

Verwachting waterdiepte Rijntakken



Verwachting waterdiepte Rijntakken

Auteur(s)

Rolien van der Mark

Matthijs den Toom

Remi van der Wijk

Kees Sloff

Verwachting waterdiepte Rijntakken


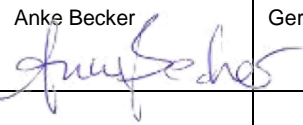
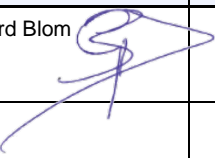
Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	de heer J.P. Kors
Referenties	
Trefwoorden	Verwachtingen, MGD, waterdiepte, Rijntakken, afvoerverwachtingen, RWsOS, BfG

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	18-12-2020
Projectnummer	11205272-006
Document ID	11205272-006-ZWS-0008
Pagina's	107
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Rolien van der Mark	
	Matthijs den Toom	
	Remi van der Wijk	
	Kees Sloff	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
1.0	Rolien van der Mark 	Anke Becker 	Gerard Blom 	

Samenvatting

Tijdens de zomer en herfst van 2018 daalde de afvoer op de Rijn als gevolg van aanhoudende droogte. Hierdoor daalde de waterdiepte en kon niet alle vracht worden vervoerd. Voor enkele bedrijven ontstonden flinke problemen doordat de aan- en afvoer van goederen over water stokte. Vanuit de logistieke sector (verladers, bevrachters) zijn er bij aankomende droogteperiodes maatregelen te nemen om beter te anticiperen op verminderde waterdiepte. De huidige voorspellingen die worden ontsloten betreffen echter geen waterdiepte maar waterstand, en bovendien kijken die niet ver genoeg vooruit om adequate tactische en strategische keuzes te maken. Mogelijk dat ook voor de Landelijke Coördinatiecommissie Waterverdeling (LCW), die actief wordt bij dreigende watertekortsituaties, een verwachting in waterdiepte nuttig is voor het nemen van beslissingen met betrekking tot keuzes in waterverdeling.

Er is geconstateerd dat tijdens langdurige droogteperiodes met lage rivierafvoeren behoefte is aan een verwachting van de waterdiepte op de Nederlandse rivieren voor een langere termijn van 6-8 weken, en in het bijzonder voor de Rijntakken (Boven-Rijn, Waal, Pannerdensch Kanaal, Neder-Rijn, Lek en IJssel).

In deze studie is een procesbeschrijving opgesteld hoe te komen tot een verwachting van de waterdiepte voor de Rijntakken, op basis van bestaande informatie, zowel voor een scenario met een statische bodem als (eerste aanzet) met een dynamische bodem. Zodra een droogte periode zich aankondigt, kan dit proces doorlopen worden en zo een diepteverwachting afgegeven worden. Het proces is eenmalig doorlopen, en er is kwalitatieve beschouwing gegeven van de nauwkeurigheid en betrouwbaarheid waarmee een verwachting kan worden afgegeven.

Een verwachting heeft alleen waarde, als deze de juiste informatie levert om een beslissing te kunnen nemen. Er is een beknopte verkenning uitgevoerd naar de toepassingswaarde van de diepteverwachtingen. Dit is gedaan enerzijds via een scan van literatuur, anderzijds door in gesprek te gaan met een klankbordgroep (bijeenkomst) en de transportsector (enquête). Aan de hand hiervan is geconcludeerd dat er behoefte is binnen de natte transportsector naar langere-termijn verwachtingen.

Het is aanbevolen om in 2021 als pilot langere-termijn diepteverwachtingen met de statische bodem te gaan afgeven tijdens droogte, en zo te ontdekken of de afgifte meerwaarde heeft. Het stappenplan is hiervoor concreet genoeg en vrij eenvoudig te doorlopen.

Belangrijke bevindingen zijn dat (1) in het stappenplan is opgenomen dat afvoerreksen van de Duitse BfG nodig zijn, omdat die momenteel de beste verwachting geven, dat (2) multibeam-peilingen van de bodemligging op een gegeven moment minder geschikt zijn dan CoVadem-data (die zijn actueler en op een gegeven moment voldoende qua nauwkeurigheid en dichtheid), en dat (3) de wijze waarop een dynamische bodemverwachting wordt meegenomen nog aanvullende analyse vraagt.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	8
1.1	Aanleiding	8
1.2	Opdracht	8
1.2.1	Doel	8
1.2.2	Ruimtelijke afbakening	8
1.3	Aanpak	10
1.4	Leeswijzer	11
1.5	Organisatie	11
2	Procesbeschrijving verwachting waterdiepte	12
2.1	Stappenplan	12
2.1.1	Globaal stappenplan	12
2.1.2	Korte toelichting op het stappenplan	13
2.1.3	Resultaat in vier dimensies	14
2.2	Afvoer	14
2.2.1	Afvoerverwachtingen in het algemeen	14
2.2.2	Onzekerheidsinformatie	15
2.2.3	Beschikbare langere-termijnverwachtingen voor Lobith	16
2.2.4	Keuze ten aanzien van te gebruiken afvoerverwachtingen (stap A)	21
2.2.5	Translatie van Ruhrort naar Lobith (stap B)	22
2.3	Waterstand	22
2.3.1	Verwachting laterale toestromingen en onttrekkingen (stap C)	22
2.3.2	Verwachting waterstanden in de Rijntakken (stap D)	24
2.3.3	Waterstanden naar 2D rooster (stap E)	24
2.4	Bodemligging	25
2.4.1	Projectie meest recente bodemligging op rooster (stap F)	25
2.4.2	Verwachting bodemligging (stap G)	28
2.5	Waterdiepte	32
2.5.1	Bepaling waterdiepte (stappen H en I)	32
2.5.2	Presentatie waterdiepte (stappen J en K)	33
3	Toepassing van het stappenplan	34
3.1	Inleiding	34
3.2	Statische waterdiepte	34
3.2.1	Afvoer	34
3.2.2	Waterstand	35
3.2.3	Bodemligging	37
3.2.4	Waterdiepte	38
3.3	Dynamische waterdiepte	44
3.3.1	Projectie tot bodemvorm-gemiddelde bodemkaart	44
3.3.2	Verwachting bodemligging (stap G)	46

4	Betrouwbaarheid en nauwkeurigheid	48
4.1	Inleiding	48
4.2	Afvoerverwachting	49
4.3	Waterstandsverwachting	54
4.3.1	Afvoer - tijdsverschuiving	55
4.3.2	Lateralen	55
4.3.3	Benedenstroomse modelranden	55
4.3.4	Modelonzekerheid	56
4.3.5	Samenvatting	56
4.4	Bodemverwachting	56
4.5	Diepteverwachting	59
5	Verkenning toepassingswaarde	60
5.1	Inleiding	60
5.2	Behoeftte aan langere termijn verwachtingen	60
5.3	Klankbordbijeenkomst	61
5.4	Enquête transportsector	62
6	Jaarlijkse inspanningen	64
7	Conclusies en aanbevelingen	65
7.1	Conclusies	65
7.2	Aanbevelingen	65
7.2.1	Algemene aanbevelingen m.b.t. stappenplan	65
7.2.2	Specifieke aanbevelingen m.b.t. afvoerverwachtingen	66
7.2.3	Specifieke aanbevelingen m.b.t. duinhoogte en bodemligging-verwachtingen	67
8	Referenties	69
A	Communicatie met BfG	71
B	Memo Voorspellen waterdiepte: morfologie	73
C	Verslag klankbordbijeenkomst	87
D	Enquête transportsector	92
D.1	Vraag 1	92
D.2	Vraag 2	94
D.3	Vraag 3	95
D.4	Vraag 4	97
D.5	Vraag 5	99
D.6	Vraag 6	101
D.7	Vraag 7a en 7b	102
D.8	Vraag 8	105

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Tijdens de zomer en herfst van 2018 daalde de afvoer op de Rijn als gevolg van aanhoudende droogte. Hierdoor daalde de waterdiepte en kon niet alle vracht worden vervoerd. Voor enkele bedrijven ontstonden flinke problemen doordat de aan- en afvoer van goederen over water stokte. Vanuit de logistieke sector (verladere, bevrachtere) zijn er bij aankomende droogteperiodes maatregelen te nemen om beter te anticiperen op verminderde waterdiepte. De huidige voorspellingen die worden ontsloten betreffen echter geen waterdiepte maar waterstand, en bovendien kijken die niet ver genoeg vooruit om adequate tactische en strategische keuzes te maken. Mogelijk dat ook voor de Landelijke Coördinatiecommissie Waterverdeling (LCW), die actief wordt bij dreigende watertekortsituaties, een verwachting in waterdiepte nuttig is voor het nemen van beslissingen met betrekking tot keuzes in waterverdeling.

