen als samenstelbaar systeem 18
     - 2.2.2 Modulaire architectuur 21
   - 2.3 Stadia van compleetheid 22

3. Rekenmodellen 24
   - 3.1 Rekenmodellen in digitale tweelingen 24
   - 3.2 Modelvorming 25
   - 3.3 Soorten rekenmodellen 26
   - 3.4 Rekenmodellen naar functie 28
   - 3.5 Rekenmodellen naar modelbenadering 31
   - 3.6 Rekenmodellen naar toepassingsdomein 32
   - 3.7 Conclusie 37

4. Interoperabiliteit van rekenmodellen 39
   - 4.1 Het EU-raamwerk voor interoperabiliteit 39
   - 4.2 Juridische interoperabiliteit 41
     - 4.2.1 Rekenmodellen in Nederlandse wetgeving 41
     - 4.2.2 De Europese Verordening Artificiële Intelligentie 42
     - 4.2.3 Het Nederlandse algoritmeregister 43
     - 4.2.4 Rekenmodellenregister voor digitale tweelingen 44
     - 4.2.5 Herkomst en traceerbaarheid 44
   - 4.3 Organisatorische interoperabiliteit 45
     - 4.3.1 Samenwerking organiseren 46
     - 4.3.2 Verdienmodellen 49
   - 4.4 Semantische interoperabiliteit 50
   - 4.5 Technische interoperabiliteit 52
     - 4.5.1 Standaarden voor technische operabiliteit van rekenmodellen 52
     - 4.5.2 Workflowmanagement voor rekenmodellen 55

4.5.3 Groeiende datastromen en schaalbare architecturen 56
4.5.4 Publish/subscribe technologie 57
4.5.5 Notebooks en Container technologie 58
4.5.6 Graphics Processing Units 60
4.5.7 Cybersecurity 61
4.6 Gebruiksaspecten van rekenmodellen 62
4.6.1 Toegankelijke en bruikbare rekenmodellen 62
4.6.2 Borging kwaliteit van rekenmodellen 63
4.6.3 Goed modelleren in de praktijk 64
4.6.4 Opzetten van een IT-infrastructuur 65
4.6.5 Een kritische blik 67

5. Bevindingen en aanbevelingen 69

Referenties 74

Bijlage 1 - Geraadpleegde experts 77

Bijlage 2 - Vragenlijst 78

Dankwoord

Wij willen onze dank uitspreken aan alle geïnterviewde experts voor hun waardevolle bijdragen aan de totstandkoming van het rapport ‘Verkenning interoperabiliteit van rekenmodellen en digitale tweelingen". Hun inzichten en expertise hebben een cruciale rol gespeeld bij de bevindingen en aanbevelingen over de interoperabiliteit van rekenmodellen in digitale tweelingen. De gedeelde ervaringen en perspectieven hebben ons in staat gesteld om een genuanceerd en uitgebreid beeld te schetsen van de huidige stand van zaken, denkbeelden en mogelijkheden rondom de interoperabiliteit van rekenmodellen. Zonder hun bereidheid om tijd en kennis te delen, zou deze verkenning niet de diepgang en relevantie hebben die het nu bezit. Wij hopen dat onze gezamenlijke inspanningen bijdragen aan verdere ontwikkeling en samenwerking rond het gebruik van rekenmodellen in digitale tweelingen.

Daarnaast bedanken we Dutch Metropolitan Innovations (DMI) voor het faciliteren van deze verkenning. Het DMI-ecosysteem voorziet de domeinen van duurzame, slimme steden van nieuwe instrumenten vanuit de digitale wereld, wat ons in staat stelde om deze verkenning uit te voeren. Onze waardering gaat ook uit naar het ministerie van Volkshuisvesting en Ruimtelijke Ordening (VRO) voor hun ondersteuning vanuit het programma Digitale Tweelingen en Zicht op Flevoland. En tot slot, gaat onze dank uit naar de collega’s’ bij Geonovum, die vanuit het ‘Digital Twin as a Service’ perspectief voor kritische aanvullingen en verbeteringen hebben gezorgd.

De samenwerking en steun van alle betrokkenen hebben de kwaliteit en diepgang van dit rapport aanzienlijk versterkt.

Michel Grothe en Eric Koomen

Managementsamenvatting

Digitale tweelingen spelen als digitale representaties van de fysieke omgeving een belangrijke rol in het ondersteunen van besluitvorming op verschillende terreinen zoals mobiliteit, woningbouw, en klimaatadaptatie. Het doel van deze verkenning is om te begrijpen hoe rekenmodellen, die essentieel zijn voor het functioneren van digitale tweelingen, met elkaar kunnen samenwerken en hoe ze gedeeld kunnen worden op een manier die bijdraagt aan efficiëntie, besparing van tijd en kosten, en het vergroten van de publieke waarde van digitale tweelingen. Deze 'Verkenning interoperabiliteit van rekenmodellen en digitale tweelingen', richt zich op het onderzoeken van de mogelijkheid om rekenmodellen op een modulaire, servicegerichte en interoperabele manier te integreren binnen digitale tweelingen.

De verkenning is uitgevoerd in het kader van het programma Dutch Metropolitan Innovations (DMI), een innovatie-initiatief dat zich richt op het ontwikkelen van een digitaal ecosysteem voor duurzame, slimme steden als samenwerking tussen overheden, bedrijven, en kennisinstellingen. In deze verkenning is gekeken naar interoperabiliteit van rekenmodellen in digitale tweelingen vanuit juridisch, organisatorisch, semantische en technisch perspectief. Daarbij doet het rapport aanbevelingen voor een verdere bijdrage aan de interoperabiliteit van rekenmodellen binnen de context van digitale tweelingen die worden toegepast in de fysieke leefomgeving.

De bevindingen in dit rapport zijn gebaseerd op een combinatie van interviews met 20 Nederlandse experts uit het werkveld van rekenmodellen en digitale tweelingen, op deskresearch en een expertworkshop. De resultaten geven inzicht in best practices, ontwikkelingen, innovaties en uitdagingen rondom de integratie van rekenmodellen in digitale tweelingen. De verkenning signaleert, dat de interoperabiliteit van rekenmodellen in digitale tweelingen van groot belang is voor het realiseren van toepassingen die verschillende waarin meer complexe of integrale afwegingen gemaakt moeten worden zoals die bijvoorbeeld samenkomen in de ambities rond duurzame steden. Dit kan worden bereikt door het ontwikkelen van samenwerking, afspraken en standaardisatie en modulaire digitale tweelingen, die het delen en hergebruik van rekenmodellen en rekeninfrastructuur vergemakkelijken. De samenwerking tussen de vele verschillende betrokken partijen en het creëren van een open infrastructuur voor rekenmodellen zijn mede de sleutel tot succes van het gebruik van digitale tweelingen voor het ondersteunen van beleid, planning en besluitvorming over complexe vraagstukken in de fysieke leefomgeving.

De belangrijkste bevindingen van de verkenning zijn:

1. Om de effectiviteit van digitale tweelingen te vergroten, moeten rekenmodellen uitwisselbaar zijn en goed kunnen samenwerken. Dit kan alleen door gebruik te maken van gestandaardiseerde interfaces en protocollen die alle aspecten van interoperabiliteit dekken, zowel de juridische, organisatorische, semantische en technische, als de gebruiksaspecten. Interoperabiliteit is essentieel voor het succes van digitale tweelingen;
2. Standaardisatie is van belang om modellen beter te laten samenwerken, maar betekent niet dat gestreefd moet worden naar universele modellen die voor heel uiteenlopende toepassingen kunnen worden ingezet.
3. Samenwerken en kennisdeling is cruciaal voor de succesvolle integratie van rekenmodellen in digitale tweelingen. Dit vereist nauwe samenwerking tussen overheden, kennisinstellingen en de private sector. Er moeten bijvoorbeeld afspraken worden gemaakt over kwaliteitsborging en gebruik van rekenmodellen en over verdienmodellen. Daarnaast is behoeft aan een nationale strategie en een organisatorische infrastructuur;
4. Rekenmodellen worden niet altijd gebruikt waarvoor ze bedoeld zijn en niet altijd gevalideerd voordat ze worden gebruikt. Kwaliteitskaders en audits zijn nodig om betrouwbaarheid te waarborgen. Er is behoefte aan kwaliteitskaders om te bepalen wanneer een model geschikt is voor een bepaald gebruik. Dit vergt duidelijk zicht op fit-

for-purpose en vastlegging van kwaliteit en betrouwbaarheid in relatie tot de voorgenomen toepassing (validatie en certificering).

5. Het Handboek Good Modelling Practice biedt richtlijnen voor transparantie, reproduceerbaarheid en validatie, wat de acceptatie van modelresultaten vergroot. Aanbevolen wordt een kwaliteitskader te introduceren, een modellenregister te verkennen, licentievoorwaarden op te stellen en audits uit te voeren. Deze maatregelen bevorderen transparantie, hergebruik en wetenschappelijke vooruitgang van rekenmodellen;
6. Open communicatie over modelwerking, kwaliteitsaspecten en toepassingsdomein kan bijdragen aan bredere acceptatie van modelgebaseerde uitkomsten bij beleidsmakers, burgers en andere belanghebbenden. Complexiteit staat op gespannen voet met transparantie en inzicht in correcte toepassingen. Het ideale model is zo complex als nodig is en zo simpel als mogelijk is.
7. In tegenstelling tot geodata, waarvoor inmiddels gestandaardiseerde richtlijnen en handreikingen bestaan, zijn voor de ontsluiting van rekenmodellen in digitale tweelingen nog geen uniforme afspraken gemaakt. Dit is begrijpelijk gezien het veel complexere karakter van modellen, maar beperkt de mogelijkheden tot koppeling en hergebruik. Er zijn nu enkele toepassingen en testbeds waarin standaarden voor rekenmodellen worden toegepast, zoals de Basic Modelling Interface en OGC API Processes. Deze kunnen helpen bij het verbinden van verschillende rekenmodellen en het faciliteren van data-uitwisseling met en tussen rekenmodellen. Dit is een belangrijke uitdaging die moet worden aangepakt om digitale tweelingen in Nederland verder te ontwikkelen en hun impact te vergroten;
8. Het bevorderen van modulaire en herbruikbare ontwerpprincipes maakt het mogelijk om rekenmodellen flexibel te integreren en te hergebruiken binnen verschillende digitale tweelingen. Dit bevordert de schaalbaarheid en het hergebruik van bestaande rekenmodellen en helpt de kosten en tijdsinzet te verminderen voor de ontwikkeling en het implementeren van nieuwe toepassingen. De referentie architectuur NLDT die nu ontwikkeling is, geeft een eerste aanzet voor implementatie hiervan in de praktijk;
9. High-performance computing vindt steeds meer toepassing in digitale tweelingen, waarbij GPU's en multi-threaded computing complexe simulaties versnellen. AI-algoritmen worden ingezet voor simulaties, modelvalidatie en het optimaliseren van bestaande modellen. Voor een effectieve implementatie wordt aanbevolen aandacht te geven aan workflow management, AI-toepassingen en samenwerking met het Digilab Toegepaste Kennis.
10. Een nauwe samenwerking tussen overheden, onderzoeksinstituten en private bedrijven is essentieel voor het creëren van een digitaal ecosysteem waarin rekenmodellen effectief kunnen worden gedeeld en hergebruikt. Ook het versterken van de samenwerking tussen belanghebbenden bij gebruik van rekenmodellen en digitale tweelingen wordt aanbevolen. DMI en het nationale programma Digitale Tweelingen vanuit Zicht op Nederland geven een eerste aanzet als belangrijke samenwerking voor het realiseren van interoperabiliteit en de gedeelde infrastructuur tussen verschillende digitale tweelingen. Dat kan de weg verder vrijmaken voor een breder gebruik van digitale tweelingen.

Lijst van afkortingen

AI	Artificiële (ook wel kunstmatige) Intelligentie
API	Application Programming Interface
AR/VR/XR	Augmented Reality/Virtual Reality/eXtended Reality
BAG	Basisregistratie Adressen en Gebouwen
BMI	Basic Modelling Interface
BRT	Basisregistratie Topografie
BRO	Basisregistratie Ondergrond
CBS	Centraal Bureau voor de Statistiek
CPT	Capabilities Periodic Table
DT	Digitale Tweeling of Digital Twin
DMI	Dutch Metropolitan Innovations
DSS	Decision Support System (Besluitvormingsondersteunend Systeem)
DTaaS	Digitale Tweeling as a Service
DTC	Digital Twin Consortium
DTE	Digital Twin Engine
EIF	European Interoperability Framework (Europees Interoperabiliteitsraamwerk)
EU	Europese Unie
FAIR	Findable, Accessible, Interoperable, Reusable (Vindbaar, Toegankelijk, Interoperabel, Herbruikbaar)
GBP	Groene Baten Planner
GIS	Geografisch Informatiesysteem
GPU	Graphics Processing Unit (Grafische Verwerkingsunit)
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
IenW	(Ministerie van) Infrastructuur en Waterstaat
IoT	Internet of Things (Internet van Dingen)
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Intergouvernmenteel Panel over Klimaatverandering)
JSON	JavaScript Object Notation
KNMI	Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut
MCA	Multi-Criteria Analysis (Multi-criteria-analyse)
MKBA	Maatschappelijke Kosten-Batenanalyse

NHI	Nederlands Hydrologisch Instrumentarium
NMDC	Nationaal Modellen- en Data Centrum
NRM	Nederlands Regionaal Model
NWM	Nationaal Water Model
LCA	Levenscyclusanalyse
LMS	Landelijk Model Systeem
DTP	Open Digital Twin Platform
OGC	Open Geospatial Consortium
OMF	Open Modeling Foundation
OpenMI	Open Modelling Interface
REST	Representational State Transfer
RIVM	Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu
STOWA	Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer
TNO	Nederlandse Organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek
TO	Toegepast Onderzoeksinstituut
UX	User Experience (Gebruikerservaring)
VRO	(Ministerie van) Volkshuisvesting en Ruimtelijke Ordening
VU	Vrije Universiteit
WPS	Web Processing Service
WOZ	Basisregistratie Waardering Onroerende Zaken
WUR	Wageningen University & Research
XML	eXtensible Markup Language

1. Inleiding verkenning

1.1 Inleiding

De ruimte in ons land wordt steeds schaarser en we willen met elkaar heel veel op een klein stukje aarde. Voor het oplossen dan deze puzzel is het noodzakelijk om de uiteenlopende ruimtelijke opgaven vanuit verschillende invalshoeken integraal te benaderen. Daarvoor is een gemeenschappelijke informatiebasis nodig. Digitale representaties van de fysieke leefomgeving ofwel digitale tweelingen helpen om de beschikbare data over de fysieke leefomgeving voor alle betrokkenen zichtbaar te maken. Rekenmodellen zorgen er daarbij voor dat deze data ook 'tot leven gebracht' kunnen worden, bijvoorbeeld in simulaties. Hierdoor kan een gesprek plaatsvinden over gewenste en ongewenste (bij-)effecten van ingrepen in de fysieke leefomgeving. In Nederland wordt daarom nu gewerkt aan een landelijk netwerk van lokale digitale tweelingen dat het mogelijk moet maken om elkaars data, rekenmodellen en visualisaties te gebruiken voor het oplossen van onze maatschappelijke opgaven (Ministerie van VRO, 2025a).

Het basisidee van het beoogde netwerk van digitale tweelingen is dat de onderdelen (data, modellen, visualisaties) waar ze uit bestaan onderling gedeeld of verbonden worden omdat dit leidt tot meer efficiëntie, gedeelde inzichten, tijdsbesparing en lagere kosten. Deze onderlinge verbindingen kunnen bestaan uit het delen van data tussen bouwstenen van een digitale tweeling, tussen verschillende digitale tweelingen, of met externe data platforms en rekenmodellen. Er zijn diverse manieren om digitale tweelingen te verbinden, bijvoorbeeld door het geven van toegang tot sensordata en data API’s en visualisaties, of door het opnemen en uitvoeren van verschillende rekenmodellen. Verbindingen met rekenmodellen kunnen zinvol zijn om resultaten op te nemen, die relevant zijn voor beleidsanalyse, scenarioplanning en het nemen van operationele, tactische en strategische beslissingen. Voor toegang tot data (en metadata) zijn diverse standaarden beschikbaar, zoals voor het vastleggen van semantiek, uitwisselformaten en diverse typen API’s.

Voor het verbinden van digitale tweelingen is het van belang dat deze modulair, servicegericht en interoperabel samengesteld kunnen worden. Daarbij spelen open standaarden een essentiële rol. In de Nederlandse situatie zijn de afgelopen tien jaar diverse ervaringen opgedaan met het interoperabel maken van verschillende statische en dynamische geodata bronnen en zijn ondertussen succesvolle implementaties beschikbaar. De afspraken daarvoor zijn vaak vastgelegd in richtlijnen en handreikingen. Dergelijke standaardisatie afspraken zijn er nog niet voor rekenmodellen (Raes, 2025). Hoe kunnen rekenmodellen – het hart van de functie van digitale tweelingen – worden benaderd en gedeeld om het nut en de publieke waarde van digitale tweelingen te vergroten? Oftewel hoe kunnen rekenmodellen modulair, servicegericht en interoperabel aangeboden worden voor hergebruik in digitale tweelingen? Dit zijn de vragen waarmee we deze verkenning zijn gestart.

1.2 Deze verkenning

Het doel van deze verkenning is een beter beeld te krijgen van de wijze waarop rekenmodellen verbonden kunnen worden aan digitale tweelingen zodat de interactie met rekenmodellen modulair, servicegericht en interoperabel opgezet kan worden. We willen daarvoor de stand van zaken ophalen rondom het gebruik van rekenmodellen in digitale tweelingen en de toepassing van open interface standaarden voor rekenmodellen en rekenmodellen interoperabiliteit in Nederland. We inventariseren daarmee welke open interface standaarden beschikbaar zijn en in Nederland worden gebruikt en voor welke rekenmodellen en toepassingen. En dat vanuit het perspectief van digitale tweelingen toepassingen in de fysieke leefomgeving.

Het in beeld brengen van ervaringen en kennis in Nederland over een uniforme en gestandaardiseerde ontsluiting van rekenmodellen is het onderwerp van deze studie. Daarbij wordt rekening

gehouden met de complexiteit van het werkveld van de rekenmodellen. Er zijn vele verschillende typen rekenmodellen, met verschillende doelen en functies en in verschillende toepassingsdomeinen. Ook de implementaties van rekenmodellen zijn uiteenlopend en divers. Deze complexiteit en diversiteit betekent dat een verkenning naar een mogelijk oplossing of oplossingen voor een uniforme ontsluiting van de rekenmodellen in digitale tweelingen begint met het verkennen van de opgedane ervaringen met rekenmodellen en interoperabiliteit in het Nederlandse werkveld. Er bestaan al diverse internationale initiatieven, die werken aan uniforme en gestandaardiseerde ontsluiting van rekenmodellen, bijvoorbeeld OpenMI, Basic Modelling Interface, OGC API Processes, die ook voor Nederland relevant kunnen zijn.

Deze verkenning heeft zeker niet de intentie gehad compleet te zijn. Bevindingen en aanbevelingen zijn de weerslag van een groot aantal gehouden interviews met Nederlandse experts en door hen aangedragen (bron)informatie. De verkenning heeft mede als doel om relevante aandachtgebieden en te onderzoeken onderwerpen te agenderen als het gaat om interoperabiliteit van rekenmodellen in de context van het gebruik van digitale tweelingen voor de fysieke leefomgeving. We richten ons hier specifiek op de fysieke leefomgeving en laten digitale weergaven van bijvoorbeeld organismen of mensen (zoals in de medische toepassingen), productieprocessen (uit de industrie) of meer sociale toepassingen (b.v. interactie tussen groepen in de samenleving) buiten beschouwing.

1.3 Dutch Metropolitan Innovations

Deze verkenning is uitgevoerd als onderdeel van het programma Dutch Metropolitan Innovations (DMI). Dit programma richt zich op het ontwikkelen van een digitaal ecosysteem dat data-uitwisseling tussen overheden en bedrijven in de sectoren mobiliteit en verstedelijking faciliteert. Het doel is om data vindbaar, bruikbaar en uitwisselbaar te maken, wat bijdraagt aan slimme en duurzame stedelijke oplossingen. DMI is een Nationaal Groeifonds[1] initiatief onder leiding van het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (IenW), in samenwerking met het Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties, diverse gemeenten, provincies, kennisinstellingen en private partners. De belangrijke doelstellingen van het programma zijn:

- Het creëren van een uniforme technische en organisatorische infrastructuur voor data-uitwisseling, inclusief duidelijke afspraken over datagebruik, privacy en beveiliging;
- Het stimuleren van samenwerking tussen overheden en het bedrijfsleven om innovatieve oplossingen te ontwikkelen voor uitdagingen op het gebied van duurzaamheid in stedelijke gebieden.

Het programma loopt van 2023 tot 2027 en beoogt in deze periode significante vooruitgang te boeken in het realiseren van slimme en duurzame stedelijke omgevingen. Het Nationaal Groeifonds heeft €85 miljoen geïnvesteerd in het versterken van het DMI-ecosysteem, met aanvullende bijdragen van het bedrijfsleven (€42 miljoen) en betrokken overheden (€50 miljoen). Door middel van DMI wordt beoogd om de fysieke leefomgeving te verbeteren door gebruik te maken van digitale innovaties zoals digitale tweelingen. Hierdoor moeten steden duurzamer, leefbaarder en beter verbonden worden. Een belangrijk aspect van deze samenwerking is het delen van kennis en ontwikkelen van best practices op het gebied van digitale tweelingen, standaarden en interoperabiliteit. Interoperabiliteit tussen de verschillende digitale tweelingen is de basis van Digitale Tweeling as a Service (DTaaS)[2]. Dit ontwikkeltraject heeft als doel een nationale geo-informatie infrastructuur te ontwikkelen, die het mogelijk maakt om niet alleen data, maar ook rekenmodellen en visualisaties te delen en te gebruiken. DTaaS voert daarvoor in de periode 2024-2027 de onderstaande activiteiten uit:

[1] Zie https://www.nationaalgroeifonds.nl/overzicht-lopende-projecten/thema-mobiliteit/digitaal-ecosysteem-mobiliteit-en-smart-city?

[2] Zie https://www.geonovum.nl/themas/digital-twins

- Het bevorderen van use case, kennis en organisatorische ontwikkeling om het gebruik van digitale tweelingen te vergemakkelijken en te optimaliseren;
- Het ontwikkelen van een nationale referentiearchitectuur met standaarden en afspraken om interoperabiliteit en hergebruik van componenten binnen digitale tweelingen te faciliteren;
- Het uitvoeren van verkenningen, onderzoek, handreikingen en testbeds om concepten en standaarden in de praktijk te testen en te verfijnen in nauwe samenwerking met de provincie Flevoland en gemeenten zoals Almere, Dronten en Lelystad (binnen het fieldlab Zicht op Flevoland[3]).

DTaaS streeft naar een nationaal ecosysteem van modulaire bouwblokken waarmee digitale tweelingen eenvoudig kunnen worden gemaakt, ingezet en hergebruikt. Het doel van dit project is de ontwikkeling van afspraken, standaarden en best practices, zodat digitale tweelingen modulair, servicegericht en interoperabel samengesteld kunnen worden. Deze verkenning over rekenmodellen en interoperabiliteit is vanuit DMI en DTaaS uitgevoerd.

1.4 Aanpak opdracht

De verkenning richt zich op het identificeren en bespreken van interoperabiliteit en best practices om rekenmodellen modulair, servicegericht en interoperabel in digitale tweelingen te integreren. Dit omvat het bespreken van bestaande aanpakken, standaarden en werkwijzen in Nederland en de toepassing binnen digitale tweelingen. De aanpak omvat een combinatie van expertinterviews, deskresearch en workshops:

1. Expertinterviews met professionals uit het werkveld om inzicht te krijgen in hoe rekenmodellen momenteel aan digitale tweelingen gekoppeld worden en wat verbeterd kan worden;
2. Deskresearch en analyse van aangedragen documenten en referentiearchitecturen, lopende digital tweeling projecten en initiatieven zoals OpenMI, Basic Modelling Interface, en OGC API Processes;
3. Het bespreken van resultaten en vervolgstappen met experts en belanghebbenden (workshop en discussies).

Het onderzoek richt zich niet op het testen van een interface standaard of het opzetten van een testbed, maar beperkt zich tot verkenning en discussie met bevindingen en aanbevelingen. De aanpak is erop gericht om inzichten te bieden voor vervolgstappen, die verder bijdragen aan de interoperabiliteit van rekenmodellen binnen digitale tweelingen in Nederland.

Voor deze verkenning is met verschillende Nederlandse experts, die werken met rekenmodellen en digitale tweelingen gesproken over aspecten van interoperabiliteit van rekenmodellen. Bijlage 1 geeft een overzicht van de geconsulteerde experts en de vragenlijst die we daarbij als basis hanteerden. Tijdens de interviews zijn niet alleen de technische aspecten aan de orde gekomen, maar ook de organisatorische uitdagingen van modelkoppelingen. De nadruk in de gesprekken lag daarbij steeds op de vraag of open standaarden behulpzaam zouden kunnen zijn bij het verbinden van verschillende rekenmodellen in digitale tweelingen en uiteenlopende toepassingen.

1.5 Leeswijzer

Deze leeswijzer helpt om gericht door het document te navigeren. Hoofdstuk 2 bespreekt hoe digitale tweelingen worden ingezet in de fysieke leefomgeving en wat hun opbouw en volwassenheidsstadia zijn. Interessant voor lezers die willen begrijpen hoe digitale tweelingen werken en hoe ze evolueren in termen van functionaliteit. Hoofdstuk 3 geeft inzicht in verschillende typen rekenmodellen voor de fysieke leefomgeving, inclusief een overzicht van de modelleercyclus

[3] Zie https://www.zichtopnl.nl/digitaletweeling/fieldlabs/zicht+op+flevoland

en verschillende classificaties van modellen op functie, benadering en toepassingsdomein. Hiermee wordt de diversiteit van rekenmodellen en hun rol in digitale tweelingen voor beleid, planning en besluitvorming geïllustreerd.

In Hoofdstuk 4 wordt nader ingegaan op de interoperabiliteit van rekenmodellen voor digitale tweelingen, waarbij juridische, organisatorische, semantische, technische dimensies van interoperabiliteit aan de orde komen. Specifieke onderwerpen hierbij zijn onder meer open standaarden, modulaire architectuur, workflow-management en (in beperkt detail) technologie. Daarnaast besteden we aandacht aan enkele gebruiksaspecten die bijdragen aan een verantwoord gebruik van modellen. Dit hoofdstuk is bedoeld voor experts en beleidsmakers, die digitale tweelingen ontwikkelen en gebruiken en die zich willen richten op het verbeteren van de samenwerking tussen en interoperabiliteit van rekenmodellen in digitale tweelingen.

Hoofdstuk 5 biedt een samenvatting van de belangrijkste bevindingen en praktische aanbevelingen. Dit is geschikt voor besluitvormers en stakeholders, die op zoek zijn naar de conclusies en aanbevelingen voor vervolgacties. Tenslotte is een overzicht bijgevoegd van geraadpleegde literatuur (referentielijst) en de geïnterviewde experts die bijdroegen aan de verkenning. Handig voor onderzoekers en andere geïnteresseerden die verdere details en onderbouwing zoeken.

2. Digitale tweelingen

2.1 Digitale tweelingen voor de fysieke leefomgeving

In deze introductie wordt het begrip digitale tweeling[4] toegelicht door stil te staan bij enkele voorbeelden van digitale tweelingen en enkele definities. Over digitale tweelingen bestaan verschillende beelden. Voor de is een digitale tweeling een 3D ontwerp van een gebouw of woning in een bouwproject, een ander denkt aan real-time informatie uit de sensoren in een brug om de onderhoudscyclus van de brug te voorspellen. En voor weer een ander voert de digitale tweeling een simulatie uit van een overstroming na een dijkdoorbraak uit of wordt voorspeld hoe ons landgebruik eruitziet in 2050. Digitale tweelingen worden in Nederland voor veel verschillende doeleinden gebruikt worden (Van Apeldoorn et al., 2023). Hieronder beschrijven we enkele recente toepassingen.

2.1.1 Toepassingsvoorbeeld 1 - Onderhoud brug

Het idee van een digitale tweeling is eigenlijk al decennia oud. We ontwikkelen, simuleren en testen al jaren machines en andere objecten met 3D-software, zodat ze doen waarvoor ze gemaakt zijn als ze in productie gaan. Maar vervolgens moet een machine ook onderhouden worden. Onderhoud wordt weliswaar geregistreerd door leveranciers en gebruikers, maar het ontbreekt vaak aan een eenduidig beeld van al het onderhoud en de vervangingsonderdelen van een machine.

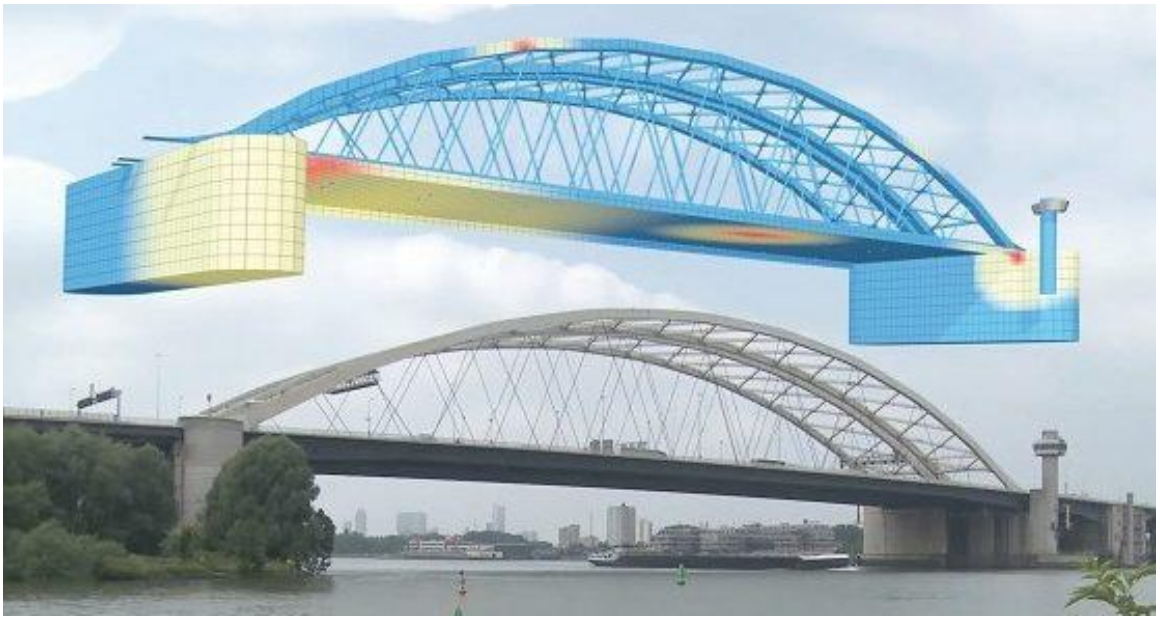
Neem bijvoorbeeld een brug (zie Figuur 1). Zo'n object bestaat uit diverse onderdelen zoals de betonconstructie, het wegdek, de ophanging, relingen et cetera, die worden geleverd en onderhouden door verschillende partijen. Voor onderhoud willen we precies weten uit welke onderdelen de brug bestaat en wanneer deze onderdelen aan vervanging toe zijn (Adriaanse, z.j.). Daarvoor verzamelen we data over het gepleegde onderhoud per onderdeel, de leveranciers, het vervangende materiaal, maar vooral ook data over het onderdeel zelf, zoals slijtage, defecten en ouderdom. De data worden verzameld via inspecties en in toenemende mate worden inspecties continue uitgevoerd met behulp van sensoren. Met een digitale tweeling maak je dit eerst inzichtelijk. Je visualiseert een brug in een digitale omgeving en kunt per onderdeel inzoomen en precies zien wat de onderhoudsstatus is (Adriaanse, z.j.). Dit open mogelijkheden om tot efficiënter beheer en onderhoud over te gaan.

In de praktijk is onderhoud veelal preventief van aard. Een onderdeel wordt vervangen of gerepareerd na een bepaalde, voorgeschreven periode, vaak omdat de levensduur van het onderdeel vooraf is bepaald (vaak door de leverancier). Dat kan betekenen dat een onderdeel vervangen wordt dat nog jaren mee had gekund, maar het komt ook voor dat een onderdeel vroegtijdig kapotgaat met alle gevolgen van dien. Een digitale tweeling kan niet alleen ingezet worden voor het preventieve onderhoud, maar ook voor het herkennen van toekomstige probleemsituaties, een predictive twin[5]. Dankzij de (historische) data uit sensoren en nieuwe data-analyse technieken, zoals predictive analytics en machine learning is het mogelijk patronen te herkennen en voorspellingen over te plegen onderhoud en vervanging van de onderdelen te doen. Met behulp van sommige voorspellende modellen is het ook mogelijk situaties te simuleren. Wat gebeurt er met een brug zodra het vrachtverkeer toeneemt of zwaardere elektrische auto's continue over de brug (gaan) rijden? Welke onderdelen komen het meest onder druk te staan? De nieuwe inzichten zorgen ervoor, dat onderdelen voortaan op tijd worden gerepareerd of vervangen en servicebeurten slimmer worden gepland en uitgevoerd. En met het gebruik van sensoren en real-time data is het voorspellen van de status van de brug is geen statische activiteit meer, maar een

[4] In Nederland wordt ook vaak de term 'digital twin' gebruikt, maar wij geven de voorkeur aan de Nederlandstalige term.

[5] Zie https://www.tno.nl/nl/newsroom/insights/2024/12/maak-infrastructuur-slimmer-duurzamer/

continu proces van dataverwerking. De digitale tweeling zorgt daarbij ook voor de visuele presentatie van de inzichten in het onderhoudsproces.



Figuur 1 - Een brug en zijn digitale tweeling (bron: vrij naar TNO).

2.1.2 Toepassingsvoorbeeld 2 – Aanleg woonwijk Brainport Smart district

We hebben een flinke uitdaging met de woonopgave in Nederland en het bouwen van ongeveer één miljoen nieuwe woningen. Waar deze woningen moeten komen is een belangrijk politiek vraagstuk. Rijk, provincies en gemeenten kullen bij de ruimtelijke bouwopgaven met de ontwikkelaars en toekomstige bewoners 3D simulaties en digitale tweelingen inzetten. De digitale tweeling helpt bij het zoeken naar afwegingen voor een optimale gebiedsgerichte omgevingskwaliteit, die moet zorgen voor een gezonde, veilige en aantrekkelijke woonomgeving voor de toekomstige bewoners. Hiermee wordt gedurende het planproces in een digitale tweeling de omgevingskwaliteit en duurzaamheid in een gebied geïnventariseerd en gevisualiseerd. Door aanpassingen kan het plan worden geoptimaliseerd. Hierbij wordt de omgevingskwaliteit via indicatoren weergegeven met rapportcijfers.

