



---

# Digital Twins for decision making

The uncertain half of the Twin

Ron Wehrens, Guus ten Broeke, Hans Stigter, Marijn Gülpen, Martin Knotters, Marijn Poortvliet,  
Myrjam de Graaf, Geerten Hengeveld



**WAGENINGEN**  
UNIVERSITY & RESEARCH

---



---

# Digital Twins for decision making

The uncertain half of the Twin

Ron Wehrens<sup>1</sup>, Guus ten Broeke<sup>2</sup>, Hans Stigter<sup>2</sup>, Marijn Gülpen<sup>3</sup>, Martin Knotters<sup>4</sup>, Marijn Poortvliet<sup>3</sup>,  
Myrjam de Graaf<sup>4</sup>, Geerten Hengeveld<sup>1</sup>

1 Wageningen Plant Research, Wageningen University & Research

2 Mathematical & Statistical methods, Wageningen University

3 Strategic Communication, Wageningen University, Social Sciences Group

4 Wageningen Environmental Research, Wageningen University & Research

This research was (partly) subsidised by the Dutch Ministry of Agriculture, Nature and Food Quality  
(project number KB-41-003-003).

Wageningen Environmental Research  
Wageningen, March 2021

---

Reviewed by:

Ir. Arjan Budding, Programme leader Sustainable water management (Environmental Sciences Group)

Ir. Mirjam Hack – ten Broeke, Team leader Soil, Water and Land use (Wageningen Environmental Research)

Approved for publication:

Ir. Mirjam Hack – ten Broeke, Team leader Soil, Water and Land use  
(Wageningen Environmental Research)

Report 3071

ISSN 1566-7197



---

Wehrens, R., G. ten Broeke, H. Stigter, M. Gülpen, G. Hengeveld, M. de Graaf, 2021. *Digital Twins for decision making; The uncertain half of the Twin*. Wageningen, Wageningen Environmental Research, Report 3071. 28 pp.; 3 fig.; 2 tab.; 27 ref.

Drie hoofdtypen onzekerheid worden geïdentificeerd die relevant zijn voor Digital Twins:

(1) modelonzekerheid, (2) onzekerheid in de toestanden en (3) onzekerheid in de run time. Om grip te krijgen op deze onzekerheden, worden in dit rapport drie methoden besproken: (1) Kalman-filtering, (2) gevoeligheidsanalyse, (3) experimentele verstoring. Voor het inzetten van Digital Twins wordt geadviseerd om binnen reactieve beleidsproblemen deze te gebruiken als hulpmiddel en daarbij statistische onzekerheidsinformatie mee te nemen in besluitvorming. Voor preventieve beleidsproblemen kan onzekerheidsinformatie gebruikt worden om aan te geven waar kennis en informatie mist. Voor transformatieve beleidsproblemen zal de DT vooral dienen als een communicatiemiddel waarbij de waardeoordelen van partners mee kunnen worden genomen.

Three main types of uncertainty relevant for digital twins are identified: (1) Model uncertainty, (2) State uncertainty and (3) Run time uncertainty. For balancing these different uncertainties three methods are discussed: (1) Kalman filtering, (2) sensitivity analysis, (3) experimental perturbation. The Digital Twin for decision making can be deployed in various ways. The advice is to use this as a tool within reactive policy problems and to include *statistical uncertainty information* in decision making. Uncertainty information can be used for preventive policy problems to indicate where knowledge and information is missing. For transformative policy problems, the DT will mainly serve as a means of communication in which the judgments of partners can be included.

Keywords: Digital Twin, decision making, uncertainty, water management, Walker, water board, draught, Kalman filter, sensitivity

The pdf file is free of charge and can be downloaded at <https://doi.org/10.18174/543905> or via the website [www.wur.nl/environmental-research](http://www.wur.nl/environmental-research) (scroll down to Publications – Wageningen Environmental Research reports). Wageningen Environmental Research does not deliver printed versions of the Wageningen Environmental Research reports.

© 2021 Wageningen Environmental Research (an institute under the auspices of the Stichting Wageningen Research), P.O. Box 47, 6700 AA Wageningen, The Netherlands, T +31 (0)317 48 07 00, [www.wur.nl/environmental-research](http://www.wur.nl/environmental-research). Wageningen Environmental Research is part of Wageningen University & Research.

- Acquisition, duplication and transmission of this publication is permitted with clear acknowledgement of the source.
- Acquisition, duplication and transmission is not permitted for commercial purposes and/or monetary gain.
- Acquisition, duplication and transmission is not permitted of any parts of this publication for which the copyrights clearly rest with other parties and/or are reserved.

Wageningen Environmental Research assumes no liability for any losses resulting from the use of the research results or recommendations in this report.



In 2003 Wageningen Environmental Research implemented the ISO 9001 certified quality management system. Since 2006 Wageningen Environmental Research has been working with the ISO 14001 certified environmental care system. By implementing the ISO 26000 guideline, Wageningen Environmental Research can manage and deliver its social responsibility.

---

# Contents

	<b>Verification</b>	<b>5</b>
	<b>Preface</b>	<b>7</b>
	<b>Summary</b>	<b>9</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>Bronnen van onzekerheid</b>	<b>13</b>
<b>3</b>	<b>Grip op onzekerheid: een filtering framework voor onlineverwerking van data in de DT</b>	<b>16</b>
<b>4</b>	<b>Grip op onzekerheid middels sensitiviteitsanalyse</b>	<b>17</b>
<b>5</b>	<b>Omgaan met onzekerheid bij beleidsvorming</b>	<b>19</b>
	5.1 Theoretisch kader	19
	5.1.1 Structuur	19
	5.1.2 Componenten van onzekerheid	20
	5.1.3 Monstertheorie	21
	5.2 Beleidsproblemen bij droogtevraagstukken	21
	5.3 Omgangsstrategieën: onzekerheidsinformatie binnen de Digital Twin	22
	<b>References</b>	<b>26</b>

---

---

# Verification

Report: 3071

Project number: KB-41-003-003

Wageningen Environmental Research (WENR) values the quality of our end products greatly. A review of the reports on scientific quality by a reviewer is a standard part of our quality policy.

Approved reviewer who stated the appraisal,

position: programme leader Sustainable water management

name: Arjan Budding

date: February 11 2021

Approved team leader responsible for the contents,

name: Mirjam Hack – ten Broeke

date: February 2 2021





---

# Preface

When measuring and modelling real life systems, as within a Digital Twin, uncertainties are paramount. When combining measurements and models these uncertainties interact with each other. A Digital Twin can be seen as a network of measurements and modelling methods, through which uncertainties propagate, emerge, multiply and potentially can be bounded. Some of these uncertainties are known and can be quantified (e.g. measurement precision), some are inherent to a model structure (chaotic attractors), whereas others are the result of imprecise knowledge on system functioning or modelling decisions in digital twin construction.

Uncertainty is not a number, however. Digital Twins are developed to provide decision support and actionable knowledge. Within this use, knowledge of uncertainties - where they originate, how they propagate and how they can be kept in check - provides additional flavour to the decision support and actionable knowledge provided. In this study we collected methodologies to get to know these uncertainties within Digital Twins and to make optimal use of this knowledge when Digital Twins are applied to inform decision making.

There are different dimensions to uncertainty, and not all uncertainties are quantifiable. The presented methodology precedes and goes beyond the formal quantitative uncertainty analysis through analytical approaches or Monte Carlo simulation.

With the Digital Twin (DT) on water management as example, we present methods to

- i. Identify the sources of uncertainty in the digital twin (chapter 2)
- ii. Explore what can be done to keep uncertainty within boundaries (chapter 3 & 4)
- iii. Communicate uncertainty within DT decision support (chapter 5)

The summary is written in English, the report itself is in Dutch.



---

# Summary

A digital twin can be seen as a network of measurements and modelling methods representing a real life system. The fidelity of reproduction of the dynamics of the physical system it represents is a core property of a digital twin. When applying the concept of a digital twin to the landscape scale objects, like the waterbodies in a watershed or management area, uncertainty in describing the dynamics impacts the fidelity of the digital twin.

This report deals with three components of uncertainty regarding digital twins, with a digital twin for water management at landscape scale as example. These three components are

1. Sources of uncertainty
2. Managing uncertainty
3. Communicating uncertainty.

For the first two components a literature study was carried out with a prototype watershed scale digital twin as example. For the third component an intern at Waterschap Vallei & Veluwe carried out interviews with people at different levels within the organization.

## **Identify the sources of uncertainty in the digital twin**

The sources of uncertainty can be categorized using different dimensions (e.g., using the Walker Matrix or the NUSAP terminology). We identify three main types of uncertainty relevant for digital twins:

1. Model uncertainty – i.e. uncertainty relating to the structuring and parameterization of the system representation.
2. State uncertainty – i.e. uncertainty relating to the initial conditions of the system simulation.
3. Run time uncertainty – i.e. uncertainty relating to the translation of observations and measurements into external forcing of the simulation.

## **Keep uncertainties within bounds**

Three methods for balancing these different uncertainties are discussed. Each of these methods involves a thorough expert interpretation of the results to manage the uncertainties.

Firstly one can use Kalman filtering. The Kalman filter weights the different uncertainties in run-time to optimise the estimates of parameters being used in the digital twin. This results in finetuning of these parameter estimates and knowledge of the components of the digital twin where uncertainty is highest.

Secondly one can study the sensitivity of the digital twin to variation in the input parameters. This sensitivity informs us about the importance of reducing uncertainty in specific model components of measurement series. Such sensitivities can be time-dependent. Low sensitivity can result from redundant parameter combination.

Thirdly and finally one can use this knowledge in experimental design. Based on the knowledge of the sensitivity of the digital twin, the physical system is experimentally perturbed (and measured) to optimise the estimation of specific parameter values or model structures.