Met verwachte waterdiepte-informatie over een termijn van 6-8 weken kunnen mogelijk meer tactische en strategische keuzes gemaakt worden door betrokken partijen in de logistieke sector. Als de beschikbare capaciteit voor vervoer van goederen over water binnen een tijdsbestek van enkele weken ingrijpend afneemt, kan deze informatie mogelijk helpen bij het beter afstemmen van de werkprocessen en voorraadbeheersing.

Er is geconstateerd dat tijdens langdurige droogteperiodes met lage rivierafvoeren behoefte is aan een verwachting van de waterdiepte op de Nederlandse rivieren voor een langere termijn van 6-8 weken, en in het bijzonder voor de Rijntakken (Boven-Rijn, Waal, Pannerdensch Kanaal, Neder-Rijn, Lek en IJssel). Dit is geconcludeerd door de Beleidstafel Droogte, en er is budget beschikbaar gemaakt vanuit het Deltafonds om te bekijken wat mogelijk is met de bestaande middelen en of dit inderdaad van meerwaarde is voor de logistieke sector en LCW.

1.2 Opdracht

1.2.1 Doel

Het doel van dit project is drieledig:

- 1 Verkrijgen van inzicht in de betrouwbaarheid en nauwkeurigheid waarmee op dit moment, gebruikmakend van *bestaande* modellen, tools en data- en informatiestromen, een verwachting van de waterdiepte kan worden afgegeven voor de Rijntakken voor een voorspeltermijn van 6-8 weken voor een scenario met (i) een statische bodem en (ii) een dynamische bodem;
- 2 Verkennen wat de toepassingswaarde is van een verwachting van de waterdiepte;
- 3 Verkrijgen van inzicht in jaarlijkse inspanningen.

1.2.2 Ruimtelijke afbakening

Het onderzoek naar verwachte waterdiepte voor een termijn van 6-8 weken zal zich beperken tot de Rijntakken (Tabel 1-1 en Figuur 1-1). De Lek wordt beschouwd tot Schoonhoven in plaats van tot Krimpen a/d Lek, omdat de ligging van de vaargeul benedenstrooms van Schoonhoven niet beschikbaar is. Voor het scenario met een dynamische bodem is de scope beperkt tot een stuk van de Waal; vanaf de Pannerdensch Kop tot het Maas-Waalkanaal.

In Tabel 1-1 zijn ook MGD-trajecten weergegeven. In de Rijntakken worden door Rijkswaterstaat ten behoeve van de scheepvaart systematisch peilingen verricht om te bepalen wat de minste waterdiepte in het vaarwater is. De grootste beperking (kleinste diepte binnen de vaargeul) van iedere riviertak wordt gecommuniceerd. Het bekendmaken van deze Minst Gepeilde Diepte (MGD) vindt plaats zodra en zolang deze diepte ergens in de vaargeul een kritische grens onderschrijft. Sinds augustus 2018 wordt voor de Boven-Rijn/Waal dagelijks op drie trajecten de MGD vastgesteld in plaats van op één. Tussen Lobith en Loevestein zijn meerdere aftakkingen aanwezig, en schepen varen soms maar over een gedeelte van het traject Lobith – Loevestein. Dan is het van belang om te weten wat de beperking (de kleinste / minste diepte) is op alleen dit gedeelte. De MGD-trajecten zoals weergegeven in Tabel 1-1 en Figuur 1-1 worden in deze studie gebruikt.

Tabel 1-1 Ruimtelijke afbakening en MGD-trajecten¹.

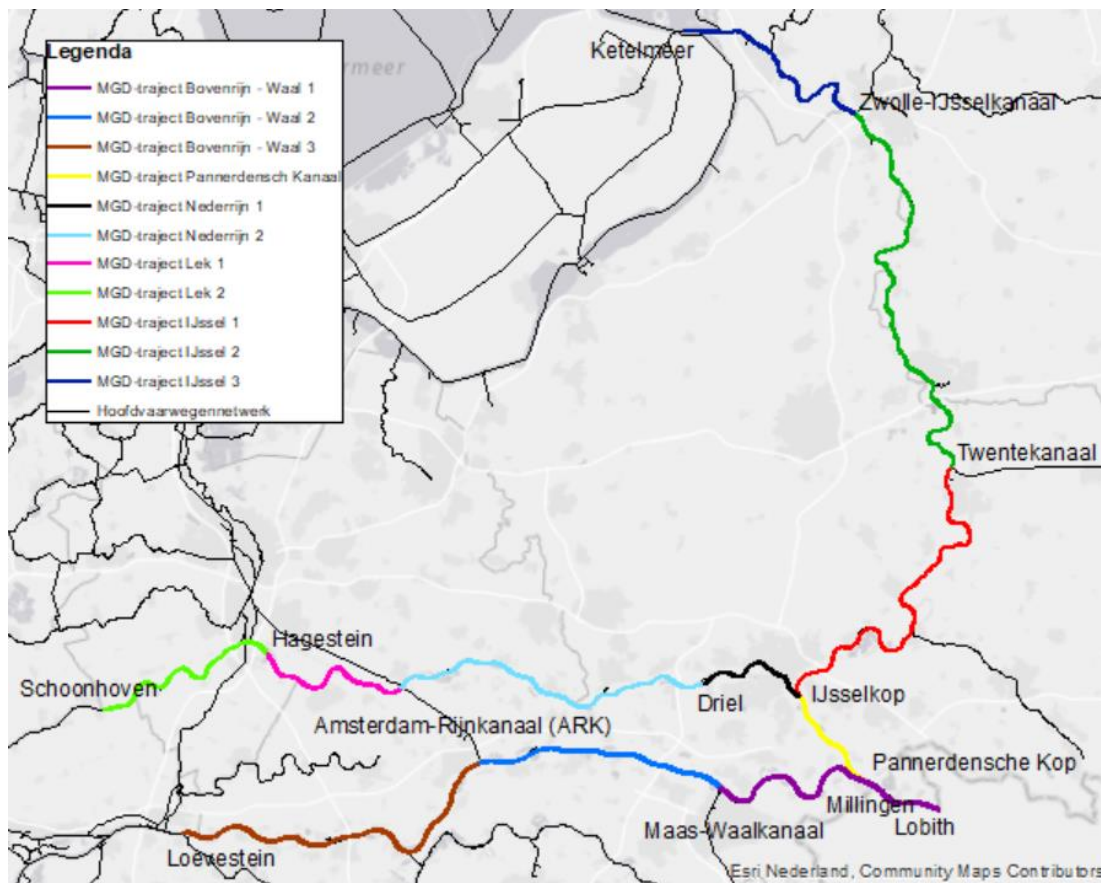
Rijntak	Traject	MGD-traject
Boven-Rijn / Waal	Lobith – Loevestein	1. Lobith – Maas-Waalkanaal 2. Maas-Waalkanaal – ARK 3. ARK – Loevestein
Pannerdensch Kanaal	Pannerdensch Kop – IJsselkop	Pannerdensch Kop – IJsselkop
Neder-Rijn	IJsselkop – Amsterdam-Rijnkanaal (ARK)	1. IJsselkop – Driel 2. Driel – ARK
Lek	Amsterdam-Rijnkanaal (ARK) – Schoonhoven	1. ARK – Hagestein 2. Hagestein – Schoonhoven
IJssel	IJsselkop – Ketelmeer	1. IJsselkop – Twentekanaal 2. Twentekanaal – Zwolle-IJsselkanaal 3. Zwolle-IJsselkanaal – Ketelmeer