Vanaf het moment van aanleg van een nieuwe woonwijk kan de digitale tweeling ingezet voor om woningzoekenden te laten zien hoe de toekomstige wijk of straat eruit komt te zien (zie Figuur 2), zoals voor Brainport Smart District in Helmond[6] is gedaan. Door een virtueel bezoek te brengen, kun je precies zien hoe de nieuwe wijk eruit komt te zien en de wijk ook echt beleven en begrijpen. Met behulp van slimme 3D-modellen, gebaseerd op allerlei data, krijg je een realistisch inkijkje in de impact van toekomstplannen. Bewoners kunnen in een digitale tweeling ook hun woning configureren. De digitale tweeling toont dan direct hoe je toekomstige huis zich verhoudt tot de beoogde kwaliteit van de leefomgeving. Wil je liever een plat dak, een dakkapel of een uitbouw? Of wil je gelijk zonnepanelen plaatsen en zien wat opbrengsten zijn? Passen je wensen niet binnen de gestelde regels, dan geeft de digitale tweeling inzicht in aanpassingen die je kan doen om binnen de geldende regels te blijven. Dit is mogelijk als de stedenbouwkundige visie, kwaliteitseisen, bouw- en omgevingsregels en rekenmodellen in de digitale tweeling zijn verwerkt. Als toekomstige bewoner kun je de wijk dan ervaren voordat je er gaat wonen. Zo krijg je inzicht in de bouwmogelijkheden op het perceel en zie je welke voorzieningen in de buurt aanwezig zijn. Of krijg

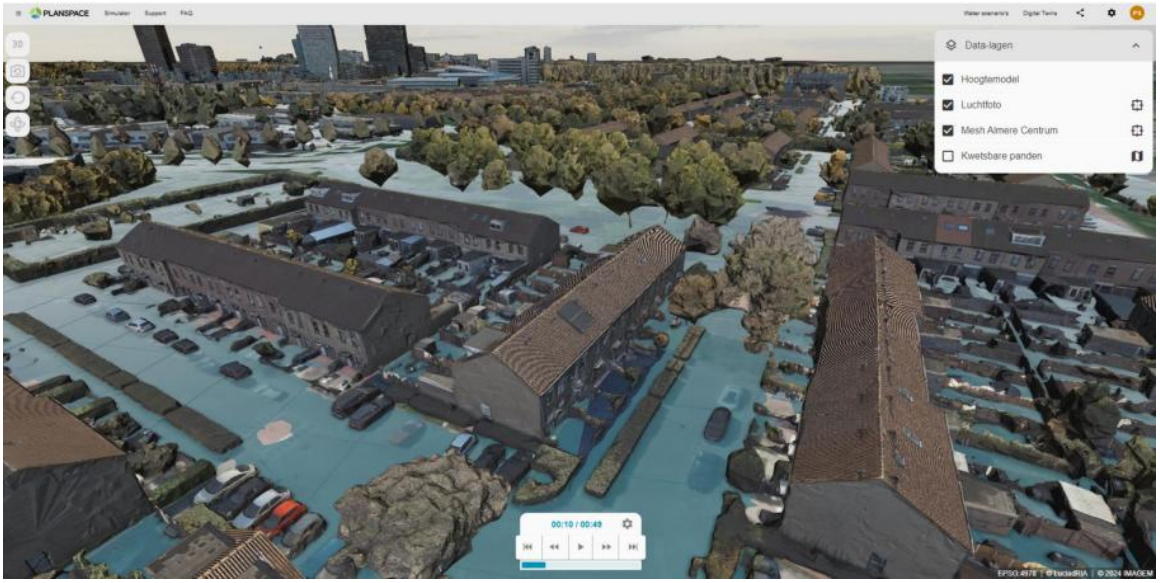
[6] Zie https://brainportsmartdistrict.nl/project/de-digital-twin-van-geodan/

je met de digitale tweeling inzicht in milieuaspecten zoals geluidsbelasting en luchtkwaliteit in de wijk.

Figuur 2 - Ontwerp van de woonwijk Brainport Smart District in Helmond (bron: vrij naar Geodan).

2.1.3 Toepassingsvoorbeeld 3 - Simulatie wateroverlast en overstromingen

Mede door de klimaatverandering worden onze zomers steeds warmer en droger. Bij het klimaatadaptief inrichten van de fysieke leefomgeving gaat het niet alleen om hittestress en droogte. Ook buien worden korter en heftiger. Door deze hevige regenval lopen straten onder water en komt wateroverlast steeds vaker voor. Een digitale tweeling maakt visueel inzichtelijk waar potentiële wateroverlastgevoelige locaties zijn. Door een rioleringsmodel (hoeveel water kan het verwerken?) te koppelen aan het maaiveldmodel (met hoogtedata die voor simulatie van stroming water) kan extreme neerslag gesimuleerd worden in een digitale tweeling. Zo'n simulatie geeft inzicht in de hoeveelheid water op straat na een hevige bui en waar dat water vandaan komt. Gemeenten en burgers zien de mogelijke gevolgen van extreme neerslag en kunnen zich voorbereiden en evt. preventieve maatregelen nemen. Figuur 3 toont een hoosbui simulatie in de gemeente Almere (Ministerie van VRO, 2025b).



Figuur 3 – Simulatie van wateroverlast in Almere (bron: vrij naar Hexagon Neelen en Schuurmans).

Naast wateroverlast in steden worden de digitale tweelingen ook ingezet voor onze waterveiligheid. Na de catastrofale dijkdoorbraken in Zeeland in 1953 zijn we de strijd tegen het water aangegaan. Wat gebeurt er bij een doorbraak van een dijk? Hoe gedraagt een waterkering zich onder verschillende stroom- en golfconditie?. Vanaf de jaren ‘50 van de vorige eeuw deed het waterloopkundig laboratorium (tegenwoordig onderdeel van het onderzoeksinstituut Deltares) hiervoor praktijkproeven met schaalmodellen. Tegenwoordig worden dergelijke simulaties uitgevoerd met computermodellen waarin berekeningen worden uitgevoerd op basis van mathematische beschrijvingen van de belangrijkste processen. Met name voor het simuleren en verbeelden van de gevolgen van overstromingen zijn digitale tweelingen heel geschikt. Op basis van aannames over bijvoorbeeld de hoogte en duur van het hoogwater, de grootte van het gat in de dijk, de ligging van bebouwing en watergangen in het gebied en de maatregelen die het waterschap neemt, kan aangegeven worden wat de mogelijke gevolgen zijn van dijkdoorbraken.

Met overstromingsmodellen en 3D-visualistatietechnieken tonen digitale tweelingen waar en wanneer het land overstroomt bij een gesimuleerde dijkdoorbraak. Hierin worden de uitkomsten van overstromingsmodellen gecombineerd met data over het wegennet, de (hoogte van) bebouwing, de demografie en kwetsbare installaties. Informatie die ook weer zinvol is voor het opstellen van bijvoorbeeld evacuatiescenario’s omdat inzicht gegeven kan worden in mogelijke vluchtroutes en de risico’s rondom en veiligheid van gebouwen en kwetsbare bevolkingsgroepen.

2.1.4 Definities van digitale tweelingen

De uiteenlopende voorbeelden geven aan dat het nog niet zo eenvoudig is een eenduidige definitie te geven van een digitale tweeling. Hieronder staan drie veelgebruikte, internationale definities van het begrip digitale tweeling gerelateerd aan verschillende toepassingen in de fysieke leefomgeving:

1. “digital representation of a target entity with data connections that enable convergence between the physical and digital states at an appropriate rate of synchronization” (ISO/IEC, 2023);
2. "A digital twin is a set of virtual information constructs that mimics the structure, context, and behavior of a natural, engineered, or social system (or system-of-systems), is dynamically updated with data from its physical twin, has a predictive capability, and informs decisions that realize value. The bidirectional interaction between the virtual and the physical is central to the digital twin." (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2024); en
3. “digital representation of a real-world entity or system. The implementation of a digital twin is an encapsulated software object or model that mirrors a unique physical object, process, organization, person or other abstraction. Data from multiple digital twins can be aggregated for a composite view across a number of real-world entities, such as a power plant or a city, and their related processes.” (Gartner, 2024).

De definities hebben gemeen dat ze de digitale weergave van de werkelijkheid benoemen, maar ze verschillen in het aspect van de werkelijkheid dat beschouwd wordt en de mate van integratie tussen de samenstellende componenten. Twee definities benadrukken de dataverbindingen die het model en de werkelijkheid aan elkaar koppelen. Dit is een aspect dat vooral bij de weergave van bestaande objecten speelt zoals in ons eerste toepassingsvoorbeeld. Dergelijke datastromen zijn minder nadrukkelijke aanwezig bij het gebruik van simulatiemodellen voor toekomstige situaties zoals we in het tweede en derde toepassingsvoorbeeld bespraken.

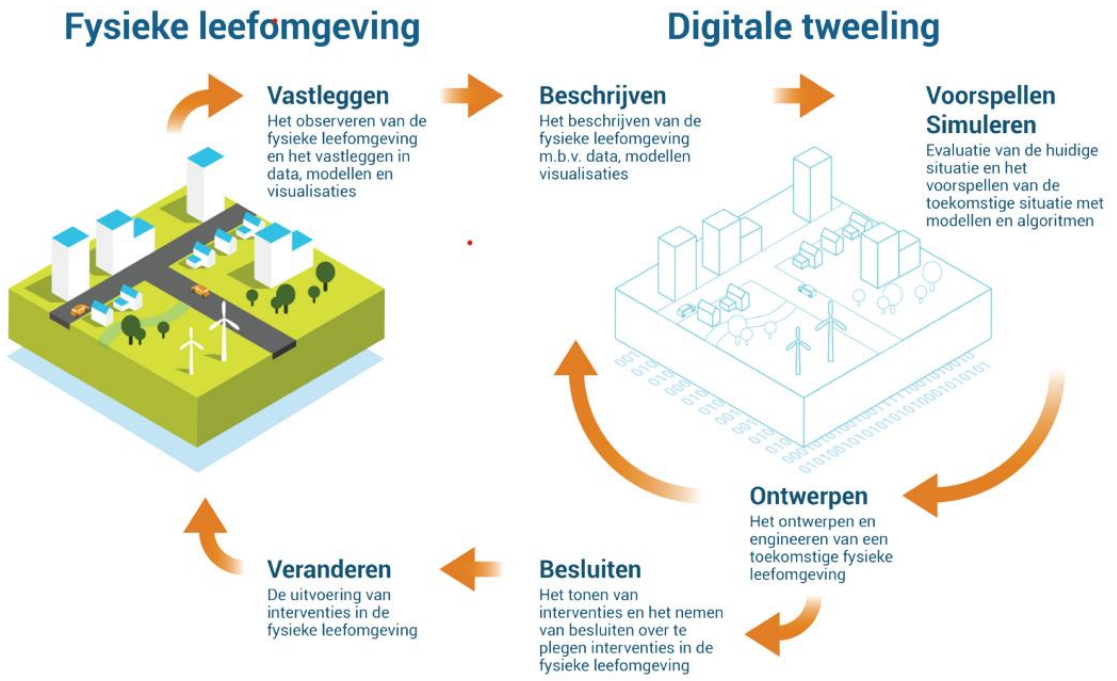
In dit rapport hanteren we de meer algemene definitie uit de kamerbrief van het Ministerie van VRO over de meerjarenvisie “Zicht op Nederland: samen data gedreven werken aan de fysieke leefomgeving” (Ministerie van VRO, 2024):

> ‘‘Een digitale tweeling van de fysieke leefomgeving is een digitale representatie van de stedelijke en landelijke omgeving op basis van data, modellen en visualisaties. Deze kunnen

worden gebruikt om verschillende aspecten van de fysieke leefomgeving te simuleren en analyseren.''

Deze definitie geeft de belangrijkste functies van een digitale tweeling aan: representatie, simulatie en analyse. Deze functies komen uitgebreider terug in het conceptueel model in Figuur 4 dat een meer procesmatige kijk op een digitale tweeling weergeeft. De figuur geeft de interactie weer tussen de werkelijke fysieke leefomgeving en de digitale tweeling.

We leggen de objecten en processen uit de werkelijke fysieke leefomgeving vast in de vorm van data, modellen en visualisaties. Daarmee komen we tot een beschrijving van de fysieke leefomgeving in een actuele tweeling. Dat leidt tot een evaluatie van de actuele situatie en de mogelijkheid om met dezelfde (en andere) modellen en algoritmen (waaronder AI) te gaan voorspellen en simuleren. Met het simuleren en voorspellen worden ook de scenario's van de toekomstige tweeling gemaakt. Daarna gaan detailontwerpen en engineering verder de toekomstige tweeling vormgeven. Dat is nodig om uiteindelijk de effecten van ingrepen en interventies in de werkelijke fysieke leefomgeving te tonen aan alle stakeholders, zodat de besluitvorming die nodig is voor het in gang zetten van de verandering(en) optimaal kan verlopen. Tenslotte, gaat die besluitvorming al dan niet leiden tot uitvoering in de werkelijke fysieke leefomgeving. De uitvoering van interventies leidt weer tot aanpassingen in de data, modellen en visualisaties van de actuele digitale tweeling. En daarmee is de cirkel min of meer rond en begint het proces opnieuw.

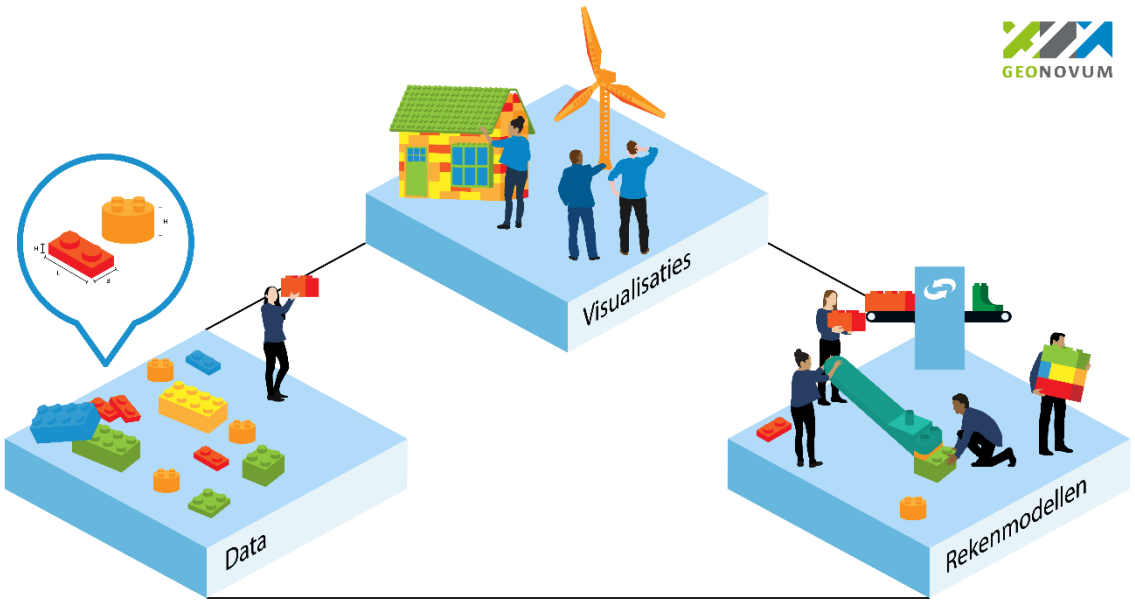


Figuur 4 – De belangrijkste functies van een digitale tweeling van de fysieke leefomgeving.

De stroom van data over de kenmerken van de fysieke leefomgeving en het dagelijks gedrag van mensen maken samen de digitale wereld. In die digitale wereld maken we vervolgens de simulaties en voorspellingen en nemen we op basis daarvan beslissingen die weer leiden tot ingrepen in de fysieke leefomgeving. Die interactie tussen data en interventies betreft naar ons idee de kern van de digitale tweeling.

2.2 De opbouw van digitale tweelingen

In aanvulling op deze procesmatige kijk op het concept van de digitale tweeling, kan ook de opbouw in de belangrijkste onderdelen of basiscomponenten voor digitale tweelingen beschouwd worden (zie Figuur 5).



Figuur 5 - De drie basiscomponenten van digitale tweelingen: data, rekenmodellen en visualisaties.

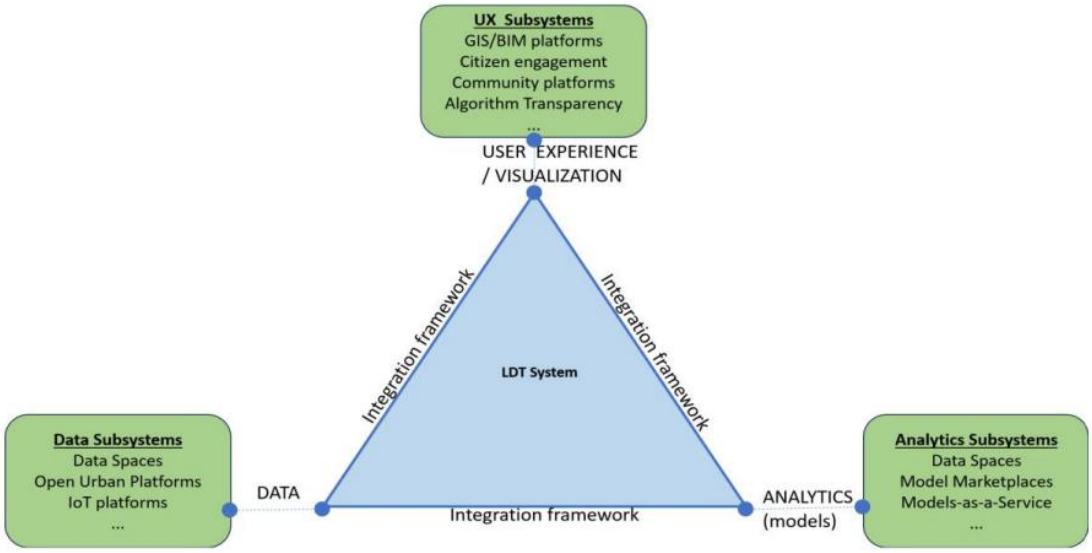
Onder data verstaan we uiteenlopende databronnen: van geografische data (gebouwen, topografie, luchtfoto's, etc.) tot mobiliteitsdata, energiedata en milieudata. Vaak wordt ook onderscheid gemaakt tussen statische en dynamische data op basis mate van actualiteit en veranderlijkheid van de data. Zo wordt data afkomstig van sensoren als dynamische data gezien omdat sensoren continue waarnemen en data genereren.

Onder de component modellen vallen rekenmodellen, die nodig zijn om de data te verwerken tot interpreteerbare informatie. Daarnaast zijn rekenmodellen representanten van de kennis, die we hebben van de complexe – fysieke, natuurlijke en sociale - processen in de werkelijkheid. De rekenmodellen bestaan veelal uit wiskundige formules, logische rekenregels en/of AI-modellen. De modellen worden gevoed met data uit de fysieke, natuurlijke en sociale werkelijkheid en worden gekalibreerd en getraind voor toepassing van monitoring, simulaties en het doen van voorspellingen.

Om de grote hoeveelheden data en resultaten van complexe rekenmodellen inzichtelijk en daarmee in de praktijk bruikbaar te maken zijn visualisaties nodig. Visualisaties en visualisatietools zoals 3D-GIS, animaties, dashboards, XR tools (augmented, virtual en mixed realities) en gaming tools zijn een onmisbare componenten om de monitorings-, plannings- en besluitvormingsprocessen te ondersteunen met heldere en eenvoudig interpreteerbare computer graphics en visuals.

De indeling in drie componenten, die onderling verbonden zijn is afkomstig uit de referentie architectuur voor Europese lokale digitale tweelingen (European Commission, 2023). Een digitale tweeling combineert meerdere technologieën, zoals data-analyse en AI, waardoor voorspellende en simulatiemodellen mogelijk zijn die kunnen worden bijgewerkt en gewijzigd naarmate hun fysieke equivalenten veranderen. In de referentie architectuur voor Europese lokale digitale tweelingen wordt een lokale digitale tweeling beschouwd als een systeem van systemen (Figuur 6). De digitale

tweeling is hierin een softwarerepresentatie waarmee interactie mogelijk is. De digitale tweeling als systeem verwijst naar andere systemen waarmee het interacteert als subsystemen, omdat deze hun eigen doel hebben zonder dat een digitale tweeling nodig is. Het systeem maakt namelijk gebruik van data(diensten) en rekenmodellen, die zijn afgeleid uit bestaande bronnen (data en rekenmodellen).



Figuur 6 - De digitale tweeling als systeem van subsystemen (Lohman, et al., 2023).

Deze data- en rekenmodellen en bijbehorende diensten kunnen ook buiten de digitale tweeling als softwaresysteem bestaan, maar moeten een gedefinieerde interactie hebben met elkaar. Deze bronnen kunnen onder andere Open Urban Data Platforms, IoT, cloudplatforms, Open Data API's, statische datasets en dataruimtes ('data spaces') zijn. Hoewel een digitale tweeling moet interacteren met deze subsystemen, worden hun technische interne vereisten gedefinieerd buiten het bereik van de digitale tweeling. Hetzelfde geldt voor het combineren van data-analyse en AI-tools. Bovendien pakt een digitale tweeling domein overschrijdende problemen aan en geeft het suggesties die impactvolle veranderingen in de gemeenschap kunnen teweegbrengen, bij voortdurende verandering van gegevens en omgeving.

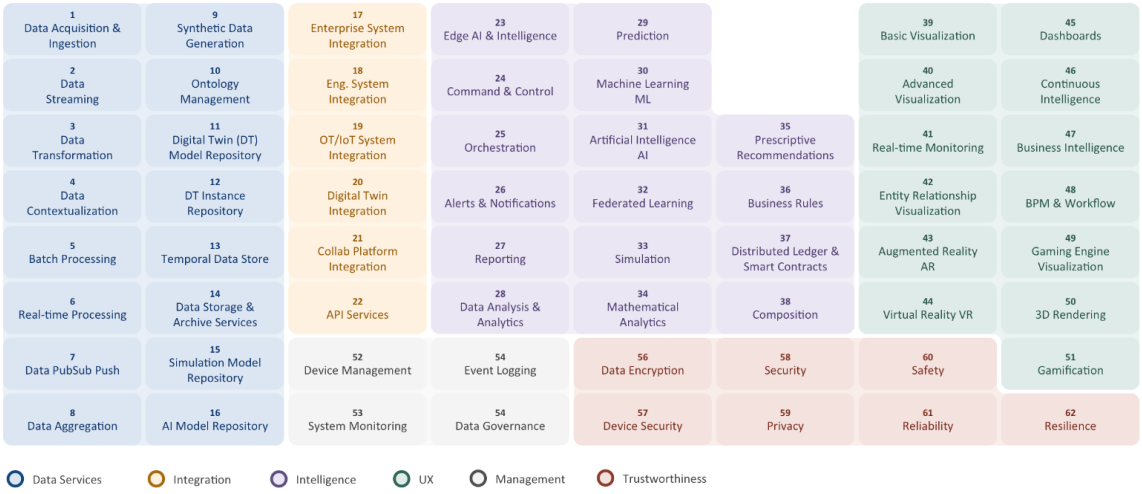
2.2.1 Digitale tweelingen als samenstelbaar systeem

Een digitale tweeling als systeem moet in staat zijn om efficiënt gebruik te maken van de diverse subsystemen die het nodig heeft. Om veerkrachtig en betrouwbaar te zijn, moeten strakke beheersafspraken gemaakt worden. Het systeem moet immers in staat zijn de interacties en processen van het subsysteem te orkestreren en de interoperabiliteit met zijn subsystemen te handhaven (of te vereisen). Hierbij zijn standaardisatie en afspraken nodig zodat de interacties tussen de subsystemen synchroon en georganiseerd verlopen. Om de realisatie van digitale tweelingen te vergemakkelijken, zijn onder meer technologie-onafhankelijke referentiearchitecturen beschikbaar met de onderliggende functionele en technische bouwstenen om digitale tweelingen te ontwerpen en te implementeren (Digital Twin Consortium, 2022; European Commission, 2023). Deze bouwstenen helpen bij het definiëren van de drie generieke componenten data, rekenmodellen en visualisaties, die worden gebruikt om digitale tweelingen samen te stellen. De bouwstenen hebben betrekking op de vele benodigde functionaliteiten, die nodig zijn voor het realiseren van systeemfunctionaliteiten voor digitale tweelingen[7]. Deze aanpak voor (applicatie)ontwikkeling van

[7] Een bouwblokkenmodel is geen referentiearchitectuur. Het benadrukt de bouwstenen voor samenstelbare digitale tweelingen en het ondersteunt meerdere architectuurbenaderingen, die eindgebruikers mogelijk hebben ontwikkeld met behulp van hun eigen bedrijfsstandaarden.

digitale tweelingen, is gebaseerd op het samenstelbare enterprise architectuurpatroon (Digital Twin Consortium, 2022). Samengestelde of composable digitale tweelingen applicaties richten zich op een snellere time-to-value, servicegebaseerde orkestratie en hergebruik van verpakte mogelijkheden om applicaties te ontwikkelen en aan te passen naarmate de bedrijfsvereisten evolueren. Digitale tweeling bouwblokken zijn modulaire combinaties van technische mogelijkheden, die worden gepresenteerd als gebundelde diensten. Deze worden samen georkestreerd (aangestuurd) via een platform om een digitale tweeling te leveren voor specifieke toepassingen. Een belangrijk kenmerk van een 'composable' digitale tweeling is dat het meestal een combinatie is van mogelijkheden van meerdere technologieleveranciers. Samengestelde of system-of-systems digitale tweelingen zijn gebaseerd op een ecosysteem van functionele mogelijkheden in plaats van een enkele leverancier.

Om beleid-, plan- en besluitvorming te ondersteunen met een digitale tweeling dienen allereerst op hoofdlijnen de functionele mogelijkheden vastgesteld te worden. Deze functionele mogelijkheden zijn door het Digital Twin Consortium (DTC) gerubriceerd in een periodiek systeem dat is weergegeven in Figuur 7[8]. Dit zijn zelfstandige onderdelen, die het vermogen hebben om bepaalde acties uit te voeren of bepaalde resultaten te bereiken in een digitale tweeling (Digital Twin Consortium, 2022). De diverse paars aangeduide bouwblokken in Figuur 7, die onder de noemer analyse vallen, betreffen de functionaliteiten die te maken hebben met het gebruik van rekenmodellen in digitale tweelingen.



Figuur 7 – Periodiek systeem van functionele mogelijkheden voor digitale tweelingen (Digital Twin Consortium, 2022)

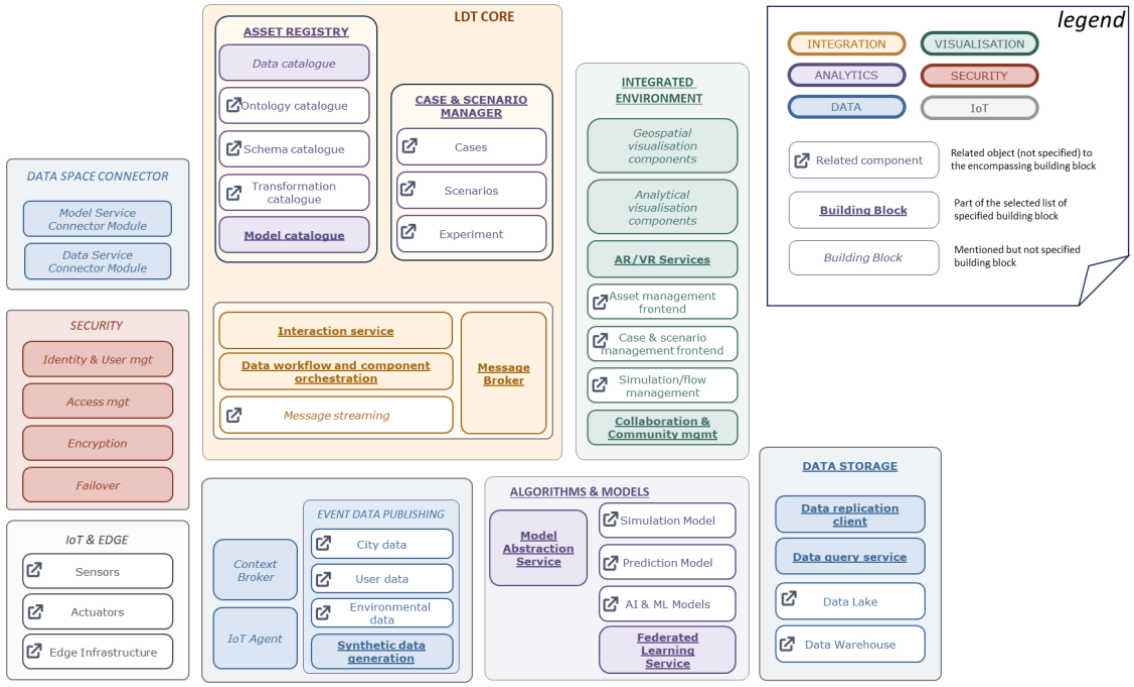
Voortbouwend op het periodiek systeem van functionele mogelijkheden[9] heeft de Europese Commissie een toolbox voor lokale digitale tweelingen opgezet (European Commission, 2023), dat is weergegeven in Figuur 8. Rekenmodellen spelen ook in dit raamwerk een belangrijke rol. Diverse bouwblokken[10] gerelateerd aan rekenmodellen, zijn daarin opgenomen en uitgewerkt voor implementatie, zoals een model service connector module als data space connector, model catalog,

[8] Dit overzicht volgt de logica van het periodieke systeem der elementen dat de bouwstenen van moleculen rangschikt.

[9] Het internationale DTC heeft de Capabilites Periodic Table (CPT) ontwikkeld als een architectuur- en technologie-agnostisch requirements definition framework. Het is bedoeld voor gebruik door organisaties die digitale tweelingen willen ontwerpen, ontwikkelen, implementeren en exploiteren op basis van use case capaciteitsvereisten en deze willen vergelijken met de functies van technologische oplossingen. Het raamwerk houdt de focus op de vereisten voor functionele bouwblokken van individuele use cases. Deze use cases kunnen vervolgens worden samengevoegd om de algemene capaciteitsvereisten, de digitale tweeling platforms en andere technologische oplossingen te bepalen die nodig zijn om aan de specifieke bedrijfsbehoeften te voldoen.

[10] De European Commission (2023) spreekt van bouwblokken in plaats van functionele mogelijkheden of capabilities of capaciteiten zoals in het Digital Twin Consortium (2022). We gebruiken de termen hier gemakshalve als equivalenten.

model abstraction service, simulation model, prediction model, AI & ML models, federated learning service.



Figuur 8 – Functionele bouwblokken voor Europese lokale digitale tweelingen (European Commission, 2023)

Waarom zijn deze frameworks van functionele mogelijkheden zo relevant voor het werken met rekenmodellen en digitale tweelingen? Deze raamwerken spelen een cruciale rol bij het opzetten van een flexibel en schaalbaar ecosysteem voor digitale tweelingen. Bouwblokken zijn de fundamentele componenten die digitale tweelingen mogelijk maken. De relevantie van bouwblokken ligt in hun flexibiliteit en herbruikbaarheid. Door modulaire bouwblokken te gebruiken, kunnen digitale tweelingen eenvoudig worden aangepast en geoptimaliseerd voor verschillende toepassingen. Dit bevordert de interoperabiliteit en maakt het mogelijk om bestaande bouwblokken opnieuw te gebruiken, wat de kosten en de ontwikkeltijd verlaagt.

Het gebruik van een capability framework faciliteert het gestructureerd identificeren en verbeteren van de verschillende functionele mogelijkheden van een digitale tweeling. Hierdoor kunnen organisaties vaststellen welke capaciteiten essentieel zijn voor hun toepassingen en ervoor zorgen dat ze de juiste bouwblokken kiezen om aan de functionele behoeften van gebruikers te voldoen. Ook voor het werken met rekenmodellen en digitale tweelingen zijn diverse bouwblokken en capabilities onderscheiden in deze capability frameworks.

Zowel het DTC capability framework (Digital Twin Consortium, 2022) als de EU Local Digital Twin Toolbox Building Blocks (European Commission, 2023) bieden een gedetailleerde set van bouwblokken, die belangrijk zijn voor de werking van digitale tweelingen. Deze raamwerken helpen bij het definiëren van de belangrijkste aspecten van digitale tweelingen, van data-integratie tot het beheer van de gehele levenscyclus van digitale tweelingen. Het stelt organisaties in staat om naadloos verschillende rekenmodellen en data te integreren in een gemeenschappelijk ecosysteem van digitale tweelingen. De raamwerken benadrukken ook het belang van interoperabiliteit, omdat digitale tweelingen vaak bestaan uit meerdere applicaties, systemen en modellen die met elkaar moeten kunnen communiceren.

Beide raamwerken bieden dus een structuur voor het identificeren van de benodigde capaciteiten van rekenmodellen, die de digitale tweelingen moeten ondersteunen. Dit helpt om ervoor te zorgen

dat digitale tweelingen niet alleen operationeel zijn, maar ook in staat zijn om effectief samen te werken met verschillende soorten rekenmodellen, die nodig zijn om de fysieke leefomgeving te analyseren en te beheren.

2.2.2 Modulaire architectuur

Bij interoperabiliteit gaat het ook over het vermogen van verschillende rekenmodellen om samen te werken en elkaars functionaliteit aan te vullen om complexe taken uit te voeren. Dit kan worden bereikt door het ontwikkelen van modulaire rekenmodellen, die specifieke taken uitvoeren en die kunnen worden geïntegreerd in digitale tweelingen. Bij een modulaire architectuur voor digitale tweelingen worden rekenmodellen ontwikkeld als losse componenten, die eenvoudig kunnen worden gecombineerd (European Commission, 2023). In een digitale tweeling, die is opgezet als een modulair platform wordt het mogelijk individuele rekenmodellen en componenten te hergebruiken in verschillende workflows en toepassingen. Rekenmodellen worden daarbij gedeeld via repositories met documentatie, zodat gebruikers eenvoudig bestaande modellen kunnen integreren in hun eigen toepassingen en workflows. Om digitale tweelingen gemakkelijker in te kunnen zetten, werkt het Ministerie van VRO met het programma Digitale Tweeling stapsgewijs aan een landelijk netwerk van lokale digitale tweelingen[11]. Zo'n stelsel moet de interoperabiliteit vergroten. Een architectuurgroep is nu aan de slag met het ontwikkelen van een referentie architectuur[12]. De referentie architectuur omvat een reeks herbruikbare bouwblokken voor digitale tweelingen.

Intertwin Digital Twin Engine en Floodadapt

FloodAdapt is een door Deltares ontwikkelde digitale tweeling die gericht is op het bevorderen en versnellen van adaptatieplanning met betrekking tot overstromingen. Het systeem integreert overstromingsmodellen en gedetailleerde impactmodellen met een gebruiksvriendelijke interface, waardoor ook niet-experts diverse scenario's, toekomstige omstandigheden en adaptatieopties binnen enkele minuten kunnen doorrekenen en evalueren. FloodAdapt slaat daarmee een brug tussen wetenschappelijke ontwikkeling en de praktische toepassing van klimaatadaptatie bij overstromingen waar ook ter wereld. FloodAdapt maakt gebruik van de benodigde thematische en kernmodules van de interTwin Digital Twin Engine (DTE) die is ontwikkeld om het digitale-tweelingbouwers mogelijk te maken om FloodAdapt eenvoudig in te zetten in elke gewenste geografische regio. Met interTwin kunnen ontwikkelaars digitale tweelingen voor complexe overstromingsmodellering bouwen op een gefedereerde computer- en data-infrastructuur. Gebruikers kunnen vervolgens de output van de digitale tweeling effectief gebruiken om weloverwogen beslissingen te nemen, hetzij door vooraf gebouwde visualisaties en data-analyses te verkennen via een online dashboard, hetzij door het ontwikkelen van aangepaste analyses.

InterTwin is een door de Europese Unie gefinancierd initiatief, dat zich richt op het ontwerpen en prototypen van een interdisciplinaire Digital Twin Engine. Dit initiatief biedt een gemeenschappelijke aanpak voor de implementatie van digitale tweelingen die toepasbaar is binnen diverse wetenschappelijke disciplines, zoals de fysica of het milieu. Dit open source platform biedt generieke en op maat gemaakte softwarecomponenten voor modellering en simulatie, waarmee specifieke digitale tweelingen kunnen worden samengesteld. De specificaties en implementatie van de DTE zijn gebaseerd op een gezamenlijk ontworpen conceptueel model, de DTE Blueprint Architecture, die wordt geleid door de principes van open standaarden en interoperabiliteit.

Om tot een werkende oplossingsarchitectuur te komen, wordt gewerkt vanuit kernwaarden die op hoofdlijnen aangeven hoe interoperabiliteit en afstemming worden nagestreefd. Het zijn algemene regels voor de architectuur, waarbij niet alleen technologische maar ook organisatorische en sociale

[11] https://zichtopnl.nl/digitaletweeling/

[12] https://geonovum.github.io/NLDT-Architectuur/

regels worden opgesteld. Voor de praktische organisatie van de architectuur zijn verschillende functieblokken benoemd, die worden uitgewerkt in vijf werkgroepen: data & sensoren, rekenmodellen, visualisatie en fundament (catalogus, IAM). In plaats van een hamburgermodel voor de architectuur dat bestaat uit verschillende horizontale lagen wordt gewerkt met een driehoeksmodel (naar Lohman *et al.*, 2023). Dit model kent een los verband tussen de functieblokken voor data en datadiensten, rekenmodellen (dataprocessing met intelligentie), visualisatie en User eXperience (UX) en het fundament met daarin management en aspecten van toegangscontrole en vertrouwen.