## **Communicate uncertainty within DT decision support**

The aim is to identify the role of uncertainty in decision making and to advise on how uncertainty information within the DT can be managed and used by Dutch water boards, specifically water board Vallei en Veluwe. The focus of this research is on decision making regarding drought issues. The results are based on interviews held with water board employees and a board member.

---

In this research, the policy problems related to drought were determined. These are divided into *reactive*, *preventive* and *transformative* policy problems. Subsequently, the *structure* and *complexity* was determined for each policy problem. The reactive policy problems are well structured. Preventive policy problems are moderately structured, in which there is consensus on goals, but not on relevant knowledge. The transformative policy problems are moderately structured (consensus on knowledge but not on goals), and unstructured.

We also analyzed how water boards currently deal with uncertainty. Uncertainty in *models* and *data* seems to be discussed mainly with policymakers and region managers and seems to be reflected in reactive policy problems. Program managers and board advisers are more interested in uncertainty within the *social system*. This type of uncertainty has also significance for day-to-day management and in preventive and transformative policy problems. Quantitative uncertainty information is not used in decision making, instead uncertainty is sometimes expressed in words during meetings or in reports. It can be expressed in financial terms in the communication to the board. Many respondents indicate that uncertainty may be included more explicitly. This can for example lead to more understanding and support regarding decisions taken and to more substantiated research.

The DT can be deployed in various ways, for various tasks and at various levels within the water board. The advice is to use this as a tool within reactive policy problems and to include *statistical uncertainty information* in decision making. Uncertainty information can be used for preventive policy problems to indicate where knowledge and information is missing. For transformative policy problems, the DT will mainly serve as a means of communication in which different scenarios can be shown. Within these policy problems, judgements of partners are important and can be included in these scenarios. The DT can provide insight in future scenarios by using long-term predictions.

Based on this research, it is important that uncertainty itself is discussed more often so that research results can be better interpreted. Good communication about uncertainty can lead to more efficient decision making, where the DT can serve as a valuable resource.

---

# 1 Inleiding

Een Digital Twin (DT), een virtueel model van een onderzoeksobject, is een complex stuk software waarbij het geven van de juiste response ondergeschikt is aan de correctheid van de gemodelleerde relaties. Het wezenlijke kenmerk van een Digital Twin dat de Twin onderscheidt van 'gewone' softwareprogramma's is dat niet precies gedefinieerd is welke vragen gesteld zullen worden – dat kan werkelijk alles zijn dat met het object te maken heeft. Met andere woorden: een DT zal alleen succesvol zijn als de onderliggende causale verbanden correct in de Twin gerepresenteerd zijn. Het is niet verrassend dat DT's vooral in de mechanische industrie opgang doen: daar is immers alles exact bekend van de ontwerptafel.

Een belangrijk aspect is verder nog dat DT's continu voorzien worden van verse gegevens, waardoor het model steeds aangepast kan worden aan de veranderende werkelijkheid. Een stresstest van een motor kan bijvoorbeeld tegelijk in de DT en in werkelijkheid worden uitgevoerd. Men kan dan ten eerste de vergelijking maken tussen het werkelijke en virtuele gedrag, maar men kan ook metingen (bijvoorbeeld temperatuur) direct terugvoeren naar de DT om deze zo goed mogelijk op de werkelijkheid te laten aansluiten. Men kan zelfs specifieke omstandigheden opzoeken die licht werpen op nog niet zo goed begrepen stukken van het studieobject en uit de experimentele resultaten convergeren naar een toestand van begrip. Hierop komen we later nog terug.

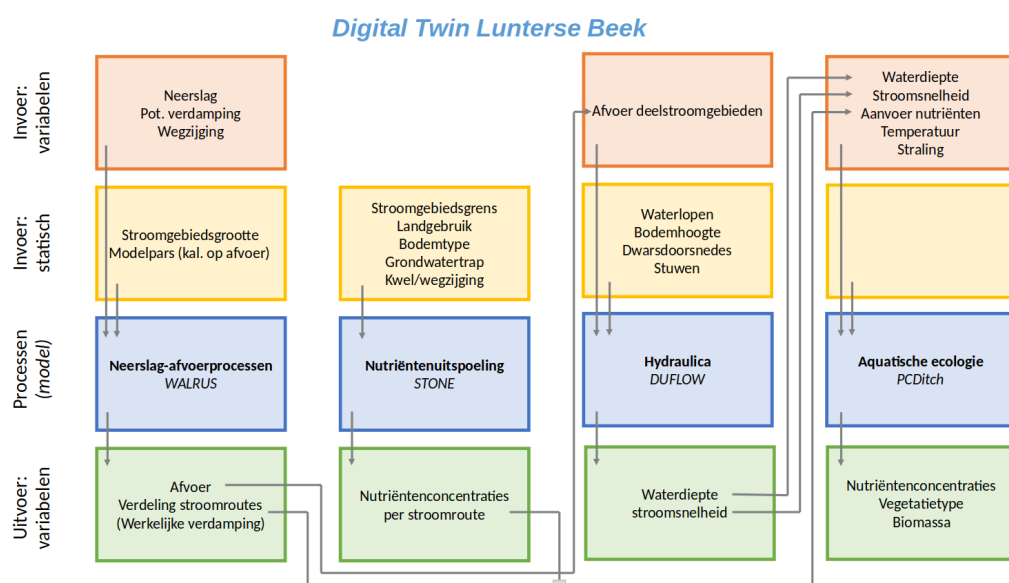
De toepassing van DT's in een bredere wetenschappelijke context, bijvoorbeeld een typisch Wageningse domein als het modelleren van een stuk Nederland, is niet triviaal – dat zal na het bovenstaande geen verrassing zijn. Vaak ontbreekt de benodigde kennis van het studieobject en is men gedwongen uit te gaan van benaderingen; zelfs het betere gokwerk wordt niet geschuwd. Realtime gegevens zijn schaars en onderhevig aan allerlei bronnen van onzekerheid. Tegelijk is de potentiële waarde van een DT enorm. Als je inderdaad in staat bent een goed functionerende DT te bouwen, kun je met recht beweren het studieobject te begrijpen. In feite is dit de wetenschappelijke aanpak die in de natuurkunde al eeuwen opgang doet: als je model in staat is voorspellingen te doen over fenomenen die overeenkomen met de metingen, geeft dat vertrouwen in je model, vooral als de voorspellingen zijn gedaan voordat de bevestigende metingen zijn uitgevoerd.

Het is dan ook vanzelfsprekend dat de onzekerheid in een DT grote aandacht behoeft – deze geeft namelijk de bandbreedte aan rond de gegeven antwoorden waarbinnen je redelijkerwijs het correcte antwoord zou verwachten. Als deze bandbreedte bijzonder groot is, heeft de toepassing van een DT geen enkele waarde ("Morgen zal het tussen de -20 en +50 graden worden, en het kan regenen of niet."). In dit rapport gaan we in op een aantal methoden om op structurele en systematische wijze een aantal doelen te bereiken:

1. Een inventarisatie van onzekerheidsbronnen in de DT.
2. Een beschouwing van hoe deze onzekerheden elkaar beïnvloeden en doorwerken in het uiteindelijke antwoord.
3. Een opsomming van methoden om de uiteindelijke onzekerheid terug te brengen, bijvoorbeeld door specifiek de bottlenecks aan te pakken.
4. Identificatie van de rol van onzekerheid binnen besluitvorming en op basis daarvan een advies over hoe informatie over onzekerheid rond de DT kan worden vastgelegd en kan worden benut bij besluitvormingsprocessen.

Om het allemaal wat concreet te maken, nemen we een specifieke DT als voorbeeld die een stuk van de Lunterse Beek modelleert, opgezet door WUR in samenwerking met het waterschap Vallei en Veluwe. Voor het laatste doel zoomen we in op de besluitvorming bij droogtevraagstukken binnen voornoemd waterschap.

Elke DT kent, abstract gezien, een aantal verschillende lagen. In de eerste laag wordt het (wiskundige) model geformuleerd dat de werkelijkheid moet beschrijven. Dat bestaat typisch uit een set toestands- of differentiaalvergelijkingen, en heeft een algemeen karakter: door parameters in het model te veranderen, kan het toegespitst worden op bepaalde specifieke situaties. Ook in het geval van de DT van het waterschap is dat het geval: de modelparameters kunnen zodanig aangepast worden dat ze een specifiek gebied beschrijven (hier de Lunterse Beek; voor een ander stroomgebied hebben ze andere waarden). De volgende laag van de DT bestaat uit de begintoestand van het systeem. De DT van de Lunterse Beek kan in principe gebruikt worden om het gehele jaar 2020 te modelleren, maar ook om, uitgaande van de huidige situatie, de toestand van het systeem over twee weken te voorspellen. In het eerste geval is de initiële toestand die van 1 januari 2020; in het tweede geval die van vandaag (wat dat dan ook moge zijn). Dan is de DT klaar om voorspellingen in de toekomst te maken, afhankelijk van de derde laag, de zogenaamde forcing data, ook wel runtime data genoemd (bijvoorbeeld gegevens over het weer of managementinformatie). Uiteindelijk zal het systeem alle informatiebronnen combineren om bijvoorbeeld antwoord te geven op de vraag of op een bepaalde plek eendenkroos zal gaan groeien (een vrij simpele vraag, maar voor de Waterschap-DT in zijn huidige vorm al uitdagend genoeg).



**Figuur 1** Schematisch overzicht van de DT van de Lunterse Beek.

De Waterschap-DT, schematisch weergegeven in Figuur 1, bestaat op dit moment uit een serieschakeling van vier afzonderlijke componenten:

1. WALRUS (Wageningen Lowland Runoff Simulator): deze component beschrijft hoe neerslag afgevoerd wordt in het systeem (Brauer et al., 2014a en 2014b).
2. STONE (Samen Te Ontwikkelen Nutriënten Emissie model): deze component modelleert de uitspoeling van nutriënten naar grond- en oppervlaktewater (Wolf et al., 2003). STONE bestaat uit een schakeling van verschillende modellen, die sequentieel worden uitgevoerd.
3. DUFLOW: deze component, ooit opgezet door STOWA, modelleert het oppervlaktewaternetwerk. Als output geeft dit waterdiepte en stroomsnelheid. De afvoer die door WALRUS wordt berekend, wordt hier als invoer gebruikt.
4. PCDITCH: deze component modelleert de aquatische ecologie (Janse, 2005). Het model is oorspronkelijk opgezet om sloten te modelleren, rechte stukken water zonder stroming. De toepassing op de Lunterse Beek is dus nogal een stap: een beek is zeker niet recht en er is stroming.