¹ Volgens de Staatscouranten van 23 mei en 10 juli 2006 zijn de riviervakken waarbinnen de minste waterdiepte wordt gepeild als volgt:

Boven-Rijn / Waal	Lobith – Loevestein	*)
Pannerdensch Kanaal en Neder-Rijn/Lek **)	Pannerden – IJsselkop	
	IJsselkop – Driel	
	Driel – ARK	
	ARK – Hagestein	
IJssel	IJsselkop – mond Twenthekanalen	
	Mond Twenthekanalen – mond Zwolle-IJsselkanaal	
	Mond Zwolle-IJsselkanaal – Ketelmeer	

*) Dus blijkbaar niet vanaf Millingen, zoals wel gehanteerd op teletekst en vaarweginformatie.nl. Millingen wordt in de Staatscourant wel genoemd, maar dan om aan te geven dat de MGD wordt bekendgemaakt zodra en zolang de gepeilde minste waterdiepte tussen Millingen en Loevestein 350 cm of minder bedraagt.

**) Hagestein tot Krimpen a/d Lek of Schoonhoven wordt in de Staatscourant dus niet als officieel MGD-traject genoemd. In deze studie wordt dit traject wel meegenomen.



Figuur 1-1 Ruimtelijke afbakening en MGD-trajecten.

1.3 Aanpak

Het project bestaat uit 3 doelen (onderdelen), die opgebouwd zijn uit de volgende aspecten:

- 1 Verkrijgen van inzicht in de betrouwbaarheid en nauwkeurigheid waarmee op dit moment, gebruikmakend van *bestaande* modellen, tools en data- en informatiestromen, een verwachting van de waterdiepte kan worden afgegeven voor de Rijntakken voor een voorspeltermijn van 6-8 weken voor een scenario met (i) een statische bodem en (ii) een dynamische bodem:
 - a Het opstellen van een stappenplan / procesbeschrijving om te komen tot een verwachting van de waterdiepte voor de Rijntakken, op basis van bestaande informatie.
 - b Het eenmalig genereren van een verwachting van de waterdiepte voor de Rijntakken aan de hand van het stappenplan (i) voor een scenario met een statische bodem en (ii) een scenario met dynamische bodem.
 - c Het verkrijgen van inzicht in de betrouwbaarheid en nauwkeurigheid waarmee een voorspelling van 6-8 weken vooruit kan worden gedaan van:
 - De afvoer bij Lobith,
 - De waterstand in de Rijntakken bij deze afvoer,
 - De bodemligging in de Rijntakken,
 - De waterdiepte in de Rijntakken.

Een methodiek of tool voor het voorspellen van bodemligging 6-8 weken vooruit (dynamische bodem) ligt niet kant en klaar op de plank. Op basis van bestaande kennis zijn eerste inzichten voor een methodiek geschetst (onderdeel 1a).

Dit is toegepast (onderdeel 1b) voor een stukje van de Waal (Pannerdensche Kop tot Maas-Waalkanaal), niet voor alle Rijntakken.

Er wordt een *kwalitatieve* beschouwing gegeven over betrouwbaarheid, nauwkeurigheid en voorspelkracht (onderdeel 1c), onder andere omdat een kwantitatieve analyse met modelberekeningen onder verschillende condities en periodes buiten de scope van de opdracht vallen.

- 2 Verkennen wat de toepassingswaarde is van de waterdiepte-verwachting zoals opgesteld in onderdeel 1 voor de Landelijke Coördinatiecommissie Waterverdeling (LCW) en de transportsector.

De toepassingswaarde wordt verkend door in gesprek te gaan met zowel collega's van Rijkswaterstaat (valideren procesbeschrijving: "hoe kan het beste een verwachting worden gemaakt") als de transportsector ("hoe zou de sector de verwachting kunnen gebruiken").

- 3 Verkrijgen van inzicht in de jaarlijkse inspanningen, die benodigd zijn om te allen tijde, zodra daar behoefte aan/aanleiding voor is (een (aankomende) droogte), de procesbeschrijving te kunnen doorlopen.

1.4 Leeswijzer

De opbouw van het rapport bespreekt de 3 onderdelen achter elkaar. De procesbeschrijving hoe te komen tot een verwachting in waterdiepte in de Rijntakken komt aan bod in hoofdstuk 2. In hoofdstuk 3 wordt het proces eenmalig doorlopen en geïllustreerd. De daaropvolgende hoofdstukken behandelen achtereenvolgens de betrouwbaarheid en nauwkeurigheid (H4), de verkenning van de toepassingswaarde (H5) en de jaarlijkse inspanningen (H6). Er wordt afgesloten met conclusies en aanbevelingen.

In hoofdstuk 2, paragraaf 2.1 wordt eerst het stappenplan globaal gepresenteerd waarmee wordt gekomen tot een verwachting. In de paragrafen erna (§2.2-2.5) volgen achtergronden, overwegingen en waar nodig nadere toelichting bij het stappenplan. Deze toelichtende paragrafen, evenals hoofdstuk 4, zijn bedoeld voor de iets meer ingewijde lezer met kennis van waterstandsmodellering en/of bodemdynamiek. Voor een globaal begrip van de voorgestelde procesbeschrijving is het lezen van enkel paragraaf 2.1 waarschijnlijk voldoende.

1.5 Organisatie

De werkzaamheden zijn uitgevoerd door Matthijs den Toom, Remi van der Wijk, Kees Sloff, Victor Chavarrias, Willem Ottevanger, Anke Becker (review) en Rolien van der Mark (projectleiding). Vanuit Rijkswaterstaat is het project begeleid door Jan Paul Kors, en lazen op de achtergrond Milou Wolters en Arjan Sieben desgevraagd deels mee.

2 Procesbeschrijving verwachting waterdiepte

2.1 Stappenplan

2.1.1 Globaal stappenplan

Dit hoofdstuk beschrijft het proces om te komen tot een verwachting in waterdiepte. In deze paragraaf wordt eerst het stappenplan gepresenteerd waarmee wordt gekomen tot een verwachting in waterdiepte in de Rijntakken. In de paragrafen erna (§2.2-2.5) volgen voor de iets meer ingewijde lezer achtergrond, overwegingen en waar nodig nadere toelichting bij het stappenplan. Iedere stap in het stappenplan wordt in een aparte sub-paragraaf behandeld, en zo'n sub-paragraaf eindigt met een blok met het resultaat van de betreffende stap. Voor een globaal begrip van de voorgestelde procesbeschrijving is het lezen van enkel paragraaf 2.1 inclusief de resultaatblokken van de stappen waarschijnlijk voldoende. In hoofdstuk 3 wordt het proces eenmalig doorlopen en geïllustreerd.