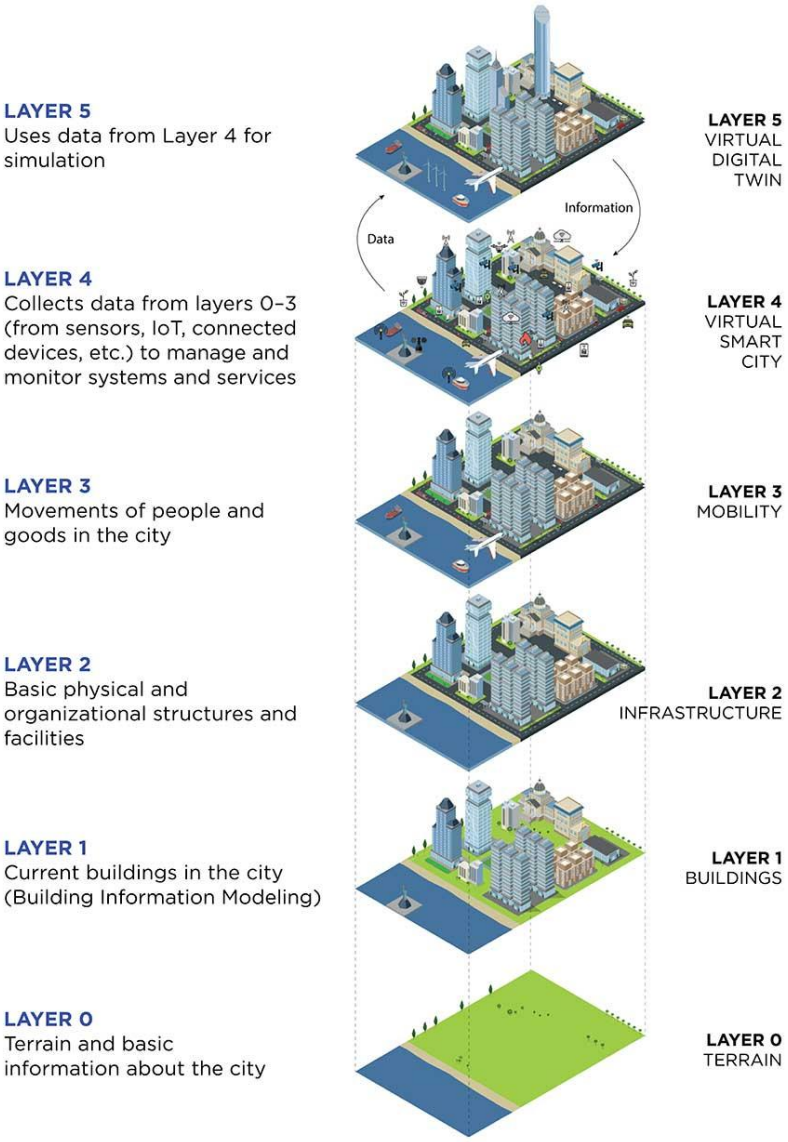
2.3 Stadia van compleetheid

Digitale tweelingen zijn ondertussen wijdverspreid in Nederland (zie bijvoorbeeld Van Apeldoorn et al., 2023). Een eerste blik op de veelheid aan toepassingen geeft echter ook aan dat dit begrip voor verschillende gebruikers een heel andere betekenis kan hebben. Op die verscheidenheid gaan we in het volgende hoofdstuk uitgebreid in. Ter introductie daarop is het belangrijk om stil te staan bij de verschillende lagen waaruit een digitale tweeling kan worden opgebouwd om de fysieke leefomgeving te beschrijven.

In de literatuur over digitale tweelingen voor smart cities wordt onderscheid gemaakt in zes lagen waaruit een complete digitale kopie van een stad kan bestaan (White *et al.*, 2021, zie Figuur 9). De basislaag beschrijft de fysieke ondergrond waarop de stad staat, denk bijvoorbeeld aan bodem-typen, hoogteligging en waterlopen. Deze kan prima in een tweedimensionale kaart worden weergegeven. Op deze basislaag (laag 0) worden achtereenvolgens gebouwen (laag 1) en infrastructuur (laag 2) geplaatst. Met deze toevoeging kan al een compleet, statisch beeld van de stad gegeven worden, zeker als voor een realistische driedimensionale weergave wordt gekozen. Door vervolgens ook real-time gegevens over mensen, voertuigen of goederen (laag 3) en andere data over bijvoorbeeld luchtkwaliteit (laag 4) toe te voegen ontstaat een dynamisch beeld waarmee gemonitord kan worden hoe een stad functioneert. In een laatste laag (5) kan simulatie worden toegevoegd om mogelijke veranderingen in het systeem te laten zien, bijvoorbeeld om de gevolgen van een stadsuitbreiding of aanpassingen in de infrastructuur te tonen.

Publiek toegankelijke digitale tweelingen van de stedelijke omgeving die bijvoorbeeld via webinterfaces toegankelijk zijn, bestaan vaak uit de lagen 0 tot 2. Al zijn er ook fraaie voorbeelden in ontwikkeling waarin de lagen 3 en 4 zijn toegevoegd[13]. Rekenmodellen spelen vooral een rol in de laatste laag van dit smart city voorbeeld en deze zijn beschikbaar in tools zoals beschreven in secties 2.1.2 en 2.1.3. De voorliggende studie richt zich op de toepassing van rekenmodellen in digitale tweelingen en kijkt niet zo zeer naar de toepassingen die vooral bestaande datalagen ontsluiten. Uiteraard kennen digitale tweelingen in andere toepassingsdomeinen (landelijk gebied, ondergrond) andere elementen dan in dit smart city voorbeeld, maar ook daar kan onderscheid gemaakt worden in toenemende complexiteit als dynamische gegevenslagen of simulatiemodellen worden toegevoegd.

[13] Een voorbeeld is de digitale tweeling van de gemeente Alkmaar: https://dtp-alkmaar.azurewebsites.net/twin



Figuur 9 – De zes lagen van een complete smart city digitale tweeling (White et al., 2021).

De lagen van compleetheid in deze schematische weergave kunnen ook aangeduid worden als niveau voor volwassenheid (Metcalfe et al., 2023) of mate van complexiteit (Van Apeldoorn et al., 2023), maar die benamingen geven ten onrechte het idee dat sprake is van een groeitraject dat in alle gevallen doorlopen moet worden. Dat is natuurlijk niet zo, want zoals bij elk hulpmiddel hangt de keuze voor een passend stuk gereedschap af van de toepassing. Elke vraag vergt immers een eigen instrumentarium, afhankelijk van bijvoorbeeld de ruimtelijke of tijdschaal waarop het vraagstuk speelt, de (effect)relaties die daarbij van belang zijn en de gewenste nauwkeurigheid. Voor ruimtelijke vraagstukken die op een grove ruimtelijke schaal en lange tijdsschaal spelen (bouwen we de gewenste 1 miljoen woningen met het oog op klimaatverandering liever in hoog of laag Nederland?) kies je een ander model dan wanneer je geïnteresseerd bent in lokale effecten op de korte termijn (wat zijn de effecten op de luchtkwaliteit van het afsluiten van een specifieke straat in een stad). Ook de gewenste compleetheid en manier van visualiseren in de digitale tweeling zal afhangen van de vraag die voorligt. Voor strategische ruimtelijke vraagstukken op de lange termijn zijn real-time datalagen (laag 3 en 4) niet heel relevant, terwijl die voor andere toepassingen juist cruciaal zijn.

3. Rekenmodellen

3.1 Rekenmodellen in digitale tweelingen

Het beschrijven van de fysieke leefomgeving in een digitale tweeling begint met het creëren en/of bijeenbrengen van data om een actueel beeld van de werkelijkheid te schetsen. De ruwe data worden daarbij verwerkt tot bruikbare data of informatie om beslissingen te nemen over de fysieke leefomgeving. Om deze beslissingen te ondersteunen worden vaak rekenmodellen gebruikt die een vereenvoudigde weergave van (bepaalde aspecten van) de realiteit geven. Modellen voor de fysieke leefomgeving zijn tegenwoordig meestal computermodellen, die de werkelijkheid samenvatten in wiskundige formules. Vervolgens wordt de rekenkracht van computers gebruikt om met waarnemingen van de werkelijkheid (data) een berekening te maken en uitkomsten uit te rekenen. Vandaar dat we van rekenmodellen spreken. Rekenmodellen, die deel uitmaken van een digitale tweeling voor de fysieke leefomgeving, beschrijven vaak een specifiek aspect van de fysieke leefomgeving. Door verschillende modellen te combineren ontstaat een completer beeld van de werkelijkheid. Een dergelijke combinatie vergt wel dat de afzonderlijke onderdelen op een logische en consistente manier gekoppeld worden die aansluit bij de manier waarop objecten, processen en systemen in de fysieke leefomgeving samenhangen en functioneren. Alleen zo kunnen oorzaak-gevolg relaties op een juiste manier nagebootst worden.

De grote opgaven in de fysieke leefomgeving, zoals de woningbouwopgave, energietransitie, klimaatadaptatie en omvorming van de landbouw zijn complex van aard. Niet alleen als opgave zelf, maar vooral ook vanwege de onderlinge verwevenheid en invloed van opgaven op elkaar. Rekenmodellen kunnen helpen om de complexiteit van de opgave te begrijpen, onderlinge afhankelijkheden te analyseren, potentiële toekomstige ontwikkelingen te schetsen, of de mogelijke gevolgen van voorgestelde ingrepen en beslissingen te bepalen. Ze vereenvoudigen de complexe werkelijkheid en kunnen inzichten bieden die niet direct zichtbaar zijn in afzonderlijke verzamelingen van waarnemingen. Met modellen is het mogelijk om lastige vraagstukken in de fysieke leef-omgeving te simuleren, bijvoorbeeld het nabootsen van ontwikkelingen die in de realiteit niet mogelijk zijn, omdat ze te duur, te complex, of in de tijd niet mogelijk zijn. Modellen helpen om inzichten te krijgen in relaties en verhoudingen, in het doorrekenen van de uitkomsten van alternatieven en scenario's en in de mogelijke gevolgen van te nemen beslissingen.

Omdat rekenmodellen vaak worden gemaakt voor een bepaalde vraag of probleem zijn ze meestal specifiek voor een bepaald toepassingsdomein gemaakt. In de diverse toepassingsdomeinen van de fysieke leefomgeving zijn vele soorten rekenmodellen te vinden, zoals energievraag en -aanbod berekeningen voor de energietransitie, klimaatadaptatie modellen om wateroverlast of hittestress te berekenen, of demografische modellen voor het inschatten van de toekomstige woningbouw-behoefte. Daarvoor worden uiteenlopende soorten modellen ingezet; fysisch-ruimtelijke modellen, gedragsmodellen, economische modellen en beslissingsmodellen. Het gaat om veel verschillende en heel diverse rekenmodellen, die worden gemaakt door of in opdracht van overheden door bedrijven (vaak specialistische ingenieursbureaus) en publieke kennisinstellingen. Nederland is daarmee naast een zeer datarijk land ook een zeer modelrijk land.

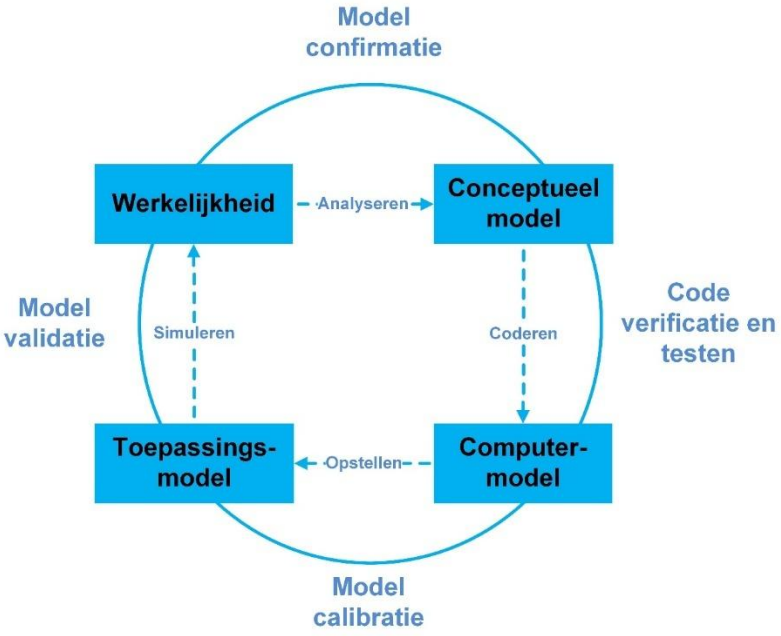
In de volgende paragrafen gaan we in op diverse aspecten van het maken en gebruiken van rekenmodellen in digitale tweelingen voor de fysieke leefomgeving. Deze introductie is bedoeld om de verscheidenheid aan rekenmodellen te begrijpen en de (on)mogelijkheden van het inzetten van dergelijke modellen in digitale tweelingen beter te kunnen duiden. Inzicht hebben in welke typen rekenmodellen bestaan is nodig om te bepalen welke modellen voor problemen en vraagstukken gebruikt kunnen worden. Daarmee draagt dit overzicht hopelijk ook bij aan een breder gebruik van modellen in digitale tweelingen. Allereerst staan we stil bij de verschillende stappen in het opstellen van een model. Daarna gaan we nader in op de verscheidenheid aan soorten modellen en kijken we

naar het doel dat ze kunnen hebben (functie), de manier waarop ze zijn opgesteld en hun deel van de werkelijkheid beschrijven (benadering) en hun toepassingsdomein.

3.2 Modelvorming

Rekenmodellen voor de fysieke leefomgeving worden bijna altijd gevoed met waarnemingen over de werkelijkheid (data). Deze gegevens wordt in een aantal stappen verwerkt tot uitkomsten. Dat proces kan worden beschouwd als een cyclisch proces zoals is weergegeven in Figuur 10. De belangrijkste stappen in het opstellen van een rekenmodel zijn:

1. het analyseren van de werkelijkheid in een conceptueel model;
2. de coderen van het conceptueel model in een computermodel;
3. het opstellen van een toepassingsmodel voor een studiegebied;
4. het simuleren van een uitkomst met het toepassingsmodel.



Figuur 10 - Modelvorming als cyclisch proces (vrij naar Refsgaard & Henriksen, 2004).

Modelvorming start met het beschrijven van (een deel van) de fysieke leefomgeving in een conceptueel model. Dat conceptueel model beschrijft de werkelijkheid in termen van de belangrijkste elementen in het beschouwde onderdeel van de leefomgeving en de relaties tussen die elementen. Die relaties worden opgesteld na een analyse van waargenomen patronen en processen en vervolgens gekwantificeerd in wiskundige vergelijkingen. Dit conceptueel model is gebaseerd op de perceptie van de gebruiker van de belangrijkste processen in het studiegebied (perceptueel model) en de bijbehorende vereenvoudigingen en numerieke weergave daarvan die acceptabel worden geacht om het doel van de modellering te bereiken. Een conceptueel model beschrijft de systeemelementen, processen, structuren, kenmerken, enz. die nodig zijn voor het specifieke doel van de modellering.

Vrij vertaald is een conceptueel model een vereenvoudigde weergave van hoe men aanneemt dat een werkelijk systeem zich gedraagt, gebaseerd op kwalitatieve gegevens uit de werkelijkheid. Een uitwerking van een conceptueel model bevat initiële berekeningen voor de belangrijkste processen. Een conceptueel model komt tot stand via een heldere vraagstelling of doelstelling en een analyse van observaties en gebiedskennis en data uit het veld of databases. De basis van rekenmodellen is daarmee veelal de best beschikbare wetenschappelijke kennis over de werking van de processen in de fysieke leefomgeving.

De tweede stap in het modelleerproces is vervolgens het uitwerken van de hypothesen (relaties) uit het conceptuele model met behulp van modelcode. Dit coderen geeft een geformaliseerde uitwerking van de beschreven relaties, die door een computer gelezen en uitgevoerd kan worden. Een dergelijk computerprogramma is zo generiek dat het, zonder programmawijzigingen, kan worden gebruikt om een rekenmodel op te stellen voor verschillende studiegebieden. Het hanteert dan de dezelfde basisvergelijkingen maar met andere invoerdata en eventueel ook andere parameterwaarden. De complexiteit van modelcode kan variëren van eenvoudige berekeningen op basis van enkele wiskundige vergelijkingen tot een zeer uitgebreide computercode. In een proces van code*verificatie* wordt de modelcode getest op de mate waarin dit een acceptabele weergave is van het conceptuele model en niet direct of het de werkelijkheid ook accuraat nabootst. Uitkomst van deze tweede fase is het *computermodel*.

Het computermodel wordt vervolgens gebruikt voor het opstellen van een locatie-specifiek model voor een bepaald studiegebied, inclusief invoerdata en parameterwaarden. In deze derde fase vindt de *modelcalibratie* plaats: de procedure van aanpassing van parameterwaarden van een model om de respons te reproduceren van een bepaald studiegebied binnen het nauwkeurigheidsbereik dat is gespecificeerd in de prestatiecriteria. Het opzetten van een locatie-specifiek model met behulp van een modelcode vereist onder meer de definitie van rand- en beginvoorwaarden en parameter-beoordeling uit veld- en laboratoriumgegevens. Zo ontstaat het *toepassingsmodel*.

In de vierde en laatste fase van *modelvalidatie* worden de uitkomsten van het toepassingsmodel vergeleken met de oorspronkelijke observaties. Dat is de uiteindelijke onderbouwing, dat het model binnen het toepassingsgebied een bevredigend bereik van nauwkeurigheid en consistentie heeft voor de toepassing van het model. De mate, waarin de weergave acceptabel is, hangt af van vooraf gespecificeerde limieten en overeenkomstige nauwkeurigheidsbereiken. Die eisen kunnen behoorlijk verschillen per toepassingsgebied. Voor een scenario-gebonden, grofschalige inschatting van de woningbouwbehoefte in 2050 gelden andere vereisten dan voor het bepalen van de geluids-belasting op een gevoelig object als gevolg van een geplande nieuwe verkeersweg. De complexiteit van de modelcode en de keuze voor het uiteindelijke model is ook afhankelijk van de eisen die aan de uitkomsten van een model worden gesteld.

Bij de validatie is het belangrijk aandacht te besteden aan gevoeligheids- en onzekerheidsanalyses van de modelvoorspellingen. Als na de validatiestap blijkt dat het model de werkelijkheid niet goed genoeg nabootst, of als de werkelijkheid ondertussen veranderd is, kan de modelleringsketen opnieuw worden doorlopen. Een eerste stap daarin is *modelconfirmatie*: bevestigen of het conceptuele model wel de juiste elementen bevat en de processen en hun onderlinge samenhang op een juiste manier beschrijft. Ook de daaropvolgende stappen van coderen, opstellen en simuleren kunnen opnieuw beschouwd worden om tot een beter resultaat te komen. Deze reflectie op voorgaande stappen maakt het bouwen van modellen een iteratief proces.

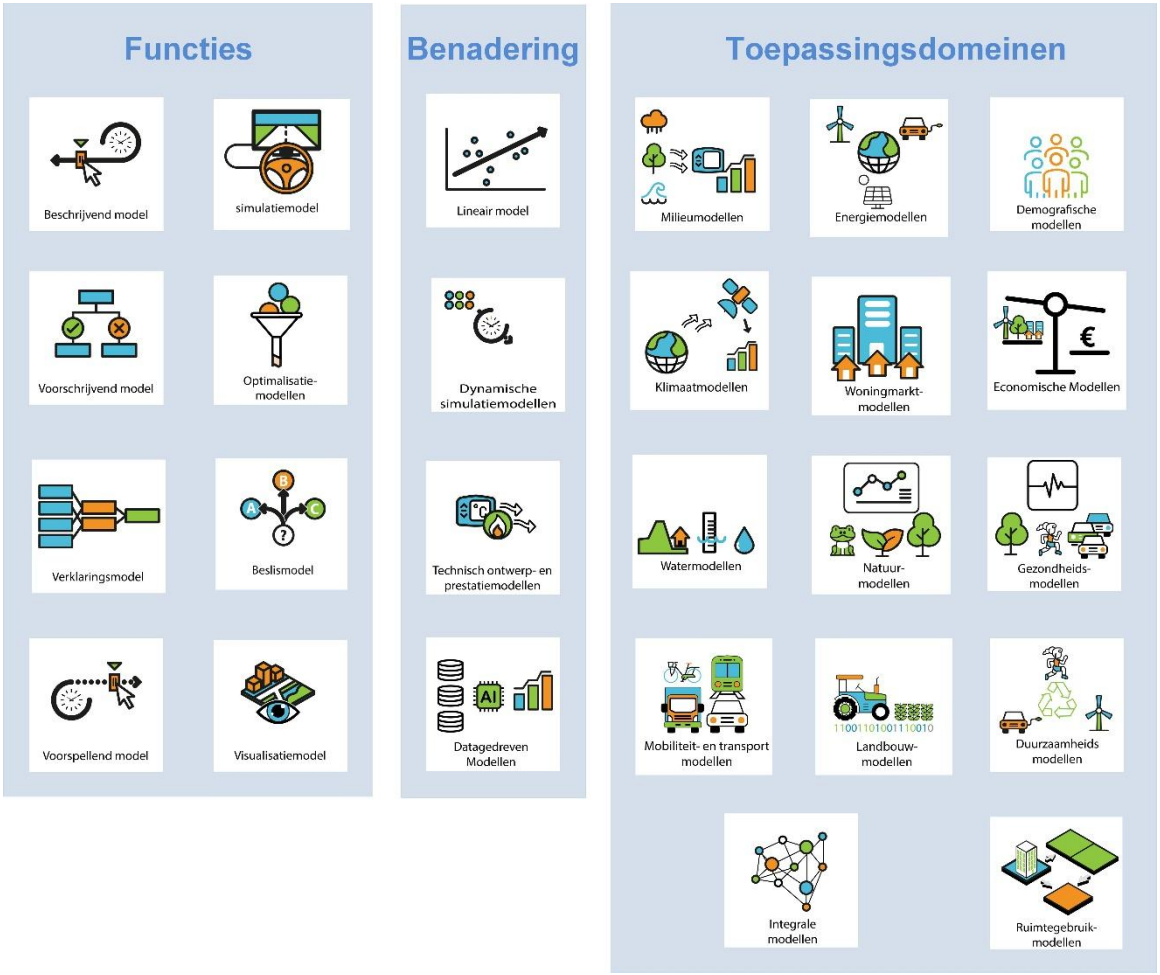
Met het gevalideerde model kunnen uitkomsten worden gegenereerd waarmee bijvoorbeeld beleid kan worden ontwikkeld. In deze toepassingen wordt in samenspraak met de eindgebruikers resultaten gegeneerd die bijvoorbeeld mogelijke ontwikkelingen (trends, scenario's), gewenste eindbeelden (optimalisatie) of effecten van bepaalde ingrepen (what-if toepassingen) verkennen. In de navolgende paragrafen gaan we nader in op de verschillende soorten modellen, hun functies, de gehanteerde benaderingen en veel voorkomende toepassingsdomeinen.

3.3 Soorten rekenmodellen

Rekenmodellen bestaan in vele typen en soorten en het is ondoenlijk om een compleet overzicht te geven van alle rekenmodellen, die zijn ontwikkeld om vraagstukken in de fysieke leefomgeving te beschrijven en te simuleren. Zelfs het opstellen van eenduidige typologie is lastig omdat rekenmodellen op heel veel aspecten van elkaar kunnen verschillen. De verschillen tussen rekenmodellen betreffen niet alleen het toepassingsdomein en doel, maar bijvoorbeeld ook of een rekenmodel statisch of dynamisch is. Statische modellen rekenen in één stap naar het eindresultaat

toe, terwijl dynamische modellen werken met tussenstappen in de tijd. Op basis van deze tussentijdse stappen wordt steeds opnieuw de volgende situatie berekend. Dit soort modellen houdt dus rekening met ontwikkelingen en interacties, die gedurende de simulatie optreden. Daarnaast kan bij het simuleren van een proces met een rekenmodel zowel van een deterministische als een probabilistische aanpak gebruik gemaakt worden. Bij een deterministisch aanpak worden strikte oorzaak-gevolg relaties toegepast, terwijl bij een 'probabilistische' aanpak de kans wordt berekend dat een toestand of actie resulteert. Verder kunnen rekenmodellen ook verschillen in manier waarop ze processen beschrijven, bijvoorbeeld als uitkomst van een onderling gerelateerde lokale gebeurtenissen (bottom-up), of juist als gevolg van bovenaf gestuurde ontwikkelingen (top-down). Maar ook in de manier waarop rekenmodellen gespecifieerd worden (op basis van empirie of theorie) of de manier waarop uitkomsten berekend worden (als continue of discrete waarden) kun je modellen karakteriseren.

De systeemmodelleringswiki van de TU-Delft (2024) gaat dieper in op deze verscheidenheid. In de rest van dit hoofdstuk bespreken we de diversiteit aan modellen aan de hand van enkele aspecten, die een rol spelen bij het maken en gebruiken van rekenmodellen. Daarbij kijken we naar: de functie (doel) van het model, de modelbenadering waarmee de werkelijkheid wordt vereenvoudigd en het toepassingsdomein. Figuur 11 visualiseert dit onderscheid dat in de volgende secties nader wordt toegelicht.



Figuur 11 - Rekenmodellen geclassificeerd naar functie, modelbenadering en toepassingsdomein.

3.4 Rekenmodellen naar functie

Rekenmodellen voor de fysieke leefomgeving worden gemaakt met een specifiek doel voor ogen. Ze hebben daarmee vaak een afgebakende functie in de besluitvorming over vraagstukken in de fysieke leefomgeving. Bijvoorbeeld om de huidige context te beschrijven waarbinnen een beslissing gemaakt moet worden, om mogelijke toekomstige situaties te voorspellen, of om optimale oplossingen te genereren. Op basis van verschillende doelen en functies van rekenmodellen (Edmonds et al., 2019) kunnen we een aantal verschillende modeltypen onderscheiden:

1. Beschrijvende modellen
2. Voorschrijvende modellen
3. Verklaringsmodellen
4. Voorspellingsmodellen
5. Simulatiemodellen
6. Optimalisatiemodellen
7. Beslismodellen
8. Visualisatiemodellen

Uiteraard hebben modellen vaak meer dan één functie. Een beschrijvend model kan bijvoorbeeld ook voor voorspellingen gebruikt worden. De manier waarop een model gebruikt wordt, is daarmee afhankelijk van de vraagstelling en het doel dat je wilt bereiken, maar ook van specifieke eigenschappen van het rekenmodel. Weinig rekenmodellen zullen immers geschikt zijn voor alle onderscheiden functies. Als dat gesuggereerd wordt, is het twijfelachtig of het model voor elke functie ook het best beschikbare model is. Hierna geven we een korte beschrijving van elk van de onderscheiden modelfuncties. We illustreren die functies met voorbeelden van operationele rekenmodellen voor de fysieke leefomgeving.

Een *beschrijvend model* is bedoeld om de toestand of werking van een verschijnsel of gebeurtenis nu of in het verleden weer te geven. Een histogram van windsnelheden op Schiphol, een kaart van actuele vluchtbewegingen boven Nederland[14], of de schematische beschrijving van de ondergrond in Nederland (zie Figuur 12) zijn voorbeelden van beschrijvende modellen. Veel dashboards die nu ontwikkeling zijn bij overheden en waarin actuele informatie over de leefomgeving wordt getoond zijn te beschouwen als een beschrijvend model.

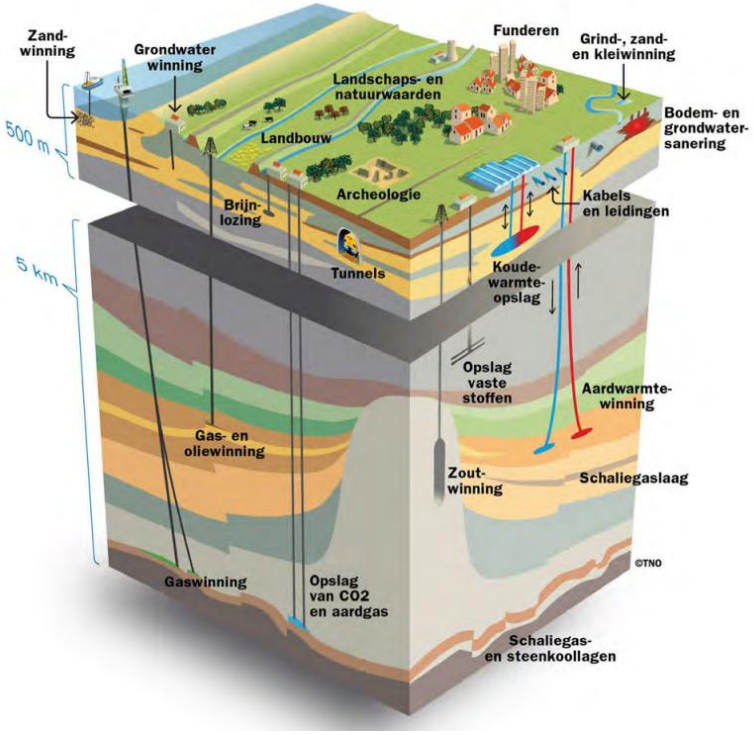
Een *voorschrijvend model* is bedoeld om aan te geven hoe we zouden moeten handelen, bijvoorbeeld vanwege een bepaalde norm of wetgeving, zoals bijvoorbeeld in de omgevingswet, waarin een vergunning wordt aangevraagd op basis van een voorgeschreven beslisboom[15]. Voorschrijvende modellen worden vaak weergegeven in vorm van flowcharts, beslisbomen en beslisregels.

Een *verklaringsmodel* tracht een bepaald verschijnsel of een gebeurtenis te doorgronden aan de hand van de (verklarende) variabelen die hierop van invloed zijn. Het geeft aan in welke mate deze variabelen bijdraagt aan het optreden van de gebeurtenis. Dit kan bijvoorbeeld gaan om het verklaren van keuzegedrag (wat verklaart dat een individu kiest voor een bepaalde vervoerswijze of een of een bedrijf voor een duurzame investering), locaties van ontwikkelingen (nieuwe distributie-centra, verlies aan bos, verkeersongevallen) of hoeveelheden (verkeersstromen, huizenprijzen). Klassieke voorbeelden van dit soort modellen zijn statistische (regressie) of machine learning modellen. Vaak zijn verklarende modellen ook geschikt om gebeurtenissen te voorspellen. De factoren die in het verleden van belang waren om een gebeurtenis te verklaren kunnen immers ook een goede indicatie bieden voor toekomstige gebeurtenissen. Met dergelijke inzichten kunnen

[14] Zie https://bas.flighttracking.casper.aero/

[15] Zie https://iplo.nl/nieuws/2022/digitalisering-kaarten-beperkingengebieden/

empirische modellen opgezet worden die trends uit het verleden extrapoleren. Dat soort modellen is vooral geschikt voor voorspellingen op de korte termijn waar de onzekerheden niet heel groot zijn.



Figuur 12 - Beschrijvend model van de ondergrond (vrij naar IW & EZK, 2018).

Voorspellingsmodellen zijn rekenmodellen die iets proberen te zeggen over de toekomst op basis van data en kennis uit het verleden en het heden. Hiervoor is het noodzakelijk aannames te doen over de toekomst. De simpelste aanname is dat processen uit het verleden onverminderd voortgaan, maar vaker worden aannames toegevoegd over toekomstige veranderingen in de variabelen die het systeem sturen. Dat kan gaan om veronderstelde veranderingen in bevolkingsomvang, broeikasgasconcentraties enzovoort. De uitkomsten van voorspellingsmodellen kennen vaak een grote onzekerheidsmarge, omdat de aangenomen veranderingen in de drijvende variabelen onzeker zijn en het begrip van het bestudeerde systeem vaak onvolledig is. Deze onzekerheden zijn logischerwijs groter als het systeem complexer is en voor een langere periode vooruitgedacht wordt. Een typisch voorbeeld van voorspellingsmodellen zijn de weermodellen van het KNMI (ECMWF[16] voor Europa en HARMONIE[17] voor Nederland), die acht keer per dag weersvoorspellingen genereren. Een ander voorbeeld uit een vergelijkbaar domein betreffen de klimaatmodellen, zoals die worden gebruikt door het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), die de wereldwijde veranderingen in bijvoorbeeld temperatuur en neerslag tot 2100 simuleren. In dergelijke gevallen zijn de onzekerheden natuurlijk vele malen groter en wordt vaak gewerkt met scenario's, die samenhangende aannames beschrijven over de belangrijkste variabelen in het klimaatsysteem.

Een *simulatiemodel* bootst de werkelijkheid na en laat vanuit een gegeven uitgangssituatie zien hoe deze zich in de loop van de tijd ontwikkelt. Dit is feitelijk een specifieke vorm van voorspelling, die

[16] https://www.ecmwf.int/

[17] https://www.knmi.nl/research/weather-climate-models

zich vooral richt op het definiëren van de regels volgens welke verandering plaatsvindt. In hun meest typische vorm zijn dit heel dynamische modellen, die vooral sterk zijn in het reproduceren van processen die sterk veranderlijk zijn in ruimte en tijd. De nadruk ligt minder op een uitgebreide verklaring van hoe een systeem exact werkt maar meer op het zo goed mogelijk nabootsen van het gedrag van die systemen. Dergelijke simulaties kunnen vooral behulpzaam zijn bij het beschrijven en voorspellen van ruimtelijke ontwikkelingen. Een typisch voorbeeld zijn de cellulaire automata, die gebruikt worden in het simuleren van veranderingen in ruimtegebruik[18].

Optimalisatiemodellen maken berekeningen om zo efficiënt mogelijk een specifiek doel te bereiken. Dat doel wordt in numerieke vorm beschreven (doelfunctie) als bijvoorbeeld het optimaliseren van opbrengsten, het minimaliseren van kosten of emissies. Daarnaast worden de randvoorwaarden voor oplossingen benoemd (bijvoorbeeld uitgangssituatie, wettelijke beperkingen) en wordt met behulp van numerieke methoden een optimale oplossing berekend. Afhankelijk van het type probleem dat moeten worden opgelost zijn hier diverse methoden voor beschikbaar zoals lineair programmeren en genetische algoritmen. Een voorbeeld van een optimalisatiemodel is MERIT, dat wordt toegepast voor het maximaliseren van de economische haalbaarheid en robuustheid van investeringen in een nieuwe technologie in de mestketen (van Wagenberg et al., 2019).

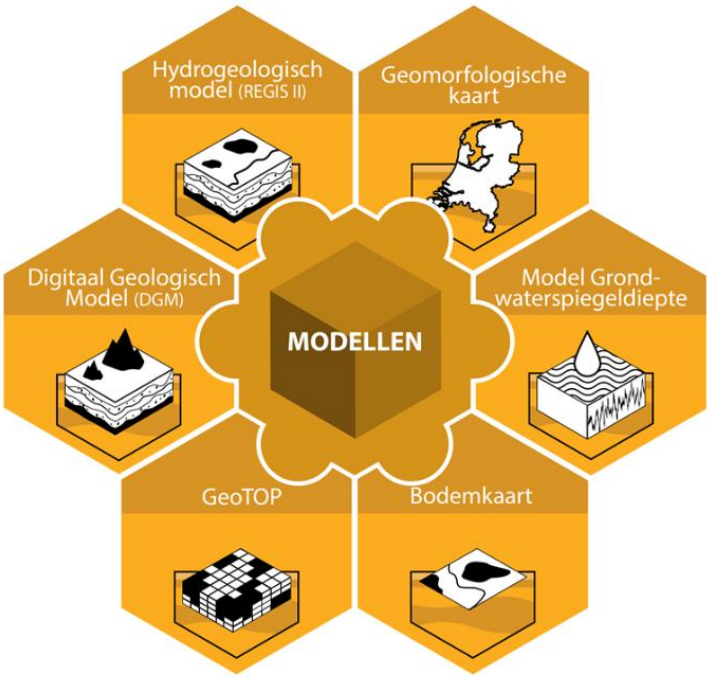
Een *beslismodel* tracht voor een specifieke probleemsituatie een afweging (evaluatie) van voor- en nadelen te geven om een oplossing of voorkeursalternatief te selecteren of soms zelfs een keuze te maken. Modellen die zelf beslissingen nemen zijn schaars, maar bijvoorbeeld de keuze om de Maeslantkering[19] te sluiten gebeurt door een speciaal hiervoor ontwikkeld beslismodel. Vaker zijn deze modellen een hulpmiddel bij het nemen beslissingen en spreken we ook wel van een beslissingsondersteunend systeem, of, in het Engels, een Decision Support System (DSS). Er zijn veel verschillende soorten beslismodellen, zoals score cards (effectentabellen), beslisbomen en beslistabellen en multi-criteria analyse. Multicriteria-analyse (MCA) is een evaluatiemethode om tussen diverse discrete alternatieven een rationele keuze te maken op basis van meerdere criteria. Met MCA kunnen scores op economische, ecologische en sociale criteria bij elkaar worden opgeteld en worden afgewogen. De MCA-methode lijkt op maatschappelijke kosten-batenanalyse (MKBA) die veel gebruikt wordt in de afweging van grote publieke investeringen, maar bij MCA hoeven criteria niet te worden uitgedrukt in monetaire termen (euro's).