Op elk van deze onderdelen is de bovengenoemde indeling in lagen van toepassing. Dat betekent dat onzekerheid in een eerdere schakel zoals WALRUS van invloed is op de latere componenten. De schakeling kan bovendien nog extra onzekerheden veroorzaken, bijvoorbeeld vanwege een verschillend gebruik van terminologieën.

---

## 2 Bronnen van onzekerheid

Uit de algemene beschrijving van de DT kan een aantal elementen worden gehaald die tot onzekerheden leiden. De eerste taak is die onzekerheden te benoemen. De Walker-matrix (Van der Sluijs et al., 2004) kan worden gebruikt om de geïdentificeerde onzekerheden in één overzicht samen te vatten en te communiceren. De matrix onderscheidt drie dimensies van onzekerheid: locatie, niveau en type. Het niveau van de onzekerheid beschrijft de mate van onzekerheid, op een schaal van absolute zekerheid tot onwetendheid. Het type onzekerheid maakt onderscheid tussen onzekerheid door gebrek aan kennis (epistemische onzekerheid) en onzekerheid door natuurlijke variabiliteit (aleatorische onzekerheid). Zowel het niveau van de onzekerheid als het type onzekerheid kan voor iedere bron van onzekerheid worden beoordeeld en genoteerd worden in de matrix. De locatie van onzekerheid beschrijft waar in de toepassing de onzekerheid zich bevindt. In de context van de Digital Twin maken we onderscheid tussen drie onderdelen: onzekerheden in het gebruikte model (inclusief onzekerheden in modelparameters), onzekerheden in toestanden (zoals initiële condities) en onzekerheden in runtimegegevens. De aanpak die we volgen, is een lijst vragen op te stellen voor ieder van die onderdelen. Met behulp van deze vragenlijst kunnen de bronnen van onzekerheid worden geïdentificeerd en kunnen het niveau en type van de onzekerheid voor iedere bron worden beoordeeld. Tabel 1 toont een voorbeeld van hoe verschillende geïdentificeerde onzekerheden vervolgens in een Walker-matrix kunnen worden samengevat.

Om per bron van onzekerheid een uitgebreidere beschrijving van de onzekerheid te maken, kan de NUSAP-notatie (Van der Sluijs et al. 2005) worden gebruikt. NUSAP is een hulpmiddel om de onzekerheid in data die in de Digital Twin worden gebruikt (zoals parameterwaarden, kalibratiedata, invoerdata, begintoestanden etc.) uit te drukken. In deze notatie wordt onderscheid gemaakt tussen vijf aspecten: Numeral, Unit, Spread, Assessment en Pedigree.

Numeral is de geschatte parameterwaarde, normaal gesproken uitgedrukt als getal. Unit omschrijft de bijbehorende eenheid. Indien relevant kan hier ook andere informatie worden toegevoegd, zoals de datum waarop een meting is uitgevoerd. Spread bevat de fout behorend bij de geschatte waarde. Assessment bevat een kwalitatieve beoordeling van de informatie over de onzekerheid. Hier kan bijvoorbeeld worden aangegeven of een schatting conservatief is of optimistisch. Pedigree kan worden uitgedrukt in een matrix en bevat beoordelingen over het proces waarmee de informatie is verkregen. Afhankelijk van de toepassing kan worden gekozen welke criteria in de matrix worden opgenomen. Het kan hier bijvoorbeeld gaan om een beoordeling van gebruikte meetmethodes of om een onafhankelijke review van expertkennis.

Zodra met behulp van bovenstaande methoden een compleet beeld is verkregen, kan de uiteindelijke onzekerheid in het antwoord bepaald worden en is het tijd voor de volgende stap: nadenken over hoe de finale onzekerheid te verkleinen. Op beide aspecten komen we in een volgende paragraaf nog terug.

Zoals al gezegd, kunnen onzekerheden in een Digital Twin in een aantal categorieën worden ingedeeld. Hieronder volgen enkele vragen voor deze categorieën die helpen deze onzekerheden beter te definiëren.

1. Modelfouten – de fundamentele onmogelijkheid de werkelijkheid compleet in een model vast te leggen.
  - a. Welke benaderingen worden gemaakt in het model? Met 'benaderingen' bedoelen we hier opzettelijke versimpelingen van de werkelijkheid, bijvoorbeeld: een kromme kan op een zeer lokaal niveau vaak prima als een rechte lijn worden beschreven. Het hangt er natuurlijk van af hoe groot de fout door deze benadering is in vergelijking met andere fouten. Deze benaderingen kunnen als doel hebben de berekeningen sneller te laten verlopen of foutschattingen mogelijk te maken.
    - i. Zijn er factoren te noemen in het systeem die niet worden gemodelleerd, maar wel van belang zijn?



- 
- ii. In hoeverre kunnen events, zoals een grote regenbui of een verstopping, onzekerheid opleveren in de toepassing van het model? Worden zulke events meegenomen in het model? Kan een inschatting worden gemaakt van de mogelijke consequenties van events?
    - b. Welke aannames worden gemaakt in het model? Onder 'aannames' vallen dan zaken als de verwachting dat bepaalde waarden altijd positief zullen zijn of tussen twee limietwaarden liggen. Dit moet zo expliciet mogelijk gemaakt worden. Een typische andere aanname is die van onafhankelijkheid tussen modelparameters, iets wat soms wel en soms niet gerechtvaardigd is.
    - c. Bepaling van modelparameters – het aanpassen van het 'universele' model aan het systeem dat onderwerp van studie is. Hiervoor staan in principe drie methoden ter beschikking. In sommige gevallen hebben modelparameters een directe fysieke interpretatie of kunnen ze gemeten worden. In andere gevallen zijn ze indirect af te leiden door het systeem te kalibreren op trainingsdata. Tot slot bestaat de mogelijkheid dat ze geschat kunnen worden op grond van expertkennis (dat kunnen echte experts – dat wil zeggen: personen – zijn, maar ook kennis beschreven in de wetenschappelijke literatuur). Voor deze drie situaties kunnen dan weer vragen worden opgesteld:
      - i. Directe bepaling van modelparameters: wat is bekend over de meetfout en de verdeling in toevallige en systematische afwijkingen?
      - ii. Kalibratie: wat is de onzekerheid in de gegevens en wat is de daardoor bepaalde onzekerheid in de modelparameters? Als er sprake is van optimalisatie om de modelparameters te bepalen: is er een uniek optimum?
      - iii. Expertkennis: is hierbij ook een onzekerheidsmarge aan te geven?
    - d. Evaluatie van het model. Dit behelst natuurlijk in eerste instantie een schatting van de te verwachten predictiefouten, maar ook vragen als "Zijn alle modelparameters relevant?" en "Waar zit de bottleneck?". Als een modelparameter bijzonder weinig invloed op de uitkomsten heeft, is het niet zinvol veel moeite te stoppen in het bepalen van optimale waarden en kan de parameter ook door een constante worden vervangen. Dit leidt dan eigenlijk weer tot een eenvoudiger model (zie punt 1). Om de relevantie van parameters te bepalen, kan een lokale (Varma et al., 2005) of globale (Saltelli et al., 2008) gevoeligheidsanalyse worden gebruikt.
    - e. Representativiteit: zijn de omstandigheden waaronder het model geacht wordt te werken compleet in kaart gebracht? Vaak verschilt de context van de DT van die waarvoor deze oorspronkelijk is ontwikkeld. Zo bestaat de DT voor waterbeheer uit vier geschakelde modellen, die niet specifiek voor de DT ontwikkeld zijn. PCDITCH, de component die de aquatische ecologie modelleert, is ontwikkeld voor sloten en wordt binnen de DT toegepast op een stromende en meanderende beek. Dit draagt bij aan de onzekerheid in de DT.
  2. Onzekerheden in toestanden, met name de begintoestand. Een Digital Twin zoals die van het waterschap kan op verschillende manieren gebruikt worden, bijvoorbeeld om scenario's door te rekenen of om managementondersteuning te bieden (moeten de sluizen opengezet worden gegeven de huidige weersverwachting?). Voor de afzonderlijke componenten van de DT kan de invoer ook bestaan uit uitvoer van voorgaande componenten. Zo gelden de nutriëntenconcentraties uit STONE als invoer voor de modellering van aquatische ecologie in PCDITCH. Afhankelijk van het type invoer kunnen de volgende vragen worden gesteld:
    - a. Wat is de omvang van de onzekerheden in de initialisatiegegevens? Als de initialisatiegegevens uit eerdere onderdelen van de DT gehaald worden, is er dan een schatting van de onzekerheden, bijvoorbeeld door toepassing van een Monte Carlo-onzekerheidsanalyse (EPA, 1997)?
    - b. Zijn er missing values? Behandeling van missing values zal afhangen van de oorzaak waarom de waarden ontbreken. Als er niets bekend is over ontbrekende waarden, zal voor de initialisatie een waarde moeten worden aangenomen. Met een onzekerheidsanalyse zou het effect hiervan op onzekerheid in modeluitkomsten kunnen worden geschat.
    - c. Wordt er een sanity check gedaan op de gegevens? Liggen de waarden binnen relevante marges?
    - d. Zijn alle gegevens beschikbaar op dezelfde ruimtelijke schaal en dezelfde tijdschaal (waar relevant)? Als dit niet het geval is, hoe wordt hiermee omgegaan en kan een schatting worden gemaakt van de onzekerheid die hieruit voortkomt? Bij ruimtelijke interpolatie bijvoorbeeld kan een schatting van de bijbehorende onzekerheid worden gemaakt.