Het voorstel is om het onderstaande stappenplan met acties (Figuur 2-1) te doorlopen om te komen tot een verwachting in waterdiepte voor de Rijntakken. Op hoofdlijnen is het proces om de waterdiepte te voorspellen op te delen in vier onderdelen, namelijk:

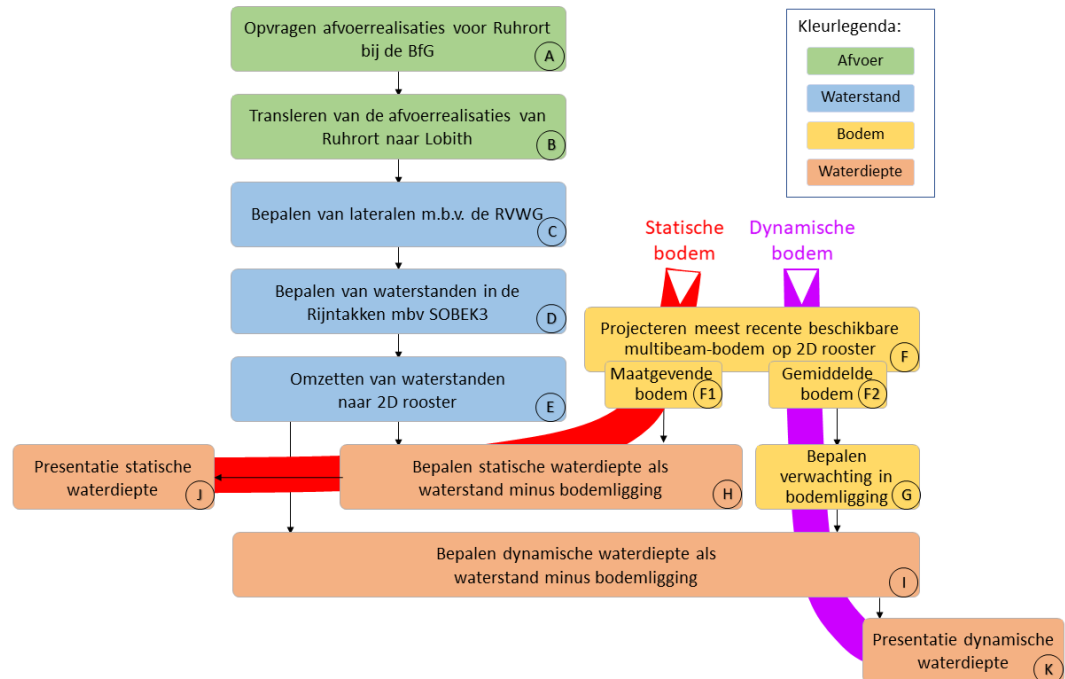
- 1 Verwachting in afvoer bij Lobith (§2.2),
- 2 Verwachting in waterstand in de Rijntakken (§2.3),
- 3 Verwachting in bodemligging in de Rijntakken (§2.4),
- 4 Verwachting in waterdiepte in de Rijntakken (§2.5).

Met kleuren is in Figuur 2-1 aangegeven op welke van de vier onderdelen de stap betrekking heeft. De stappen zijn aangegeven met letters A t/m K; in de paragrafen hierna wordt via deze letters naar de stappen verwezen.

Er wordt onderscheid gemaakt in een verwachting met “statische bodem” en met “dynamische bodem”. Dat wil zeggen, bij de statische bodem wordt verondersteld dat de bodemligging in de tijd (6-8 weken vooruit) niet verandert, bij de dynamische bodem worden wel morfologische ontwikkelingen meegenomen, en wordt dus een verwachting in bodemligging-ontwikkeling voor 6-8 weken vooruit gemaakt. Het stappenplan voor beide sporen is:

- Statische bodem spoor: stappen A – B – C – D – E – F1 – **H – J** (rood in Figuur 2-1)
- Dynamische bodem spoor: stappen A – B – C – D – E – F2 – **G – I – K** (paars in Figuur 2-1)

Onze inschatting is dat de hier gepresenteerde procesbeschrijving de meest pragmatische aanpak is, enerzijds uitgaande van bestaande data en modellen, anderzijds uitgaande van een juiste balans tussen verwerkingstijd (o.a. rekentijd) en nauwkeurigheid. Mocht de procesbeschrijving een vervolg of implementatie krijgen, dan is met betrekking tot het voorspellen van de bodemligging 6-8 weken vooruit nog een aanvullende verdiepingsslag nodig. Hiervoor is een eerste voorstel gedaan (namelijk relaxatievergelijking voor duinhoogte-ontwikkeling), maar of dit de beste aanpak is voor het gewenste doel, zou idealiter nog wat nader onderzoek vragen.



Figuur 2-1 Stappenplan met acties A t/m K om te komen tot een verwachting in waterdiepte. De rode en paarse route hebben betrekking op de statische en dynamische bodem.

2.1.2 Korte toelichting op het stappenplan

Afvoer

Er zijn meerdere bronnen beschikbaar voor de afvoer, op dit moment wordt ingeschat dat de voorspelling van de BfG (Bundesanstalt für Gewässerkunde) voor Ruhrort de beste optie is. Deze voorspelling wordt twee keer per week afgegeven. De voorspeltermijn is 46 dagen en bevat 51 mogelijke realisaties (verschillende, even plausibele scenario's), die gezamenlijk de bandbreedte in afvoerverwachting bij Ruhrort weergeven. De eerste week liggen de verwachtingen tussen deze 51 realisaties dicht bij elkaar, verder in de toekomst zullen de verschillende scenario's meer van elkaar afwijken.

Waterstand

Het tweede onderdeel is het uitrekenen van de waterstanden op de Rijntakken op basis van een hydrodynamisch model (SOBEK3, 1D). Een invoerparameter hiervoor is de afvoer bij Lobith, die eerst op basis van de voorspelling bij Ruhrort wordt afgeleid. Op basis van de afvoer bij Lobith worden ook sets aan toestromingen en onttrekkingen ("lateralen") bepaald met behulp van de randvoorwaarden-generator (RGWM 1.2.2). De benedenranden van het SOBEK3-model bevatten QH-relaties.

Bodem

De bodem wordt op basis van de best beschikbare data verrasterd voor het gehele Rijntakken-gebied om een maatgevende bodem voor de scheepvaart te verkrijgen. Dit vergroven van de resolutie is noodzakelijk om kleine morfologische fluctuaties weg te filteren, die niet in detail voorspeld kunnen worden, maar zo wel meegenomen worden aangezien deze kritisch voor scheepvaart kunnen zijn. De bodemkaart is met behulp van relaxatiemodellen en empirische coëfficiënten of een andere aanpak (zoals aangegeven vraagt dit desgewenst nog om nadere uitwerking) te vertalen naar een verwachting van de bodem in te toekomst.

Waterdiepte

Met de uitgerekende waterstanden en bodemkaarten wordt de waterdiepte voor elk van de 51 realisaties (reeksen van de komende 46 dagen) bepaald voor de gehele Rijntakken. Dit gebeurt door voor ieder tijdstip in de reeks de waterstand en bodemligging van elkaar af te trekken. Per MGD-traject wordt vervolgens de minste diepte weergegeven binnen de vaargeul.

Het stappenplan “statische bodem” is volledig uitgewerkt en eenmalig toegepast voor al de Rijntakken. Bij een komende droogteperiode kan dit vrij eenvoudig doorlopen worden zodra de BfG de meest recente verwachtingsreeksen bij Ruhrort levert. Indien een verwachting met dynamische bodem gewenst is, zal dit nog nader uitgewerkt moeten worden.

Er wordt in het gehele proces gebruikgemaakt van verschillende tools, scripts en databronnen. Op dit moment is het proces uit Figuur 2-1 niet geautomatiseerd, niet uit te voeren met een druk op een knop (dit was ook geen onderdeel van de opdracht). Waarschijnlijk zal het daarom nu nog nodig zijn om de hulp van Deltares in te schakelen wanneer het gewenst is het stappenplan tijdens een komende droogteperiode te doorlopen.