Visualisatiemodellen zijn modellen, die de resultaten in een, twee, drie of vier dimensies weergeven. Het zijn vaak specifieke tools om uitkomsten uit andere modellen op een aansprekende manier te tonen. Op basis van hun geografische ligging kunnen onderliggende modelresultaten zo verwerkt worden dat ze in verschillende dimensies getoond worden. Vaak worden dit GIS-modellen genoemd, omdat deze ruimtelijke databewerking in Geografische Informatie Systemen (GIS) wordt voorbereid of uitgevoerd. Met 4D visualisatie wordt beweging in de tijd ingebracht, bijvoorbeeld via bewegende beelden of animaties. Visuele modellen kunnen een sterk communicatiemiddel zijn en veel digitale tweelingen maken gebruik van de mogelijkheid om modelresultaten in 3D te tonen. Maar ook visuele resultaten behoeven steeds uitleg over de achtergrond en aannames van visualisatie. Voorbeelden van visualisatiemodellen zijn de modellen van de ondergrond (Figuur 13), opgenomen in de Basisregistratie Ondergrond (BRO):

1. Geomorfologische modellen voor vormen van het landschap (Geomorfologische Kaart);
2. Bodemkundige modellen voor specifieke bodemeigenschappen (Bodemkaart, GeoTOP);
3. Geologische modellen voor eigenschappen van de diepere ondergrond (Digitaal Geologisch Model);
4. Hydrogeologische modellen voor kenmerken van het grondwatersysteem (REGIS II en Model Grondwaterspiegeldiepte).

[18] Zie bijvoorbeeld https://ruimtemodel.vlaanderen/wat-we-doen/simulatie

[19] https://www.rijkswaterstaat.nl/water/waterbeheer/bescherming-tegen-het-water/waterkeringen/deltawerken/maeslantkering



Figuur 13 - Visualisatiemodellen van de ondergrond.

3.5 Rekenmodellen naar modelbenadering

Een belangrijk aspect dat van invloed is op het rekenmodel en de daarin gekozen vereenvoudiging van de werkelijkheid is de keuze voor de modelbenadering die wordt toegepast bij het rekenmodel. Deze benadering, ook wel het modelleringsparadigma genoemd, wordt gebruikt om de relaties in het systeem van het rekenmodel te beschrijven. Er bestaan veel verschillende modellerings-paradigma's. De mogelijkheden om modelbenaderingen te benoemen zijn groot. We geven een beperkt, niet uitputtend beeld geven van een veel complexer werkelijkheid van modelbenaderingen. Enkele van de meest voorkomende zijn ter illustratie voor de niet-modelleurs hieronder opgesomd en kort beschreven. We hebben daarbij steeds enkele voorbeelden opgenomen van operationele rekenmodellen, die worden gebruikt in de fysieke leefomgeving.

Lineaire modellen zijn gebaseerd op (sets van) van lineaire wiskundige vergelijkingen. Ze zijn gemakkelijk en snel te maken maar kunnen geen dynamische veranderingen weergeven. Belangrijke voorbeelden van het gebruik van lineaire modellen voor de fysieke leefomgeving zijn bijvoorbeeld rekenmodellen voor levenscyclusanalyses[20] (LCA-modellen) voor het berekenen van de milieu-impact die een product of object heeft op de omgeving. Een andere veelgebruikt vorm van lineaire modellen betreft de zogeheten input-outputmodellen, die economen bijvoorbeeld gebruiken om de verbanden tussen productie en een aantal economische kenmerken te bepalen, zoals energiegebruik en milieueffecten.

Dynamische simulatiemodellen beschrijven hoe een systeem met zijn componenten zich in de loop van de tijd gedraagt. Het beschrijft hoe een systeem functioneert en een bepaalde eindtoestand bereikt. In hun simpelste versie werken simulatiemodellen op basis van een startsituatie met daaraan toegevoegd een hoeveelheid verandering per tijdsstap (zoals in zogeheten rule-based simulation models, die bijvoorbeeld de hoeveelheid erosie berekenen, zie: Koomen & Stillwell, 2007). Deze modellen zijn dan ook gevoelig voor de beginvoorwaarden en beschreven systeemstructuur. Meer complexe voorbeelden hiervan zijn te vinden in de systeemdynamica en de

[20] https://www.rivm.nl/en/life-cycle-assessment-lca

op actoren gebaseerde modellen. Een voorbeeld van een actor-gebaseerd systeem is Urban Tools Next van TNO waarin de geëxperimenteerd is met het doorrekenen van scenario's voor bijvoorbeeld bestemmings- en vervoerswijzekeuzen en parkeergedrag van gefingeerde individuen in de regio Rotterdam (Snelder et al., 2021).

Technisch ontwerp- en prestatiemodellen worden gebruikt voor berekeningen en voorspellingen van technische systemen. Voorbeelden hiervan zijn het ontwerpen van gebouwen, infrastructuur en kunstwerken en de technische systemen voor bijvoorbeeld energiebeheer en bediening van elektronische meet- en regelsystemen in gebouwen, infrastructuur en kunstwerken. Een voorbeeld is het integraal model voor de kassenbouw van TNO (SIOM[21]).

Data-gedreven modellen zijn vooral gericht op het verwerken van grote datasets ('big' data). Deze modellen zijn behulpzaam in het genereren van actuele en accurate informatie en kunnen ook zeer nauwkeurige voorspellingen doen. Ze zijn volledig en kritisch afhankelijk van de datasets waarop ze zijn getraind en de manier waarop resultaten tot stand komen kan tamelijk ondoorgrondelijk zijn. Een dergelijk black box kan voorkomen worden door goede documentatie, maar het begrijpen daarvan vergt vaak wel enige expert-kennis van de gebruiker. Afhankelijk van de manier waarop de data in dergelijke modellen verwerkt wordt, spreekt men ook wel over kunstmatige of artificiële intelligentie (AI) modellen. Voor de fysieke leefomgeving worden deze data-gedreven AI-modellen o.a. ingezet voor automatische beeldherkenning ten behoeve van objectdetectie en mutatiesignalering op basis van luchtfoto's of satellietbeelden van objecten in de fysieke leefomgeving, bijvoorbeeld gebouwen, bomen, wegen en zonnepanelen.

Welke modelbenadering gekozen wordt voor het opzetten van rekenmodel is allereerst de keus van de modelleur. Wat het best past bij een specifieke probleemstelling hangt af van de gedefinieerde criteria, de beschikbare data en de aanwezige kennis van de te modelleren objecten of processen. Geen van deze benaderingen is op zichzelf goed of slecht en de keuze is veelal een afweging tussen verschillende kostenprestatie-opties. De benaderingen zijn hulpmiddelen die op een juiste of onjuiste manier kunnen worden gebruikt, en het resulterende model kan geschikt of ongeschikt zijn voor het probleem dat zich voordoet. De modelleur moet duidelijk kunnen uitleggen waarom voor een bepaalde benadering wordt gekozen en hoe geschikt deze is voor het modelleringsprobleem.

3.6 Rekenmodellen naar toepassingsdomein

Rekenmodellen zijn vaak gemaakt voor het oplossen van een bepaald vraagstuk en daarmee toegesneden op een specifiek toepassingsdomein. Rekenmodellen weerspiegelen zo de actuele kennis over het functioneren van (aspecten van) dat toepassingsgebied. Typische toepassings-domeinen van dergelijke sectorale modellen in de fysieke leefomgeving zijn milieu en klimaat (water, bodem, en lucht), landbouw, natuur en biodiversiteit, de gebouwde omgeving (bouwwerken en woningmarkt), infrastructuur (mobiliteit- en transportnetwerken over de weg, water, rail en lucht) en watersystemen.

Daarnaast zijn er ook meer generieke modellen, zoals bevolkingsmodellen, economische rekenmodellen, gezondheidsmodellen, ruimtegebruiksmodellen en integrale modellen die de afzonderlijke domeinen in onderlinge samenhang trachten te beschouwen. Hierin worden systemen dus als een completer geheel benaderd. Hieronder bespreken we verschillende toepassing-specifieke rekenmodellen en geven we enkele voorbeelden van beschikbare implementaties. Dit overzicht is zeker niet volledig en ook niet bedoeld om heel scherpe indeling te maken (sommige modellen kennen immers meerdere toepassingsdomeinen), maar het beoogt een idee te geven van de verschillende soorten modellen die beschikbaar en mogelijk binnen digitale tweelingen gebruikt kunnen worden.

[21] https://www.tno.nl/nl/duurzaam/energie-gebouwde-omgeving/glastuinbouw/systeemintegratie/

Voor een gezond milieu worden rekenmodellen gemaakt en sensoren ingezet, die de kwaliteit van de fysieke leefomgeving in kaart brengen. Dit zijn *milieumodellen*. Denk aan sensoren die soms real-time specifieke stoffen meten in lucht, water, grondwater, bodem en vaste stof. Voorbeelden betreffen onder meer fijnstof door het verkeer, pesticidengebruik en stikstofuitstoot door landbouw en nanodeeltjes en microplastics door materialengebruik in het buitenmilieu. Door de toepassing van nieuwe materialen, elektronica en isolatie belanden ook steeds meer stoffen in huizen en kantoren. Zowel voor het binnen- als het binnenmilieu worden de rekenmodellen gebruikt om de sensordata te analyseren en om voorspellingen te doen. Zo helpen rekenmodellen om sneller en preciezer te kunnen reageren op mogelijke verontreinigingen, calamiteiten en gezondheidsrisico's voor mensen, dieren en planten in de fysieke leefomgeving. Voorbeelden van milieumodellen zijn AERIUS[22] voor stikstofdepositie, het model OPS[23] (operationele prioritaire stoffen) voor luchtkwaliteit, CNOSSOS-EU[24] voor geluid en SAFETI-NL[25] voor het bereken van risico's van inrichtingen met gevaarlijke stoffen (externe veiligheid). Ook LCA-modellen[26] zijn rekenmethoden voor het in kaart brengen van de invloed van producten en menselijke activiteiten op het milieu. Dergelijke modellen bekijken de hele levenscyclus van een product of activiteit; van winning van grondstoffen via productie en (her)gebruik tot en met afvalverwerking.

Bij *klimaatmodellen* gaat het om modellen die de toestand van het klimaat beschrijven en waarmee bijvoorbeeld de navolging van de afspraken van Parijs gemonitord kan worden. Ze zijn ook relevant voor het analyseren van de effecten van klimaatverandering en het evalueren van mogelijke oplossingen. Net als bij milieumodellen wordt bij klimaatmodellen gewerkt met observaties en staan metingen van, in dit geval, broeikasgasemissies naar de atmosfeer aan de basis van de simulaties. Dergelijke metingen zijn vaak afkomstig van satellieten. Voor de simulaties van toekomstige veranderingen in het klimaat wordt gewerkt met scenario-gebonden aannamen over veranderingen in broeikasgasemissies. Wereldwijde, geïntegreerde beoordelingsmodellen ('Global Integrated Assessment Models') zoals IMAGE[27] van het PBL leveren belangrijke input voor dergelijke studies en vertalen aannamen over sociaaleconomische en technologische veranderingen in ruimtegebruikspatronen en deels daarmee samenhangende broeikasgasemissies (Doelman et al., 2018). De uitkomsten van internationale klimaatmodellen van het IPCC worden door het KNMI in Nederland vertaald naar mogelijke Nederlandse klimaatscenario's[28].

Klimaatadaptatie gaat over het aanpassen van de fysieke leefomgeving aan de gevolgen van de wereldwijde klimaatverandering. Voor Nederland als deltaland is dat erg belangrijk. In het rekenmodellen van Nederlandse klimaatadaptiestrategie zijn vier aspecten van belang: het wordt warmer, het wordt natter, het wordt droger en de zeespiegel stijgt. Dat leidt tot:

1. Overstromingen door de grote rivieren en de Noordzee;
2. Wateroverlast als gevolg van steeds meer korte, hevige regenbuien;
3. Droogte;
4. Hittestress in met name steden.

Watermodellen kunnen worden ingezet om enkele van deze effecten te bepalen. Daarmee dragen zij bij aan goed geïnformeerd waterbeheer dat zorgt voor droge voeten en voldoende schoon water. Nederland heeft een lange traditie in het maken en gebruiken van watermodellen en er is dan ook een breed scala aan watermodellen beschikbaar voor zoet- en zoutwatermodellen, hoogwater-

[22] https://www.aerius.nl/

[23] https://www.rivm.nl/operationele-prioritaire-stoffen-model

[24] https://www.infomil.nl/onderwerpen/geluid/uitvoering-kartering/index/handreiking-modelleren/

[25] https://www.rivm.nl/safeti-nl

[26] https://www.rivm.nl/en/life-cycle-assessment-lca/what-is-lca

[27] https://www.pbl.nl/en/image/

[28] https://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/achtergrond/knmi-23-klimaatscenario-s

modellen, waterkwaliteitsmodellen. Zo is het Nationaal Water Model[29] (NWM) een verzameling van bestaande, aan elkaar gekoppelde watermodellen. Deze bieden inzicht in de gevolgen van klimaatverandering en socio-economische ontwikkelingen voor onze waterhuishouding, zowel voor waterkwantiteit en -kwaliteit. Een meer specifieke model omgeving, dat geschikt is voor interactieve, beleidsgerelateerde toepassingen is de D-HYDRO Suite van Deltares[30]. Deze maakt simulaties mogelijk van overstromingen, stormvloeden, orkanen, golven, wateroverlast door hevige neerslag, sediment transport en morfologie, waterkwaliteit en ecologie. Watermodellen voor simulatie van wateroverlast als gevolg van hevige regenval en overstromingen maken deel uit van klimaatadaptie, evenals modellen voor het uitvoeren van berekeningen voor hittestress en droogte. Daarbij zijn uitkomsten van de rekenmodellen voor klimaatadaptatie voor heel Nederland ook beschikbaar gemaakt in de Klimaateffectatlas[31]. Gemeenten kunnen met deze gegevens klimaat-stresstesten uitvoeren. Uiteraard verandert de ruimtelijke context waarin klimaatverandering optreedt ook en ruimtegebruiksmodellen worden ingezet om die veranderende omstandigheden voor het hele land in beeld te brengen, zoals recent gedaan is voor de Deltascenario's (Claassens et al., 2023). De ruimtegebruikspatronen uit deze modelsimulaties vormen de input voor hydrologische effectbepalingen.

Mobiliteits- en transportmodellen – ook wel verkeersmodellen genoemd - helpen om de steeds groeiende behoefte aan verplaatsingen van mensen en goederen in goede banen te leiden. Mobiliteit en verplaatsingen zijn van grote invloed op de toegankelijkheid, leefbaarheid en duurzaamheid van de fysieke leefomgeving. Met rekenmodellen wordt inzicht verkregen in de toekomstige vervoerstromen en verplaatsingen en de verdeling daarvan over de verschillende vervoerstypen (modaliteiten), zoals per fiets, auto of per open vervoer. De modellen kennen veel toepassingsmogelijkheden, zoals bijvoorbeeld inzicht verkrijgen in de voor- en nadelen van nieuwe infrastructuur of uitbreiding van bestaande infrastructuur. Daarvoor wordt berekend hoeveel voertuigen over welke wegen rijden en wat de effecten zijn van mobiliteitsalternatieven, voor onder andere de verkeersintensiteit, reistijden, geluidshinder, verontreiniging van de lucht en de natuur. Deze voorspellingen dienen weer als input voor kosten-batenanalyses en milieueffectrapportages.

In Nederland worden verschillende verkeers- en vervoermodellen gebruikt. Voorbeelden van landelijke modellen zijn het Landelijk Model Systeem[32] (LMS) en het Nederlands Regionaal Model[33] (NRM). Er zijn vier regionale modellen van het NRM in gebruik voor meer gedetailleerde toepassingen per landsdeel (NRM-Noord, -Oost, -Zuid en -West. Met deze modellen kunnen langetermijnprognoses worden gemaakt en de effecten van beleid onderzocht worden. Bijvoorbeeld het effect van een rijstrook erbij; wat betekent dat dan voor een file? Lost de file dan op of juist niet? Komt er extra verkeer bij door de verbreding en wat betekent dat voor de luchtkwaliteit of de hoeveelheid geluid? Provincies en gemeenten gebruiken meestal regionale of lokale modellen om preciezer verkeersprognoses te maken voor hun gebied, zoals VENOM[34] en V-MRDH[35]. Daarnaast zijn er adviesbureaus actief, die verkeersstudies ondersteunen met eigen modellen zoals OmniTRANS[36] en Urban Strategy[37].

---

[29] https://iplo.nl/thema/water/applicaties-modellen/watermanagementmodellen/

[30] https://www.deltares.nl/software-en-data/producten

[31] https://klimaatadaptatienederland.nl/hulpmiddelen/overzicht/klimaateffectatlas/

[32] https://www.rijkswaterstaat.nl/wegen/wegbeheer/aanleg-wegen/nederlands-regionaal-model-nrm-en-landelijk-model-systeem-lms

[33] https://www.rijkswaterstaat.nl/wegen/wegbeheer/aanleg-wegen/nederlands-regionaal-model-nrm-en-landelijk-model-systeem-lms

[34] https://vervoerregio.nl/venom

[35] https://mrdh.nl/project/verkeersmodel

[36] https://www.goudappel.nl/nl/expertises/data-en-it-oplossingen/verkeersmodelleringssoftware-omnitrans-expert

[37] https://www.scenexus.com/urban-strategy/

Energiemodellen helpen om de keuzes te verkennen, te onderbouwen en te verantwoorden aangaande energiegebruik en de energietransitie. Op welke duurzame oplossingen zet je in binnen je gemeente, regio of provincie? Wil je CO2-emissies reduceren? Energieneutraal worden? Welke opties je hebt om je doelen te gaan halen? Voor het beantwoorden van dergelijke vragen en het opstellen van regionale energiestrategieën, energietransitievisies, warmte- en systeemstudies worden diverse rekenmodellen ingezet. Hiermee kunnen de bijdragen en effecten van oplossingen zoals het elektrificeren van mobiliteit, een duurzaam warmtenet of een zonnepark verkend worden. Ook kun je inzoomen op de gebouwde omgeving: wat is nu een kostenefficiënte oplossing voor een bepaalde buurt of wijk? En dan komt het nadenken over de implementatie, zoals wat een slim ontwerp is van een warmtenet. Bij elke stap hoort een ander energiemodel. Een voorbeeld is het Energietransitiemodel[38], dat gemeenten, provincies en netbeheerdersmet helpt met het beantwoorden van vragen als: wat gebeurt er met het energiesysteem als je voor een bepaalde duurzame energieoplossing kiest? Hoe sluiten vraag en aanbod op elkaar aan?

Demografische en meer specifieke w*oningmarktmodellen* richten zich op het maken van prognoses over groei en samenstelling van de bevolking en daarmee samenhangend de woningvoorraad, woonbehoefte en woningtekort. Een voorbeeld van een landelijk model dat prognoses op gemeente- en buurtniveau maakt voor bevolking, huishoudens en woningvoorraad is Primos[39]. Daarnaast doet het model uitspraken over het geschatte woningtekort. PEARL[40] is een ander demografisch prognosemodel met een woningbouwmodule, in gebruik bij het PBL. De overheid gebruikt prognoses uit dit soort modellen bijvoorbeeld om te bepalen hoeveel huizen er gebouwd moeten worden en op welke locaties. Maar ook voor de planning van publieke voorzieningen zoals (basis)scholen of de levering van energie is het noodzakelijk een goede indicatie te hebben van de ruimtelijke spreiding van verschillende demografische groepen.

Onder *natuurmodellen* vallen rekenmodellen voor ecologie, natuur, landschap en biodiversiteit. De natuurmodellen gaan bijvoorbeeld over de geschiktheid van leefgebieden voor specifieke planten en diersoorten, of de ontwikkeling van bosgebieden onder verschillende beheersomstandigheden. Zulke modellen zijn vaak ook bruikbaar om de effecten van klimaatverandering te bepalen. Een voorbeeld van een ecologisch model is de MetaNatuurPlanner[41] van het PBL, dat de gevoeligheid van plant- en diersoorten voor veranderingen in omvang en kwaliteit van een leefgebied door type beheer, milieu- en watercondities in beeld brengt. Het Natuur Technisch Model[42] is ontwikkeld om te helpen beoordelen of ecologisch herstel bijdraagt aan verbeterde omstandigheden voor vegetatie. DIMO[43] is een plantendispersiemodel om de mogelijkheden voor verspreiding en migratie van planten te onderzoeken.

Landbouwmodellen richten zich voornamelijk op de productieverbetering van de landbouw-activiteiten zoals veehouderij, glastuinbouw, open en bedekte teelt. Maar deze modellen kunnen ook inzicht geven in de bijkomende effecten van landbouwproductie op de fysieke leefomgeving, in het bijzonder de landbouwuitstoot en -emissies. Voor productieverbetering zijn rekenmodellen beschikbaar zoals bijvoorbeeld SWAP[44], dat het transport van stroom- en transportprocessen van water, opgeloste stoffen en warmte in onverzadigde/verzadigde bodems simuleert op veldniveau tijdens groeiseizoenen en voor lange periodes. NUFER[45] kwantificeert stikstof- en fosforstromen in voedselketens en berekent de efficiëntie van nutriëntengebruik. Met name voor de veehouderijen is

[38] https://energytransitionmodel.com

[39] https://primos.datawonen.nl/jive

[40] https://www.pbl.nl/modellen/pearl-projecting-population-events-at-regional-level

[41] https://www.pbl.nl/modellen/meta-natuurplanner-model-for-nature-policy-mnp

[42] https://www.wur.nl/nl/show/natuur-technisch-model-ntm.htm

[43] https://www.wur.nl/nl/show/plantendispersiemodel-dimo.htm

[44] https://swap.wur.nl/

[45] https://www.wur.nl/en/research-results/chair-groups/environmental-sciences/earth-systems-and-global-change-group/research/water-quality/nufer.htm

er uitgebreide wetgeving vanwege de emissies van ammoniak, geur en fijnstof, zoals OPS[46] voor stikstofuitstoot, V-Stacks[47] voor geur en ISL3a[48] voor fijnstof. Daarnaast zijn ook rekenmodellen beschikbaar voor het gebruik van pesticiden[49] in de landbouw.

Economische modellen zijn rekenmodellen, die gericht zijn op het berekenen van economische kenmerken van de fysieke leefomgeving. Dat kunnen macro-economische aspecten zijn over de samenleving als geheel, zoals belastingen, sociale zekerheid en arbeidsmarkt, overheidsfinanciën en koopkracht en arbeidskosten. Meer specifiek voor de fysieke leefomgeving worden economische rekenmodellen ingezet voor (maatschappelijke) kosten-baten analyses, faalkostenanalyse en vraag-aanbod analyses voor onder meer de energiesector.

Gezondheidsmodellen beschrijven de factoren in de fysieke leefomgeving, die bijdragen aan de leefbaarheid en gezondheid. Om de gezondheid van mensen te verbeteren is een omgeving die gezond gedrag mogelijk maakt een belangrijke voorwaarde naast aandacht voor gedrag en leefstijl. Het gaat om verschillende niveaus in de fysieke leefomgeving die van invloed zijn: van het micro- (dichtbij het individu), meso- (gemeenschap, bijvoorbeeld school, buurt of gemeente) tot macroniveau (de maatschappij). Bijvoorbeeld vanuit een landelijke beweegcampagne, besluit een gemeente een sportveldje aan te leggen, waardoor mensen meer gaan bewegen.

Duurzaamheidsmodellen worden gebruikt als meetsysteem voor duurzame ontwikkeling. Ze maken het begrip duurzaamheid meetbaar. In deze modellen worden de gevolgen van de economische groei berekend voor de brede welvaart voor nu, maar ook voor later en elders in de wereld. Dit wordt ook wel het model voor Brede Welvaart genoemd, zoals men duurzaamheid steeds vaker noemt. Het bekendste voorbeeld van een duurzaamheidsmodel is de Monitor Brede Welvaart[50]. Dit duurzaamheidsmodel geeft een beeld van de duurzaamheid van de Nederlandse samenleving. De monitor laat zien op welke terreinen het vanuit duurzaamheid goed gaat en waar zorgen over zijn. De monitor presenteert een verzameling factoren (zogenaamde indicatoren), die de duurzame ontwikkeling goed beschrijft.

Ruimtegebruiksmodellen zijn voorbeelden van integrale modellen die onder meer worden toegepast om toekomstige sectorale ruimteclaims te kunnen vertalen naar een geïntegreerd ruimtelijk toekomstbeeld. Hierbij wordt vaak gebruik gemaakt van verschillende (sociaaleconomische) toekomstscenario's om zodoende de bandbreedte van mogelijke ruimtelijke toekomstbeelden te verkennen. Modellen zoals Ruimtescanner[51] worden ingezet om de verhaallijnen van die scenario's te vertalen naar ruimtegebruikspatronen (Koomen et al., 2024). Het model integreert uitkomsten van uiteenlopende sectorale modellen (zoals regionale prognoses voor uitbreiding van de woningvoorraad of aantallen arbeidsplaatsen, uit bijvoorbeeld het model Tigris XL[52]) tot gedetailleerde kaarten met toekomstig ruimtegebruik. Een recent voorbeeld van zo'n scenariostudie betreft de ruimtelijke verkenning van de inrichting van Nederland in 2050 van het Planbureau voor de Leefomgeving (Hamers et al., 2023). Het model is ook in staat om meer trendmatige ontwikkelingen te verbeelden (Kuiper et al., 2023) of de kosten en baten te verkennen van aanpassingen in het waterbeheer en de gevolgen die dat mogelijk heeft voor agrarisch landgebruik (Van den Born et al., 2016). Overigens kunnen dergelijke verkennende scenariostudies ook op een meer ontwerpende manier opgesteld worden zoals in de scenario's voor Nederlandse landbouw in 2050 van de Wageningen Universiteit (Lesschen et al., 2020).

---

[46] https://www.rivm.nl/operationele-prioritaire-stoffen-model

[47] https://www.infomil.nl/onderwerpen/landbouw/geur/model-v-stacks/

[48] https://www.infomil.nl/onderwerpen/lucht-water/luchtkwaliteit/slag/isl3a/

[49] https://www.wur.nl/nl/onderzoek-resultaten/onderzoeksinstituten/environmental-research/faciliteiten-tools/software-en-modellen.htm

[50] Zie https://www.youtube.com/watch?v=fZSq1UhnEC4

[51] https://spinlab.vu.nl/research/spatial-analysis-modelling/land-use-scanner-model/

[52] https://www.pbl.nl/publicaties/naar-een-nieuw-tigris-xl

Ruimtescanner

Het rekenmodel RuimteScanner is ontwikkeld door het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL) om toekomstige ruimteclaims te vertalen naar geïntegreerde ruimtelijke toekomstbeelden van Nederland. Het model maakt gebruik van diverse sociaaleconomische toekomstscenario's om mogelijke ruimtelijke ontwikkelingen te verkennen en bepaalt de ruimtebehoefte van verschillende sectoren per regio.

Het model komt voort uit de samenwerking van een aantal instituten. Ruimtescanner is ontwikkeld met het open source software framework GeoDMS voor (ruimtelijke) modellering van het bedrijf ObjectVision. Het model is de afgelopen decennia veel gebruikt voor uiteenlopende ruimtelijke planningsprojecten in Nederland, voornamelijk door het PBL en haar voorgangers. De Vrije Universiteit Amsterdam (VU) doet wetenschappelijk onderzoek ten behoeve van de methodologische ontwikkeling en kalibratie van het model, waarbij zij nauw samenwerkt met het PBL en ObjectVision. De samenwerking tussen deze partijen zorgt voor een integratie van academische expertise, beleidsanalyse en technische ondersteuning, wat resulteert in een krachtig rekeninstrument voor ruimtelijke planning en beleidsvorming in Nederland.

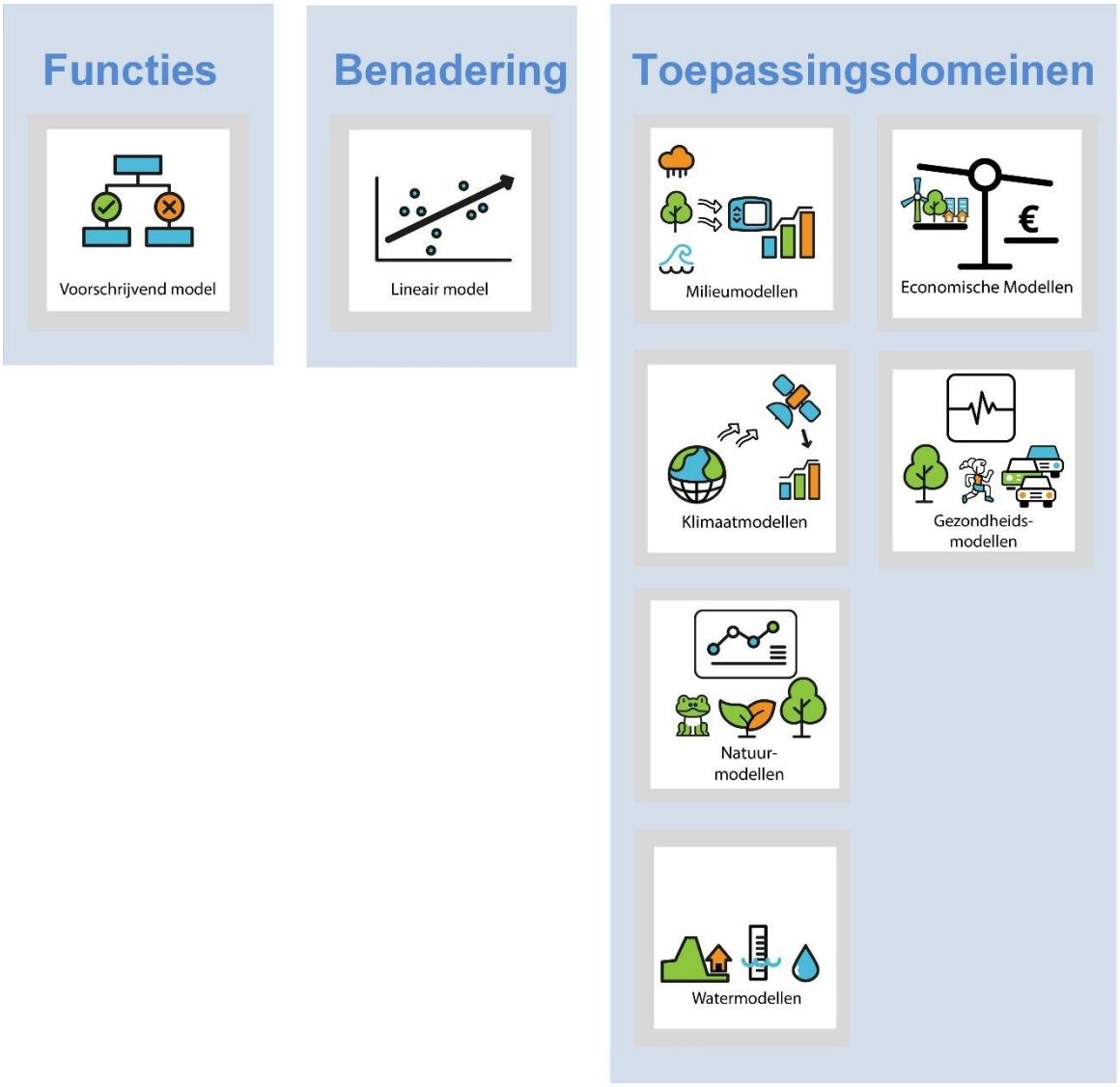
3.7 Conclusie

Er is een enorme rijkdom aan rekenmodellen in Nederland. Deze modellen hebben allemaal een eigen functie, modelbenadering en toepassingsdomein. Veel modellen hebben vaak zelfs meerdere functies, passen verschillende benaderingen toe en kennen daarmee uiteenlopende toepassingsdomeinen. Dat valt goed te illustreren aan de hand van de Groene Baten Planner[53] waarvan we de belangrijkste kenmerken weergeven in Figuur 14.

Dit rekeninstrument is ontwikkeld door het RIVM om de maatschappelijke en financiële baten van vergroening in steden inzichtelijk te maken. Het doel is te laten zien dat groen geen kostenpost is, maar juist waarde toevoegt, zowel economisch als voor het welzijn van bewoners. Groen vermindert hittestress, biedt schaduw, en helpt wateroverlast te beperken. Ook voelen bewoners van groene wijken zich gezonder en maken minder gebruik van zorg. Nieuw groen kan maatschappelijke baten opleveren van €1 tot €10 per vierkante meter per jaar, afhankelijk van de locatie. Het rekenmodel is gebaseerd op het Natuurlijk Kapitaal Model (Remme et al., 2017), dat ecosysteemdiensten en hun monetaire waarde berekent. Het model maakt gebruik van data uit basisregistraties zoals BAG, BRT, WOZ en CBS-gegevens. De input en output voor het model zijn geïntegreerd in 3D-omgevingen van adviesbureaus zoals Tygron, ESRI en Strategis, die de modeloutput vertalen naar visualisaties voor besluitvormers en belanghebbenden. Het model is zo opgenomen in de digitale tweelingen van steden als Zwolle en Amersfoort om de opbrengsten en effecten van vergroening zichtbaar te maken bij de herontwikkeling van wijken en stationslocaties en de inrichting van nieuwe woongebieden. De Groene Baten Planner vervult daarmee verschillende functies. De groene baten planner is kan dienen als voorschrijvend model waarmee aangegeven kan worden hoe gehandeld moet worden om aan bepaalde doelstelling te voldoen. Hiermee kunnen alternatieve opties voor vergroening doorgerekend worden om te bepalen of ze voldoen aan specifieke doelstellingen. De relaties tussen de opgenomen variabelen in de groene baten planner en het onderliggende Natuurlijk Kapitaal Model zijn lineair en het past daarbij verschillende benaderingen toe. Hiermee heeft het model een brede waaier aan toepassingsdomeinen. De groene baten planner is ook een natuurmodel, omdat het uitgaat van het natuurlijk kapitaal. Het natuurlijk kapitaal bestaat uit diensten en voorraden die de natuur ons levert. Deze ecosysteemdiensten en voorraden hebben verschillende functies, zoals voedselproductie of verkoeling in de stad. De planner rekent met input van het Natuurlijk Kapitaal model uit wat de effecten zijn van ingrepen in de fysieke leefomgeving, zoals vergroening of verstening, woningbouw, of aanleg infrastructuur. De uitkomsten van de

[53] https://atlasnatuurlijkkapitaal.nl/groene-baten-planner

groene baten planner worden verschillende modelberekeningen gebruikt: Luchtkwaliteit – fijnstof (milieumodel), CO2 uitstoot (klimaatmodel), regenwater afvoer (watermodel), sporten en bewegen, huisarts- en ziekenhuisbezoek (gezondheidsmodel) en woningwaarde, kosten waterzuivering, zorgkosten, ziekteverzuim (economisch model).



Figuur 14 - De groene baten planner geclassificeerd naar functie, modelbenadering en toepassingsdomein.

Dit overzicht is waardevol omdat het laat zien hoe divers, omvangrijk en gespecialiseerd het landschap van rekenmodellen in Nederland is. Door de verschillende functies, benaderingen en toepassingsdomeinen te combineren, kunnen beleidsmakers, onderzoekers en adviseurs beter begrijpen welk model geschikt is voor een specifieke situatie. Dit helpt bij het kiezen van het juiste model om complexe vraagstukken rondom milieu, economie, gezondheid en klimaat te analyseren en oplossingen te ontwikkelen die maatschappelijk en economisch waardevol zijn.

Tegelijkertijd maakt het duidelijk hoe complex het is om deze modellen goed met elkaar te laten samenwerken en effectief op te nemen in digitale tweelingen. Verschillende functies, benaderingen en toepassingsdomeinen maken integratie uitdagend, wat vraagt om zorgvuldige afstemming en technische oplossingen. In het volgende hoofdstuk gaan we daarom dieper in op wat er nodig is om deze modellen beter te laten samenwerken en hoe interoperabiliteit van rekenmodellen en digitale tweelingen vormgegeven kan worden.