### 3. Gegevens gebruikt during runtime

- a. Gemeten forcing data: Hiervoor gelden punt a t/m d van onder systeem initialisatie met gemeten data. Daarnaast hebben deze data in deze Twin een temporele resolutie. De vraag is of de beschikbare data de juiste resolutie hebben. Deze vraag is bijzonder relevant als de input van een module bestaat uit de output van een andere; niet altijd worden dezelfde definities gehanteerd als het over resolutie gaat. Dat geldt niet alleen voor temporele resolutie, maar ook voor spatiële resolutie en in sommige gevallen zelfs voor semantische resolutie (hoeveel details neem je mee in categorische data?). Over het aspect van resolutie wordt door een werkgroep op dit moment een essay geschreven (Vullings et al., 2020).
- b. Forcing data in de vorm van functies: voor sommige forcing data wordt aangenomen dat deze door een functie beschreven worden. In WALRUS wordt bijvoorbeeld een sinusfunctie gebruikt om de evapotranspiratie te beschrijven. Deze functie benadert de seizoensafhankelijkheid. Een ander voorbeeld is de beschrijving van regenval als een Poisson-proces in WALRUS. Dit kan worden gezien als een modelbenadering (punt 1a) en als zodanig worden behandeld.

**Tabel 1** Een Walker-onzekerheidsmatrix kan worden gebruikt om de onzekerheden in de Digital Twin samen te vatten. In het onderstaande voorbeeld is voor enkele bronnen van onzekerheid de locatie aangegeven. Ook voor het niveau van de onzekerheid en het type onzekerheid kan hier in de matrix een beoordeling worden opgenomen.

Bron van onzekerheid	Locatie						Niveau			Type	
	Context	Invoerdata	Modelbenadering	Modelaannamen	Parameters	Output	Statistische onzekerheid	Scenario onzekerheid	Onwetendheid	Epistemische onzekerheid	Aleatorische onzekerheid
Neerslagafvoer Stroomgebiedsgemiddeld			X								
Onafhankelijkheid modelparameters				X							
Kalibratie modelparameters					X						
Omstandigheden in toepassing model (e.g., gebruik PCDitch voor sloot ipv. beek)	X										
Onzekerheid in begintoestand		X									
Onzekerheid in gemeten forcing data		X									
...											
Modelvoorspellingen (e.g., groei eendenkroos)						X					

---

### 3 Grip op onzekerheid: een filtering framework voor onlineverwerking van data in de DT

Vanuit de systeemtheorie kunnen methodologieën worden aangereikt die het verwerken van onzekerheden beter faciliteren dan nu het geval is. Een heel bekend algoritme in deze context dat we hier als voorbeeld noemen, is het extended Kalman-filter (EKF) (Jazwinski, 1970; Beck, 1976). Dit is een zogenaamde 'toestand-schatter' die onlinemetingen verwerkt op een geavanceerde manier, dat wil zeggen rekening houdend met de onzekerheden in model en meting(en). De onzekerheid in model en meting(en) wordt in het EKF voortdurend gewogen om te komen tot een versterkingsmatrix (de Kalman gain matrix) die de fout tussen gemeten en voorspelde waarde (door het model) weegt in termen van de twee veronderstelde onzekerheidsbronnen, namelijk meetonzekerheid en modelonzekerheid. Deze voorspelfout wordt vervolgens teruggekoppeld in veranderingen in modelparameters (een parameterupdate) en/of de toestand van het systeem (denk bijvoorbeeld aan concentraties van BOD/DO in het water als maat voor de waterkwaliteit). Het mooie van dergelijke algoritmes is dat schattingen in toestanden en/of parameters uit het model, tezamen met de geassocieerde onzekerheden in diezelfde toestanden en parameters, voortdurend worden geactualiseerd. Onzekerheden worden dus online voortdurend meegenomen en gebruikt in de updates van de schattingen (zodra er een nieuwe meting binnenkomt).

Een interessante output van een dergelijk online schattingsalgoritme is dat de modelparameters voortdurend worden geüpdatet bij elke nieuwe meting die binnenkomt en er dus een trajectorie wordt berekend van updates van (constante) parameterschattingen, iets wat binnen de context van DT's cruciaal is. Indien nu die updates van de parameterschattingen sterk gaan afwijken van de (van tevoren) veronderstelde (constante) waarde, dan kan dat een sterke indicator zijn van een gebrek aan voorspellende waarde van het gegeven model. Je kunt dus op basis van de online geschatte parametertrajectoriën overwegen om een deel van het model te herzien en/of in te zoomen op dat deel van het model waar de sterk variërende parameter een belangrijke rol speelt. Kennelijk is in zo'n geval het model niet in staat om met de gegeven constante parameterwaarden een juiste voorspelling te genereren en moet er door het EKF voortdurend aan de knoppen worden gedraaid om de meetwaarden te kunnen matchen. Uit dergelijke parametervariëaties kan daarom veel worden afgeleid over de voorspellende waarde (en corresponderende onzekerheid) van het model als geheel. Bovendien geven de schattingstrajectoriën van de parameters aanwijzingen over de zwakke delen in het model die voor een verfijning/verbetering in aanmerking komen en waar dus nieuw onderzoek naar kan worden gedaan; Beck, (1987).

Een moeilijk aspect van het online schatten met een EKF is dat a priori de grootte van de onzekerheden in model en meting(en) moet worden vastgesteld. Dit is in het algemeen lastig voor met name het model (meetonzekerheid is in het algemeen makkelijker om te specificeren) en hier is het dus belangrijk om rekening te houden met de verschillende bronnen van onzekerheid die eerder zijn genoemd. Een inventarisatie van die verschillende bronnen is essentieel voor het succesvol filteren van onlinemetingen. Bij een redelijke schatting van de modelfout (en die is vaak wel te geven) kan er interessante informatie worden gegenereerd door het filter, waarmee aanwijzingen worden gegeven over waar precies de grootste bron van onzekerheid zit in het model. Voor modelontwikkelaars is dit vanzelfsprekend heel belangrijke informatie. Verder weten we dat het extended Kalman-filter een suboptimale schatter is en vanwege het niet-lineair zijn van de onderliggende modelstructuur is het moeilijk om de onzekerheden in toestanden en parameters precies te schatten. Echter, met de toename in rekenkracht zijn er aantrekkelijke alternatieven ontwikkeld (zoals het ensemble of particle filter) die gebaseerd zijn op verdelingen/distributies in de dynamische grootheden (en parameters). Dergelijke verdelingen komen tot stand door honderden simulaties te combineren en te kijken naar gevoeligheden van de variabelen voor veranderingen in bijvoorbeeld de modelparameters. Het is met de huidige rekenkracht zeker haalbaar om dergelijke berekeningen voor grote modellen uit te voeren.

---

## 4 Grip op onzekerheid middels sensitiviteitsanalyse

Sensitiviteiten of gevoeligheden kunnen worden gedefinieerd voor verschillende onderdelen van het model. Zo zijn er gevoeligheden ten aanzien van inputs, toestanden en parameters. Ook de beginvoorwaarden (initiële condities of IC's) kunnen worden geanalyseerd om te zien welke IC's het grootste gevolg hebben voor de modelvoorspelling. Gevoeligheden kunnen voor zowel een keten van modellen tezamen alsook voor de individuele componenten in het model berekend worden. Hierdoor kan worden vastgesteld welke onderdelen in de keten het cruciaalst zijn voor een bepaalde voorspelling van het model als geheel (de zwakste schakel in de modellen trein).

Een belangrijk voordeel van gevoeligheden is dat ze (lokaal) betrekkelijk eenvoudig berekend kunnen worden. Er is slechts een flink aantal simulaties nodig van het model (of de modellentrein) waarbij in elke simulatie een parameter een klein beetje wordt geperturbeerd (veranderd), waardoor de verschillen in de voorspelde curves (de outputs van het model) berekend kunnen worden. Het is daarbij belangrijk je te realiseren dat gevoeligheden veranderen in de tijd. Soms kan er bijvoorbeeld gedurende een tijdsinterval (bijvoorbeeld 's nachts) een nul-gevoeligheid zijn voor een bepaalde parameter, terwijl op andere momenten (bijvoorbeeld gedurende de dag) dit juist niet het geval is en de parameter een grote invloed heeft op de modelvoorspelling. Uit de trajectoriën van de sensitiviteiten kan dergelijke informatie vrij eenvoudig worden afgelezen.

Een ander belangrijk aspect dat bij gevoeligheidsberekeningen kan worden bepaald, is of er parameters in het model zijn die redundant zijn, dat wil zeggen dat de waarde van dergelijke parameters (nagenoeg) geen invloed heeft op de uitkomst of output van het model. Het kan bovendien zo zijn dat bepaalde *combinaties van parameters* een totale gevoeligheid nul opleveren, hetgeen wil zeggen dat de waarden van een dergelijke combinatie van parameters mag variëren, terwijl er een *exact (mathematisch!)* gelijke modeluitkomst uit de simulatie komt. Dergelijke parameters zijn in zo'n geval niet identificeerbaar en moeten, indien mogelijk, worden geëlimineerd uit het model: hetzij door vaststellen van een literatuurwaarde die als vast en gegeven wordt meegenomen, hetzij door middel van een transformatie waarmee bijvoorbeeld drie parameters worden vervangen door twee parameters die wel identificeerbaar zijn (Stigter et al., 2017).