2.1.3 Resultaat in vier dimensies

Er wordt gebruik gemaakt van 51 mogelijke afvoertijdreeksen van 46 dagen (zie hierna voor nadere toelichting). Dit resulteert in 51 tijdreeksen voor lateralen, waterstanden en waterdieptes. Doordat de waterdiepte geprojecteerd wordt op een tweedimensionaal (2D) rooster, wordt er voor iedere tijdstap een diepteveld gegenereerd. Concreet betekent dit, als ieder uur wordt uitgevoerd, dat er meer dan 56.000 dieptevelden voor iedere riviertak gegenereerd worden, voor alléén het statische bodem spoor. De gegenereerde diepteverwachting is in feite een vierdimensionale parameter, aangezien er dieptevariëaties zijn in ruimte (x,y) en tijd (t) en bandbreedte door onzekerheid (de 51 mogelijke realisaties). Vanwege de grote hoeveelheid gegenereerde data en de meerdere dimensies vraagt de wijze van presentatie de nodige aandacht.

2.2 Afvoer

2.2.1 Afvoerverwachtingen in het algemeen

De totstandkoming van afvoerverwachtingen is in de basis geënt op proces-gebaseerde modellen. Daarbij wordt in het algemeen gewerkt met een combinatie van hydrologische en hydrodynamische modellen.

Een hydrologisch model vormt de schakel tussen het water in de atmosfeer en het oppervlaktewater. Het representeert processen zoals verdamping, de opbouw en smelt van sneeuw, infiltratie in de bodem en afstroming naar het oppervlaktewater over het land en via de ondergrond. Deze representatie is veelal conceptueel van aard, en voor de meeste processen zijn verschillende concepten voorgesteld. Er zijn dan ook veel verschillende ‘smaken’ hydrologische modellen. Een hydrologisch model bestaat uit een verzameling gebiedseenheden (een raster of een verzameling deelstroomgebieden) die gezamenlijk een stroomgebied bedekken. Voor elk van deze eenheden zijn er binnen het gekozen concept typisch meerdere parameters (ongeveer 5-20) te kalibreren.

Met een hydrodynamisch model wordt het gedrag van oppervlaktewater gesimuleerd. In het geval van de afvoer bij Lobith betreft het de routing van de bovenstrooms door het hydrologische model gegenereerde afvoer. Van hydrodynamische modellen bestaan verschillende varianten die van elkaar verschillen in complexiteit. In de meest complexe modellen is de werkelijke krachtenbalans goed gerepresenteerd en worden afvoeren en waterstanden op een fijnmazig rooster (tientallen tot honderden meters) berekend.

In de software voor hydrologisch modelleren is over het algemeen een simpeler hydrodynamisch model opgenomen (bijvoorbeeld Muskingum-Cunge; Todini, 2007). Daarin zijn aannames gedaan die een grove ruimtelijke resolutie (tientallen kilometers) mogelijk maken. In de hieronder besproken opties voor langere-termijn afvoerverwachtingen bij Lobith is steeds sprake van een simpel hydrodynamisch model.

Het genereren van verwachtingen verschilt in een belangrijk aspect van het draaien van historische simulaties voor bijvoorbeeld onderzoeks-, beleids- of vergunningsdoeleinden. In een operationele context heeft het moment 'nu', ofwel T_0 , een speciale betekenis. De toestand van het systeem tot en met T_0 is namelijk deels bekend uit observaties, terwijl de evolutie na T_0 alleen met modellen te voorspellen is. De begintoestand is daarom medebepalend voor de nauwkeurigheid van een verwachting. Om die reden loont het om data-assimilatie toe te passen in een operationele context om de begintoestand beter in overeenstemming te brengen met metingen.

2.2.2 Onzekerheidsinformatie

Bij het opstellen van een verwachting is het doel de onzekerheid over wat komen gaat te verkleinen. Deze wegnemen is echter onmogelijk. Wanneer een verwachting dus informatie geeft over de mate waarin deze onzeker is, neemt de waarde van de verwachting toe. De rijkste implementatie hiervan staat toe om over- of onderschrijdingskansen te bepalen voor het optreden van bepaalde gebeurtenissen: een zogenoemde probabilistische verwachting. Hiermee wordt het mogelijk om de bij een gebeurtenis behorende voordelen of schade te wegen met de kans op het optreden ervan. Het wordt voor beslissers dan dus mogelijk een risicoschatting te maken (Den Toom, 2018). Voor verwachtingen van de afvoer bij Lobith met een zichttijd van zes tot acht weken blijkt dat de onzekerheid erin dermate groot is, dat een deterministische verwachting nauwelijks waarde heeft. De beschikbare verwachtingen zijn dan ook zonder uitzondering probabilistisch van aard.

Er zijn ruwweg twee manieren om onzekerheidsinformatie toe te voegen aan een verwachting. De eerste betreft het gebruik van ensemble-technieken. Daarbij wordt niet één simulatie van de toekomst gedaan, maar wordt een pluim van even waarschijnlijke, fysisch plausibele voorspellingen gemaakt. Uit zo'n pluim kan een kans worden afgeleid door simpelweg het aantal leden van het ensemble te tellen dat aan de conditie voldoet waarvoor de kans gevraagd wordt. Deze methode is in de meteorologie al tientallen jaren gangbaar. De tweede manier is om deterministische modelresultaten achteraf te verrijken (en eventueel te corrigeren) op basis van een statistische beschrijving van de modelfout in het verleden. Het nabewerkte modelresultaat heeft dan voor elk tijdstip de vorm van een waarschijnlijkheidsverdeling.

Bij gebruik van ensemble-technieken is de kwaliteit van de verwachting een aandachtspunt. In geval van een probabilistische verwachting wordt deze in de eerste plaats afgemeten aan de mate van nauwkeurigheid. Daarbij gaat het om de vraag of de verwachte kans van optreden van een bepaalde gebeurtenis klopt met de gemeten werkelijkheid achteraf, gemiddeld over een groot aantal verwachtingen. In de tweede plaats wordt een goede probabilistische verwachting gekenmerkt door een zo scherp mogelijke kansverdeling. In beide gevallen wordt meestal de klimatologie als referentie gehanteerd. In de hydrologie worden de resultaten van ensemble-technieken typisch gekenmerkt door systematische fouten en een te geringe spreiding. Bij verrijking achteraf is dit minder problematisch.

Een beperking van statistische nabewerking is echter dat dynamische informatie verloren gaat. Uit de in de tijd opeenvolgende waarschijnlijkheidsverdelingen kan geen fysisch plausibel tijdsverloop gereconstrueerd worden.

Voor het berekenen van waterdieptes benedenstrooms van Lobith is dit een belangrijk aandachtspunt, omdat de verwachte afvoer bij Lobith daarvoor als randvoorwaarde dient. Als voor Lobith geen fysisch plausibel tijdsverloop beschikbaar is, heeft het geen zin voor het berekenen van waterdiepte een dynamisch model te gebruiken². Niet-dynamische afvoeren zijn alleen bruikbaar als voor de waterdiepteberekening een valide statisch model voorhanden is.

2.2.3 Beschikbare langere-termijnverwachtingen voor Lobith

Voor een verwachting van de afvoer bij Lobith op een termijn van 6 tot 8 weken zijn verschillende bronnen beschikbaar. De volgende leveranciers zijn bij Deltares bekend:

- BfG (Bundesanstalt für Gewässerkunde): Duits federaal instituut, onder andere belast met het uitvoeren van onderzoek naar het verbeteren van verwachtingen ten behoeve van de scheepvaart.
- EFAS (European Flood Awareness System): Europees consortium, belast met het uitgeven van overstromingswaarschuwingen.
- RWsOS (Rijkswaterstaat – Samenhangende Operationele Systemen): Het instrumentarium van Rijkswaterstaat (RWS) voor het maken van verwachtingen voor het hoofdwatersysteem (waterstanden, debiet, golven en stroming).
- SMHI (Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut): De Zweedse overheidsinstantie voor meteorologie en hydrologie.
- UU (Universiteit Utrecht): De vakgroep van droogte-expert Niko Wanders.