4. Interoperabiliteit van rekenmodellen

4.1 Het EU-raamwerk voor interoperabiliteit

Digitale tweelingen maken vaak gebruik van diverse rekenmodellen om gedrag te simuleren, voorspellingen te doen of beslissingen te ondersteunen. Zo bevat en integreert een stedelijke digitale tweelingen rekenmodellen voor diverse doeleinden, zoals verkeersbewegingen om congestie te simuleren, energieverbruik te berekenen en voor het bereken van de milieu impact zoals luchtkwaliteit en geluidsoverlast. Deze rekenmodellen moeten data verwerken en delen, zoals weersvoorspellingen of bevolkingsgegevens om tot een geïntegreerd beeld te komen. Interoperabiliteit verwijst daarbij naar het vermogen van verschillende de databronnen, rekenmodellen, systemen en softwarecomponenten binnen een digitale tweeling effectief samen te laten werken, data uit te wisselen en geïntegreerd als één geheel te functioneren. Interoperabiliteit betekent hier dus, dat verschillende systemen, rekenmodellen of tools in staat zijn om data te delen en op een gestandaardiseerde en begrijpelijke manier deze data uitwisselen. In de context van digitale tweelingen betekent dit dat rekenmodellen uit verschillende disciplines, softwareomgevingen of technologieën probleemloos met elkaar moeten communiceren en samenwerken.

Interoperabiliteit is een fundamenteel kenmerk voor het succes en de betrouwbaarheid van rekenmodellen binnen digitale tweelingen. Het zorgt ervoor dat de componenten van de digitale tweeling – data, rekenmodellen en visualisaties - kunnen samenwerken als een coherent geheel.

Omdat digitale tweelingen vaak worden gebruikt in complexe toepassingen zoals stadsplanning, gezondheidszorg, industriële processen en klimaatmodellering is het een vereiste dat rekenmodellen afkomstig uit verschillende domeinen samen functioneren. Interoperabiliteit zorgt ervoor dat deze modellen coherent en efficiënt samenwerken, wat cruciaal is voor nauwkeurige en betrouwbare simulaties. Maar daarvoor zullen duidelijke afspraken gemaakt te worden, waarbij de afspraken zowel organisatorisch, juridisch, semantisch als ook technisch van aard zijn.

Op 18 november 2022 publiceerde de Europese Commissie het voorstel voor de Verordening Interoperabel Europa ('Interoperable Europe Act')[54]. De Commissie ziet het reguleren van internationale interoperabiliteit van overheidsdiensten als fundamentele voorwaarde voor het verder ontwikkelen en vervolmaken van de digitale eenheidsmarkt[55]. Betere internationale interoperabiliteit in de publieke sector creëert innovatiekansen, maakt betere planning mogelijk bijvoorbeeld in crisissituaties, en versterkt de technologische soevereiniteit van de EU. De verordening heeft drie doelstellingen:

1. Zorgen voor een consistente, mensgerichte Europese benadering van interoperabiliteit, van beleidsvorming tot beleidsuitvoering;
2. Een governancestructuur voor interoperabiliteit opzetten, die overheidsdiensten op alle niveaus en in alle sectoren, als ook particuliere belanghebbenden, in staat moet stellen samen te werken met een duidelijke opdracht om overeenstemming te bereiken over gedeelde interoperabiliteits-oplossingen (bv. kaders, open specificaties, open normen, toepassingen of richtlijnen);
3. Samen een ecosysteem van interoperabiliteitsoplossingen voor de overheidssector in de EU tot stand brengen, zodat overheidsdiensten (op alle niveaus in de EU) en andere

[54] https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/TXT/?uri=CELEX%3A32024R0903

[55] De tekst in deze sectie is grotendeels afkomstig uit: https://docs.geostandaarden.nl/eu/handreiking-EU-informatie/#interoperable-europe-act. De complete verordening is hier te vinden: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/NL/TXT/?uri=CELEX:32024R0903

belanghebbenden kunnen bijdragen aan dergelijke oplossingen en deze kunnen hergebruiken, en zij gezamenlijk kunnen innoveren en publieke waarde kunnen creëren.

Bij het vernieuwen, maken of aanschaffen van informatie- en netwerksystemen dient rekening te worden gehouden met de Europese interoperabiliteitsvereisten, zoals die sinds 2010 zijn verwoord in het European Interoperability Framework (EIF)[56]. In Nederland is de compliance met het EIF verankerd in NORA.

Met de Verordening Interoperabel Europa wordt een algemeen en voorschrijvend kader neergezet voor interoperabiliteit van netwerk- en informatiesystemen, die worden gebruikt om overheidsdiensten in de Europese Unie te verlenen en te beheren. De Verordening is van toepassing op alle publieke instellingen die informatiesystemen of netwerken leveren of beheren voor het elektronisch verstrekken of beheren van publieke diensten. Het geeft maatregelen om de grensoverschrijdende interoperabiliteit van informatie- en netwerksystemen te versterken betreft dus de internationale verbinding en uitwisseling van overheidsdiensten in ketens tussen lidstaten. In het voorstel wordt onderscheid gemaakt tussen vier aspecten van interoperabiliteit (zie ook Figuur 15):

1. Juridische interoperabiliteit; rechtskaders, die van invloed zijn op interoperabiliteit;
2. Organisatorische interoperabiliteit gerelateerd aan de coördinatie tussen organisaties;
3. Semantische interoperabiliteit, waarmee betekenis en formaat van uitgewisselde data wordt vastgelegd;
4. Technische interoperabiliteit voor technische aspecten van data delen en data-uitwisseling.

Figuur 15 - Het Interoperabiliteitsraamwerk van de EU[57].

De Commissie stelt dat op al deze gebieden een hoog niveau van interoperabiliteit van de overheidssector nodig is. Interoperabiliteitsoplossingen zijn alle technische specificaties (zoals een standaard, conceptueel raamwerk, handreikingen, toepassingen en waar van toepassing gedocumenteerde broncode) die juridische, organisatorische, semantische of technische vereisten beschrijven aan een informatiesysteem om grensoverschrijdende interoperabiliteit te versterken.

In de volgende paragrafen hanteren we bovenstaande indeling in vier vormen van interoperabiliteit om de belangrijkste bevindingen uit deze studie te rubriceren. We bespreken hier de

[56] https://interoperable-europe.ec.europa.eu/collection/nifo-national-interoperability-framework-observatory/european-interoperability-framework-detail
[57] Vrij naar: https://ec.europa.eu/isa2/sites/default/files/eif_brochure_final.pdf

aandachtspunten en ontwikkelingen, die tijdens het uitvoeren van deze studie zijn opgetekend uit de interviews met Nederlandse experts en door hun aangedragen bronnen (voor deskresearch). Deze inventarisatie tracht vooral aanbevelingen te verzamelen om interoperabiliteit mogelijk te maken door aan te sluiten bij recente juridische, organisatorische, semantische en technologische ontwikkelingen. Daarnaast besteden we in de slotparagrafen aandacht aan enkele gebruiksaspecten die in de gesprekken ter sprake kwamen. Deze hebben vooral betrekking op de vraag hoe modelleurs en modelgebruikers kunnen bijdragen aan verantwoord gebruik van hun modellen.

De tekst in dit hoofdstuk is verrijkt met blauwe kaderteksten waarin we inspirerende praktijkvoorbeelden van lopende projecten en systemen geven. We benoemen daarnaast ook enkele aandachtsgebieden voor innovatie en onderzoek. Al deze voorbeelden zijn in de interviews door de experts ter illustratie genoemd en geven aan hoe we tot een effectieve koppeling van rekenmodellen en digitale tweelingen kunnen komen.

4.2 Juridische interoperabiliteit

De juridische kaders voor rekenmodellen worden bepaald regelgeving op nationaal en Europees niveau. We bespreken deze kaders dan ook in relatie tot enkele belangrijke wetten en regels. Juridische interoperabiliteit voor het gebruik van rekenmodellen in digitale tweelingen verwijst naar de mate waarin juridische en regelgevende kaders consistent en compatibel zijn, zodat rekenmodellen (en bijbehorende data) op een rechtmatige manier kunnen worden gedeeld, geïntegreerd en gebruikt binnen en tussen organisaties. De juridische interoperabiliteit van rekenmodellen zorgt er ook voor, dat digitale tweelingen juridisch veilig en effectief ingezet kunnen worden. Onder de juridische aspecten van interoperabiliteit voor rekenmodellen vallen o.a. aspecten als licenties en eigendomsrechten, aansprakelijkheid en contractuele afspraken over het gebruik van de rekenmodellen. Maar ook zijn rekenmodellen in algemene regelgeving (bijvoorbeeld de Europese AI verordening) en specifieke domeinwetgeving (bijv. de Nederlandse Omgevingswet) vastgelegd. Ook hierin zijn juridische afspraken gemaakt over (het gebruik van) rekenmodellen.

4.2.1 Rekenmodellen in Nederlandse wetgeving

In Nederland worden rekenmodellen voor de fysieke leefomgeving soms opgenomen in wetgeving om complexe berekeningen of analyses te standaardiseren en beleid te ondersteunen. Dit gebeurt volgens duidelijke richtlijnen en procedures om de betrouwbaarheid, transparantie en toepas-baarheid van de rekenmodellen te waarborgen. De toepassing van een rekenmodel wordt dan verplicht gesteld voor bepaalde berekeningen, zoals bijvoorbeeld in omgevingswet. De wet verwijst naar een specifiek rekenmodel en/of een bijlage waarin het rekenmodel wordt beschreven. Rekenmodellen worden dan ook expliciet genoemd in wetten, algemene maatregelen van bestuur of ministeriële regelingen. En in sommige gevallen wordt een technisch document of handleiding opgenomen waarin de werking en toepassing van het rekenmodel gedetailleerd wordt toegelicht, zoals bijvoorbeeld voor geluidsberekeningen in de fysieke leefomgeving (zie kader).

De rekenmodellen worden beoordeeld op robuustheid, betrouwbaarheid en validatie voordat ze in wetgeving worden opgenomen. Ze worden regelmatig geëvalueerd en aangepast aan nieuwe wetenschappelijke inzichten of beleidsdoelen. De rekenmodellen moeten openbaar beschikbaar zijn en gebaseerd op wetenschappelijke inzichten. Dit vergroot de controleerbaarheid en het draagvlak bij stakeholders. Rekenmodellen fungeren daarbij namelijk ook soms als basis voor toetsing en naleving van wet- en regelgeving; overheden en vergunningverlenende instanties kunnen de rekenmodellen gebruiken om te bepalen of bepaalde normen of eisen worden gehaald.

Geluidsmodellen in de omgevingswet

Het gebruik van rekenmodellen in geluidsberekeningen voor de omgevingswet heeft als doel om te beoordelen of activiteiten voldoen aan wettelijke normen voor geluidshinder, zoals vastgelegd in de Omgevingswet. De geluidsmodellen ondersteunen vergunningverlening, ruimtelijke ordening en het ontwerp van infrastructuur. De geluidsmodellen zijn vastgelegd in de wet in de vorm van reken- en meetvoorschriften en worden gebruikt om geluidsemissies van wegen, spoorwegen en industriële activiteiten te modelleren. De geluidsmodellen berekenen geluidsniveaus op basis van input zoals verkeersintensiteit, voertuigsoorten, snelheid, en omgevingsfactoren (bijvoorbeeld bodemabsorptie en bebouwing). De resultaten uit geluidsmodellen zijn juridisch bindend bij vergunningverlening of het opstellen van een omgevingsplan. Over de kwaliteit van de geluidsmodellen zijn afspraken gemaakt; de geluidsmodellen moeten voldoen aan wettelijke eisen voor nauwkeurigheid, validatie en transparantie, die zijn vastgelegd in het Besluit kwaliteit leefomgeving[58] en de Omgevingsregeling[59].

4.2.2 De Europese Verordening Artificiële Intelligentie

Per 1 augustus 2024 is vanuit de EU de Verordening Artificiële Intelligentie van kracht geworden. Het gebruik van AI door de overheid zal vanaf de inwerkingtreding aan specifieke eisen moeten voldoen, afhankelijk van het risiconiveau van de toepassing ervan. AI-modellen worden geanalyseerd op basis van hun impact op veiligheid, gezondheid en fundamentele rechten, zoals privacy en non-discriminatie. Daarbij staat risicobeheer centraal. AI-systemen moeten worden getypeerd en gereguleerd op basis van een risico-gebaseerde benadering: van onacceptabel risico, hoog risico, beperkt risico tot minimaal risico.

Hoogrisico modellen zullen moeten voldoen aan strenge voorwaarden voor ontwerp, implementatie en monitoring. Daarvoor wordt een CE-markering voor hoogrisico AI-systemen ingesteld. Dit is een certificering die aangeeft dat een AI-systeem voldoet aan de normen en vereisten van de Europese Verordening AI en voldoet aan de wettelijke vereisten op het gebied van veiligheid, betrouwbaarheid, transparantie en ethiek. Voor hoogrisico AI-systemen zoals die gebruikt worden in kritieke sectoren als de gezondheidszorg, rechtshandhaving, transport of onderwijs gelden dus strikte regels en verplichtingen onder de Verordening AI.

Daarnaast dienen de ontwikkelaars en gebruikers van AI-systemen de transparantie, traceer-baarheid en uitlegbaarheid van AI-systemen te waarborgen, o.a. door AI-systemen te toetsen, te beschrijven en te zorgen voor kwaliteitsborging. Gebruikers van AI-systemen moeten dus geïnformeerd worden over hoe modellen werken, welke data wordt gebruikt en hoe de output tot stand is gekomen. Ook zullen afspraken en mechanismen moeten worden geïmplementeerd voor het monitoren en auditen van AI-algoritmen om te waarborgen dat ze veilig blijven functioneren en blijven voldoen aan de regelgeving. Dit vergt onder meer een beschrijving van de tests die zijn uitgevoerd om betrouwbaarheid en nauwkeurigheid te waarborgen. Daarnaast moeten nationale toezichthoudende instanties en een Europees Comité voor AI worden opgericht om de naleving te waarborgen.

Volgens de Europese AI-verordening wordt een AI-systeem gedefinieerd als “een systeem dat op basis van gegevens intelligente of autonome beslissingen maakt of aanbevelingen doet, met behulp van één of meer AI-technieken.” [60] In de context van de Verordening AI werkt een AI-algoritme of AI-systeem niet alleen op basis van vooraf geprogrammeerde regels, maar kan het zelf leren en zich aanpassen aan nieuwe data. Dit minimaliseert of elimineert menselijke tussenkomst en is wat AI-algoritmen doorgaans onderscheidt van traditionele algoritmen, rekenmodellen en systemen. Het gaat hier om geavanceerde algoritmen die in staat zijn om zelfstandig taken uit te voeren en

[58] https://wetten.overheid.nl/BWBR0041313/2024-12-21

[59] https://wetten.overheid.nl/BWBR0045528/2025-01-01

[60] https://eur-lex.europa.eu/legal-content/NL/TXT/?uri=OJ%3AL_202401689

die bekend staan bekend onder noemers als machine learning, deep learning, patroonherkenning of natuurlijke taalverwerking.

Vanuit de EU wordt ook gewerkt aan een Europees AI-database waarin de hoogrisico AI-systemen worden geregistreerd die in de EU worden gebruikt. Daarmee wordt de monitoring en controle van de naleving van de Verordening AI door toezichthoudende instanties ondersteund en vindt controle plaats of AI-systemen voldoen aan de vereiste normen op het gebied van veiligheid, ethiek en transparantie.

4.2.3 Het Nederlandse algoritmeregister

Het Nederlandse algoritmeregister[61] is een antwoord op de vraag om meer transparantie over het gebruik van algoritmes door de Nederlandse overheid zoals die in diverse rapporten, kamermoties en adviezen was vastgelegd (Ministerie van BZK, 2022). Daarbij wordt een algoritme vrij algemeen omschreven als "...een set van regels en instructies die een computer geautomatiseerd volgt bij het maken van berekeningen om een probleem op te lossen of een vraag te beantwoorden" (Algemene Rekenkamer, 2022). Deze omschrijving is vrij breed en omvat meer dan alleen AI-modellen. Vandaar dat bij het Nederlandse algoritmeregister de nadruk ligt op het registeren van hoogrisico AI-systemen en impactvolle algoritmen. Het gaat daarbij in ieder geval om:

- AI-systemen, die door de Europese (Verordering AI als hoogrisico worden aangeduid. Dat zijn algoritmes die elementen van autonomie (zelfstandigheid) kennen en meestal (deels) zelflerende algoritmes zijn. Het AI-systeem moet daarnaast tot één van de toepassingsgebieden van Annex III van de AI-verordening behoren[62]. Denk aan gebieden als biometrie, kritieke infrastructuur en werkgelegenheid.;
- Informatie over algoritmes die direct impact hebben op de betrokkenen. Ze dragen bijvoorbeeld bij aan een besluit dat van invloed is op iemands rechten, op iemands juridische status of zijn rechten vanuit een overeenkomst. Denk aan: het opleggen van boete of het toekennen of weigeren van een subsidie.

Daarnaast zijn er nog een aantal andere redenen om algoritmes volledig te publiceren, bijvoorbeeld wanneer algoritmes veel maatschappelijke aandacht krijgen. Er zijn echter ook redenen om niet alle informatie over een algoritme te publiceren, bijvoorbeeld wanneer een algoritme wordt gebruikt voor opsporing. Idealiter publiceert de overheid dan het deel van de informatie over het algoritme dat wel gepubliceerd kan worden. Voor het selecteren van algoritmes voor publicatie in het algoritmeregister is een aparte handreiking[63] ontwikkeld. Ook voor het beschrijven van de algoritmen is een publicatiestandaard[64] ontwikkeld bestaand uit een set van informatie-elementen (metadata) over de algoritmen. Met het Nederlandse algoritmeregister zoekt de Nederlandse overheid naar aansluiting op de Europese AI-verordening zodat het makkelijker wordt voor overheden met een hoog risico AI-systeem, die in het Nederlandse Algoritmeregister staan, te voldoen aan deze Europese verplichting. Niet alle beschrijvingen van algoritmes in het Nederlandse Algoritmeregister gaan overigens over hoogrisico AI-systemen. Er staan ook niet-zelflerende algoritmes en/of algoritmes met een lager risico in het register, die worden aangeduid als impactvol en overige algoritmen.

Naast een register voor algoritmes wordt de AI Management Toolkit[65] (AMT) ontwikkeld om de transparantie en governance van algoritmen gedurende hun hele levenscyclus te verbeteren. AMT genereert gestandaardiseerde rapportages over algoritmes, inclusief technische details en

---

[61] https://algoritmes.overheid.nl/nl

[62] Zie voor meer informatie over de risicoclassificatie de AI-verordening zelf op https://eur-lex.europa.eu/legal-content/NL/TXT/?uri=CELEX:32024R1689.

[63] https://aienalgoritmes.pleio.nl/attachment/entity/f1a35292-7ea6-4e47-93fa-b3358e9ab2e0

[64] https://aienalgoritmes.pleio.nl/wiki/view/2bcdf820-ce62-4249-95f7-d1a13fb6e1c9/handleiding-publicatiestandaard

[65] https://minbzk.github.io/ai-validation/

regelgevingstoetsingen, van ontwikkeling tot inzet en gebruik. Dit bevordert verantwoording, toezicht en samenwerking, en sluit aan op eisen uit het Nederlandse Algoritmekader.

4.2.4 Rekenmodellenregister voor digitale tweelingen

Zeer sterk verwant aan het algoritmeregister is een modellenregister of register van rekenmodellen, dat diverse malen in de interviews voor deze verkenning genoemd werd. Een dergelijk register kan bijdragen aan transparantie over het functioneren van het model en het inschatten van risico's van modeltoepassing in relatie tot wet- en regelgeving zoals bij het algoritmeregister. Daarbij kan het helpen zorgen voor consistentie en betrouwbaarheid bij het gebruik van rekenmodellen, het stroomlijnen van modelbeheer en het hergebruik van rekenmodellen. Zo'n register biedt een centrale locatie waar alle betrokkenen (overheden, bedrijven, academische instellingen) inzicht krijgen in de modellen die worden gebruikt, hoe ze werken, en wat hun beperkingen zijn. In een rekenmodellenregister kan worden vastgelegd wie verantwoordelijk is voor een rekenmodel en hoe het is ontwikkeld. Het kan een mechanisme zijn voor het vinden van rekenmodellen en het bijhouden van updates, wijzigingen, of nieuwe versies van rekenmodellen, zodat gebruikers altijd toegang hebben tot de meest betrouwbare en relevante versie. Een register verbetert het hergebruik van rekenmodellen voor andere toepassingen en maakt het vergelijken van rekenmodellen van verschillende leveranciers mogelijk (vindplaats).

Voorbeelden van dergelijke rekenmodellenregisters zijn bijvoorbeeld de Model Gallery[66] van Wageningen University & Research, het overzicht van door PBL gebruikte modellen[67] op hun website en het Modelling Inventory and Knowledge Management System (MIDAS[68]) van de European Commissie. Deze registers bevatten onder andere informatie over:

- Wat het model doet, voor welke doeleinden het wordt gebruikt, en de scope van de toepassing;
- Metadata over de gebruikte input en output van het model, het type data, en de algoritmes die worden toegepast;
- Kwaliteitscontrole en validatie: data over de validatie van het model, zoals de methoden voor kwaliteitsborging en de uitvoering van tests;
- Eigenaren en verantwoordelijken: informatie over wie het model heeft ontwikkeld, onderhouden en verantwoordelijk is voor de uitkomsten;
- Afspraken over het delen van het rekenmodel en bijvoorbeeld de voorwaarden voor hergebruik (licentievoorwaarden);
- Informatie over de verschillende versies van het model, inclusief updates, wijzigingen en validatie van resultaten.

Een rekenmodellenregister vervult daarmee een vergelijkbare functie als een algoritmeregister en draagt ook bij aan transparantie en het beperken van het risico op oneigenlijk of onverantwoord gebruik.

4.2.5 Herkomst en traceerbaarheid

Een ander belangrijk aspect van rekenmodellen dat eveneens in de interviews veelvuldig naar voren kwam, is aandacht voor het gestandaardiseerd vastleggen van *herkomst* en *traceerbaarheid* van de manier van toepassing van rekenmodellen. Dit zijn twee belangrijke aspecten om te kunnen voldoen aan wetgeving en juridische vereisten in relatie tot transparantie voor besluitvorming te voldoen (zie ook kader).

Herkomst of provenance verwijst naar het vastleggen van de geschiedenis van rekenmodellen en hun data. Het betreft het documenteren van hun oorsprong en verwerking, en de processen die

[66] https://www.wur.nl/nl/onderzoek-resultaten/kennisonline-onderzoeksprojecten-lvvn/kennisbasis-onderzoek/kb-projecten-lopend-2019-2024/wageningen-research-modeling-group-kb-33.htm
[67] https://www.pbl.nl/modellen
[68] https://web.jrc.ec.europa.eu/policy-model-inventory/

hiervoor zijn toegepast. In toepassingen in de publieke sector, waar beslissingen een aanzienlijke impact kunnen hebben op (kwetsbare) mensen, zorgt inzicht in de herkomst van data ervoor dat beleid gebaseerd is op nauwkeurige en betrouwbare informatie. Daarbij draagt transparantie over de model- en data-oorsprong bij aan vertrouwen in modeltoepassing en de herkomst van de gebruikte input data, het waarborgen van de data-integriteit en het vergemakkelijken van de naleving van regelgeving.

Traceerbaarheid of tracebility omvat de mogelijkheid om het gebruik van rekenmodellen en data gedurende hun hele levenscyclus te volgen. Zo kan gecontroleerd worden hoe rekenmodellen worden toegepast, kunnen eventuele wijzigingen worden geïdentificeerd en kan inzicht verkregen worden in de datastromen tussen verschillende rekensystemen. In digitale tweelingen zorgt traceerbaarheid ervoor dat alle componenten functioneren zoals bedoeld en dat eventuele problemen snel kunnen worden geïdentificeerd en aangepakt. Voor toepassingen in de publieke sector betekent dit dat diensten die afhankelijk zijn van digitale tweelingen hoge kwaliteits- en betrouwbaarheidsnormen kunnen handhaven.

Standaard voor transparantie besluitvorming

Het is belangrijk dat de overheid verantwoording en transparantie biedt aan burgers en bedrijven over haar handelen. Burgers en bedrijven moeten weten welke data wordt gebruikt en hoe beslissingen worden genomen. Hierbij worden niet alleen persoonsgegevens, maar ook data over objecten in de fysieke leefomgeving gebruikt. Er wordt gewerkt aan een standaard om de verwerking van persoonsgegevens vast te leggen en te verantwoorden[69]. Dit project[70] heeft als doel deze standaard uit te breiden zodat hij ook kan worden toegepast in de fysieke leefomgeving. Zo kan de hele overheid op een uniforme, consistente en gemakkelijk te implementeren manier verantwoording afleggen. Initiatiefnemers van het project zijn Ministerie van Binnenlandse Zaken en de Stichting Geonovum.

4.3 Organisatorische interoperabiliteit

Organisatorische interoperabiliteit bij het gebruik van rekenmodellen en digitale tweelingen verwijst naar het vermogen van verschillende organisaties om effectief samen te werken rondom het gebruik van rekenmodellen en digitale tweelingen. Dit kan uitdagingen met zich meebrengen op het gebied van beleid, besturing, samenwerkingen tussen organisaties en zakelijke processen (zoals verdienmodellen). Daarvoor dienen zowel publieke, private en kennisorganisaties met elkaar afspraken te maken en informatie uit te wisselen. Het adresseren van deze organisatorische aspecten draagt bij aan een succesvolle implementatie en benutting van rekenmodellen en digitale tweelingen binnen en tussen organisaties. Het gaat daarbij om verschillende aspecten waarover afspraken gemaakt moeten worden, zoals afspraken over de besturing(smodellen), de samenwerking tussen publieke, private en kennisorganisaties, de afspraken en richtlijnen over processen, kwaliteit en verdienmodellen. Kortom, het ontwikkelen van gemeenschappelijke beleidskaders en governancestructuren, die het delen en gezamenlijk gebruik van rekenmodellen in digitale tweelingen faciliteren.

Het delen van data en rekenmodellen is gebaat bij sterke samenwerkingsverbanden tussen verschillende organisaties, zoals overheidsinstellingen, onderzoeksinstituten en private partijen. Het opzetten van platforms voor uitwisseling van rekenmodellen en data kan deze samenwerking faciliteren, transparantie bevorderen en bijdragen aan het benodigde vertrouwen tussen betrokken partijen om daadwerkelijk data en modellen te delen. Dit delen vereist daarbij gedeelde doelstellingen, wederzijds begrip van elkaars rollen en verantwoordelijkheden en duidelijke

[69] https://logius-standaarden.github.io/logboek-dataverwerkingen/

[70] https://geonovum.github.io/logboek-dataverwerkingen-voor-objecten

afspraken over bijvoorbeeld verantwoordelijkheden en procedures voor gegevensbeheer en -uitwisseling.

Ook afspraken over hoe gemeenschappelijke standaarden en richtlijnen voor het gebruik van rekenmodellen en digitale tweelingen worden gebruikt en gehandhaafd is cruciaal. Dit zorgt voor consistente en efficiënte implementatie op nationaal, regionaal en lokaal niveau. Daarbij is ook de integratie van rekenmodellen en digitale tweelingen in de bedrijfsprocessen van organisaties een evident aspect van organisatorische interoperabiliteit. Het is namelijk belangrijk om ook bedrijfsprocessen te harmoniseren om compatibiliteit - een soepele integratie en toepassing van rekenmodellen en digitale tweelingen - en effectiviteit te waarborgen van het gebruik van rekenmodellen en digitale tweelingen. Dit omvat het stroomlijnen van workflows, het definiëren van gemeenschappelijke procedures en het implementeren van interoperabele IT-systemen.

Tot slot, is ook aandacht voor het ontwikkelen van duurzame verdienmodellen (en het licentiëren van rekenmodellen) essentieel voor de adoptie van uniforme rekenmodellen in digitale tweelingen. Het is belangrijk om de waardepropositie van het gebruik van rekenmodellen in digitale tweelingen helder te maken en te communiceren naar alle betrokkenen. Digitale tweelingen bieden nieuwe mogelijkheden en markten voor bestaande rekenmodellendiensten en het ontwikkelen van nieuwe diensten, zoals data-analyse diensten en het creëren van nieuwe producten op basis van inzichten verkregen uit digitale tweelingen.

In de onderstaande subparagrafen gaan we dieper in op enkele voorbeelden die illustreren hoe de organisatorische interoperabiliteit van rekenmodellen en digitale tweelingen in de praktijk al tot stand komt. Deze voorbeelden hebben betrekking op samenwerkingsverbanden en verdienmodellen die in de gesprekken met experts in deze verkenning naar voren zijn gekomen.

4.3.1 Samenwerking organiseren

In de gevoerde gesprekken zijn diverse samenwerkingsverbanden en praktijkgemeenschappen (communities of practice) genoemd, waarin Nederlandse organisaties op verschillende niveaus (van internationaal tot lokaal) samenwerken aan het ontwikkelen en gebruiken van rekenmodellen en digitale tweelingen.

Internationale samenwerking - Open Modeling Foundation

De Open Modeling Foundation (OMF) is een internationale open science community, die zich richt op het bevorderen van de volgende generatie rekenmodellen voor menselijke en natuurlijke systemen. Het is een alliantie van modelleerorganisaties, die gezamenlijk standaarden en best practices ontwikkelen en beheren voor diverse gemeenschappen van modelleurs, waaraan ook enkele Nederlandse organisaties zoals WUR en Deltares deelnemen. OMF is een actieve organisatie, die regelmatig bijeenkomsten en workshops organiseert om de ontwikkeling van modelleer-standaarden te bevorderen. Binnen het OMF is een Standards Working Group actief, die een cruciale rol speelt bij het ontwikkelen en implementeren van gemeenschappelijke standaarden. Hun doel is om samenwerking en transparante kennisuitwisseling te bevorderen door het vaststellen van uniforme richtlijnen, die de interoperabiliteit en kwaliteit van modellen verbeteren (Barton et al. 2022a). Voor de Nederlandse partijen heeft deelname als voordeel dat ze OMF-standaarden en best practices kunnen integreren in nationale projecten. Dit leidt tot een betere samenwerking tussen Nederlandse onderzoekers en internationale communities en kan de kwaliteit en reproduceerbaarheid van modellen verhogen. Bij OMF gaat de aandacht momenteel vooral uit naar het goed beschrijven van rekenmodellen en aspecten van semantische interoperabiliteit en niet zo zeer de technische interoperabiliteit[71].

[71] Meer over de Open Modeling Foundation: https://www.youtube.com/watch?v=oG9_Y2KfI5Y&t=1127s

Nationaal Modellen- en Data Centrum

Het Nationaal Modellen- en Data Centrum voor de leefomgeving (NMDC) is een samenwerkingsverband van diverse Nederlandse kennisinstituten, waaronder het KNMI, RIVM, PBL, Deltares, Wageningen Research en TNO. Het NMDC heeft als doel kennis op het gebied van de leefomgeving en milieu te bundelen door het delen van elkaars kennis en expertise, het afstemmen van modellen, data en infrastructuur, en het stimuleren van gezamenlijk gebruik.

Deze integrale aanpak voorkomt versnippering van onderzoekscapaciteit en bevordert een veilige en duurzame leefomgeving. De deelnemers hebben afspraken gemaakt over het ontwikkelen en gebruiken van rekenmodellen, waaronder:

- Het gezamenlijk ontwikkelen en onderhouden van modellen en data-infrastructuren;
- Het bevorderen van de interoperabiliteit van modellen en data;
- Het waarborgen van de kwaliteit en betrouwbaarheid van modellen en data; en
- Het stimuleren van open toegang tot data en modellen, met inachtneming van wettelijke en ethische kaders.

Samenwerking kennisinstellingen – Het Digilab Toegepaste kennis

De Nederlandse Toegepaste Onderzoeksinstituten (Deltares, MARIN, NLR, TNO en WUR, verenigd in de TO2-federatie) zijn begin 2024 gestart met het Digilab Toegepaste kennis en met het delen van data en rekencapaciteit, zodat de kennisinstituten gebruik kunnen maken van elkaars analyse- en modelleringstechnieken. Om hun innovatiekracht te versterken, investeren deze TO2 organisaties met een aantal leidende Rijkskennisinstellingen (zoals RIVM en PBL) gezamenlijk in een digitale infrastructuur: het DigiLab Toegepaste Kennis (DigiLab)[72]. Dit is een digitale faciliteit waar data, modellen en rekencapaciteit gedeeld kunnen worden. Zo kunnen de kennisinstituten nog beter samenwerken en stelt het Digilab als innovatief ecosysteem de kennisinstituten in staat om oplossingen te vinden voor complexe onderzoeksvraagstukken. Of het nu gaat om klimaatverandering, energietransitie en duurzaamheid, de stikstof problematiek, de gezondheidszorg en epidemieën/pandemieën, water en voedselzekerheid, of integrale veiligheidsvraagstukken, de maatschappelijke uitdagingen zijn groot en complex. Daarbij veranderen ze snel en zijn ze lastig voorspelbaar. Samenwerking tussen onderzoeksinstituten, kennisinstellingen, overige overheden en bedrijfsleven is cruciaal om deze vraagstukken op te lossen. Deze samenwerking is steeds vaker digitaal, waardoor de noodzaak om elkaars data en modellen te kunnen delen en gebruiken steeds urgenter wordt.

Het vinden van antwoorden op de complexe onderzoeksvragen heeft daarom baat bij een digitale faciliteit: een federatieve, digitale infrastructuur die toegang biedt tot deze “exploderende” hoeveelheid gegevens en modellen. In deze faciliteit wordt data en modellen gecombineerd met rekenkracht en moderne visualisatieomgevingen. Een ontwikkeling die mede mogelijk gemaakt wordt door steeds krachtigere computers. Hiermee wordt ook de ontwikkeling van AI ondersteund en wordt inzicht gecreëerd met behulp van complexe simulaties en visualisatie in digitale tweelingen. Digitale samenwerking wordt bemoeilijkt doordat partijen de soevereiniteit over hun data, algoritmes, rekenmodellen willen en moeten behouden. Vaak is er wel bereidheid tot het onder voorwaarden beschikbaar stellen hiervan maar niet tot het volledig overdragen van deze componenten. Daarnaast zorgt versnippering van data, algoritmes en rekenmodellen voor gebrek aan reproduceerbaarheid en transparantie. Dat laatste is cruciaal voor de maatschappelijke acceptatie van uitkomsten die steeds meer onder druk komt te staan. Tenslotte moet bij elke samenwerking kennisveiligheid en bescherming tegen digitale dreiging in acht worden genomen. Deze aspecten zijn gelijk voor alle instellingen en vragen om een gemeenschappelijke, en schaalbare oplossing. Het DigiLab neemt deze obstakels voor digitale samenwerking weg en biedt

[72] https://to2-federatie.nl/artikel/to2-digilab-bundelen-van-gezamenlijke-denkkracht/

een ecosysteem waarin co-creatie en gezamenlijk gebruik van data en modellen veilig, transparant en reproduceerbaar kan plaatsvinden.

Naast de kennisinstituten kunnen op termijn ook (semi)overheidsorganisaties, onderwijsinstellingen en het bedrijfsleven op het Digilab worden aangesloten. Ook deze partijen hebben echter de wens om controle te houden over hun eigen data. Dit geldt zeker, maar niet alleen, voor marktpartijen die een cruciale rol spelen in toegepast onderzoek. Dergelijke partijen zullen vanwege zakelijke of juridische afwegingen niet zomaar gegevens met anderen delen. Voor andere partijen gelden vaak vergelijkbare, strategische belangen bijvoorbeeld om een kennisvoorsprong te houden of als eerste te kunnen publiceren over nieuwe ontwikkelingen. Zulke overwegingen kunnen conflicteren met de vaak ook genoemde bereidheid om samen te werken. Het Digilab Toegepaste kennis wil een oplossing bieden, door data en rekenmodellen alleen onder bepaalde voorwaarden beschikbaar te stellen en aan specifieke groepen. Zo houdt elke partij de zeggenschap over de eigen data. Het is een virtuele samenwerkingsomgeving waarin aangesloten partijen onder de afgesproken voorwaarden - flexibel, efficiënt en veilig toegang krijgen tot elkaars data, algoritmes, modellen en rekencapaciteit. Een vergelijkbare virtuele samenwerkingsomgeving is nog niet voorhanden.