Belangrijk voor het bepalen van de redundanties in het model is de gevraagde output van de DT voor bepaalde (management)taken. Het zijn namelijk de gevoeligheden van precies die outputs (voorspellingen) aangaande modelparameters of beginwaarden, die bepalen of delen van het model redundant zijn ja of nee. Een extra stap die in deze context gemaakt kan worden, is om te reflecteren op een doelfunctie van het ecosysteem die door middel van management geoptimaliseerd moet worden. Zo'n doelfunctie kan met behulp van een DT worden geëvalueerd voor verschillende scenario's. Het is nu met behulp van gevoeligheidsanalyses ook mogelijk om te kijken naar de gevoeligheid van een dergelijke doelfunctie in plaats van 'alleen maar' de voorspellingen/outputs van de DT.

De gevoeligheden (sensitiviteiten) in bovenstaande zijn natuurlijk afhankelijk van de gekozen waarden van de parameters bij elke simulatie van het model. Het is daarom erg belangrijk dat de parameters in een gevoeligheidsanalyse goed worden gekozen en/of van tevoren worden gekalibreerd. Dat lijkt vanzelfsprekend, maar kan nog weleens over het hoofd worden gezien.

Verder is de berekening van de gevoeligheden van een model (of onderdeel van een modellentrein) een opmaat naar de berekening van de zogenaamde Fisher-informatiematrix, een belangrijke component in het vaststellen van het nut (of de hoeveelheid informatie) van een gegeven datareeks (input-output data) ten behoeve van het vaststellen van de parameterwaarden (kalibratie) in het algemeen. De Fisher-matrix is direct gerelateerd aan de covariantiematrix van een gegeven set modelparameters en geeft daarmee een *schatting* van de onzekerheid in de vastgestelde parameterwaarden. Ook dat is een belangrijke maat voor verdere modelontwikkeling en het vaststellen van onzekerheden in het algemeen.

---

Er bestaan in de literatuur verschillende normen van de Fisher-matrix die aangeven hoe goed een gegeven input-output dataset geschikt is voor kalibratie van het model (Stigter and Molenaar, 2017).

Als we dan – gegeven het vaststellen/berekenen van een Fisher-matrix voor een gegeven model en input/output signalen – nog een stap verder denken, komen we uit bij het onderwerp ‘experimenteel ontwerp’. Dit behelst het *kiezen* van een geschikte input-output dataset die het informatiefst is voor de kalibratie van een gegeven set modelparameters. Sterker nog: we kunnen, gebaseerd op de modelberekeningen (tezamen met Fisher-informatie), komen tot een vaststelling van *optimaal management* van het gegeven ecosysteem op een zodanige manier dat modelkalibratie optimaal kan plaatsvinden. Voor bijvoorbeeld de Lunterse beek, waar openen/sluiten van sluizen de waterstand en flow in de beek beïnvloedt, kan er gedacht worden aan een optimalisatie van sluisbeheer op een zodanige manier dat de modelontwikkeling (het reduceren van onzekerheid in de modellentrein) gefaciliteerd kan worden. Als je op een dergelijke manier tegen het probleem aankijkt, kun je zeggen dat je met het management van je ecosysteem kunt bijdragen aan het verkleinen/beheersen van de onzekerheden in je modellentrein. Dergelijke modelgebaseerde designvragen blijken vaak heel nuttig in het iteratief verbeteren van het model als geheel. Zo’n design kan praktisch gezien wel lastig zijn te implementeren, omdat het ecosysteem bijvoorbeeld te veel (of te vaak) gestrest wordt door de beoogde (optimale) strategie. Echter, ook hier kunnen optimalisatiealgoritmes uitkomst bieden en worden getuned op een zodanige manier dat beperkingen/constraints van tevoren worden meegenomen in het optimalisatieprobleem, zodat er niet buiten de grenzen wordt gestuurd. De dynamica in het ecosysteem blijft zich dan afspelen binnen de natuurlijke (of aangelegde) grenzen en er is dan geen over-excitatie van de dynamica waardoor het systeem over-gestrest raakt en niet meer natuurlijk functioneert.

---

## 5 Omgaan met onzekerheid bij beleidsvorming

Een DT is een digitale versie van een systeem in de werkelijkheid. Onzekerheden zijn onvermijdelijk binnen een DT, omdat verschillende modellen en data met hun eigen onzekerheid worden gecombineerd. Uit verschillende onderzoeken blijkt dat onzekerheidsinformatie vaak niet wordt meegenomen en gecommuniceerd door waterbeheerders tijdens besluitvorming. Dit kan in sommige gevallen echter wel leiden tot efficiëntere beslissingen. Op welke manier onzekerheidsinformatie efficiënt kan worden meegenomen, verschilt per beleidsprobleem.

Dit deelonderzoek heeft als doel om de rol van onzekerheid binnen besluitvorming te identificeren en op basis daarvan advies te geven over hoe onzekerheidsinformatie rond de DT kan worden vastgelegd en kan worden benut door het waterschap. De focus van dit onderzoek is gericht op besluitvorming rondom de droogteproblematiek. De resultaten van dit onderzoek zijn gebaseerd op interviews gehouden met waterschapmedewerkers en een bestuurder.

### 5.1 Theoretisch kader

Communicatie over onderzoeksresultaten (wetenschapscommunicatie) vindt plaats binnen het waterschap tussen mensen met verschillende achtergronden en functies, zoals hydrologen, beleidsmakers en bestuurders. Deze verschillen kunnen wetenschapscommunicatie bemoeilijken. Verschillende redenen zijn hiervoor aan te dragen: i) er komen verschillende vormen van kennis samen (ervaring en analytische kennis), ii) er wordt een verschillende taal of jargon gebruikt en iii) er zijn verschillende belangen die meespelen (Bergsma, 2016).

Daarnaast zijn er ook nog externe partijen waarmee het waterschap samenwerkt of compromissen mee moet sluiten. De belangen van deze partijen kunnen verstrengeld zijn met die van het waterschap of met die van andere partijen en hebben daardoor invloed op besluitvorming. Dit kan leiden tot complexe beleidsproblemen. Als belanghebbenden verschillende ideeën hebben over hoe een probleem moet worden aangepakt, resulteert dit in ambiguïteit. Ambiguïteit kan normatief zijn, waarbij er verschillende ideeën zijn over de aanvaardbaarheid en ethiek, of interpretatief, waarbij onderzoeksresultaten op verschillende manieren worden geïnterpreteerd.

#### 5.1.1 Structuur

Hoe er wordt omgegaan met onzekerheid is afhankelijk van consensus over kennis en normen tussen actoren. Anders gezegd: hoe een bepaald probleem wordt aangepakt (kennis) en of dat probleem überhaupt zou moeten worden aangepakt (normen). Met deze gedachten over kennis en normen kunnen beleidsproblemen worden ingedeeld in vier niveaus van gestructureerdheid. Per niveau speelt onzekerheid een andere rol. Hieronder zijn de verschillende niveaus uitgelegd en gevisualiseerd in Figuur 2.1 (Bergsma, 2016; Petersen, 2012):

1. *Goed gestructureerd*: Er wordt sterk vertrouwd op de kunde van experts en de informatie die wordt verstrekt kan zonder problemen worden gebruikt voor beleidsvoering.  
Rol van onzekerheid: onzekerheid kan statistisch gekwantificeerd worden, aangegeven kan worden hoe groot de onzekerheidsmarges zijn en deze informatie kan worden benut bij het nemen van beslissingen.
2. *Matig gestructureerd (doelen)*: Er is consensus over de doelen die behaald moeten worden, maar niet over de manier waarop. Het is daardoor niet alleen een kennisprobleem, maar ook een politiek probleem.  
Rol van onzekerheid: nadruk op zwaktes in de kennis en missende informatie zijn belangrijk.
3. *Matig gestructureerd (middelen)*: Verschillende onverenigbare belangen spelen bij dit beleidsprobleem een rol. Beleid kan een rol spelen om mensen ofwel aan dezelfde kant te krijgen door middel van nieuwe concepten ofwel de aandacht te verleggen naar de technische kant.

Rol van onzekerheid: aandacht voor waardeoordelen in aannames en scenario-onzekerheid zijn belangrijk.

4. *Ongestructureerd*: Er is wetenschap nodig om het probleem te identificeren en aan te geven waar onduidelijkheid over is. Nieuwe informatie kan dan aan het licht komen of er is nog nooit echt goed naar gekeken.

Rol van onzekerheid: aandacht voor datgene waarvan bekend is dat het onbekend is, zwakke punten in beschikbare kennis en waardeoordelen in aannames.

Beleidsproblemen waar meerdere partijen bij betrokken zijn, zijn meestal ook complexe beleidsproblemen. Dit komt dan doordat deze partijen invloed op elkaar hebben en omdat deze partijen onvoorspelbaar zijn. Beleidsproblemen kunnen ook complex zijn doordat er sprake is van onduidelijke of onvoorspelbare fysische processen. Complexiteit kan dus zowel op fysiek als sociaal niveau zijn. Goed gestructureerde beleidsproblemen kunnen fysiek complex zijn (Turnhout, Hisschemöller and Eijsackers, 2008). In het geval van complexe beleidsproblemen is het belangrijk dat er goed wordt omgegaan met onzekerheid in de vorm van goede communicatie en transparantie. Statistische onzekerheid zou hier kunnen helpen de complexiteit te verkleinen.