Een overzicht van de karakteristieken van de betreffende verwachtingen (zoals bekend op moment van schrijven; alle partijen ontwikkelen door) is te vinden in Tabel 2-1. Aan de hand hiervan is overwogen in hoeverre de verschillende afvoerwachtingen toepasbaar zijn voor het berekenen van waterdiepteverwachtingen. Bij die overweging zijn twee aspecten meegenomen. In de eerste plaats is dat de inhoudelijke kwaliteit van de verwachting. Daarbij wordt opgemerkt dat deze niet kwantitatief geëvalueerd is, maar dat de beoordeling gebaseerd is op expertkennis. In de tweede plaats is gekeken naar de vorm waarin de verwachtingen beschikbaar zijn.

Voor wat betreft het aspect inhoudelijke kwaliteit wordt het verschil tussen de producten gemaakt door de gebruikte modellen, de begintoestand en meteorologische forcering.

Uit Tabel 2-1 wordt duidelijk dat in elk product een ander hydrologisch model gebruikt wordt. Het voert te ver om de achterliggende concepten hier met elkaar te vergelijken, vooral omdat de uiteindelijke prestatie van het model niet alleen van het concept maar ook van de kalibratie afhankelijk is. Dat betekent dat een zinnig vergelijk kwantitatieve analyse vraagt, wat buiten het kader van dit werk valt. Voor verdere details ten aanzien van de modellen wordt daarom naar de referenties verwezen.

In relatie tot bovenstaande is het wel belangrijk op te merken dat UU een aanpak hanteert met vier modellen, terwijl de overige producten op een enkel hydrologisch model gebaseerd zijn. De UU-aanpak is zinvol, omdat geen enkel model alle hydrologische fenomenen goed zal representeren. Door de inzet van meerdere modellen is de onzekerheid in de verwachting ten gevolge van de modelformulering (in elk geval ten dele) afgedekt.

² Ook als geen tijdsverloop gewenst is voor waterdiepte, maar alleen statistiek daarvan, is de afwezigheid van dynamische randvoorwaarden funest. Bijvoorbeeld: de gemiddelde waterdiepte op basis van dynamische afvoer verschilt van de waterdiepte op basis van de gemiddelde afvoer. De reden hiervan is dat de dynamica van waterdiepte (en waterhoogte) *niet-lineair* is. Aanpassing van de volgorde van bewerkingen heeft in dat geval een andere betekenis en geeft een ander resultaat.

Behalve in concept verschillen de hydrologische modellen van elkaar in ruimtelijke representatie en in de temporele resolutie. De relatief fijnmazige raster-gebaseerde modellen hebben ten opzichte van modellen op basis van deelstroomgebieden het voordeel dat de ruimtelijke verdeling van neerslagpatronen beter tot uiting komt in het afvoerverloop. Gezien de onzekerheid in de neerslag op een termijn van 6 tot 8 weken lijkt dit niet doorslaggevend. Hetzelfde kan gezegd worden voor de temporele resolutie, die tussen de modellen varieert tussen 1 uur en 1 dag.

Ook in de modellering van de hydrodynamica ontlopen de producten elkaar weinig. In alle producten wordt gebruikgemaakt van een vereenvoudigde voorstelling van de afvoerrouting.

In de behandeling van de begintoestand is eveneens geen sprake van noemenswaardige verschillen. De modeltoestand van waar de verwachting start is in alle gevallen het resultaat van een historische simulatie. Er wordt dus geen data-assimilatie gebruikt. Verder is de initiële conditie steeds deterministisch van aard. In de verwachtingen werkt de onzekerheid in de begintoestand dan ook niet door.

Op het vlak van meteorologische forcering onderscheiden de producten zich wel duidelijk. De eerste implementaties (in de jaren '70) van op hydrologische modellen gebaseerde lange-termijn afvoerwachtingen waren gebaseerd op een methode die bekend staat als Ensemble Streamflow Prediction (ESP; Twedt e.a., 1977). De producten van de BfG en de UU bevatten ook resultaten op basis van ESP. Hierbij wordt de forcering gevormd door een ensemble samen te stellen uit historische neerslagreeksen. De nauwkeurigheid is in dat geval volledig afkomstig uit de hydrologische begintoestand³. Voor de daggemiddelde afvoer in de Rijn heeft ESP voor zichttijden groter dan ongeveer een maand niet meer nauwkeurigheid dan de afvoerklimateologie (Meißner e.a., 2017).

Anders dan bij het ontstaan van ESP zijn inmiddels ook lange-termijn meteorologische verwachtingen beschikbaar. Hierin zijn twee varianten te onderscheiden:

- 'Extended verwachtingen': Het European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECWMF) gebruikt voor de reguliere weervoorspelling een ensemblemodel waarbij de zichttijd 15 dagen bedraagt. Tweemaal per week worden deze simulaties (gebruikmakend van een half zo fijne resolutie) verlengd tot 46 dagen zichttijd. Deze verwachting wordt aangeduid als ECWMF-ENS extended⁴ en wordt toegepast in de producten van de BfG, UU en EFAS.
- Seizoensverwachtingen: Dit gaat om verwachtingen met een zichttijd van 6 maanden of meer. Vergeleken met reguliere weervoorspellingen is de resolutie van de hiervoor gebruikte modellen grover; voor de dataset van het ECWMF (SEAS⁵) bijvoorbeeld half zo fijn. Verder worden dit soort verwachtingen meestal maar een keer per maand gedraaid. In de producten van EFAS, SMHI en UU worden seizoenverwachtingen toegepast.

Bij het gebruik van lange-termijn meteorologische verwachtingen moet bedacht worden dat voorspellingen van uurgemiddelde neerslag, die voor het weerbericht van belang zijn, niet nauwkeurig zijn voor zichttijden langer dan 10 dagen (voor temperatuur en straling is dat langer; Van Osnabrugge, 2019).

³ Dit kan met de volgende voorbeelden begrepen worden: Als een stroomgebied op dit moment relatief nat is, zal de afvoer de komende tijd relatief hoog zijn. Idem als er voor het begin van het smeltseizoen veel sneeuw ligt.

⁴ Zie verder <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/set-vi>

⁵ Zie verder <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/set-v>

Dat lange-termijn meteorologische verwachtingen toch nauwkeurigheid kunnen toevoegen aan hydrologische verwachtingen, komt doordat in meteorologische modellen ook trager verlopende processen (in de interactie tussen atmosfeer en land/zee) gerepresenteerd zijn. Die nauwkeurigheid wordt pas zichtbaar door de snelle dynamica ten gevolge van het individuele weersysteem weg te filteren en alleen naar langere periodes te kijken, bijvoorbeeld week- of maandgemiddelde afvoeren.

Meteorologische modellen hebben last van systematische fouten. Het is mogelijk hiervoor (deels) te corrigeren, waardoor de nauwkeurigheid van de hydrologische verwachting verbeterd kan worden. Alleen door BfG wordt een dergelijke correctie toegepast. In het product van de UU worden meerdere meteorologische modellen toegepast, zodat deze voor elkaars fouten kunnen compenseren.

Naast de inhoud is ook de vorm van de afvoerverwachting van belang voor de toepasbaarheid. Hierin zijn grote verschillen te zien tussen de producten, die deels verklaard worden uit inhoudelijke overwegingen. Hier zal gekeken worden naar de vorm van het eindproduct, de zichttijd van de verwachting en tijdsresolutie.