Domeinspecifieke samenwerking –Watercloud

Het initiatief Watercloud is een samenwerkingsverband van Nederlandse waterbeheerders en kennisinstellingen, waaronder Rijkswaterstaat, de waterschappen, Deltares en het KNMI (Aalders et al., 2020). Het doel van Watercloud is het bevorderen van samenwerking op het gebied van waterbeheer door het delen van data, modellen en rekenkracht via een gezamenlijke cloudomgeving. Met deze samenwerking streven de betrokken partijen naar een geïntegreerde aanpak van waterbeheer, waarbij gebruik wordt gemaakt van gedeelde digitale middelen van het Nederlands Hydrologisch Instrumentarium (NHI) om beter in te spelen op uitdagingen zoals klimaatverandering en waterveiligheid. De belangrijkste doelen van Watercloud zijn:

- Het faciliteren van toegang tot actuele en betrouwbare waterdata en rekenmodellen voor alle deelnemende partijen;
- Het optimaliseren van rekenprocessen door gebruik te maken van gedeelde cloudresources, wat leidt tot kostenbesparing en snellere doorlooptijden;
- Het stimuleren van gezamenlijke ontwikkeling en implementatie van nieuwe technologieën en methoden binnen het waterbeheer.

In 2021 werd een functioneel ontwerp voor Watercloud ontwikkeld (Aalders et al., 2020), met functionaliteiten zoals de NHI Modelcode selector, workflow-ondersteuning en postprocessing. Deze toepassingen sluiten aan bij de doelstellingen van NHI en geven invulling aan de eerste versie van Watercloud.

Samenwerking binnen één organisatie - Wageningen Universiteit en Research

Organisatorische interoperabiliteit voor de ontwikkeling en het gebruik van rekenmodellen kan ook een thema zijn binnen organisaties. Dit draagt bij aan het uniformer ontwikkelen en gebruiken van rekenmodellen binnen de gehele organisatie. Deze vorm van interoperabiliteit kan worden ondersteund met richtlijnen en afspraken. De WUR Guidelines on Model Management van Wageningen University & Research (WUR) zijn hier een voorbeeld van en bieden een kader voor het beheer van modellen binnen een organisatie (Vullings et al., 2024). Deze richtlijnen zijn van toepassing op alle WUR-medewerkers die betrokken zijn bij het ontwikkelen en het gebruik van rekenmodellen[73]. Binnen de WUR is afgesproken dat rekenmodellen voldoen aan enkele algemene regels, zoals:

[73] De richtlijnen zijn tevens “in lijn met de Nederlandse Code voor Wetenschappelijke Integriteit en bevorderen het wetenschappelijk gebruik van modellen, inclusief delen, hergebruik en verificatie, en helpen bij het waarborgen van de reputatie van WUR” (Vullings et al., 2024).

- Modellen moeten zoveel mogelijk volgens de FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable) principes worden beheerd;
- Er moet voldaan worden aan het WUR Data Policy en de WUR Guidelines on Value Creation with Software & Data; en
- De Good Modelling Practice moet worden toegepast.

Om deze algemene regels invulling te geven zijn diverse afspraken gemaakt, zijn organisatorische veranderingen in gang gezet en zijn concrete afspraken binnen deze richtlijnen gemaakt. De WUR Guidelines on Model Management noemt hiervoor onder meer (Vullings et al., 2024):

- Modelontwikkelaars zijn verantwoordelijk voor het documenteren van hun modellen, het registreren in de WUR Model Gallery, het veilig opslaan en versiebeheer, en het beoordelen van de modelkwaliteit;
- Alle modellen moeten worden geregistreerd in de WUR Model Gallery met volledige metadata. De metadata moeten periodiek (jaarlijks) worden bijgewerkt en modellen met een bepaalde kwaliteitsstatus kunnen, na goedkeuring, zichtbaar worden gemaakt buiten WUR;
- Supervisors moeten ervoor zorgen dat teamleden voldoende training hebben, de richtlijnen naleven en dat er een modelbeheerder binnen het team is;
- Modelbeheerders bieden eerste lijns-ondersteuning bij het naleven van de richtlijnen;
- De modelcoördinator ondersteunt de implementatie en verdere ontwikkeling van de richtlijnen en leidt de Wageningen Modelling Group;
- Modellen worden geclassificeerd op basis van impact en krijgen een kwaliteitsstatus (bijvoorbeeld zelfbeoordeling, Status A, Status AA) waarbij de frequentie van kwaliteitscontroles varieert op basis van de impactklasse van het model;
- Modelauditors zijn getrainde collega's die kwaliteitsbeoordelingen uitvoeren;
- De Wageningen Modelling Group evalueert de richtlijnen elke vier jaar en coördineert de ontwikkeling en het onderhoud van de bouwstenen;
- Modellen moeten veilig worden opgeslagen en versiebeheer moet worden toegepast, afhankelijk van de impactklasse;
- Modellen die ten grondslag liggen aan publicaties moeten minimaal 10 jaar worden bewaard; en
- De Dean of Research wijst een modelcoördinator aan om de naleving van de richtlijnen te monitoren en rapporteert aan het College van Bestuur.

4.3.2 Verdienmodellen

En andere terugkomend gesprekonderwerp in de gevoerde gesprekken betrof het verdienmodel voor zowel publieke als private aanbieders bij het aanbieden van (geïntegreerde) modeldiensten en het koppelen van rekenmodellen binnen digitale tweelingen. Op dit moment wordt al op diverse wijzen invulling gegeven aan het gebruik van rekenmodellen en digitale tweelingen, zoals:

- Dienstverlening op abonnementsbasis, waarbij aanbieders hun gebruikers toegang geven tot digitale tweelingen via een abonnementsmodel, waarbij regelmatige updates en ondersteuning zijn inbegrepen;
- Licentieverlening voor specifieke toepassingen van bepaalde modellen of functionaliteiten binnen een digitale tweeling;
- Het leveren van voorspellende analyses, beleids- en effectenrapportages op basis van geïntegreerde rekenmodellen, voor bijvoorbeeld verkeersstromen of milieueffecten, die gebruikers ondersteunen bij beleid, planning en besluitvorming.

Om rekenmodellen in de nabije toekomst meer modulair en interoperabel binnen digitale tweelingen toe te passen, zullen ook vragen over verdienmodellen beantwoord moeten worden, zoals:

- Wat is de optimale prijsstelling?

- Hoe kan de waarde van deze diensten effectief worden bepaald voor potentiële klanten?
- Hoe kunnen licentievoorwaarden worden opgesteld om zowel flexibiliteit voor de klant als bescherming van intellectueel eigendom te waarborgen?
- Welke rekenfunctionaliteiten zijn het meest waardevol voor verschillende gebruikersgroepen?
- Welke datasets zijn essentieel voor nauwkeurige voorspellingen?
- Hoe kan de nauwkeurigheid en betrouwbaarheid van voorspellende modellen worden gegarandeerd?

Het verkennen van deze verdienmodellen en het beantwoorden van de bijbehorende onderzoeksvragen kan bijdragen aan het ontwikkelen van duurzame en waardevolle diensten voor digitale tweelingen, waarbij zowel publieke als private partijen profiteren van de mogelijkheden die digitale tweelingen bieden.

4.4 Semantische interoperabiliteit

Bij semantische interoperabiliteit gaat het om een gedeelde taal spreken om ervoor te zorgen dat de betekenis van data consistent is binnen verschillende rekenmodellen. Semantische interoperabiliteit van rekenmodellen verwijst naar het vermogen van verschillende modellen en systemen om data uit te wisselen en te interpreteren met een gedeelde betekenis. Dit betekent dat de uitgewisselde data door alle betrokken systemen op dezelfde manier worden begrepen, wat essentieel is voor samenwerking tussen rekenmodellen en het daarmee genereren van consistente en betrouwbare resultaten. Rekenmodellen gebruiken dezelfde definities, standaarden en ontologieën voor hun data input, variabelen en data output. Dit voorkomt misverstanden die kunnen ontstaan door verschillen in terminologie of interpretatie. Bijvoorbeeld, als het ene model de term temperatuur gebruikt in graden Celsius en een ander in graden Fahrenheit, kan dit zonder semantische afstemming leiden tot inconsistente of foutieve resultaten. Het bereiken van semantische interoperabiliteit vereist het opstellen en implementeren van gemeenschappelijke standaarden en afspraken. Dit betekent:

- Het gebruik van uniforme terminologie door het afspreken van eenduidige termen en definities voorkomt misinterpretaties; en
- Het ontwikkelen van gestandaardiseerde datamodellen en ontologieën, zodat dat alle betrokken modellen dezelfde structuur en betekenis aan data toekennen.

Diverse vragen zijn van belang voor de beoordeling van semantische interoperabiliteit van rekenmodellen. Kan het model bijvoorbeeld verbinding maken met een ander model (ruimtelijke en temporele synchronisatie)? En worden de input- en outputvariabelen beschreven met behulp van een gemeenschappelijk vocabulaire?

Om semantische interoperabiliteit te bereiken zijn diverse aspecten van belang:

- Duidelijkheid en precisie in definities van parameters en variabelen (ontologie);
- Opname van gegevensitems in metadata, zoals schaal (ruimte en tijd), typische looptijd, limieten (bijv. bereik van kalibratiegegevens);
- Metagegevens en documentatie met betrekking tot interoperabiliteit;
- Compatibiliteit van de invoer- en uitvoervariabelen.

Met behulp van gevoeligheidsanalysen of robuustheidstests kan semantische interoperabiliteit tot op zekere hoogte getest worden. Een optie is bijvoorbeeld invoergegevens te vervangen door gegevens uit een andere bron die dezelfde variabelen en kenmerken beschrijven. Denk aan twee verschillende op satellietbeelden gebaseerde invoerbestanden die landbedekking beschrijven om te analyseren of een model daarmee tot vergelijkbare uitkomsten komt. Een dergelijke oefening heeft ook het voordeel dat het model niet wordt vastgelegd op één bepaalde bron.

Semantische interoperabiliteit is meer dan een technische exercitie omdat het raakt aan de kern van de rekenmodellen: welk doel hebben ze, hoe zijn bepaalde begrippen geïnterpreteerd en geconceptualiseerd, welke definities zijn daarbij toegepast, welke databronnen zijn daarvoor gekozen et cetera. Dergelijke keuzen kunnen discipline- of domeinspecifiek zijn wat uitwisseling bemoeilijkt, want de ene discipline zal de definitie van de andere moeten accepteren (of andersom). Als de uitgangspunten van modellen te ver uiteenlopen kan een directe koppeling pas mogelijk zijn als een van beide modellen zijn uitgangspunten (bijvoorbeeld inputdata, begripsdefinitie, aggregatiewijze) aanpast. In de gevoerde gesprekken is semantische interoperabiliteit indirect besproken als belangrijke randvoorwaarde voor samenwerkende modellen. Op dat onderwerp gaan we hieronder nader in.

Samenwerkende rekenmodellen

Bij het simuleren van veranderingen in de fysieke leefomgeving spelen vaak complexe interacties tussen verschillende sociaaleconomische en natuurlijke systemen, die vaak een eigen tijd en ruimteschaal hebben. Zo is klimaatverandering een belangrijke drijvende kracht in veel processen die op een veel langere tijdschaal en over veel grotere gebieden speelt dan de meeste sociaaleconomische veranderingen. In keuzen over, bijvoorbeeld, woningbouwlocaties is die tegenstelling duidelijk aanwezig. Aantrekkelijke locaties die gemeenten nu graag zouden willen ontwikkelen zijn op de langere termijn wellicht ongunstig vanuit bijvoorbeeld overstromingsrisico. Rekenmodellen die zowel het fysieke als sociaaleconomische domein willen beschrijven zullen die uiteenlopende ruimte en tijdschalen moeten combineren (Claassens et al., 2020). Een belangrijke vraag daarbij is dan hoe dergelijke modellen beter kunnen samenwerken? Deze vraag komt ook al snel aan de orde als het gaat over de interoperabiliteit van rekenmodellen. Modellen moeten allereerst worden ontworpen als modulaire componenten, zodat specifieke functionaliteiten kunnen worden vervangen of verbeterd zonder het hele systeem te verstoren. Door modellen op te delen in kleine, onafhankelijke modules die via bijvoorbeeld API's communiceren, wordt de samenwerking gemakkelijker.

Rekenmodellen werken doorgaans op verschillende schalen en resoluties (geografische en/of temporele schalen) en moeten hun outputs kunnen aanpassen aan de vereisten van andere, gekoppelde modellen. Dat betekent ook dat gestandaardiseerde terminologieën en dus semantische afstemming tussen modellen de verschillen in interpretatie tussen modellen verkleint. Elk model moet kunnen aangeven:

- Welke data is gebruikt (input);
- Welke transformaties of berekeningen zijn uitgevoerd;
- Welke resultaten zijn gegenereerd (output).

In de gesprekken werden verschillende randvoorwaarden en afspraken benoemd voor de samenwerking tussen modellen als het gaat de data input, berekeningen en data output. Zo dient de data, die wordt ingevoerd, te voldoen aan bepaalde kwaliteitsnormen, zoals nauwkeurigheid, volledigheid en actualiteit. Ook dient input en output data voor rekenmodellen vindbaar, toegankelijk, interoperabel en herbruikbaar zijn (duidelijk beschreven met metadata en documentatie). Hierbij gelden specifieke aspecten van het FAIR maken van rekenmodellen zoals hierna beschreven wordt.

Rekenmodellen moeten compatibele datadimensies hebben over bijvoorbeeld eenheden (Celsius vs. Fahrenheit), tijdsschalen (minuten vs. uren), of resoluties (meters vs. kilometers). Daar waar deze datadimensies conflicteren, dient een transformatie tussenlaag te worden ingezet om data te vertalen of transformeren. Elk model moet gedetailleerd gedocumenteerd zijn, inclusief een beschrijving van de functies van het model, de data input- en outputvereisten, en beperkingen van het model. Gebruikers moeten begrijpen wat de beperkingen van samenwerkende rekenmodellen zijn en dat rekenmodellen validatie vereisen voor het specifieke doel waarvoor ze worden ingezet. Als de beperkingen te groot zijn, bijvoorbeeld omdat het ene model een bepaald begrip heel anders

definieert, of op een heel andere ruimtelijke of tijdschaal weergeeft, kan het onmogelijk blijken om modellen te laten samenwerken. Interoperabiliteit is geen doel op zich, maar een streven om waar zinvol modellen gebruik te laten maken van elkaars sterke kanten. Naast de semantische interoperabiliteit voor input en output data is het daarbij van belang, dat rekenmodellen dus ook in hun beoogde functie, benadering en conceptualisatie op elkaar aansluiten als ze in dezelfde digitale tweeling gebruikt worden. Zeker als rekenmodellen meer moeten doen dan een estafette lopen met elkaar (data doorgeven), maar dit ook herhaaldelijk of interactief met elkaar moeten doen (output model A is input model B, output model B is input model A).

4.5 Technische interoperabiliteit

Technische interoperabiliteit omvat het gebruik van gestandaardiseerde technologieën en protocollen om de uitwisseling van data tussen verschillende rekenmodellen mogelijk te maken. Voorbeelden hiervan zijn API's (Application Programming Interfaces), webdiensten, en gestandaardiseerde bestandsindelingen zoals XML en JSON.

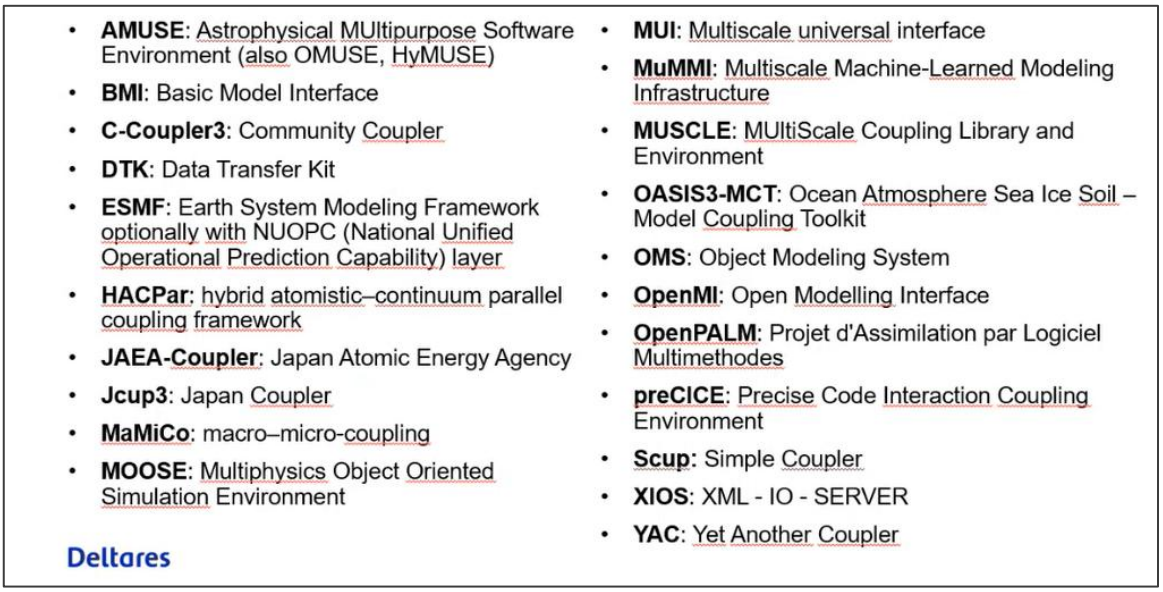
Als het gaat om technische interoperabiliteit van rekenmodellen en digitale tweelingen zijn diverse technische aspecten relevant om ervoor zorgen dat verschillende rekenmodellen naadloos samenwerken binnen een digitale tweeling. Dit omvat in ieder geval technische afstemming over de uitwisseling van data (harmoniseren van dataformaten voor input en output) en protocollen voor de communicatie tussen modellen onderling en eventueel ook hun toeleverende dataportalen. Rekenmodellen moeten dezelfde datastandaarden (dataformaten) hanteren om data in en uit te lezen, zoals GeoJSON, CityGML, HDF5, NetCDF of cloud-native formaten zoals protobuf. Voor de communicatie tussen de modellen worden open protocollen en gestandaardiseerde API's (Application Programming Interfaces) toegepast, zoals RESTful API's of gestandaardiseerde OGC APIs, zoals OGC API Features, 3D Tiles en OGC SensorThings API voor IoT-data. Technische interoperabiliteit zorgt er ook voor dat de productiviteit wordt verhoogd door een verscheidenheid aan modelleringstaken te vereenvoudigen. Het gaat hierbij om taken als:

- Het draaien van operationele rekenmodellen in meerdere verschillende technologische frameworks en/of op meerdere technologische platforms;
- Het controleren van parameterwaarden en gedrag zonder opnieuw code te compileren;
- Het ophalen van informatie over de huidige status van een model (inclusief statusvariabelen);
- Het onderbreken en voortzetten van modeluitvoering;
- Het aanpassen van modelvariabelen en/of controleparameters tijdens een modelrun, bijvoorbeeld ter ondersteuning van data-assimilatie.
- Het koppelen van rekenmodellen (de modellentrein) via gestandaardiseerde workflows;
- Het modulair aanbieden van rekenmodellen met Notebooks en container technologie;
- Het snel kunnen rekenen op GPU's.

Tijdens de gevoerde gesprekken zijn diverse aspecten van technische interoperabiliteit aan de orde gekomen. In de onderstaande paragrafen gaan we nader in op enkele belangrijke voorwaarden en voor technische interoperabiliteit en ontwikkelingen die dit mogelijk maken.

4.5.1 Standaarden voor technische operabiliteit van rekenmodellen

Interoperabiliteitsstandaarden zijn bedoeld om rekenmodellen, ontwikkeld door een diverse (wetenschappelijke) gemeenschap, te integreren in modelleringsomgevingen met meerdere modelcomponenten. Gestandaardiseerde koppelvlakken, API's en gemeenschappelijke ontologieën, zijn essentiële factoren voor het bereiken van technische interoperabiliteit. In de gesprekken met de experts zijn verschillende initiatieven genoemd, die wereldwijd hebben gewerkt aan gestandaardiseerde koppelaars en interoperabiliteitsstandaarden, zodat rekenmodellen die worden toegepast in de fysieke leefomgeving gemakkelijker met elkaar kunnen worden verbonden en dus koppelbaar worden (zie Figuur 16).



Figuur 16 – Overzicht wereldwijde initiatieven voor het koppelen van rekenmodellen (vrij naar Jagers, 2010).

Bij drie van deze initiatieven zijn Nederlandse partijen actief betrokken en deze worden hieronder kort toegelicht[74]. Open Modelling Interface (OpenMI). Basic Modelling Interface (BMI), en OGC API-Processes zijn standaarden, die tot doel hebben de interoperabiliteit en toegankelijkheid van modellen en processen in verschillende wetenschappelijke en technische domeinen te verbeteren. Ze hebben verschillende benaderingen en doeleinden, maar vergemakkelijken alle drie de koppeling en uitwisseling van modellen tussen verschillende systemen en platforms. Hieronder bespreken en vergelijken we de drie initiatieven waarmee in verschillende Nederlandse gebruikersomgevingen ervaringen zijn opgedaan.

Open Modelling Interface

De Open Modelling Interface (OpenMI) is ontwikkeld om de real-time uitwisseling van data tussen verschillende modellen tijdens hun uitvoering mogelijk te maken. Het is speciaal ontworpen voor het koppelen van modellen die gegevens moeten uitwisselen terwijl ze actief zijn. OpenMI wordt voornamelijk gebruikt in hydrologische en milieumodellering en dient om modellen op verschillende platforms en domeinen op een tijdgesynchroniseerde manier te koppelen. Rekenmodellen zijn direct aan elkaar gekoppeld en kunnen in realtime gegevens uitwisselen. Dit betekent dat de modellen samenwerken binnen een gemeenschappelijk uitvoeringskader en bij elke tijdstap waarden uitwisselen. Synchrone communicatie tussen modellen is een belangrijk kenmerk van OpenMI en maakt data-uitwisseling tijdens runtime tussen modellen mogelijk, wat betekent dat het real-time feedback tussen systemen kan verwerken.

Deze nauwe, synchrone, realtime koppeling maakt de OpenMI-interface relatief complex in vergelijking met BMI (zie onder). OpenMI werd ontwikkeld om modellen van verschillende partijen te koppelen zonder dat deze open source hoeven te zijn. Hoewel de standaard een formele goedkeuring kreeg als OGC-standaard, wordt deze tegenwoordig niet meer gebruikt, en BMI heeft deze rol deels overgenomen, met een focus op toegankelijkheid en platformonafhankelijkheid. Een belangrijk reden daarvoor is het omgaan met technische interoperabiliteit tussen rekenmodellen,

[74] Ook bij AMUSE (Sterrenwacht Leiden) en MUSCLE (UvA) zijn Nederlandse partijen betrokken. Wel zijn dit initiatieven met een (nog) kleine gebruikersgroep, en daarmee misschien minder relevant voor de doelgroep van onderhavig rapport. Voor meer informatie over deze initiatieven: https://research-software-directory.org/software/amuse en https://research-software-directory.org/software/muscle3.

die op verschillende platforms draaien, zoals Windows en Linux. Het is van belang voor zowel kleine als grootschalige rekenmodellen, dat standaarden breed inzetbaar zijn en ook werken met supercomputers.

Basic Model Interface

De Basic Model Interface (BMI) is een eenvoudigere, lichtgewicht interface voor modelontwikkelaars. De focus ligt op het toegankelijker maken van modellen door een standaard manier te bieden om te communiceren met modelinvoer, -uitvoer en -toestanden, zonder dat er realtime interactie nodig is. BMI wordt gebruikt om modellen toegankelijker te maken en gemakkelijker te integreren in grotere workflows. Het biedt een programmatische interface voor interactie met modellen, waardoor hergebruik in verschillende contexten mogelijk is (bijvoorbeeld in Python-scripts of opdrachtregelinterfaces). De Basic Model Interface (BMI) is een initiatief ontwikkeld door de Community Surface Dynamics Modeling System, een internationale gemeenschap die werkt aan de interoperabiliteit tussen verschillende computermodellen in de context van aardwetenschappen, zoals geomorfologie, hydrologie, en kustdynamica.

BMI richt zich op het bieden van een programmatische interface voor een enkel model. Het biedt niet inherent de infrastructuur voor model-naar-model-communicatie, maar biedt een standaard manier om met het model te communiceren via functie-aanroepen (model statussen ophalen/instellen, modelstappen uitvoeren). BMI heeft geen directe modelkoppeling zoals OpenMI, maar modellen kunnen worden ingebed in grotere workflows. Data-uitwisseling is mogelijk, maar niet in real-time of tussen meerdere modellen. Eenvoudige get/set-interface voor inputs, outputs en tijdstappen. Dit maakt BMI gemakkelijker toe te passen voor modelbouwers die geen real-time interactie nodig hebben. In plaats daarvan biedt het een standaardmanier voor een enkel model om zijn variabelen bloot te leggen, wat het geschikter maakt voor integratie in workflows zonder complexe synchronisatie. BMI wordt toegepast in projecten, zoals eWaterCycle (Hut *et. al.*, 2022) en MODFLOW (Hughes *et. al.*, 2022) om modellen toegankelijker en herbruikbaarder te maken in verschillende contexten, zoals de water- en milieumodelleringsgemeenschap. In de hydrologie wordt het onder meer toegepast voor het koppelen van verschillende modellen gerelateerd aan waterstroming en transport van verontreinigende stoffen (zie kader).

Toepassing Basic Model Interface - Deltares

BMI wordt binnen Deltares gebruikt bij het uitwisselen van data tussen hydrologische modellen. Er wordt gewerkt aan de integratie van deze interface in meerdere projecten, waaronder hydrologische toepassingen voor stormmodellering en stedelijke waterbeheer. Deltares werkt internationaal samen aan BMI met de United States Geological Survey (USGS) en de National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) om de interface te kunnen inzetten bij grootschalige nationale modellen (Hughes *et. al.*, 2022). Sinds eind 2017 werkt Deltares samen met de USGS aan de MODFLOW-broncode. Deltares heeft van de USGS de opdracht gekregen om de open-source code van MODFLOW 6 te parallelliseren. De experimenten met parallellisatie laten zien dat aanzienlijke versnellingen in de rekentijd kunnen worden bereikt en dat de MODFLOW 6-berekeningskern in principe geschikt is voor zeer grote grondwatermodellen met hoge resolutie. Een ander voorbeeld van samenwerking is de implementatie van BMI in de modelcode van MODFLOW 6 om koppeling aan andere modellen en andere modelleringsdomeinen mogelijk te maken. De BMI-koppeling is met succes toegepast op het model voor de onverzadigde zone voor Nederland, dat deel uitmaakt van het Nederlands Hydrologische Instrumentarium (MODFlow 6)[75].

OGC API-Processes

OGC API-Processes is een jonge standaard van het Open Geospatial Consortium (OGC) en is de opvolger van de Web Processing Service (OGC WPS) standaard. Het wordt voornamelijk gebruikt in

[75] https://oss.deltares.nl/web/imod/-/new-modflow6-api-deltares-usgs

het geo-informatie domein voor het uitvoeren van geoprocessingtaken en -modellen als webservices en wint aan populariteit vanwege zijn flexibiliteit in cloudomgevingen en gedistribueerde systemen (zie kader). OGC API-Processes is een webgebaseerde RESTful-standaard die is ontworpen om geo-informatie processen beschikbaar te stellen op het web. Het primaire doel is om op afstand toegang te bieden tot verwerkingstaken, of het nu gaat om eenvoudige of complexe rekenmodellen, zonder dat de modellen lokaal hoeven te worden geïnstalleerd of uitgevoerd. Het wordt gebruikt om een breed scala aan GIS-gebaseerde verwerkingstaken en rekenmodellen en toegankelijk te maken via het web. OGC API–Processes ondersteunt zowel synchrone als asynchrone communicatie, waardoor het geschikt is voor zowel real-time als batchverwerking.

Deze API-standaard maakt gebruik van HTTP-gebaseerde communicatie om te interacteren met rekenmodellen. Gebruikers doen verzoeken via het netwerk aan een server die de modellen of processen uitvoert en de resultaten retourneert via web-services. Deze standaard kan overweg met verschillende gegevensformaten (bijv. JSON, XML) en ondersteunt interactie met externe databronnen. Dit maakt data-uitwisseling via het web mogelijk, waardoor het flexibel is voor grootschalige of gedistribueerde systemen. De webgebaseerde, RESTful-interface is relatief eenvoudig te gebruiken voor een ontwikkelaar die bekend is met HTTP- en REST-API's. Deze aanpak is zeer geschikt voor moderne web- en cloudgebaseerde systemen, waardoor externe toegang tot modellen en processen mogelijk is zonder lokale installatie.

Praktijkvoorbeeld – Testbed OGC API-Processes

In dit praktijkvoorbeeld is een testbed[76] uitgevoerd van het gebruik van OGC API-Processes om enkele rekenmodellen in een digitale tweeling toegankelijk te maken via een gestandaardiseerde API. In dit voorbeeld is een digitale tweeling opgezet voor het simuleren van stedelijke overstromingsscenario's bij hevige regenbuien. Het concept ondersteunt beleidsvorming door eenvoudig schaalbare en herbruikbare rekenmodellen aan te bieden, die zowel in de gemeenten Almere en Rotterdam zijn gedemonstreerd. OGC API Processes wordt gebruikt om rekenmodellen, zoals hydrologische modellen die wateroverlast simuleren of tijdreeksanalyses visualiseren) toegankelijk te maken als diensten binnen de digitale tweeling. In de demonstratie voor de gemeenten Almere en Rotterdam zijn OGC API-Records (voor de catalogus functie) en OGC API-Processes (voor de rekenmodellen) ingezet om simulaties te draaien voor wateroverlast bij hevige buien. Rekenmodules worden opgeroepen om wateroverlast en afvoerproblematiek te modelleren. Hittestress simulaties zijn geïntegreerd via OGC API-Processes om stedelijke warmte-effecten te analyseren.
De rekentools worden als afzonderlijke bouwblokken aangeboden, waardoor ze eenvoudig kunnen worden hergebruikt in verschillende toepassingen. De API's worden gepositioneerd als plug-and-play oplossingen, waarbij gebruikers rekentools naadloos kunnen inzetten in een ecosysteem van digitale tweelingen. De API's bieden zowel een machine-interface (b.v. JSON) als een mensvriendelijke interface (b.v. HTML), zodat ze toegankelijk zijn voor diverse gebruikersgroepen.

Het testbed is uitgevoerd als samenwerking van enkele bedrijven (Future Insight, Tygron, Nelen Schuurmans, GeoCat, 52North en Imagem), de gemeenten Almere en Rotterdam en Geonovum.

4.5.2 Workflowmanagement voor rekenmodellen

Voor het bevorderen van samenwerking en interoperabiliteit van rekenmodellen in digitale tweelingen zijn workflows tussen rekenmodellen nodig (European Commision, 2023; Grübel *et al.*, 2023). Dat is nodig om rekenmodellen, data en visualisaties binnen een digitale tweeling te integreren en te beheren. Workflowmanagement voor rekenmodellen zorgt voor de verbinding van rekenmodellen en hun datastromen via gestandaardiseerde interfaces (zoals API's). Deze

[76] https://www.geonovum.nl/themas/digital-twins

gestandaardiseerde interfaces maken het mogelijk om workflows op te zetten tussen rekenmodellen.

Workflowmanagement tools zorgen ervoor, dat modellen en data naadloos met elkaar communiceren. Onder workflowbeheer valt ook het coördineren van modelinteracties en de procesuitvoering. Verschillende technologieën worden daarbij ingezet, zoals workflowmanagement-tools en containerisatie technologie (zoals Docker). Workflowmanagementtools zoals Apache Airflow en Kepler coördineren de volgorde van modeluitvoering, datatransformaties en foutafhandeling (ook wel orkestratie genoemd). Workflows zoals OGC API Processes[77] kunnen daarbij eenvoudig worden aangepast om nieuwe rekenmodellen of datastromen toe te voegen.

Open Digital Twin Platform (ODTP)

Wageningen University & Research werkt mee aan het Open Digital Twin Platform (ODTP)[78]. Dit open-source framework faciliteert de integratie en samenwerking van rekenmodellen binnen digitale tweelingen. ODTP maakt gebruik van gestandaardiseerde interfaces en protocollen, waardoor verschillende rekenmodellen effectief kunnen samenwerken binnen een digitale tweeling. Door een modulaire architectuur kunnen gebruikers eenvoudig nieuwe componenten toevoegen of bestaande componenten vervangen, wat flexibiliteit en schaalbaarheid bevordert. Het platform biedt functionaliteiten voor het waarborgen van de reproduceerbaarheid van workflows en het traceren van datastromen. De belangrijkste componenten van ODTP zijn:

1. Orchestrator: de kernapplicatie die de uitvoering van workflows beheert;
2. Componenten: tools die zijn aangepast om compatibel te zijn met ODTP, zoals simulatie- en analysetools;
3. Workflows: combinaties van componenten in specifieke sequenties om complexe processen te modelleren en te simuleren;
4. Zoo: Een verzameling van componenten die beschikbaar zijn voor gebruik binnen het platform.

Een prototype-implementatie van ODTP is ontwikkeld op basis van het agent-gebaseerde simulatie-instrument MATSim en de gerelateerde pipeline eqasim voor grootschalige simulaties. De broncode en documentatie van ODTP zijn beschikbaar op GitHub waar gebruikers de tools kunnen verkennen en bijdragen aan de verdere ontwikkeling van het platform. Door deze infrastructuur te bieden, ondersteunt ODTP effectief workflowmanagement en samenwerking tussen rekenmodellen in digitale tweelingen, wat leidt tot verbeterde integratie, flexibiliteit en reproduceerbaarheid in complexe simulatie- en modelleringstoepassingen.

4.5.3 Groeiende datastromen en schaalbare architecturen

In de gevoerde gesprekken komt ook veelvuldig de gehanteerde technologie ter sprake die nodig is om verschillende rekenmodellen samen te laten werken zodat ze elkaars functionaliteit aanvullen voor complexe taakuitvoering. Specifieke software verbindt rekenmodellen die van verschillende technologieën gebruikmaken.

In de wereld van digitale tweelingen neemt de hoeveelheid beschikbare data razendsnel toe. Sensoren, rekenmodellen en gebruikersinteracties in digitale tweelingen leveren continu nieuwe data op. Deze continue datastroom biedt kansen voor betere analyses en besluitvorming, maar stelt ook steeds hogere eisen aan de technische infrastructuur en de te leveren performance. Met meer data groeit niet alleen de opslagbehoefte, maar vooral de behoefte om deze data snel, betrouwbaar en op de juiste manier te verwerken. De digitale tweeling moet immers razendsnel kunnen reageren op veranderingen en gebruikersinteracties, bijvoorbeeld voor het simuleren van verkeersstromen of het bereken van de luchtkwaliteit of de geluidsbelasting na een maatregel of ingreep in het verkeerssysteem. Daarbij gaat het vaak niet meer om miljoenen, maar om miljarden

[77] http://www.opengis.net/doc/is/ogcapi-processes-3/0.0

[78] https://csfm.ethz.ch/en/research/integrative-projects/digital-twin/odtp.html

berekeningen. Dit vraagt om een schaalbare architectuur; een systeem dat makkelijk kan meegroeien met de toenemende datavolumes en complexiteit van berekeningen.

Bestaande standaarden en methodes worden regelmatig te beperkt of te traag bevonden voor moderne cloudomgevingen. Veel modellen zijn ooit ontworpen voor stand-alone toepassingen, en blijken moeilijk overdraagbaar naar flexibele cloudplatforms. Daarnaast worden architecturen vaak te zwaar of te rigide als ze direct volledig gestandaardiseerd worden. Dit belemmert innovatie en samenwerking. Wat vandaag werkt voor één rekenmodel, moet morgen ook kunnen werken voor tientallen modellen die gelijktijdig draaien. Denk hierbij aan functionaliteiten als:

- Real-time verwerking van grote datastromen;
- Automatisch opschalen van rekenkracht via de cloud;
- Beheer van modelketens waarbij de output van het ene model input is voor het volgende;
- Gebruik van container technologie (zoals Docker) om rekenmodellen flexibel, snel en op verschillende systemen te kunnen draaien.

In plaats van alles vooraf te standaardiseren, is ook een praktische aanpak nodig. Dit vraagt om een holistische kijk op performance: niet alleen snelle hardware, maar ook slimme software en flexibele infrastructuur. Starten met kleine stukjes interoperabiliteit tussen modellen en systemen, en die successen vervolgens uitbreiden. Hierbij spelen bijvoorbeeld pub/sub-mechanismen, notebooks, container technologie, Graphics Processing Units (GPU's) en schaalbare cloudtechnologie een belangrijke rol. In volgende paragrafen gaan dieper op deze technologieën in. Alleen met slimme, schaalbare architecturen, die meebewegen met de groeiende datastromen en flexibel omgaan met samenwerking tussen rekenmodellen, kunnen we blijven profiteren van de kracht van digitale simulatie. Dit vereist een balans tussen pragmatiek en visie: klein beginnen, maar bouwen met het oog op de toekomst door ook te standaardiseren.