Geen zekerheid van relevante kennis	<b>Matig gestructureerd (doelen)</b> <i>Nadruk op zwaktes in de kennis en missende informatie is belangrijk</i>	<b>Ongestructureerd</b> <i>Aandacht voor datgene waarvan bekend is dat het onbekend is, zwakke punten in beschikbare kennis en waardeoordelen in aannames.</i>
	<b>Goed gestructureerd</b> <i>Onzekerheid kan statistisch getoetst worden en aangegeven kan worden hoe groot de onzekerheidsmarges zijn</i>	<b>Matig gestructureerd (middelen)</b> <i>Aandacht voor waardeoordelen in aannames, scenario-onzekerheid zijn belangrijk</i>
Zekerheid van relevante kennis	Consensus over waarden	Geen consensus over waarden

**Figuur 2** Schematische weergave van de verschillende categorieën beleidsproblemen aan de hand van de consensus over waarden en de zekerheid van relevante kennis. *Cursief staat uitgelegd wat de rol is van onzekerheid per type.*

### 5.1.2 Componenten van onzekerheid

Zoals eerder is genoemd in dit hoofdstuk kan verschillend taalgebruik of jargon ervoor zorgen dat wetenschapscommunicatie wordt bemoeilijkt. In het geval van dit onderzoek kan de onzekerheid op veel manieren worden geïnterpreteerd. Klinke & Renn (2002) hebben dit begrip opgedeeld in verschillende componenten. Als niet wordt erkend dat deze vier componenten bestaan binnen het begrip onzekerheid, kan dat leiden tot misvattingen en is het moeilijk voor mensen om elkaar te begrijpen. De auteurs halen een voorbeeld aan waarin de onzekerheden rondom de toepassing van genetische technologie voor de landbouw werd besproken door verschillende wetenschappers. Doordat verschillende groepen wetenschappers het over andere vormen van onzekerheid hadden, was de perceptie van het risico rondom de toepassing ook totaal verschillend. Door goed te begrijpen wie wat verstaat onder onzekerheid, kan wetenschap beter worden gecommuniceerd. De verschillende componenten zijn de volgende:

- *Variabiliteit*: Geobserveerde of voorspelde variatie van individuele reacties op een identieke gebeurtenis binnen een groep. Voorbeelden van die groepen zijn: mensen, dieren, planten en landschappen.
- *Systematische en willekeurige fouten*: Niet-precieze of niet-perfecte metingen, kleine steekproeven, onzekerheden rondom modellen, keuzes die gemaakt worden om data te kunnen extrapoleren.
- *Onbestemdheid*: Onzekerheid als een resultaat van onduidelijke, non-lineaire, chaotische oorzaak-gevolgreacties.



- 
- *Kennistekort*: Onzekerheid als resultaat van onwetendheid door de kaders van het systeem of door het buiten beschouwing houden van bepaalde invloeden of door onmogelijke metingen.

De eerste twee componenten vallen onder epistemische onzekerheid. Men weet dat er onzekerheid bestaat en ook waar die zich bevindt. Deze vorm van onzekerheid kan worden gereduceerd door het doen van meer onderzoek of door het gebruik van betere methoden. Dit leidt niet altijd tot meer of minder onzekerheid, maar kan er ook voor zorgen dat nieuwe onzekerheden blootgelegd worden (Brugnach et al., 2008). De laatste twee vallen onder inherente onzekerheid. Deze vorm kan niet altijd worden opgelost en zijn ook moeilijk te duiden in woorden of te kwantificeren.

### 5.1.3 Monstertheorie

Op welke manieren er kan worden omgegaan met onzekerheid kan worden uitgelegd aan de hand van de monstertheorie (Smits, 2006). Deze theorie impliceert dat als er twee werelden bij elkaar worden gevoegd die in eerste instantie niet bij elkaar horen er een monster kan ontstaan. In dit onderzoek is er gekeken naar het figuurlijke monster dat ontstaat als wetenschap en beleid bij elkaar komen, waarbij dan bijvoorbeeld de Digital Twin deze verbindt. Andere werelden die daarbij kunnen horen, zijn bijvoorbeeld kennis versus onwetendheid, objectief versus subjectief en feiten versus waarden (Van der Sluijs, 2005). Het monster dat daaruit voort kan komen, is in dit geval het onzekerheidsmonster en kan discomfort en angst veroorzaken. Er zijn vijf manieren om met dit 'monster' om te gaan (Smits, 2006; Poortvliet et al., 2019):

- *Monsterexorcisme*: Onzekerheden worden geminimaliseerd door meer onderzoek te doen.
- *Monsteradaptatie*: Onzekerheden worden gekwantificeerd, zodat deze beter kunnen worden benut in berekeningen of beleidsvorming.
- *Monsteromarming*: Onzekerheden worden benadrukt om bijvoorbeeld een ander perspectief te bieden.
- *Monsterassimilatie*: Onzekerheden worden expliciet genoemd en meegenomen in verschillende scenario's waarbij transparantie in keuzes belangrijk is.
- *Monsterontkenning*: Onzekerheden worden ontkend en niet bij beleidsmakers neergelegd.

## 5.2 Beleidsproblemen bij droogtevraagstukken

In deze studie zijn de beleidsproblemen bij Waterschap Vallei en Veluwe geformuleerd die spelen naar aanleiding van de droogte. Een beleidsprobleem is een kwestie of opgave waarover besloten moet worden binnen het waterschap rondom het onderwerp droogte. De structuur en complexiteit van deze beleidsproblemen waren als volgt bepaald. Er was gekeken in hoeverre er consensus is over de doelen die behaald moeten worden per beleidsprobleem en in hoeverre er consensus is over de manier waarop dit doel wordt bereikt en welke rol kennis daarbij heeft. De complexiteit van een beleidsprobleem was bepaald door de verbanden tussen fysische processen en sociale actoren te analyseren. Als deze verbanden onduidelijk of onvoorspelbaar zijn, werd er gesproken van een complex beleidsprobleem. De beleidsproblemen zijn verdeeld in drie categorieën: i) reactief, ii) preventief en iii) transformatief (zie Tabel 2). Reactieve beleidsproblemen gaan over beleidskeuzes en beslissingen op de korte termijn die bij operationeel waterbeheer horen en worden ingezet als reactie op bepaalde gebeurtenissen. Preventieve beleidsproblemen worden ingezet op zowel lange als korte termijn en horen bij tactisch-strategisch waterbeheer en moeten schade voorkomen. Als het gaat om transformatieve beleidsproblemen wordt er gesproken over beleid dat een transformatie in gang zet en speelt meestal op de lange termijn.

De reactieve beleidsproblemen zijn goed gestructureerd. Preventieve beleidsproblemen zijn matig gestructureerd waarbij er wel consensus was over doelen, maar niet over relevante kennis. De transformatieve beleidsproblemen zijn matig gestructureerd, met consensus over kennis, maar niet over doelen, en ongestructureerd. Er is ook gekeken hoe er op dit moment omgegaan wordt met onzekerheid. Onzekerheid in modellen en data lijkt vooral bij de beleidsmakers en gebiedsbeheerders te worden besproken en lijkt vooral terug te komen bij reactieve beleidsproblemen. Onzekerheid rondom het sociale systeem lijkt een grotere rol te spelen bij programmamanagers, bestuursadviseurs en het dagelijks bestuur. Dit speelt ook een grote rol bij preventieve en transformatieve

beleidsproblemen. Kwantitatieve onzekerheidsinformatie wordt niet gebruikt binnen besluitvorming, maar onzekerheid wordt soms uitgedrukt in woorden tijdens vergaderingen of in rapporten. Het wordt uitgedrukt in euro's in de communicatie naar het bestuur. Veel respondenten geven aan dat onzekerheid explicieter mag worden meegenomen en dat dit kan leiden tot meer kansen en gericht onderzoek.

**Tabel 2** Drie categorieën waarin verschillende beleidsproblemen zijn ingedeeld. Deze beleidsproblemen zijn besproken met verschillende mensen die werkzaam zijn bij waterschap Vallei en Veluwe tijdens de interviews.

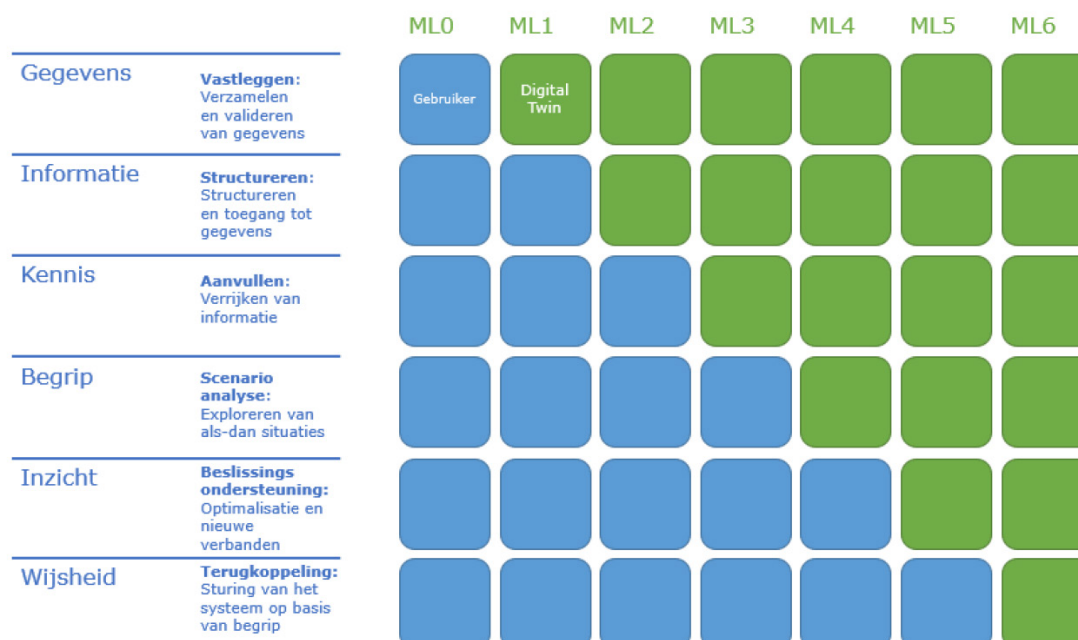
Categorie	Beleidsprobleem
Reactief	Peilbeheer
	Onttrekkingsverbod
	Ingrijpen drooggevallen beken
Preventief	Inlaten IJsselwater in het Apeldoorns kanaal
	Regeling Watersparen
Transformatief	Transformatieve maatregelen
	- Verkennend onderzoek
	- Gebiedsgerichte projecten

## 5.3 Omgangsstrategieën: onzekerheidsinformatie binnen de Digital Twin

De structuur van de beleidsproblemen heeft invloed op hoe er kan worden omgegaan met onzekerheid. In sommige gevallen is het mogelijk om onzekerheid statistisch te toetsen, mits voldoende informatie daarvoor beschikbaar is. Ook kan onzekerheid worden uitgedrukt in missende informatie of benadrukken waar de zwakke punten liggen in de informatie. Onzekerheid kan ook worden uitgedrukt in scenario's. Als verschillende waardeoordelen een rol spelen, is het belangrijk om de aannames achter deze waardeoordelen onder de aandacht te brengen (Petersen, 2012). Deze strategieën sluiten aan bij de definities van monsteradaptatie (onzekerheden worden gekwantificeerd zodat deze beter kunnen worden benut in berekeningen of beleidsvorming) en monsterassimilatie (onzekerheden worden expliciet genoemd en meegenomen in verschillende scenario's waarbij transparantie in keuzes belangrijk is).