In de vorm van het eindproduct zijn ruwweg drie categorieën te onderscheiden:

- Afvoerpluim: een ensemble bestaande uit 51 fysisch plausibele afvoertijdreeksen. Deze vorm wordt gehanteerd door RWsOS en SMHI. Uit de presentatie van Fleischer e.a. (2020) blijkt dat bij de BfG de afvoerpluim als tussenproduct voorhanden is. Zoals hierboven aangegeven is een dynamische uitvoer noodzakelijk als voor waterdiepte met een dynamisch model verder gerekend wordt.
- Boxplot (of snorredeos): een discretisatie van de kansverdeling voor de verwachte afvoer, waarin de 5%, 25%, 50%, 75% en 95% percentielen zijn aangegeven. Een percentielwaarde van X% wil daarbij zeggen dat er een kans van X% is dat de gegeven afvoer onderschreden wordt. Het 50%-percentiel heet ook wel mediaan. Deze vorm wordt gehanteerd door BfG en EFAS. Met deze vorm is dus niet verder te rekenen met een dynamisch model. Verder is de discretisatie van de kansverdeling erg grof. Ook als een statistisch model voor waterdiepte zou volstaan, kan de onderschrijdingskans voor een bepaalde kritische waterdiepte alleen door interpolatie benaderd worden.
- Kwintielverwachting: een kansverdeling in vijf klassen, waarbij de grenswaarden op basis van een klimatologie gedefinieerd zijn en voor elke tijdsstap verschillen. Anders dan bij de boxplot zijn in dit geval de afvoeren gegeven (als functie van de tijd) en de kansen variabel. Deze vorm wordt gehanteerd door de BfG en de UU. Ook in dit geval is niet verder te rekenen met een dynamisch model en zou bij beschikbaarheid van een statisch model een onderschrijdingskans benaderd moeten worden. Ten opzichte van de boxplot is dat mogelijk lastiger, omdat de kritische waterdieptes voor varen waarschijnlijk corresponderen met een afvoer die lager is dan de afvoer die in 20% van de tijd onderschreden wordt. Voor het berekenen van de onderschrijdingskans van die waterdiepte zou dan dus extrapolatie nodig zijn. Dat lukt bijvoorbeeld niet als de verwachte afvoer zeker (100%) in de laagste categorie valt. Verder is sprake van een belangrijk verschil tussen BfG en UU: De BfG baseert de grenswaarden op een historische afvoerreeks, terwijl de UU de historische simulatie als referentie gebruikt. Voor de UU is er dus geen koppeling met werkelijk gemeten afvoeren.

Voor de waterdiepteverwachtingen wordt gevraagd om een zichttijd van 6 tot 8 weken. De verwachtingen van BfG en RWsOS hebben beide een zichttijd van 46 dagen, oftewel zes-en-halve week. Zowel de BfG als RWsOS geven tweemaal per week een nieuwe verwachting uit, zodat de effectieve zichttijd minimaal zes weken bedraagt.

In EFAS wordt een zichttijd van 8 weken gehanteerd⁶. De producten van SMHI en UU geven informatie tot 6 maanden vooruit. Daarbij valt op dat het product van SHMI gebaseerd is op de meteorologische verwachting van meer dan een maand geleden.

Tot slot verschilt de temporele resolutie aanzienlijk tussen de producten. Alle producten behalve RWsOS hanteren een tijdstap van een week of langer. De reden dat voor deze presentatie gekozen is, is dat voor fijnere tijdstappen geen nauwkeurigheid te verwachten is. Nadeel is echter dat het aandrijven van een dynamisch waterdieptemodel met dergelijke tijdstappen geen zin heeft.

⁶ Daartoe wordt de ECMWF ENS extended verwachting aangevuld met ECWMF SEAS.

Tabel 2-1 Overzicht bekende bronnen voor lange-termijn afvoerwachting Lobith.

Bron	BfG	EFAS	RWsOS	SMHI	UU
Referentie	Meißner e. a., 2017 Fleischer e.a., 2020	Arnal e.a., 2018 Wetterhall en Di Giuseppe, 2018	Zie helpdesk water, RWsOS	-	Wanders e.a. 2019
Status	Pre-operationeel. RWS ontvangt eindproduct (pdf) per e-mail	Operationeel. RWS participeert in EFAS, maar bij Deltares is onbekend of RWS over de seizoensverwachtingen kan beschikken	Draait operationeel bij Rijkswaterstaat, als "pilot"-toepassing. Gegevens beschikbaar via https://matroos.rws.nl	Operationeel. Gegevens beschikbaar via https://hypeweb.smi.se/explore-water/forecasts/seasonal-forecasts-europe/	Op het moment van schrijven nog niet beschikbaar. Operationalisering wordt voorbereid. Wens tot inlezen in RWsOS is geïdentificeerd.
Hydrologisch model	LARSIM-Mittel Europa (raster-gebaseerd met 5 km resolutie; dagtjdstappen).	Lisflood (raster gebaseerd met 5 km resolutie, dagtjdstappen)	HBV (representatie in deelstroomgebieden; uurtjdstappen)	HYPE (representatie in deelstroomgebieden; waarschijnlijk dagtjdstappen)	Multi-model ensemble van 4 leden: mHM, Noah-MP, PCR-GLOBWB en VIC (raster-gebaseerd met 5 km resolutie; dagtjdstappen, behalve Noah-MP die 3-uur hanteert)
Meteorologische forcering	ECMWF-ENS-extended met bias/drift correctie (51 leden) ESP (51 leden)	ECMWF-ENS extended (51 leden) ECMWF-SEAS (51 leden)	ECMWF-ENS extended (51 leden)	ECMWF-SEAS (51 leden)	4 ensemble seizoensverwachtingen: CanCM4 (10 leden), GFDL-FLOR (12 leden), ECMWF-SEAS (15 leden) en Météo-France LFPW (15 leden) ESP (15 leden)
Eind-product	Kansverdeling in vijf klassen, gerefereerd aan metingen ⁷ Boxplots voor afvoer (5%, 25%, 50%, 75%, 95%)	Boxplots voor afvoer (5%, 25%, 50%, 75%, 95%)	Afvoerpluim (51 leden)	Afvoerpluim (51 leden)	Kansverdeling in vijf klassen, gerefereerd aan simulaties ⁸
Zichttijd	46 dagen, elke maandag en donderdag	8 weken, 2x/week voor ECWWMF-ENS extended, maandelijks voor ECMWF-SEAS	46 dagen, elke dinsdag en vrijdag	6 maanden	6 maanden, elke 1 ^e van de maand
Tijd-resolutie	1 week	1 week	1 uur	1 maand	1 maand
Bijzonderheden	Uit de presentatie van Fleischer e.a. (2020) blijkt dat ook de afvoerpluim als tussenproduct bestaat en niet alleen daarvan afgeleide kansen		Simpele correctie (constant in de tijd) van ruwe modelresultaten om ze te laten aansluiten bij de laatste meting	Huidige verwachting is gebaseerd op meteorologie van meer dan 1 maand oud	

⁷ Grenzen van de klassen verschillen per week en zijn zo gekozen dat elke klasse even waarschijnlijk is, gegeven de historisch *gemeten* afvoeren.

⁸ Grenzen van de klassen verschillen per maand en zijn zo gekozen dat elke klasse even waarschijnlijk is, gegeven de door elk model historisch *gesimuleerde* afvoeren.