. GPU's maken het uitvoeren van extreem data-intensieve berekeningen mogelijk, maar de behoefte aan High Performance Computing (HPC) betekent dat ook de rest van de infrastructuur moet kunnen meegroeien. Dit vergt onder meer:

- Veel (server)geheugen om met terabytes aan datasets te kunnen werken;
- API-koppelingen die efficiënt genoeg zijn om grote hoeveelheden data te kunnen verwerken en te delen met andere systemen;
- Snelle en soepele datastromen naar client-visualisaties. Trage streaming of bottlenecks in de communicatie kunnen immers de hele ervaring ondermijnen.

In de praktijk wordt deze keten vaak onderschat. Een GPU alleen is niet genoeg. De prestaties van zo'n systeem hangen af van het samenspel tussen GPU's, CPU's, geheugen, dataverbindingen, algoritmes en het ontwerp van de software zelf.

4.5.4 Publish/subscribe technologie

Waarom wordt het publish/subscribe mechanisme (ook wel pub/sub) vaak in digitale tweelingen gebruikt? Dat heeft te maken met het doorrekenen van bepaalde scenario's en effecten van ingrepen, die in een digitale tweeling mogelijk zijn. De digitale tweeling gebruikt data, rekenmodellen en visualisaties om situaties in de echte wereld te simuleren. In een digitale tweeling kun je bijvoorbeeld zien wat er gebeurt als je een straat afsluit, een nieuw verkeersplan invoert (een 30 km zone) of extra geluidsschermen plaatst. Om dit allemaal soepel te laten verlopen, is goede communicatie tussen de verschillende onderdelen of bouwstenen van een digitale tweeling essentieel. Hier komt het publish/subscribe mechanisme in beeld (European Commission, 2023). Dit mechanisme werkt als een soort slimme bezorger van berichten tussen de bouwstenen:

- De publisher stuurt berichten over veranderingen of gebeurtenissen, zoals scenario's of te plegen ingrepen, bijvoorbeeld 'de weg is afgesloten';
- De subscribers zijn de bouwstenen of onderdelen van de digitale tweeling, die automatisch deze berichten ontvangen, bijvoorbeeld een verkeersmodel dat wil weten wanneer wegen

zijn afgesloten en het geluidsmodel kan daarop de geluidseffecten van de wegafsluiting berekenen;
- Tussen de publisher en subscribers zit een boodschappenverdeler (‘message broker’), die zorgt dat elk bericht bij de juiste subscribers terechtkomt, zonder dat de afzender en ontvanger elkaar hoeven te kennen.

In een digitale tweeling veranderen gegevens voortdurend. Denk aan de bovengenoemde aangepaste verkeersstromen, nieuwe geluids- of luchtkwaliteitsberekeningen die een beleidsmaker wil zien als hij een drukke straat afsluit in een digitale tweeling. Zodra hij deze wijziging invoert via een interface:

1. Worden wijzigingen gepubliceerd en automatisch gedeeld met alle betrokken rekenmodellen op het pub/sub-systeem;
2. Ontvangen de verschillende rekenmodellen, zoals verkeers-, milieu- en geluidsmodellen automatisch berichten van wijzigingen en rekenen zij de impact uit;
3. Worden de resultaten automatisch gevisualiseerd in de digitale tweeling.

Het toepassen van het publish/subscribe mechanisme houdt eveneens de rekenmodellen in een digitale tweeling synchroon, zodat alle onderdelen met dezelfde informatie werken. Kortom, pub/sub is een mechanisme van een digitale tweeling dat zorgt dat alle rekenmodellen op het juiste moment de juiste informatie krijgen. Zonder pub/sub zou elk onderdeel handmatig informatie moeten ophalen of onderling verbindingen maken. Dat is complexer, foutgevoeliger en trager.

4.5.5 Notebooks en Container technologie

Notebooks zijn interactieve, webgebaseerde tools waarmee gebruikers code, tekst, visualisaties en uitvoer in één document kunnen combineren. Bekende voorbeelden zijn Jupyter Notebooks, Google Colab en Deepnote. Deze tools worden veel gebruikt in wetenschappelijke computing en data science. Onderzoekers kunnen de rekenmodellen uitvoeren en direct de resultaten bekijken en aanpassen in interactieve workflows. Wetenschappelijke onderzoekers en modelleurs gebruiken Notebooks om rekenmodellen in te stellen, te kalibreren en uit te voeren. Deze tools bevatten interactieve cellen voor invoerparameters, simulatie-uitvoer en visualisaties in real-time grafieken en kaarten van de modeluitvoer. Notebooks zijn relatief gebruiksvriendelijk, omdat onderzoekers complexe modellen kunnen uitvoeren zonder diepgaande kennis van command-line tools of programmeeromgevingen. Notebooks combineren code met uitleg en resultaten wat transparantie en reproduceerbaarheid bevordert en ondersteunen meerdere programmeertalen (zoals Python, R en Julia) die vaak worden gebruikt in de wetenschappelijke kringen van modelleurs.

Containerisatie is een technologie, die softwaretoepassingen en hun afhankelijkheden verpakt in een geïsoleerde omgeving, een container, zodat ze consistent kunnen draaien op verschillende computersystemen. Containers zijn lichtgewicht, zelfvoorzienende omgevingen, die alles bevatten wat een applicatie nodig heeft om te draaien, zoals de (runtime) code van de applicatie, de bibliotheken en afhankelijkheden en eventuele bestandssystemen en configuraties. Elk rekenmodel wordt verpakt in een container, die alle noodzakelijke software en bibliotheken bevat. Dit elimineert afhankelijkheidsproblemen. Containers zijn licht (gebruiken minder computing resources), starten sneller op en zijn platformonafhankelijk (doen hetzelfde, ongeacht het onderliggende systeem op een laptop, server, cloudomgeving of HPC cluster). Docker is een veelgebruikte tool voor het maken, distribueren en beheren van containers. In combinatie met Kubernetes zorgt het voor een platform om containers op schaal te beheren in productieomgevingen. Containerisatie is ideaal voor moderne softwareontwikkeling en wetenschappelijke toepassingen zoals modellering en simulaties.

Door Notebooks en Containers te combineren kan elke simulatie volledig worden gereproduceerd. Andere onderzoekers kunnen eenvoudig dezelfde Container en Notebook gebruiken om resultaten te valideren of te verbeteren. In enkele Nederlandse wetenschappelijke projecten zijn rekenmodellen in digital tweelingen via Notebooks en Containers bij elkaar gebracht, zoals in de LTER-LIFE

infrastructuur voor ecologische modellering en het Destiné Adaptation Modelling Framework op het gebied van klimaat adaptatie (zie kader).

Toepassing – LTER-LIFE onderzoeksinfrastructuur

LTER-LIFE[79] is een grootschalige Nederlandse onderzoeksinfrastructuur in wording. Het doel is een state-of-the-art infrastructuur te bieden om te bestuderen en te voorspellen hoe veranderingen in het klimaat en andere door de mens veroorzaakte druk ecosystemen en biodiversiteit beïnvloeden. De LTER-LIFE aanpak is één van “digitale tweelingen van hele ecosystemen”. Een LTER-LIFE digitale tweeling is "een digitale replica van een levende of niet-levende fysieke entiteit". Het bouwen van digitale tweelingen van ecosystemen is pas sinds kort mogelijk geworden door het ontwikkelen en beschikbaar stellen van de voor dit domein benodigde grote hoeveelheden data, kunstmatige intelligentie, geavanceerde computerinfrastructuur en de FAIR-principes.

Een digitale tweeling van een ecosysteem biedt hulpmiddelen om data over abiotische factoren (b.v. nutriëntendepositie, temperatuur, droogte), biotische factoren (b.v. data over het voorkomen op lange termijn van dieren en planten) en menselijke activiteiten (b.v. toerisme, landbouw, visserij) te integreren. Het biedt diagnostische data-gestuurde en dynamische, proces-gebaseerde rekenmodellen op één logische plek waardoor de nodige interoperabiliteit, schaalbaarheid, opslag en verwerkingscapaciteit worden gewaarborgd. LTER-LIFE brengt datawetenschappers, informatici en ecologen samen in onderzoeksgemeenschappen rond ecosystemen. Om digitale tweelingen van volledige ecosystemen te produceren, zal LTER-LIFE een infrastructuur ontwikkelen, die een virtuele onderzoeksomgeving en diensten omvat, catalogi en repositories die FAIR-gegevens, modellen en softwaretools zoals Notebooks en Containers bevatten.

Toepassing – Destiné Adaptation Modelling Framework

Vanuit o.a. Deltares wordt in Europa gewerkt aan het Adaptation Modelling Framework (AMF)[80]. AMF is een initiatief binnen het Destination Earth programma, gericht op het ondersteunen van de EU klimaatadaptatiestrategie. Het doel is om besluitvormers gemakkelijker toegang te bieden tot geavanceerde modellen voor het analyseren van de gevaren en gevolgen van klimaatverandering. Hoewel er geavanceerde open-source modellen bestaan voor bijvoorbeeld overstromingsrisico zijn deze vaak complex en vereisen ze specifieke technische expertise.

Binnen het AMF is een digitale tweeling voor overstromingsrisicobeheer ontwikkeld, die processen automatiseert en niet-technische gebruikers in staat stelt om verschillende scenario's te evalueren. AMF heeft de volgende basiskenmerken:

1. Het maakt gebruik van een modulaire ontwerpbenadering, wat samenwerking, innovatie en kennisuitwisseling bevordert. Dit zorgt ervoor dat digitale tweelingen continu evolueren om in te spelen op opkomende behoeften en de nieuwste wetenschappelijke ontwikkelingen te integreren;
2. Door automatisering van modelvoorbereiding en workflows maakt het AMF complexe modellen toegankelijk voor een breder scala aan gebruikers, wat essentieel is voor effectieve besluitvorming in digitale tweelingen;
3. Het gebruik van containerisatie (zoals Docker) binnen het AMF vergemakkelijkt de schaalbaarheid en reproduceerbaarheid van modellen, wat cruciaal is voor betrouwbare en consistente resultaten in digitale tweelingen.

Door deze benaderingen te integreren kunnen digitale tweelingen effectiever worden ingezet voor adaptatieplanning en risicobeheer bij overstromingen met verbeterde toegankelijkheid en betrouwbaarheid van rekenmodellen.

[79] https://lter-life.nl/en

[80] https://destination-earth.eu/use-cases/adaptation-modelling-framework/

4.5.6 Graphics Processing Units

Berekeningen in digitale tweelingen gebaseerd op Graphics Processing Units (GPU) zijn essentieel vanwege de noodzaak om grote hoeveelheden data snel en efficiënt te verwerken (Lohman et al., 2023). GPU's zijn ontworpen voor parallelle verwerking en een hoge rekencapaciteit. Ze bevatten duizenden kleine kernen, die tegelijkertijd rekenbewerkingen kunnen uitvoeren, wat veel sneller is dan traditionele CPU's bij taken zoals matrixbewerkingen en simulaties. GPU's splitsen grote datasets in kleinere delen en voeren dezelfde berekening op elk deel tegelijkertijd uit. De data worden overgedragen van het CPU-geheugen naar het GPU-geheugen, waar de berekeningen plaatsvinden. Specifieke programmeertalen, zoals CUDA (voor NVIDIA-GPU's) en OpenCL maken dit mogelijk en worden gebruikt om algoritmen voor GPU-verwerking te schrijven. Dit is bijzonder geschikt voor simulaties met veel herhalende berekeningen, zoals verkeersmodellen, stromingsmodellen of ray tracing voor realistische visualisatie. Moderne digitale tweelingen optimaliseren deze overdracht om vertraging te minimaliseren.

Inzet van GPU's is bijvoorbeeld zinvol bij het doorrekenen van real-time of near-real-time simulaties en dynamische scenario's voor bijvoorbeeld waterstromingsdynamica (hydrologische modellering), verkeersmodellen en crowdsimulaties. In Nederland zijn enkele digital tweeling systemen ontwikkeld, die rekenen op GPU's, zoals Tygron Platform, Urban Strategy en SIMCrowds (zie kaders).

Toepassing - Tygron Platform

Tygron implementeert GPU-gebaseerde HPC & AI rekenmodellen[81] voor het uitvoeren van complexe stedelijke en milieu-simulaties, zoals wateroverlast, hittestress, objectherkenning, geluid en verkeersstromen. Dankzij de GPU is Tygron in staat om real-time simulaties uit te voeren op uitgebreide GIS-datasets, waaronder 3D-stadsmodellen en bijvoorbeeld de impact van neerslag op stedelijke gebieden te berekenen, zowel vóór als na het implementeren van een klimaatadaptieve maatregel. Tevens kan dit in hoge resolutie en is het daardoor mogelijk om het rekenmodel direct op te bouwen uit OGC GIS-data die via verschillende API-koppelingen worden aangeleverd. Tygron beheert een compute cloud omgeving waarop gebruikers inloggen (of mee koppelen) en verschillende simulaties parallel kunnen uitvoeren. De resultaten worden in real-time gepresenteerd, waardoor gebruikers interactief kunnen plannen en analyseren met het platform. Vervolgens visualiseert het de uitkomsten via verschillende client (web) applicaties, waaronder een interactieve 3D-omgeving.

Toepassing –Urban Strategy

Urban Strategy[82] van Scenexus, een spin-off van TNO, gebruikt eveneens GPU-technologie om complexe simulaties van mobiliteit stedelijke gebieden te versnellen, zoals verkeersstromen, luchtkwaliteit, en geluidshinder. Door het gebruik van GPU's kan Urban Strategy geïntegreerde analyses met gebruik van aan elkaar gekoppelde rekenmodellen uitvoeren van meerdere stedelijke systemen binnen één platform (Lohman *et al.*, 2023). Het platform verdeelt rekenintensieve taken (zoals luchtverplaatsing en verkeersbewegingen) over GPU-kernen, wat de rekensnelheid drastisch verhoogt. Urban Strategy helpt bij besluitvorming door stedenbouwkundige en mobiliteitsscenario's te simuleren, bijvoorbeeld de impact van verkeersmaatregelen op uitstoot en geluidshinder of de invoering van 30km zones of zero emission zones in grote steden. Doordat Urban Strategy grote

[81] https://www.tygron.com/en/gpu/

[82] https://www.scenexus.com/urban-strategy/

datasets kan verwerken zonder vertraging, kunnen de gebruikers onmiddellijk feedback krijgen op hun scenario's en simulaties

Toepassing – SIMCrowds

SIMCrowds[83] is ontwikkeld door UCrowds als spin-off van de Universiteit van Utrecht en maakt eveneens intensief gebruik van op GPU-gebaseerde berekeningen. Deze zijn cruciaal voor crowd-simulaties, omdat ze de hoge rekencapaciteit bieden die nodig is om in real-time het gedrag van grote aantallen individuele agents (actoren met hun eigen gedrag zoals mensen in voertuigen, enz.) simuleren. Crowdsimulaties omvatten duizenden tot miljoenen agents, waarbij elk agent dynamisch reageert op de omgeving en andere agents. Dit vereist een enorme hoeveelheid rekenkracht voor parallelle berekeningen zoals routeplanning en botsingdetectie. Elke agent in een simulatie voert grotendeels onafhankelijke berekeningen uit, zoals het bepalen van een optimale route, het aanpassen van snelheid bij noodsituaties of veranderingen in de infrastructuur. De GPU verwerkt continue updates van de simulatieomgeving, zoals veranderende obstakels of aanpassingen in de doelen van agents. Door GPU's in te zetten voor botsingsdetectie, berekent SIMCrowd in fracties van seconden of agents moeten stoppen, versnellen, of hun route aanpassen om botsingen te vermijden.

Specifieke algoritmen, zoals boid-algoritmen voor zwermgedrag of crowd dynamics-modellen (bijvoorbeeld Helbing's Social Force Model), worden geoptimaliseerd voor GPU's met behulp van programmeertalen zoals CUDA of OpenCL. GPU's ondersteunen niet alleen de berekeningen, maar ook de rendering (bijv. WebAssemby) van de simulatie in een 3D-omgeving, zodat gebruikers direct kunnen zien hoe een menigte zich beweegt en reageert. Dit maakt crowdsimulaties ideaal voor GPU's, die veel rekenkernen bevatten om dergelijke berekeningen parallel uit te voeren. In toepassingen zoals evacuatieplanning of evenementenbeheer is real-time simulatie essentieel omdat tijdkritische beslissingen worden genomen. GPU's kunnen deze snelheid leveren.

4.5.7 Cybersecurity

Naarmate digitale tweelingen complexer en toegankelijker worden en gekoppeld zijn aan steeds meer rekenmodellen, data(bronnen) en clouddiensten neemt ook het risico op digitale aanvallen fors toe. Cybersecurity is dan ook geen bijzaak meer, maar een harde randvoorwaarde voor het verantwoord gebruik van digitale tweelingen. Je kunt nog zo'n krachtig rekenmodel hebben, met gestroomlijnde API-koppelingen en hoogwaardige data, indien het systeem onveilig is, ben je alles kwijt:

- Als data worden gestolen of verwijderd bij een aanval, verlies je het fundament van je simulaties;
- Als de uptime instabiel is door DDoS-aanvallen of serverinbraken, kun je als gebruiker niet meer rekenen op een betrouwbaar systeem;
- Als externe partijen ongemerkt toegang krijgen tot jouw systeem, zijn ook privacy, beleidsgevoeligheid en integriteit in gevaar.

Dit is geen hypothetisch risico. Uit ervaring blijkt dat online rekenplatforms, zoals het Tygron Platform, honderden keren per dag worden aangevallen. En dat is beslist geen uitzondering. Het komt overal voor, zoals ook bevestigd wordt in het dreigingsbeeld van de rijksoverheid[84].

Cybersecurity is niet alleen een technische uitdaging, maar ook een beleidsmatige. De Nederlandse Cybersecuritystrategie 2022–2028 maakt dit duidelijk en stelt dat digitale producten en diensten

[83] https://ucrowds.com/simcrowds/

[84] https://www.rijksoverheid.nl/documenten/publicaties/2022/10/10/nederlandse-cybersecuritystrategie-2022---2028

veilig én innovatief moeten zijn. Digitale tweelingen, die vaak als centrale schakel dienen in beleidsinformatie en besluitvorming, vallen hier direct onder. Daarom is het van belang dat digitale tweelingen:

- Draaien op veilige en betrouwbare infrastructuur (bij voorkeur binnen Nederland);
- Continu gemonitord worden tegen aanvallen;
- Voorzien zijn van ISO 27001-certificering en – waar nodig – worden getest door externe ethische hackers bij grote releases';
- Duidelijk beleid hanteren voor toegangscontrole, versleuteling en gegevensbeveiliging.

Bij de kwaliteitsborging van digitale tweelingen moet cyberveiligheid een vaste pijler zijn, en net zo belangrijk als modelvalidatie of datakwaliteit. Ontwerpkeuzes moeten niet alleen gestoeld zijn op prestaties of schaalbaarheid, maar ook op bescherming tegen dreigingen. Zeker nu digitale tweelingen vaker via het internet toegankelijk zijn en met meerdere partijen gekoppeld worden, is het essentieel dat veiligheid al vanaf het begin wordt meegenomen in het ontwerp. Een digitale tweeling zonder robuuste beveiliging is kwetsbaar voor verstoring, sabotage en misbruik.

4.6 Gebruiksaspecten van rekenmodellen

Tijdens de gesprekken kwamen ook enkele aspecten ter sprake die van belang zijn voor het verantwoord gebruiken van modellen. Dit betrof onder meer toepassing van de FAIR-principes voor toegankelijkheid en bruikbaarheid en kwaliteitsborging bij het ontwikkelen en gebruik van rekenmodellen. We bespreken die aspecten hieronder en sluiten daarna af met een kritische reflectie op de relatie tussen rekenmodellen en digitale tweelingen en initiatieven die kunnen bijdragen aan goed moelleren in de praktijk.

4.6.1 Toegankelijke en bruikbare rekenmodellen

De FAIR-principes afkomstig uit de open science beweging zijn een set richtlijnen om data toegankelijk en bruikbaar te maken (Wilkinson et al., 2016). FAIR staat voor Findable, Accessible, Interoperable en Reusable en toepassing van deze principes op rekenmodellen zorgt ervoor dat rekenmodellen beter deelbaar, herbruikbaar en begrijpelijk zijn. Janssen *et al*. (2023) hebben een aantal uitgangspunten geformuleerd die aangeven waaraan rekenmodellen moeten voldoen om als FAIR beschouwd te worden:

- Rekenmodellen moeten uniek identificeerbaar zijn en via beschrijvingen en metadata vindbaar via zoekmachines en/of een algoritme- of rekenmodellenregister;
- De toegang tot rekenmodellen moet eenvoudig en helder geregeld zijn, waar mogelijk worden rekenmodellen als open tools beschikbaar gesteld, bijvoorbeeld via licenties zoals Creative Commons, binnen de beperkingen van rechten en privacy. Voor gevoelige modellen (bijvoorbeeld eigendomsmodellen) worden toegangsrechten via authenticatie en autorisatie geregeld;
- Rekenmodellen en hun metadata moeten makkelijk combineerbaar zijn met andere datasets en tools. Modellen moeten standaard dataformaten gebruiken die breed ondersteund worden. Metadata en termen zijn geharmoniseerd via semantische standaarden, zoals ontologieën. Ook kennen rekenmodellen een gebruiksvriendelijke toegang via gestandaardiseerde interfaces, zoals RESTful API's. Bij het FAIR maken van rekenmodellen is niet alleen semantische interoperabiliteit van belang, maar spelen ook technische aspecten van interoperabiliteit een rol;
- Rekenmodellen zijn tenslotte goed gedocumenteerd, zodat ze in verschillende contexten kunnen worden hergebruikt. Ze worden beschreven met duidelijke handleidingen, gebruiksinstructies en beperkingen. Daarbij is de historie van modelupdates vastgelegd om consistentie te waarborgen. Voor de kwaliteitsborging worden audit en verificatierapporten opgesteld om het vertrouwen in het model te verhogen.

In de wetenschappelijke wereld krijgt de FAIRificatie van rekenmodellen veel aandacht. Making models FAIR[85] is een internationaal initiatief is om de vaardigheden, praktijken en protocollen te verbeteren en zo rekenmodellen FAIR te maken (Barton et al. 2022b).

4.6.2 Borging kwaliteit van rekenmodellen

Een ander aspect dat veelvuldig ter sprake komt in de gevoerde gesprekken is het verantwoord gebruik van rekenmodellen in digitale tweelingen. Daarbij gaat het in basis om de vraag: welk rekenmodel moet ik gebruiken en voldoet het rekenmodel aan bepaalde kwaliteitseisen?

Aan de inzet van rekenmodellen waarvan de kwaliteit onvoldoende is geborgd, zijn risico's verbonden. In het recente verleden is zijn politieke afwegingen (bijvoorbeeld het stikstofdossier) ernstig bemoeilijkt nadat discussie is ontstaan over de kwaliteit van het modelinstrumentarium dat is ingezet bij de beleidsadvisering. Ook dreigt een verlies van efficiëntie in het beleidsproces wanneer tekortkomingen in de modelberekeningen door digitale tweelingen, gecorrigeerd moeten worden omdat bijvoorbeeld (input)gegevens incorrect blijken, processen onvoldoende nauwkeurig zijn nagebootst of de rekenmodellen niet volledig geschikt bleken voor de toepassing. Kwaliteitsborging is bedoeld om deze risico's te beperken en daarmee relevant voor alle gebruikers en belanghebbenden.

Wageningen University & Research heeft de afgelopen jaren aan een kwaliteitsborgingraamwerk van haar rekenmodellen gewerkt (zie Figuur 17). Als onderdeel daarvan is een protocol opgesteld met 22 vereisten waaraan elk nieuw computermodel moet voldoen. Het protocol is online beschikbaar als handzame checklist[86] (Hengeveld, 2020) en helpt Wageningse modelleurs bij de ontwikkeling van hun model, bij de beoordeling van de toepasbaarheid van het model en bij het krijgen van grip op noodzakelijke investeringen in het modelonderhoud. Door een rekenmodel te toetsen aan dit protocol laten modelleurs zien dat dit een betrouwbaar model is.

Het protocol gebruikt een self-assessment methode, die modelleurs kunnen toepassen om aan te geven wanneer het rekenmodel wel en niet gebruikt kan worden. Door het gebruik van het protocol ontstaat ook inzicht in waar meer investeringen in het rekenmodel moeten plaatsvinden (om ze beter te krijgen en goed te houden). Ook wijst het protocol een modelleur op onvolkomenheden of onduidelijkheden in zijn beschrijvingen en analyses en wordt de communicatie over rekenmodellen met beleidmakers en bestuurders (management en opdrachtgevers) verbeterd. De auditors van de rekenmodellen lezen alle documentatie en beschrijvingen van modellen en toetsen die aan de vereisten waar een model van WUR aan zou moeten voldoen. Een uitgebreide beschrijving van het rekenmodel is daarbij essentieel. Wat is het doel van het model en waarvoor kan het gebruikt worden en waarvoor niet? Daarbij moeten de uitkomsten van het model ook geanalyseerd worden: wat is de gevoeligheid voor variatie in de invoerdata, welke onzekerheden kennen het model en de onderliggende data? Deze werkwijze draagt ook bij aan planmatig werken: weten en vastleggen wie wat doet en wie welke verantwoordelijkheid heeft. Kwaliteitsborging brengt echter kosten met zich mee. Uiteindelijk is het de afweging van deze kosten tegen de hierboven genoemde risico's die bepaalt of een investering in kwaliteitsborging zinvol is.

[85] https://www.tobefair.org/

[86] https://magazines.wur.nl/kb-magazine-2023/een-checklist-voor-kwaliteit

Figuur 17 - Checklist voor de kwaliteit van rekenmodellen (Hengeveld, 2020).

4.6.3 Goed modelleren in de praktijk

Het verantwoord toepassen van modellen is niet eenvoudig en een behulpzaam handvat hiervoor is het "Good Modelling Practice" handboek. Dit is oorspronkelijk ontwikkeld om richtlijnen te bieden voor het verantwoord ontwikkelen, gebruiken, en evalueren van rekenmodellen in beleids- en besluitvormingsprocessen (Waveren et al., 1999). Het handboek is opgesteld door diverse

Nederlandse overheidsinstanties en wetenschappelijke organisaties, zoals Rijkswaterstaat en TNO en richt zich vooral op het gebruik van modellen in de fysieke leefomgeving, zoals waterbeheer, milieu, en infrastructuur. Het dient als een praktisch kader voor zowel modelontwikkelaars als gebruikers in beleidsprocessen, met een sterke focus op transparantie, uniformiteit en het expliciet omgaan met onzekerheden.

Het handboek volgt de levenscyclusbenadering van een model: van specificatie van doelen en eisen, ontwikkeling en implementatie naar validatie, kalibratie, en gevoeligheidsanalyse. Als laatste stap is er aandacht voor de toepassing van het rekenmodel in beleid en besluitvorming en communicatie. Er wordt aandacht besteed aan hoe onzekerheden in gegevens en modelaannames expliciet moeten worden gemaakt en gecommuniceerd. En het handboek benadrukt het belang van samenwerking tussen modelontwikkelaars, beleidsmakers, en andere stakeholders (teamproces). Via richtlijnen voor het documenteren van rekenmodellen wordt gezorgd, dat de aannames, methoden en uitkomsten kunnen worden begrepen en reproduceerbaar zijn. Het handboek helpt daarmee gebruikers om rekenmodellen effectief en verantwoord in te zetten.

Het Handboek was oorspronkelijk ontworpen om de betrouwbaarheid en reproduceerbaarheid van modellen te waarborgen. Tijdens de bijeenkomst 'Goed Modelleren in de Praktijk' op 13 juni 2024, georganiseerd door de Nederlandsche Hydrologische Vereniging en STOWA, werd stilgestaan bij 25 jaar Good Modelling Practice. De vijftig deelnemers reflecteerden op de actualiteit en toepasbaarheid van het handboek in het watermanagement en-beheer. De algemene conclusie was dat het relevant blijft omdat modelresultaten steeds vaker een cruciale rol spelen in politiek-bestuurlijke besluitvorming. Modellen worden steeds complexer en maatschappelijk relevanter, waardoor het handboek actueler is dan ooit. De opgenomen richtlijnen worden vaak indirect toegepast, met moderne tools en methodes voor validatie en gevoeligheidsanalyses. Het toenemend wantrouwen van de buitenwereld en het grote publiek vraagt om meer transparantie en duidelijke communicatie over wat modellen wel en niet kunnen. Uit de workshop[87] volgden dan ook diverse aanbevelingen en acties voor herziening van het Handboek:

- Rekening houden met nieuwe technieken zoals scripting voor reproduceerbaarheid en automatische kalibratie;
- Oprichting van een onafhankelijke autoriteit voor kwaliteitsmanagement van rekenmodellen, zoals een hydrologische autoriteit of een onafhankelijk reviewnetwerk, vergelijkbaar met het Expertisenetwerk Waterveiligheid, werden geopperd;
- Opzetten van training en certificering door het ontwikkelen van een "Good Modelling Practice" cursus en mogelijk ook certificering om richtlijnen te integreren in de praktijk van nieuwe en bestaande modelleurs;
- Het versterken van internationale samenwerking en leren van andere landen, zoals België, waar zulke examens worden afgenomen;
- De publieke toegang tot een "Good Modelling Practice" Wiki, een digitaal platform voor het delen en actualiseren van het handboek, aangedragen door de Wageningen Universiteit, werd positief ontvangen.

STOWA en Rijkswaterstaat hebben eind 2024 een oproep gedaan om de community "Good Modelling Practise" verder gestalte te geven.

4.6.4 Opzetten van een IT-infrastructuur

De data, rekenmodellen en visualisaties die in digitale tweelingen gecombineerd worden zijn vaak afkomstig van verschillende leveranciers en beschikbaar op uiteenlopende locaties en platforms. Een solide IT-infrastructuur is nodig om deze elementen op snelle en berouwbare wijze te combineren. Bij het opzetten hiervan moeten leveranciers en gebruikers van rekenmodellen diverse

[87] https://www.stowa.nl/agenda/bijeenkomst-goed-modelleren-de-praktijk

afwegingen maken. Wij gaan hier kort in op enkele aspecten die van belang zijn om rekenmodellen te kunnen laten functioneren binnen digitale tweelingen Oftewel op welke IT-infrastructuur draaien de rekenmodellen en hun bouwstenen?

In paragraaf 2.2 is een modulaire architectuur geïntroduceerd afkomstig uit de referentie architectuur voor Europese lokale digitale tweelingen (European Commission, 2023). De data, rekenmodellen en visualisaties draaien ergens ‘in the cloud’ gehost door een leverancier of lokaal (‘on-premise) dicht bij de gebruiker. De vraag waar de digitale tweeling 'leeft' is zeker van belang voor hoe de digitale tweeling wordt ontworpen, gebruikt en opgeschaald. De fysieke plek(ken) en IT-infrastructuur waar de data, rekenmodellen en visualisaties draaien, bepalen namelijk ook welke keuzes gemaakt kunnen en moeten worden over het functioneel en technische beheer, de gehele infrastructuur, de performance, de toegankelijkheid, de besturing, het eigenaarschap, bekostiging en verdienmodel en de cyberbeveiliging. En daarmee ook hoe rekenmodellen in de tweeling worden geïntegreerd of beschikbaar gesteld. Dit raakt aan enkele fundamentele vragen:

- Waar worden data opgeslagen en verwerkt?
- Waar en door wie worden rekenmodellen uitgevoerd?
- Hoe dicht staan rekenmodel en data bij elkaar, logisch én fysiek?

Er zijn verschillende opties om de toegang tot rekenmodellen in een modulaire architectuur te organiseren: centraal bij de leverancier of platformaanbieder bijvoorbeeld als webservice via een API, decentraal bij de gebruiker of afnemer van de digitale tweeling, of in een hybride vorm waarbij delen van de digitale tweeling centraal draaien en andere lokaal. De keuze hiervoor is onder meer afhankelijk van de mate waarin de aanbieder toestaat dat afnemers het digitale tweeling en/of rekenmodel zelfstandig (lokaal) draaien of aanpassen. Bijvoorbeeld: is het model alleen via een API te gebruiken, of mag het (al dan niet gecompileerd) worden uitgevoerd op de IT-infrastructuur van de gebruiker? En zijn er technische of juridische restricties ingebouwd door de leverancier, bijvoorbeeld vanwege aannames over rekenkracht, opslaglocatie of beveiliging? In de praktijk zien we verschillend oplossingen. Zo rekent de groene batenplanner bij RIVM op basis van input die een gebruiker aanlevert, terwijl Deltares veel watermodellen aan bijvoorbeeld waterschappen uitlevert als binair bestand waarvoor de gebruikers zelf invoer, uitvoer en runtime regelen op hun eigen infrastructuur. Rekenmodellen kunnen eveneens geïntegreerd in een digitale tweeling met data en visualisaties worden beschikbaar gesteld. Ook kunnen rekenmodellen worden ‘rondgestuurd’ en bij de data gebracht worden (‘data visiting’) vanwege databeschermingsoverwegingen (m.b.v. ‘privacy enhancing technologies’).

Hoe toegang tot rekenmodellen georganiseerd wordt is afhankelijk van diverse overwegingen die zowel door de leverancier als door de afnemer van het rekenmodel gemaakt moeten worden. Doorgaans bepaalt een leverancier van een rekenmodel hoe het rekenmodel wordt beschikbaar gesteld. Maar misschien wil de afnemer dat liever anders. Als de afnemer elders goedkoper en efficiënter kan rekenen of als berekening en data dicht bij elkaar moeten staan, als tussenliggende databestanden heel groot zijn of te gevoelig om te delen en dus liever niet verhuisd worden etc., kan het wenselijk zijn dat het rekenmodel door de afnemer (on)gecompileerd elders gedraaid wordt. Dat is mede afhankelijk van het niveau waarop de leverancier toestaat dat afnemers hun eigen toepassingen of aanpassingen in het model kunnen doen. Daarbij kunnen inhoudelijke, zakelijke, strategische of technische overwegingen een rol spelen. Een recente, geopolitieke overweging kan zijn om opslag van gevoelige data en simulaties binnen de EU of zelfs het eigen land te houden. Vanuit het perspectief van de gebruiker zijn er diverse situaties denkbaar waarin het wenselijk is om het rekenmodel elders uit te voeren:

- Wanneer de afnemer zelf goedkoper of efficiënter kan rekenen (bijvoorbeeld via eigen cloud resources);
- Wanneer data en berekening fysiek dicht bij elkaar moeten blijven (bijvoorbeeld bij latency gevoelige toepassingen);

- Wanneer tussenliggende bestanden groot zijn of privacygevoelig en dus liever niet worden overgedragen;
- Wanneer aanpassingen aan het rekenmodel nodig zijn die alleen lokaal of met broncode kunnen worden gedaan.

4.6.5 Een kritische blik

diEen kritische blik over het gebruik van rekenmodellen in digitale tweelingen ontbrak niet in de gesprekken de we voerden. Zo is aangegeven dat veel modellen erg complex zijn, waardoor hun werking niet goed wordt begrepen door gebruikers. Complexe modellen zijn ook moeilijk uitlegbaar aan burgers en daarmee soms een beperkende factor in transparante besluitvorming. In democratische besluitvorming hebben alle betrokkenen idealiter dezelfde kennis en informatie beschikbaar. Bij veel besluitvormingstrajecten speelt echter informatie uit diverse complexe modellen een belangrijke rol waarvan de herkomst en betrouwbaarheid voor betrokkenen moeilijk is in te schatten. Dat brengt twee tegengestelde reacties teweeg. Enerzijds is er een neiging om te veel te vertrouwen op modellen als objectieve weergave van processen in de werkelijkheid. Zeker als resultaten van rekenmodellen heel overtuigend worden gepresenteerd leidt dat tot een risico op overschatting van hun nauwkeurigheid. Anderzijds kan het hoge black box gehalte van modellen bijdragen aan wantrouwen over de resultaten en een neiging deze te negeren. Dat benadrukt het belang van heldere communicatie over de werking en beperkingen van modellen.