De complexiteit van de beleidsproblemen heeft invloed op de complexiteit die in de DT moet worden verwerkt. Dit betekent dat complexe vraagstukken waar veel verschillende processen invloed op elkaar hebben en waar meerdere scenario's mogelijk zijn, resulteren in een complexere DT. Dit kan worden beschreven aan de hand van de maturity level van de DT (Metcalf, 2020). Een volwassen DT is in staat om zelf i) gegevens vast te leggen; ii) informatie te structureren; iii) kennis aan te vullen; iv) scenario-analyse uit te voeren; v) ondersteuning te geven aan beslissingen en vi) terug te koppelen (zie Figuur 3). In deze volgorde wordt een DT volwassen. Dit betekent dat een DT die nog in maturity level 1 zit, alleen gegevens kan vastleggen. Het idee is dat de andere vijf stappen dan worden uitgevoerd door de gebruiker zelf. Voor de meeste complexe beleidsproblemen is het het wenselijkst om een DT te hebben met een hoog maturity level. Aan de andere kant betekent dit dat voor minder complexe beleidsproblemen het juist al genoeg is om een DT te hebben met een laag maturity level. De onzekerheid neemt echter ook toe bij een hoger maturity level, omdat er meer processen aan elkaar verbonden worden. Dit verschilt per beleidsprobleem en hangt ook af van de beschikbare data, de kennis rondom het beleidsprobleem. De daadwerkelijke onzekerheid kan pas worden bepaald als de DT is ontwikkeld. Dit valt dus buiten de scope van dit onderzoek.

In deze paragraaf is beschreven welke rol de DT kan hebben en wat de rol is van onzekerheid per beleidsprobleem. Daarnaast is aangegeven hoe 'volwassen' een DT moet zijn om de vraagstukken te beantwoorden aan de hand van hun complexiteit.



**Figuur 3** Visualisatie van de verschillende maturity levels (ML) die een DT kan doorlopen om uiteindelijk een volgroeide/volwassen DT te zijn. Hierin worden de taken weergegeven die door de DT of door de gebruiker moeten worden uitgevoerd, afhankelijk van het maturity level (Metcalf, 2020).

## Reactief

Reactieve beleidsproblemen zijn gedefinieerd als goed gestructureerde beleidsproblemen. De rol van kennis binnen dit soort problemen is om als hulpmiddel te dienen en daarbij problemen op te lossen. Dit betekent dat de DT kan worden gebruikt om direct antwoord te geven op de vraagstukken die zich aandienen binnen deze beleidsproblemen. Bijvoorbeeld: moet ik het onttrekkingsverbod nu wel of niet instellen, of een week later? Echter is er wel door meerdere respondenten aangegeven dat modeluitkomsten alleen gebruikt worden als deze herkend worden door de gebruiker. Er is dus vertrouwen nodig om deze uitkomsten te gebruiken voor besluitvorming rondom reactieve beleidsproblemen binnen het waterschap.

Binnen goed gestructureerde beleidsproblemen is het mogelijk om statistische toetsen uit te voeren en daarmee onzekerheid aan te geven (monsterassimilatie). Ook onzekerheidsmarges kunnen hier gebruikt worden voor het uitdrukken van onzekerheid. Dat laatste zou ervoor kunnen zorgen dat er ook meer vertrouwen ontstaat in het model, omdat het een realistischer beeld schetst. Uit de interviews met waterschapmedewerkers kwam naar voren dat er bereidheid is om deze onzekerheidsinformatie mee te nemen en te gebruiken als uitgangspunt. Beslissingen en keuzes binnen reactieve beleidsproblemen liggen veelal binnen het droogteoverleg, waar kennis aanwezig is om deze onzekerheidsinformatie te interpreteren. Naast het uitdrukken van onzekerheidsinformatie in statistische termen is het ook van belang om de aannames en gekozen waarden voor de DT te benoemen (monsteradaptatie). De communicatie over deze onzekerheden is essentieel voor de acceptatie van de DT. Uit de interviews bleek bijvoorbeeld dat een extreem droge en verdichte bodem ervoor zorgt dat peilbeheer geen effect meer heeft op de waterstand op de landbouwakkers. Als goed uitgelegd wordt dat die processen onzekerheden veroorzaken in de DT, zou er meer begrip zijn en kan het vertrouwen in de DT groeien. Uit de interviews blijkt dat deze onzekerheidsinformatie, zoals brandbreedtes, goed zouden kunnen worden gevisualiseerd door een DT.

De complexiteit van deze beleidsproblemen is vooral fysiek. Het is wenselijk om voor deze beleidsproblemen een DT te hebben die scenario's kan doorrekenen. Het inzicht in de uitkomsten en in de onzekerheid van deze scenario's kan worden uitgevoerd door de specialisten. Het maturity level ligt dus rond de 3 en 4.

---

## **Preventief**

De structuur van de preventieve beleidsproblemen is matig, met consensus over doelen. Dit betekent dat kennis gebruikt wordt om verschillende kanten van het probleem te belichten en andere partijen te overtuigen van de maatregelen of keuzes die worden gemaakt. Wetenschappelijke bewijzen worden gebruikt om intern en extern consensus te krijgen.

De rol van onzekerheid bij dit type beleidsproblemen is het openleggen van kennis die mist en de nadruk leggen op zwaktes in de informatie die er is. De DT is staat om statistische onzekerheid (kwantitatief) aan te tonen en om te laten zien waar die het grootst is. Daarnaast kan de DT aantonen wat dan het effect is van het verkleinen van de onzekerheid op de uitkomsten (monsteradaptatie). Het kan bijvoorbeeld zo zijn dat door het verzamelen van meer data, onzekerheid significant wordt gereduceerd. Aan de andere kant kan het ook zo zijn dat het doen van extra onderzoek niet zoveel invloed heeft op de modelonzekerheid. Het is bij deze beleidsproblemen ook essentieel dat gekeken wordt waardoor de onzekerheid ontstaat en of deze daadwerkelijk te verkleinen is. Binnen dit soort problemen is men geneigd om meer onderzoek te doen, omdat het vaak draait om het overtuigen van een andere partij (monsterexorcisme). Het openleggen van missende informatie is ook een van de strategieën binnen dit soort beleidsproblemen (monsterassimilatie). Uit meerdere interviews werd het belang van dit punt aangestipt. Ten eerste zouden meer mensen op die manier hun kennis kunnen delen. Ten tweede zorgt dit voor meer transparantie, waardoor ook externe partijen meer begrip kunnen krijgen voor de beslissingen die het waterschap neemt. Ook bij deze beleidsproblemen kunnen visualisaties van onzekerheden, zoals brandbreedtes of verschillende scenario's, helpen in de communicatie over onzekerheid, zowel intern als extern.

De preventieve beleidsproblemen zijn sociaal en fysiek al een stuk complexer dan de reactieve beleidsproblemen. Het slagen van bepaalde maatregelen is bijvoorbeeld afhankelijk van de maatschappelijke perceptie op het beleidsprobleem. Veel processen die samenhangen binnen deze beleidsproblemen zijn nog nauwelijks of niet bekend en daarom is het wenselijk als een DT meer inzicht zou kunnen geven. Dit valt onder maturity level 5.

## **Transformatief**

Transformatieve beleidsproblemen zijn matig gestructureerd, waarbij er wel consensus is over kennis (middelen), maar niet over doelen. De rol van kennis is hier om conflict te mijden, door bijvoorbeeld compromissen te sluiten. Dit sluit aan bij wat respondenten aangaven over gebiedsgerichte projecten waarbij een gedeelde visie tussen samenwerkende partijen van belang is om het project te kunnen laten slagen. Een DT zou mogelijk deze technische kant kunnen belichten en door middel van scenario's laten zien wat de uitkomsten zijn van verschillende maatregelen in een gebied. Daarnaast kunnen deze beleidsproblemen ook ongestructureerd zijn. Dit laatste is vooral in het geval van verkennend onderzoek en wordt verder behandeld in de volgende paragraaf.

Onzekerheid kan binnen matig gestructureerde beleidsproblemen (middelen) uitgedrukt worden in scenario-onzekerheid. Dit houdt in dat verschillende scenario's kunnen worden doorgerekend en de onzekerheid daarbij moet worden aangegeven, dus onder welke omstandigheden de scenario's plaatsvinden en welke aannames daarin zijn gedaan. Binnen dit soort problemen spelen waardeoordelen van verschillende partijen een rol. Dit kan bijvoorbeeld gaan over hoe belangrijk een partij een bepaald type landgebruik vindt. Het in kaart brengen van deze waardeoordelen kan voorkomen dat partijen onzekerheid opblazen (monsteromarming) of juist bagatelliseren (monsterontkenning). Deze beleidsproblemen, die over een langdurige periode plaatsvinden, zijn erg onzeker. Onzekerheden zouden kunnen worden gevisualiseerd binnen de verschillende scenario's, maar zouden echter meer een toekomstgevoel kunnen geven dan een concreet toekomstbeeld.

Transformatieve beleidsproblemen zijn erg complex: ten eerste omdat ze zich afspelen op de lange termijn en ten tweede zijn er veel verschillende partijen bij betrokken met meestal uiteenlopende belangen. Net zoals bij preventieve beleidsproblemen is het wenselijk om voor transformatieve beleidsproblemen een al wat oudere DT te hebben die de complexe verbanden zou kunnen doorvoeren en mogelijke scenario's kan schetsen en hierbij inzicht kan geven. Ook hier is een maturity level van 5 voor nodig.

---

### **De Digital Twin als ongestructureerd beleidsprobleem**

Bij ongestructureerde beleidsproblemen wordt wetenschap gebruikt om problemen te identificeren en te duiden. Het probleem is daarbij zelf nog onduidelijk en ook weet men nog niet waardoor het wordt veroorzaakt. Verkennend onderzoek door middel van bijvoorbeeld enquêtes of het gebruiken van nieuwe modellen valt onder dit type beleidsproblemen. Gedurende het onderzoek en de interviews ontstond er een gedachtegang. Enkele respondenten gaven aan dat onzekerheidsinformatie explicieter moet worden meegenomen en dat dit zou kunnen leiden tot gerichtere kennisvergaring. Onduidelijk is om wat voor type onzekerheidsinformatie dit gaat. Door gesprekken met wetenschappers van WUR werd uiteindelijk de vraag gesteld 'Wanneer is een DT af om te gebruiken voor beleidsvoering?'. Het uiteindelijke antwoord was dat ook een Digital Twin die misschien heel onzeker is door weinig en onnauwkeurige data al kan worden bestempeld als bruikbaar. De kwaliteit van de DT moet dan wel worden gegeven. De functie van deze DT is dan nog niet om er beleid op te voeren, maar wel om te kijken welke onzekerheden er nu zitten in de data en modellen. Dit zou betekenen dat het de functie van een DT is om problemen in onzekerheid te verkennen. Dit sluit aan bij de definitie van een ongestructureerd beleidsprobleem. Naarmate deze DT completer wordt (met behulp van nuttige informatie) in het doen van voorspellingen, zou het een steeds grotere rol kunnen spelen in het vormen van beleid. Het blijft belangrijk voor zowel de gebruikers als voor de ontwikkelaars in hun hoofd te houden dat een volwassen DT niet altijd nodig is voor het vormen van beleid.

---

# References

- Beck, M.B., Young, P.C., Systematic Identification of DO-BOD Model Structure. *Journal of the Environmental Engineering Division*, 102, EE5:902-927, 1976.
- Beck, M.B., Water Quality Modeling: A Review of the Analysis of Uncertainty. *Water Resources Research*, 23(8): 1393-1442, 1987.
- Bergsma, Petra. (2016). "Besluiten Onder Onzekerheid." Wageningen University and Research.
- Brauer, C. C., Teuling, A. J., Torfs, P. J. J. F., & Uijlenhoet, R. (2014). The Wageningen Lowland Runoff Simulator (WALRUS): a lumped rainfall-runoff model for catchments with shallow groundwater. *Geoscientific model development*, 7(5).
- Brauer, C. C., Torfs, P. J. J. F., Teuling, A. J., & Uijlenhoet, R. (2014). The Wageningen Lowland Runoff Simulator (WALRUS): application to the Hupsel Brook catchment and the Cabauw polder. *Hydrology & Earth System Sciences*, 18(10).
- Brugnach, Marcela, Art Dewulf, Claudia Pahl-Wostl, and Tharsi Taillieu. (2008). "Toward a Relational Concept of Uncertainty: About Knowing Too Little, Knowing Too Differently, and Accepting Not to Know." *Ecology and Society* 13 (2). <https://doi.org/10.5751/ES-02616-130230>.
- EPA, Risk Assessment Forum, Guiding Principles for Monte Carlo Analysis, EPA/630/R97/001, 1997.
- Janse, J. H. (2005). Model studies on the eutrophication of shallow lakes and ditches. Dissertatie, Universiteit Wageningen, <http://edepot.wur.nl/121663> (PDF)
- Jazwinski, A.H., Stochastic Processes and Filtering Theory, volume 64, Mathematics in Science and Engineering, Academic Press, NY, 1970.
- Klinke, Andreas, and Ortwin Renn. (2002). "A New Approach to Risk Evaluation and Management: Risk-Based, Precaution-Based, and Discourse-Based Strategies." *Risk Analysis* 22 (6): 1071-94. <https://doi.org/10.1111/1539-6924.00274>.
- Knotters, Martin. (2002). "Onzekerheid Is Welkom Bij Beslissingen in Het Grondwaterbeheer." *Stromingen* 8 (4): 5-18. <http://library.wur.nl/WebQuery/hydrotheek/lang/1670490>.
- Loenen, A, M De jong, J Verkade, and S Kleermaeker. (2012). "Operationeel Besluiten Onder Onzekerheid."
- Metcalfe, Brett. (2020). "Digital Twin Methodology Platform." <https://web.microsoftstream.com/video/9f943cee-3b57-4dc1-8d79-2165dceeda79>.
- Pappenberger, F., and K. J. Beven. (2006). "Ignorance Is Bliss: Or Seven Reasons Not to Use Uncertainty Analysis." *Water Resources Research* 42 (5). <https://doi.org/10.1029/2005WR004820>.
- Petersen, Arthur Caesar. (2012). *Simulating Nature: A Philosophical Study of Computer-Simulation Uncertainties and Their Role in Climate Science and Policy Advice*. *Simulating Nature: A Philosophical Study of Computer-Simulation Uncertainties and Their Role in Climate Science and Policy Advice*, Second Edition. <https://doi.org/10.1201/b11914>.
- Poortvliet, P. Marijn, Martin Knotters, Petra Bergsma, Joël Verstoep, and Jiska van Wijk. (2019). "On the Communication of Statistical Information about Uncertainty in Flood Risk Management." *Safety Science* 118 (October): 194-204. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.05.024>.
- Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., ... & Tarantola, S. (2008). *Global sensitivity analysis: the primer*. John Wiley & Sons.
- Sluijs, van der, J. P., Janssen, P. H., Petersen, A. C., Klopprogge, P., Risbey, J. S., Tuinstra, W., & Ravetz, J. R. (2004). RIVM/MNP guidance for uncertainty assessment and communication: tool catalogue for uncertainty assessment. Utrecht University (Downloadable from. <http://www.nusap.net/sections>. Php.
- Sluijs, Jeroen van der. (2005). "Uncertainty as a Monster in the Science-Policy Interface: Four Coping Strategies." *Water Science and Technology* 52 (6): 87-92. <https://doi.org/10.2166/wst.2005.0155>.
- Smits, Martijntje. (2006). "Taming Monsters: The Cultural Domestication of New Technology." *Technology in Society* 28 (4): 489-504. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2006.09.008>.
- Stigter, J.D., Joubert, D., Molenaar, J., Observability of Complex Systems: Finding the Gap, *Nature Scientific Reports*, 7(1), November 2017.

- 
- Stigter, J.D. and Molenaar, J., Assessing Local Structural Identifiability for Environmental Models, *Environmental Modeling and Software*, 93(C), 398-408, 2017.
- Turnhout, Esther, Matthijs Hisschemöller, and Herman Eijsackers. (2008). "Science in Wadden Sea Policy: From Accommodation to Advocacy." *Environmental Science & Policy* 11 (3): 227–39. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2007.07.004>.
- Varma, A., Morbidelli, M., & Wu, H. (2005). *Parametric sensitivity in chemical systems*. Cambridge University Press.
- Verstoep, Joël. (2015). "Communiceren over Onzekerheid Binnen Het Waterbeheer: Hoe Waterschappen Bezig Zijn Met Het Presenteren En Interpreteren van Statistische Informatie over Onzekerheid." Wageningen University and Research.
- Vullings, W., Bulens, D., Knotters, M., Walvoort, D. & Wehrens, R (2020). Resolution and digital twins. In preparation.
- Zandvoort, Mark, Rutger van der Brugge, Maarten J. van der Vlist, and Adri van den Brink. (2019). "Dealing with Uncertainty in Collaborative Planning: Developing Adaptive Strategies for the IJsselmeer." *Journal of Environmental Planning and Management* 62 (2): 248–65. <https://doi.org/10.1080/09640568.2017.1409196>.



---

Wageningen Environmental Research  
P.O. Box 47  
6700 AA Wageningen  
The Netherlands  
T +31 (0)317 48 07 00  
[www.wur.nl/environmental-research](http://www.wur.nl/environmental-research)

Wageningen Environmental Research  
Report 3071  
ISSN 1566-7197

---

The mission of Wageningen University & Research is "To explore the potential of nature to improve the quality of life". Under the banner Wageningen University & Research, Wageningen University and the specialised research institutes of the Wageningen Research Foundation have joined forces in contributing to finding solutions to important questions in the domain of healthy food and living environment. With its roughly 30 branches, 6,500 employees (5,500 fte) and 12,500 students, Wageningen University & Research is one of the leading organisations in its domain. The unique Wageningen approach lies in its integrated approach to issues and the collaboration between different disciplines.





To explore  
the potential  
of nature to  
improve the  
quality of life



---

Wageningen Environmental Research  
P.O. Box 47  
6700 AB Wageningen  
The Netherlands  
T +31 (0) 317 48 07 00  
[www.wur.eu/environmental-research](http://www.wur.eu/environmental-research)

Report 3071  
ISSN 1566-7197

---

The mission of Wageningen University & Research is "To explore the potential of nature to improve the quality of life". Under the banner Wageningen University & Research, Wageningen University and the specialised research institutes of the Wageningen Research Foundation have joined forces in contributing to finding solutions to important questions in the domain of healthy food and living environment. With its roughly 30 branches, 6,500 employees (5,500 fte) and 12,500 students, Wageningen University & Research is one of the leading organisations in its domain. The unique Wageningen approach lies in its integrated approach to issues and the collaboration between different disciplines.