In de interviews is door sommigen ook aangegeven dat er geregeld onrealistische verwachtingen worden geschapen over de toepassingsmogelijkheden van rekenmodellen. Zo wordt de ambitie om alle beleidsvragen met één model of een geïntegreerde digitale tweeling te beantwoorden problematisch genoemd. Het koppelen van verschillende rekenmodellen met uiteenlopende aannames en schalen kan onnauwkeurige of misleidende resultaten opleveren. Een belangrijke, hieraan gerelateerde vraag is: welk rekenmodel past het best bij (dit onderdeel van) de planningsopgave of onderzoeksvraag die voorligt. Deze fit-for-purpose betreft niet alleen de betrouwbaarheid (reliability) van het model, maar ook aspecten zoals aansluiting bij de casus (saliency) en de ‘stakeholders’ (legitimacy). Zie voor een uitgebreide discussie hierover: Hamilton et al. (2022).

Daarbij wordt het gebrek aan expliciete communicatie over de onzekerheden benoemd als zorgpunt. Rekenmodellen presenteren resultaten vaak zonder duidelijkheid te bieden over de onzekerheden en aannames die eraan ten grondslag liggen. Dit kan leiden tot verkeerde interpretaties door beleidsmakers en andere gebruikers. Ook beperkte validatie en reproduceerbaarheid wordt beschouwd als risico. Validatie van rekenmodellen gebeurt vaak niet systematisch genoeg, en reproduceerbaarheid is een uitdaging, zeker voor niet-experts. Dit vermindert de legitimiteit en het vertrouwen in modellen.

Tenslotte wordt confirmation bias genoemd als argument tegen het ondoordacht gebruik van rekenmodellen. Zodra een model als bewezen wordt beschouwd, durft bijna niemand het meer kritisch te beoordelen. Dit kan leiden tot een ongezonde status quo in het gebruik van rekenmodellen.

Vanuit deze tegenargumenten zijn eveneens diverse aanbevelingen gedaan om problemen bij interpretatie, tekortkomingen en risico’s te vermijden. Om er enkele te noemen:

1. Ontwikkel minder complexe modellen, die transparanter zijn en eenvoudiger te begrijpen en te reproduceren, ook voor burgers;
2. Zorg voor expliciete communicatie over onzekerheden en waardegedreven keuzes in rekenmodellen aan gebruikers, inclusief beleidsmakers;
3. Valideer rekenmodellen met regelmaat met (nieuwe) observaties en maak gevoeligheidsanalyses een standaard onderdeel van het modelleerproces;

4. Beperk overkoppeling van rekenmodellen en streef niet naar geïntegreerde modellen die alles proberen te omvatten, ontwikkel per vraag liever meer specifieke modellen;
5. Zorg voor meer democratisering en participatie, waarbij burgers en belanghebbenden inspraak hebben in wat rekenmodellen moeten vertegenwoordigen en hoe ze worden gebruikt. Dit wordt ook wel participatory modelling genoemd;
6. Focus op fit-for-purpose, zodat rekenmodellen worden ontworpen en gecertificeerd voor specifieke doeleinden, in plaats van te proberen universeel toepasbaar te zijn; en
7. Bevorder openheid, transparantie en samenwerking door het delen van modelcodes en documentatie.

5. Bevindingen en aanbevelingen

Digitale tweelingen zijn digitale representaties van de werkelijkheid, die de analyse en simulatie van complexe vraagstukken in de fysieke leefomgeving mogelijk maken voor actuele vraagstukken zoals klimaatadaptatie, energietransitie, infrastructuur, woningbouw en stadsontwikkeling. Digitale tweelingen hebben als doel om beleid, planning en besluitvorming te ondersteunen door real-time inzichten, analyses, simulaties en voorspellingen te koppelen aan op te lossen vraagstukken.

In de basis bestaan digitale tweelingen uit data, rekenmodellen en visualisaties. Om tot meer efficiëntie, gedeelde inzichten, tijdsbesparing en lagere kosten te komen wordt in Nederland nu gewerkt aan een landelijk netwerk van lokale digitale tweelingen. Dit netwerk moet het mogelijk maken om elkaars data, rekenmodellen en visualisaties te gebruiken. Met het delen van data is de afgelopen jaren al veel ervaring opgedaan. Het verbinden van rekenmodellen is echter nog grotendeels onontgonnen terrein, terwijl juist daarmee voor het oplossen van de grote maatschappelijke opgaven winst te behalen valt. In deze verkenning staat daarom de interoperabiliteit (het vermogen om samen te werken en informatie uit te wisselen) van rekenmodellen binnen digitale tweelingen centraal.

Rekenmodellen worden gebruikt in digitale tweelingen om aspecten en processen van de fysieke leefomgeving te analyseren, simuleren, of voorspellen met als uiteindelijk doel om beslissingen te ondersteunen en interventies te plegen. Rekenmodellen variëren sterk in functie, modelbenadering en toepassingsdomein, en kunnen zowel beschrijvend, voorspellend, simulerend of optimaliserend zijn. Modellen worden ontworpen met een specifieke vraag of probleem in gedachten, waardoor ze vaak specifieke toepassingen kennen in afgebakende domeinen als watermanagement, energietransitie, klimaatadaptatie of mobiliteit. Voor iedere toepassing geldt, dat het gebruik van rekenmodellen aandacht vereist voor validatie, onzekerheidsanalyse en iteratie om nauwkeurige, toepasbare resultaten te leveren.

Bij veel complexe maatschappelijke vragen spelen diverse, uiteenlopende aspecten (mens, milieu, economie etc.) een rol, terwijl vaak een integrale afweging gewenst is. Digitale tweelingen kunnen bijdragen aan integrale oplossingen voor dergelijke vragen door (uitkomsten van) diverse modellen te combineren. Maar gezien de uiteenlopende doelstellingen, opzet en aard van de rekenmodellen is dat geen eenvoudige zaak. Over de (on)mogelijkheid van het combineren en uitwisselen van rekenmodellen binnen digitale tweelingen hebben we het gesprek gevoerd met diverse experts uit het Nederlandse werkveld. Zij houden zich professioneel bezig met rekenmodellen in digitale tweelingen en brachten verschillende juridische, organisatorische, semantische, technische en gebruikersaspecten van interoperabiliteit naar voren.

Om de interoperabiliteit van rekenmodellen in digitale tweelingen te stimuleren zijn op basis van de gevoerde gesprekken met de experts en uit eigen deskresearch een aantal aanbevelingen geformuleerd. Deze zijn gedaan met het oog op de diverse uitvoeringsprogramma's in Nederland, waaronder DMI DTaaS, zodat dit leidt tot acties om verder invulling te geven aan interoperabiliteit van rekenmodellen in de Nederlandse praktijk van digitale tweelingen. We vatten de belangrijkste bevindingen, de daaruit voortvloeiende aanbevelingen en uit te voeren vervolgacties hieronder samen. Deze zijn gegroepeerd naar een aantal terugkerende thema's: strategie, samenwerking, verdienmodellen, kwaliteitsborging, standaardisatie en high-performance computing/AI.

Strategie

Diverse overheden en bedrijven gebruiken digitale tweelingen voor simulaties, maar zonder duidelijk beleid en infrastructuur blijven toepassingen beperkt tot losse projecten. Een nationale roadmap kan helpen om te bepalen hoe digitale tweelingen consistent en schaalbaar kunnen worden ingezet. Dit kan bereikt worden met de volgende acties:

1. Ontwikkel een roadmap voor digitale tweelingen in Nederland. Dit biedt een langetermijnstrategie voor interoperabiliteit en samenwerking.
2. Het delen van rekenmodellen is niet makkelijk. Vaak ligt dit niet primair aan de techniek, maar eerder aan semantiek en governance. Nadere studie van deze aspecten is wenselijk.

Samenwerking en kennisdeling

Samenwerking tussen instituten, bedrijven en overheden is cruciaal om afspraken te maken en standaarden te ontwikkelen en te adopteren. De samenwerking tussen verschillende disciplines en domeinen vermindert duplicatie van werk en versnelt innovatie. Door kennisdeling worden best practices verspreid, wat leidt tot bredere acceptatie van nieuwe technologieën. Er is een sterke behoefte aan regelmatige bijeenkomsten en testbeds om nieuwe technieken te testen en ervaringen te delen. Regelmatige workshops en conferenties kunnen de bewustwording en adoptie bevorderen. Open communicatie over modelwerking, kwaliteitsaspecten en toepassingsdomein kan bijdragen aan bredere acceptatie van modelgebaseerde uitkomsten bij beleidsmakers, burgers en andere belanghebbenden. Complexiteit staat op gespannen voet met transparantie en inzicht in correcte toepassingen. Het ideale model is zo complex als nodig is en zo simpel als mogelijk is.

De volgende aanbevelingen zijn gedaan:

1. Bevorder openheid, transparantie en samenwerking door het delen van modelcodes en documentatie. Zorg voor expliciete communicatie over onzekerheden en waarde gedreven keuzes in rekenmodellen aan gebruikers, inclusief beleidsmakers;
2. Zorg voor meer democratisering en participatie, waarbij burgers en belanghebbenden inspraak hebben in wat rekenmodellen moeten vertegenwoordigen en hoe ze worden gebruikt (‘participatory modelling’);
3. Ontwikkel minder complexe modellen, die transparanter zijn en eenvoudiger te begrijpen en te reproduceren, ook voor burgers;
4. Focus op demonstratieprojecten, die de potentie hebben schaalbaar te zijn in samenwerking met gemeenten en bedrijven, bijvoorbeeld voor waterbeheer en mobiliteit;
5. Faciliteer kennisdeling via workshops en conferenties. Start een jaarlijkse conferentie over digitale tweelingen en modelbeheer. Dit stimuleert samenwerking en zorgt voor een platform om resultaten te delen;
6. Organiseer trainingen en workshops om de kennis over (de voor- en nadelen) van het gebruik van rekenmodellen in digitale tweeling in de dagelijkse praktijk te delen. Ontwikkel kennisprogramma's gericht op het gebruik en de interpretatie van modellen. Gebruikers moeten worden opgeleid om de nieuwe tools en standaarden effectief te gebruiken;
7. Verken financieringsmogelijkheden en samenwerking via Europese programma’s zoals Horizon Europe, Digital Europe of nationale subsidies.

Verdienmodellen

Er bestaan al verschillende manieren om de verdere ontwikkeling van digitale tweelingen en rekenmodellen te bekostigen, zoals abonnementsdiensten en/of via licenties. Naarmate rekenmodellen meer modulair en interoperabel worden binnen digitale tweelingen, ontstaan nieuwe vragen over het bepalen van de waarde, prijsstelling en licentievoorwaarden voor deze diensten. Gebruikersgroepen hebben verschillende prioriteiten, zoals essentiële datasets, nauwkeurige voorspellingen en toegang tot specifieke rekenfunctionaliteiten, hetgeen van invloed is op het aanbod en de waardebepaling van rekenmodellendiensten.

Dit leidt tot de volgende aanbeveling:

1. Naast de technische uitdagingen is het essentieel om verdien- en prijsmodellen te verkennen, zodat de waarde van het gebruik van rekenmodellendiensten voor verschillende doelgroepen, inclusief publieke en private partijen, kan worden vastgesteld;

2. Stel licentievoorwaarden op die flexibiliteit bieden aan gebruikers en tegelijkertijd de intellectuele eigendomsrechten van aanbieders beschermen, met aandacht voor de behoeften van verschillende gebruikersgroepen.

Kwaliteitsborging

Rekenmodellen worden niet altijd gebruikt waarvoor ze bedoeld zijn en niet altijd gevalideerd voordat ze worden gebruikt. Kwaliteitskaders en audits zijn nodig om betrouwbaarheid te waarborgen. Er is behoefte aan kwaliteitskaders om te bepalen wanneer een model geschikt is voor een bepaald gebruik. Dit vergt duidelijk zicht op fit-for-purpose en vastlegging van kwaliteit en betrouwbaarheid in relatie tot de voorgenomen toepassing (validatie en certificering). Onbetrouwbare modellen kunnen namelijk leiden tot verkeerde beslissingen in kritieke domeinen, zoals infrastructuur en natuurbeheer. Ook remt het ontbreken van kwaliteitscontrole de wetenschappelijke vooruitgang en gebruik van wetenschappelijke resultaten (rekenmodellen) in beleid. Rekenmodellen zijn ook niet altijd vindbaar, toegankelijk, interoperabel en herbruikbaar, FAIR dus. Dit vereist heldere richtlijnen, zoals het toevoegen van metadata en het volgen van richtlijnen.

Het Handboek Good Modelling Practice kan bijdragen aan de betrouwbaarheid en acceptatie van rekenmodellen in digitale tweelingen. Door het Handboek toe te passen, kunnen modelresultaten niet alleen beter worden begrepen, maar ook breder worden geaccepteerd door beleidsmakers en het publiek:

- Het expliciet maken van doelstellingen, modelaannames en het werkingsbereik van rekenmodellen zorgt voor transparantie;
- Het gebruik van gestandaardiseerde processen en tools die consistentie bevorderen zorgt voor reproduceerbaarheid; en
- Validatie en legitimering zorgen voor een betrouwbare basis bieden voor besluitvorming en integratie van rekenmodellen in digitale tweelingen.

De volgende aanbevelingen zijn gedaan:

1. Introduceer een kwaliteitskader voor rekenmodellen zoals bijvoorbeeld ontwikkeld door de WUR en werk daarbij samen met kennisinstellingen als WUR, PBL en Deltares. Adopteer een kwaliteitskader dat op een breed draagvlak kan rekenen en dat kwaliteit koppelt aan toepassingsdomein. Focus hierbij op fit-for-purpose, zodat rekenmodellen worden ontworpen en gecertificeerd voor specifieke doeleinden, in plaats van te proberen universeel toepasbaar te zijn;
2. Valideer rekenmodellen met regelmaat met (nieuwe) observaties en maak gevoeligheidsanalyses een standaard onderdeel van het modelleerproces;
3. Verken de mogelijkheid van een nationaal modellenregister voor het vindbaar maken van rekenmodellen, inclusief metadata en certificeringen. Een nationaal modellenregister bevordert transparantie over beschikbare rekenmodellen en hun kwaliteit en bevordert hergebruik. Zoek hierin samenwerking met het algoritmeregister;
4. Voer audits uit om modelkwaliteit te waarborgen. Dit verhoogt het vertrouwen in de resultaten van rekenmodellen en stimuleert gebruik in de praktijk.

Standaardisatie

Het belang van standaardisatie komt voort uit de noodzaak om rekenmodellen, die in verschillende domeinen worden ontwikkeld, te koppelen en gezamenlijk te gebruiken in digitale tweelingen voor de uiteenlopende toepassingen in de fysieke leefomgeving. Vooral de integratie van dynamische rekenmodellen blijkt een uitdaging. Zonder standaardisatie blijven rekenmodellen gefragmenteerd en moeilijk herbruikbaar. Ook gaan tijd en middelen verloren aan maatwerkoplossingen voor modelkoppelingen, hetgeen innovatie belemmert. Standaarden, zoals OGC API Processes en Basic

Model Interface zijn van belang om rekenmodellen te koppelen en interoperabiliteit te verbeteren. Standaardisatie is van belang om modellen beter te laten samenwerken, maar betekent niet dat gestreefd moet worden naar universele modellen die voor heel uiteenlopende toepassingen kunnen worden ingezet.

Om samenwerking tussen rekenmodellen mogelijk te maken is workflow management nodig in combinatie met nieuwe technologieën, zoals containerisatie en op GPU-gebaseerde processing platforms (cloud en on premise). Het Open Digital Twin Platform (ODTP) biedt een uitgebreide infrastructuur voor workflow management binnen digitale tweelingen. Door gestandaardiseerde interfaces, automatiseringstools en kwaliteitsborging te combineren, verbetert ODTP de samenwerking tussen rekenmodellen.

De verschillen in technologische platforms bemoeilijken vaak de koppeling en integratie van rekenmodellen. Het werken met verschillende technische platforms en infrastructuren creëert vaak obstakels bij modelintegratie, zoals verschillen in toegepaste programmeertalen en prestatievereisten. Nieuwe technologische tools zoals Notebooks en containerisatie (zoals het vaak genoemde Docker) helpen bij de modulaire architectuur aanpak voor de integratie van rekenmodellen binnen digitale tweelingen. Het gebruik van tools zoals Docker en cloudgebaseerde oplossingen wordt aanbevolen. Notebooks maken workflows transparanter en toegankelijker, terwijl Docker zorgt voor reproduceerbaarheid en schaalbaarheid. Samen zorgen ze voor een modern en efficiënt platform waarmee onderzoekers en beleidsmakers uitdagingen met rekenmodellen beter kunnen aanpakken.

De volgende aanbevelingen zijn gedaan:

1. Beperk overkoppeling van rekenmodellen en streef niet naar geïntegreerde modellen die alles proberen te omvatten, ontwikkel per vraag liever meer specifieke modellen
2. Organiseer bijeenkomsten om kennis te delen over de Basic Modelling Interface en OGC API Processes en het integreren van deze standaarden in toekomstige digitale tweelingen. Voer verdere testbeds uit om de technische standaarden zoals OGC API Processen en Basic Modelling Interface te testen op een hun toepasbaarheid met verschillende typen modellen. Pas deze standaarden toe in nationale en Europese projecten;
3. Verken de mogelijkheden van workflow management, zoals OGC API Processes en ODTP in combinatie met technologieën, zoals publish/subscribe technologie, containerisatie en op GPU-gebaseerde processing platforms om samenwerking tussen rekenmodellen mogelijk te maken;
4. Ontwikkel een nationale handreiking voor interoperabiliteit. Hiermee krijgen ontwikkelaars en beleidsmakers concrete richtlijnen. Richt deze op het gebruik van modellen in digitale tweelingen.

High-performance computing en AI

High-performance computing begint in digitale tweelingen ook zijn toepassing te vinden. Het gebruik van multi-threaded computing en GPU's wordt aanbevolen om simulaties op grote schaal mogelijk te maken. GPU-gebaseerde berekeningen zijn essentieel voor het versnellen van complexe simulaties in digitale tweelingen. Deze platforms gebruiken GPU-technologie om data-intensieve rekenmodellen efficiënter en schaalbaarder te maken. Ze maken real-time analyses mogelijk, verbeteren de gebruikservaring, en ondersteunen gedetailleerde stedelijke planning en beleidsvorming. Ook worden AI-algoritmen steeds meer ingezet voor simulaties en modelvalidatie in digitale tweelingen. De integratie van AI-algoritmen met bestaande rekenmodellen en digitale tweelingen kan de efficiëntie van bestaande systemen verhogen en nieuwe toepassingen mogelijk maken.

De volgende aanbevelingen zijn gedaan:

1. Geef aandacht aan high-performance computing en de rol van workflow management en container-technologie daarbij en onderzoek welke standaarden daarbij een rol kunnen spelen;
2. Verken de rol van AI voor modeloptimalisatie en onderzoek toepassingen van AI voor validatie, simulatie en voorspellingen in digitale tweelingen;
3. Verken de samenwerking voor high-performance computing voor modelintegratie en modelinnovaties in digitale tweelingen met bedrijven en onderzoeksinstituten zoals de TO2 federatie.

Referenties

Aalders, P., Angelov, Z., Gerrits, J., Hauw, K. v. d., Mul, T., & Wolf, T. d. (2020). Bureaustudie Watercloud. https://open.rijkswaterstaat.nl/open-overheid/@61319/bureaustudie-watercloud/

Adriaanse, A., Borsboom, W, & R. Roef (z.j). Naar netwerken van predictive twins van de gebouwde omgeving. TNO. https://publications.tno.nl/publication/34637410/lYA5FO/TNO-2020-netwerken.pdf

Algemene Rekenkamer (2022). Algoritmes getoets. De inzet van 9 algoritmes bij de overheid. https://www.rekenkamer.nl/publicaties/rapporten/2022/05/18/algoritmes-getoetst

Angelov, Z., Huizinga, H., Sloekers, A., Stam, P., Aalders, P., Bonnet, I., Folmer, I. Portman, R., van der Hauw, K., Mul, T., de Wolf, T. & J. Gerrits (2020). Technisch achtergrondrapport Bureaustudie Watercloud. Royal HaskoningDHV. In opdracht van: Rijkswaterstaat. Referentie: BG6428WATRP2003181327WM. https://open.rijkswaterstaat.nl/open-overheid/@61319/bureaustudie-watercloud/

Barton, C.M., Lee, A., Janssen M.A., Leeuw van der, S., Tucker, G.E., Porter, C., Greenberg, J., Swante, L., Frank, K., Chen, M. & H. R.A. Jagers (2022a) How to make models more useful. PNAS 119 (35). https://doi.org/10.1073/pnas.2202112119

Barton, C.M., Ames, D., Chen, M., Frank, K., Jagers, H.R.A., Lee, A., Reis, S. & L. Swantek (2022b), Making modeling and software FAIR. Environmental Modelling & Software 156. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105496

Claassens, J., Koomen, E., & Rijken, B. (2020). Linking Socio-economic and Physical Dynamics in Spatial Planning. In S. Geertman & J. Stillwell (Eds.), Handbook on Planning Support Science (pp. 383-396). Edward Elgar Publishers. https://doi.org/10.4337/9781788971089.00036

Claassens, J., Koomen, E., & Rijken, B. (2023). Actualisering landgebruik Deltascenario's 2023 (SPINlab Research Memorandum, Issue. Vrije Universiteit Amsterdam. https://research.vu.nl/en/publications/actualisering-landgebruik-deltascenarios-2023

Digital Twin Consortium, (2022). Digital Twin Capabilities Periodic Table A Digital Twin Consortium User Guide 2022-03-28. https://www.digitaltwinconsortium.org/wp-content/uploads/sites/3/2022/06/Digital-Twin-Capabilities-Periodic-Table-User-Guide.pdf

Doelman, J. C., Stehfest, E., Tabeau, A., van Meijl, H., Lassaletta, L., Gernaat, D. E. H. J., Hermans, K., Harmsen, M., Daioglou, V., Biemans, H., van der Sluis, S., & van Vuuren, D. P. (2018). Exploring SSP land-use dynamics using the IMAGE model: Regional and gridded scenarios of land-use change and land-based climate change mitigation. Global Environmental Change, 48, 119-135. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.11.014

Edmonds, B., Le Page, C., Bithell, M., Chattoe-Brown, E., Grimm, V., Meyer, R., Montañola-Sales, C., Ormerod, P., Root, H. & F. Squazzoni (2019) Different Modelling Purposes. Journal of Artificial Societies and Social Simulation 22 (3) 6. http://jasss.soc.surrey.ac.uk/22/3/6.html. doi: 10.18564/jasss.3993

European Commission (2023). Garcia Barron, M., Ramos, C., Birecki, E., Carvalho, F. et al.,Public report on the LDT toolbox detailed specifications requirements – D05.02. European Commission: Directorate-General for Communications Networks, Content and Technology. https://data.europa.eu/doi/10.2759/384198

Gartner. (2024). Gartner Glossary/ Information Technology Glossary / D / Digital Twin. https://www.gartner.com/en/information-technology/glossary/digital-twin

Grübel, J., Vivar Rios, C., Zuo, C., Ossey, S., Franken, R. M., Balać, M., Xin, Y., Raubal, M., Axhausen, K.W., & O. Riba Grognuz (2023), Outlining the Open Digital Twin Platform. In: IEEE Digital Twin 2023. https://ieeexplore.ieee.org/document/10448743

Hamers, D., Kuiper, R., van Dam, F., Dammers, E., Evenhuis, E., van Gaalen, F., de Hollander, G., van Hoorn, A., van Minnen, J., Nabielek, K., Pols, L., Rijken, B., Rood, T., Snellen, D., Dirkx, J., & Wolters, H. (2023). Vier scenario's voor de inrichting van Nederland in 2050: Ruimtelijke verkenning 2023, Achtergrondrapport. https://www.pbl.nl/publicaties/vier-scenarios-voor-de-inrichting-van-nederland-in-2050

Hamilton, S. H., Pollino, C. A., Stratford, D. S., Fu, B., & Jakeman, A. J. (2022). Fit-for-purpose environmental modeling: Targeting the intersection of usability, reliability and feasibility.

Environmental Modelling and Software 148: 105278. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105278
Hengeveld, G. (2020). A checklist for the Quality of Models, Datasets and Indicators to be used in policy and decision support. Wageningen University & Research. https://assets.foleon.com/eu-central-1/de-uploads-7e3kk3/20634/wrqualitycriteriamodelsdatasets_2.d65c4f6abfac.pdf
Hughes, J.D., Russcher M.J., Langevin C.D., Morway E.D. & R.R. McDonald (2022). The MODFLOW Application Programming Interface for simulation control and software interoperability. Environmental Modelling & Software 148. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815221002991.doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105257
Hut, R., Drost, N., van de Giesen, N., van Werkhoven, B., Abdollahi, B., Aerts, J., Albers, T., Alidoost, F., Andela, B., Camphuijsen, J., Dzigan, Y., van Haren, R., Hutton, E., Kalverla, P., van Meersbergen, M., van den Oord, G., Pelupessy, I., Smeets, S., Verhoeven, S., de Vos, M., and Weel, B. (2022). The eWaterCycle platform for open and FAIR hydrological collaboration, Geosci. Model Dev., 15, 5371–5390. https://doi.org/10.5194/gmd-15-5371-2022
ISO/IEC. (2023). Digital twin; Concepts and terminology. https://www.iso.org/standard/81442.html
IW, & EZK. (2018). Structuurvisie Ondergrond. M. v. I. e. W. M. E. Z. e. Klimaat. https://open.overheid.nl/documenten/ronl-da2bbe33-1384-4f85-9912-1b3d389e091e/pdf
Jagers, H.R.A. Linking Data, Models and Tools: An Overview (2010). International Congress on Environmental Modelling and Software. 101. https://scholarsarchive.byu.edu/iemssconference/2010/all/101
Janssen, M. A., Claborn, K., Edmonds, B., Shahbaznezhadfard, M., & Vanegas Ferro, M. (2023). Making Models FAIR: An educational initiative to build good ABM practices. Review of artificial societies and social simulation, Medium: X. https://rofasss.org/2023/05/11/fair/
Koomen, E., Rijken, B., & Claassens, J. (2024). RuimteScanner 2.0. VU University/ SPINlab. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.30442.29129
Koomen, E., & Stillwell, J. (2007). Modelling land-use change; Theories and methods. In E. Koomen, J. Stillwell, A. Bakema, & H. J. Scholten (Eds.), Modelling land-use change; progress and applications (pp. 1-21). Springer. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4020-5648-2_1
Kuiper, R., Rijken, B., & van Bemmel, M. S. (2023). Planmonitor NOVI 2023; Mogelijke toekomstige woon- en werklocaties: risico's voor kwetsbare gebieden. https://www.pbl.nl/publicaties/planmonitor-novi-2023
Lesschen, J. P., Reijs, J., Vellinga, T., Verhagen, J., Kros, H., de Vries, M., Jongeneel, R., Slier, T., Gonzalez Martinez, A., Vermeij, I., & Daatselaar, C. (2020). Scenariostudie perspectief voor ontwikkelrichtingen Nederlandse landbouw in 2050. Wageningen Environmental Research. https://doi.org/10.18174/512111
Lohman, W., Cornelissen, H., Borst, J., Klerkx, R., Araghi, Y., & Walraven, E. (2023). Building digital twins of cities using the Inter Model Broker framework. Future Generation Computer Systems, 148, 501-513. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.future.2023.06.024
Metcalfe, B., Boshuizen, H. C., Bulens, J. D., & Koehorst, J. J. (2023). Digital twin maturity levels: a theoretical framework for defining capabilities and goals in the life and environmental sciences. *F1000Research*, *12*(961). https://doi.org/10.12688/f1000research.137262.1
Ministerie van BZK (2022), Kamerbrief Stand van zaken Algoritmeregister. No. 2022-0000693912. https://open.overheid.nl/repository/ronl-391fc340bc62f9c0b60f7408f9d780aa6be5168e/1/pdf/kamerbrief-over-het-algoritmeregister.pdf
Ministerie van VRO (2024), Kamerbrief Aanbieding meerjarenvisie Zicht op Nederland: samen datagedreven werken aan de fysieke leefomgeving. No. 2024-0000079269. https://www.rijksoverheid.nl/documenten/kamerstukken/2024/02/12/kamerbrief-bij-meerjarenvisie-zicht-op-nederland
Ministerie van VRO (2025a). Zicht op Nederland - Digitale Tweelingen. https://zichtopnl.nl/digitaletweeling/

Ministerie van VRO (2025b). Zicht op Flevoland - Casus Wateroverlast door hoosbui. https://www.zichtopnl.nl/digitaletweeling/fieldlabs/zicht+op+flevoland/casus+wateroverlast+door+hoosbui/default.aspx

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2024). Foundational Research Gaps and Future Directions for Digital Twins. Washington, DC: The National Academies Press. https://doi.org/10.17226/26894

Raes, L. De Lathouwer, B., Hilgers, G. & S. Lefever (2025). Public Development: Towards Open Standards and Components for Local Digital Twins In: L. Raes et al. (eds.),Decide Better. Open and Interoperable Local Digital Twins, pp. 125-168. https://doi.org/10.1007/978-3-031-81451-8_6

Refsgaard, J. C., & Henriksen, H. J. (2004). Modelling guidelines––terminology and guiding principles. Advances in Water Resources, 27(1), 71-82. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2003.08.006

Remme, R., de Nijs, T. & M. Paulin (2017). Natural Capital Model Technical documentation of the quantification, mapping and monetary valuation of urban ecosystem services RIVM Report 2017-0040. https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2017-0040.pdf

Snelder, M., Araghi, Y., Ashari, B., Charoniti, E., Klunder, G., Sterkenburg, R., van der Tuin, M., Spruijtenburg, D., Zhou, H., Kochan, B., Bellemans, T., & de Romph, E. (2021). Urban Tools Next II – Hoofdlijn. https://publications.tno.nl/publication/34640063/UhEyF4/TNO-2021-R10650.pdf

TU-Delft. (2024). Typologie van modellen. https://sysmod.tbm.tudelft.nl/wiki/index.php?title=Typologie_van_modellen

Van Apeldoorn, N., van Lamoen, J., Mayer, I., & J. de Kruijf (2023). Digital Urban Brabant Making (common) sense of urban digital twins. Breda University of Applied Scences. https://pure.buas.nl/ws/portalfiles/portal/35020309/Apeldoorn_DUB_Report_Final_V3_NL.pdf

Van den Born, G. J., Kragt, F., Henkens, D., Rijken, B., Van Bemmel, B., & van der Sluis, S. (2016). Dalende bodems, stijgende kosten. https://www.pbl.nl/publicaties/dalende-bodems-stijgende-kosten

Van Wagenberg, C. P. A., Greijdanus, A. F., & Luesink, H. H. (2019). Economische optimalisatie van de afzetketen voor varkens- en melkveemest (scenarioanalyse met het MERIT-model, Issue. https://edepot.wur.nl/477222

Verordening EU 2024/1689 (2024). Verordening artificiële intelligentie - AI Act. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/NL/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202401689

Vullings, W., Liu, C., van der Heide, J., & Godefrooij, R. (2024). WUR guidelines on model management. Wageningen University & Research. https://doi.org/10.18174/676874

Waveren, H. v., Groot, S., Scholten, H., Geer, F., Wüsten, H., Koeze, R., & Noort, J. (1999). Vloeiend modelleren in het waterbeheer : Handboek Good Modelling Practice. Utrecht/Lelystad : STOWA/RWS-RIZA, 1999. - ISBN-9057773-056-1. - (STOWA rapport; 99-05, Rijkswaterstaat-RIZA rapport; 99.36). https://www.stowa.nl/publicaties/handboek-good-modelling-practice-vloeiend-modelleren-het-waterbeheer

White, G., Zink, A., Codecá, L., & Clarke, S. (2021). A digital twin smart city for citizen feedback. Cities, 110, 103064. https://doi.org/10.1016/j.cities.2020.103064

Wilkinson, M. D., Dumontier, M., Aalbersberg, I. J., Appleton, G., Axton, M., Baak, A., Blomberg, N., Boiten, J.-W., da Silva Santos, L. B., Bourne, P. E., Bouwman, J., Brookes, A. J., Clark, T., Crosas, M., Dillo, I., Dumon, O., Edmunds, S., Evelo, C. T., Finkers, R., Gonzalez-Beltran, A., Gray, A. J. G., Groth, P., Goble, C., Grethe, J. S., Heringa, J., 't Hoen, P. A. C., Hooft, R., Kuhn, T., Kok, R., Kok, J., Lusher, S. J., Martone, M. E., Mons, A., Packer, A. L., Persson, B., Rocca-Serra, P., Roos, M., van Schaik, R., Sansone, S.-A., Schultes, E., Sengstag, T., Slater, T., Strawn, G., Swertz, M. A., Thompson, M., van der Lei, J., van Mulligen, E., Velterop, J., Waagmeester, A., Wittenburg, P., Wolstencroft, K., Zhao, J., & Mons, B. (2016). The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship. Scientific Data, 3(1), 160018. https://doi.org/10.1038/sdata.2016.18

Bijlage 1 - Geraadpleegde experts

(in alfabetische volgorde achternaam)

Fedor Baart	Deltares
Björn Backeberg	Deltares
Niels Drost	Netherlands eScience Center
Tessa Eikelboom	Rijkswaterstaat
Yann Friocourt	Rijkswaterstaat
Roland Gerearts	Universiteit Utrecht / UCrowds
Joep Grispen	Nelen & Schuurmans
Jene van der Heide	Wageningen University & Research
Geerten Hengeveld	Nederlands Instituut voor Ecologie (NIOO-KNAW)
Maarten Hilferink	ObjectVision
Bert Jagers	Deltares
Peter Kalverla	Netherlands eScience Center
Maxim Kepflé	Tygron
Maurice de Kleijn	Netherlands eScience Center
Walter Lohman	TNO
Lieke Melsen	Wageningen University & Research
Ton de Nijs	Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM)
Erik Oudejans	ObjectVision
Nico Pieterse	Planbureau van de Leefomgeving (PBL)
Johan van der Schuit	Planbureau van de Leefomgeving (PBL)

Bijlage 2 - Vragenlijst

De volgende vragen zijn leidraad geweest voor de interviews met experts over interoperabiliteit en het gebruik van rekenmodellen in digitale tweelingen. De vragenlijst is ontworpen om de kernpunten van technische en organisatorische interoperabiliteit te adresseren.

Context en ervaringen

1. Vanuit welke context en ervaringen voer je dit gesprek?
    - Sector, thema, of specifiek model(product)?
2. Welke type rekenmodellen gebruik je, en wat zijn de belangrijkste toepassingen?
3. Wie zijn de primaire gebruikers van de rekenmodellen, en wat zijn hun behoeften?

Data en rekenmodellen samenbrengen

4. Welke methoden gebruik je om data en modellen samen te brengen?
    - Orchestratie: Een centrale component koppelt data en modellen via een interface.
    - Data-driven: Het model start zodra het data ontvangt en produceert output.
    - Data-visiting: Bij grote datasets wordt het model naar de data gebracht.
5. Maak je gebruik van specifieke standaarden (bijvoorbeeld voor orchestratie of data-driven processen)

Benadering en ontsluiting van rekenmodellen

6. Hoe benader je rekenmodellen?
    - Via een eigen interface, een domeinspecifieke standaard, of een generieke standaard (bijv. OpenMI, BMI, SISO, OGC API Processes)?
7. Welke (inter)nationale initiatieven voor modelinterfaces ben je bekend, en heb je implementatie-ervaring?
8. Hoe ontsluit je rekenmodellen?
    - Via koppelvlakken (bijv. REST API), als software (bijv. Docker containers), of als compileerbare code?

Ondersteuning en certificering

9. Welke opties voor ondersteuning zijn noodzakelijk?
    - Standaarden voor data-provenance (bijv. lablogboeken voor reproduceerbaarheid).
    - Certificering van modellen of implementaties door softwareleveranciers.
10. Is er behoefte aan afspraken over modeldeployment?
    - Bijvoorbeeld gebruik van standaard containers, documentatie of ondersteuning vanuit experts.

Verdere Interoperabiliteit

11. Zijn er specifieke aanvullingen nodig op bestaande interface-standaarden?
12. Zijn aanvullende afspraken nodig voor publiek-private samenwerking (bijvoorbeeld om standaarden te ondersteunen die door de publieke sector zijn vastgesteld)?

Verdienmodellen en Samenwerking

13. Wat zijn de belangrijkste uitdagingen en kansen in het ontwikkelen van verdienmodellen voor rekenmodellen in digitale tweelingen?
14. Hoe kan samenwerking worden gestimuleerd tussen publieke en private partijen om tot interoperabele oplossingen te komen?

Geonovum

T 033 460 41 00

E info@geonovum.nl

I www.geonovum.nl

bezoekadres

Barchman Wuytierslaan 10

3818 LH Amersfoort

postadres

Postbus 508

3800 AM Amersfoort

GEONOVUM