2.2.4 Keuze ten aanzien van te gebruiken afvoerverwachtingen (stap A)

Het heeft de voorkeur om de afvoerverwachtingen als randvoorwaarde op te leggen aan een dynamisch model, want hiermee is het mogelijk om het tijdsverloop in waterdiepte te visualiseren. Een eindproduct in de vorm van kansverdeling in vijf afvoerklassen is een erg grove opdeling, waarmee onderscheid in kritische waterdiepte binnen de laagste afvoerklassen niet te maken valt. Op zich is een opdeling in klassen of percentielen verstandig, omdat met dynamische reeksen een schijnnaauwkeurigheid kan ontstaan. Maar dan ligt het meer voor de hand om in ons geval die opdeling uit te voeren op de waterdiepte in plaats van op de afvoer.

Dit betekent dat beschikbaarheid van een afvoerpluim sterk geprefereerd wordt. Volgens Tabel 2-1 wordt een afvoerpluim met 51 leden aangeboden door RWsOS, SMHI en de BfG (de laatste niet direct voor ons vrij te downloaden, maar pluim bestaat wel). Op basis van expertkennis, eigen ervaringen en voorgaande vergelijking wordt geconcludeerd dat inhoudelijk de verwachting van de BfG momenteel aantrekkelijker is dan die van RWsOS. SMHI biedt een sterk verouderde verwachting met grove resolutie. De BfG-verwachting heeft momenteel de voorkeur als zij bereid zijn de afvoerreeksen (tussenproduct) aan ons beschikbaar te stellen.

Er is derhalve contact geweest met de BfG (Dennis Meißner en Bastian Klein), en zij stellen zich zeer flexibel, prettig en behulpzaam op. Ze hebben aangegeven er geen problemen in te zien om de onderliggende afvoer ensemble data van hun 6-weeken verwachting met ons te delen, zelfs ook op operationele basis (Bijlage A). Dit zou een uitwerking kunnen zijn van de bestaande samenwerkingsovereenkomsten (MoU) tussen BfG en RWS en tussen BfG en Deltares⁹. Op dit moment zijn ook ensemble reeksen van Lobith onderdeel van hun systeem, alleen worden deze niet opgeslagen en zijn die nog zonder correctie vanwege gebrek aan meetdata. Ze geven aan dat dit in de toekomst zou kunnen worden toegevoegd. Mocht na deze studie blijken dat er vanuit RWS behoefte is aan een structurele of operationele datalevering van de afvoerverwachting, dan verdient het aanbeveling dat RWS hierover concrete (contractuele) afspraken maakt met de BfG.

Conclusie

Zodra het gewenst is het stappenplan te doorlopen om een verwachting in waterdiepte te genereren, dienen de meest recente afvoerrealisaties bij Ruhrort (dichtst bij Lobith) te worden opgevraagd bij de BfG. Deze worden aangeleverd als netcdf file. Hiermee kan een verwachting in waterdiepte gemaakt worden voor 42 tot 46 dagen vooruit (dus 6 weken en enkele dagen)¹⁰. Vanzelfsprekend geldt dat altijd kan worden besloten, om uiteenlopende redenen, om toch de RWsOS afvoerrealisaties te gebruiken in het genereren van een diepteverwachting. Toekomstige ontwikkelingen of praktische argumenten kunnen aanleiding zijn om af te wijken van het hier gepresenteerde stappenplan. Op dit moment is ons advies op inhoudelijke grond om de data van de BfG te kiezen.

⁹ Formeel zijn de MoU's afgelopen, er wordt gewerkt aan nieuwe versies die begin volgend jaar ondertekend worden.

¹⁰ Als op maandag een verzoek om data richting de BfG gaat, is de meest recente beschikbare verwachting van de donderdag ervoor; de verwachting is dan geen 46 maar 42 dagen vooruit.

Resultaat van stap A

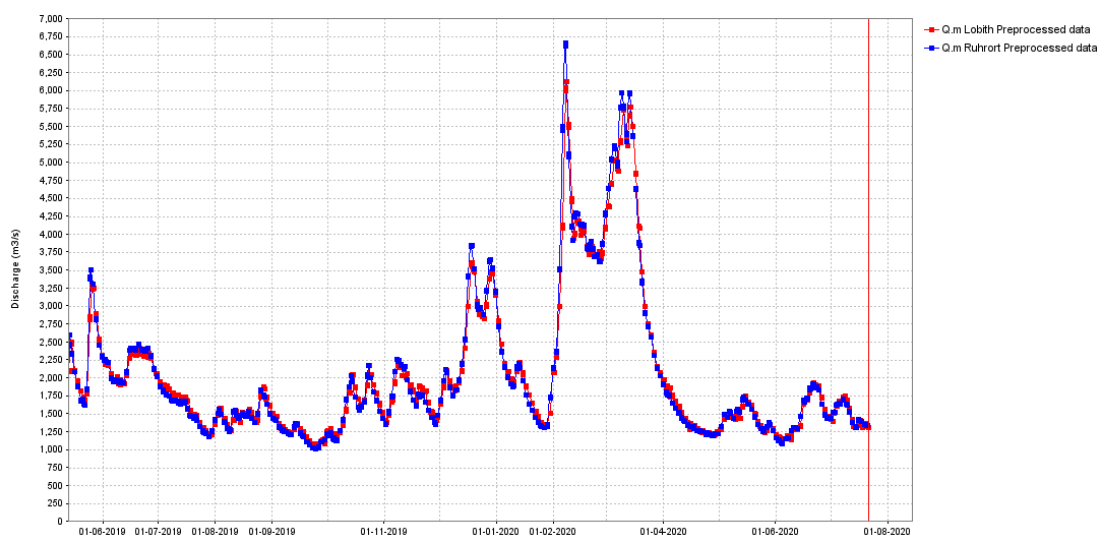
51 ensemble afvoertijdreeksen voor Ruhrort, lengte van de reeks 42 tot 46 dagen vooruit, waarmee de afvoerreeksen bij Lobith kunnen worden afgeleid.

2.2.5 Translatie van Ruhrort naar Lobith (stap B)

Dynamische modellen van de Rijntakken hebben de bovenstroomse randvoorwaarde bij Lobith. Er dient dus een translatie plaats te vinden van Ruhrort naar Lobith. De gemeten afvoer van Ruhrort ligt ongeveer even vaak boven die van Lobith als eronder (zie Figuur 2-2 voor een willekeurige periode ter illustratie). Een correctie op de afvoer is niet nodig. Een tijdsverschuiving lijkt wel zinvol. De beste correlatie wordt verkregen bij een verschuiving van 16 en 17 uur. Het voorstel is daarom om een tijdsverschuiving van 16 uur toe te passen op de afvoerrealisaties.

Resultaat van stap B

51 ensemble afvoertijdreeksen voor Lobith, lengte van de reeks circa 41 tot 45 dagen vooruit, die als invoer dienen voor het SOBEK3 waterstandsmodel.



Figuur 2-2 Gemeten afvoer bij Ruhrort en Lobith voor een willekeurig gekozen periode.

2.3 Waterstand

2.3.1 Verwachting laterale toestromingen en onttrekkingen (stap C)

Alvorens met een hydrodynamisch model van de Rijntakken de waterstanden berekend kunnen worden aan de hand van de afvoerrealisaties, worden eerst de laterale toestromingen en onttrekkingen bepaald. Deze zijn, naast de afvoer bij Lobith, invoer voor het hydrodynamische model.

Op meerdere punten langs de Rijntakken wordt er water onttrokken uit de rivier richting andere wateren. Deze onttrekkingen zijn afhankelijk van de watervraag en beïnvloeden de hydrodynamica in de rivier en daarmee ook de waterstand en waterdiepte. Bij een lange-termijn voorspelling is het daarom zaak om ook de lateralen te voorspellen. Verwaarlozing hiervan, vooral bij lage afvoer, kan van grote invloed zijn op de waterstanden.

Zoals benoemd zijn de lateralen afhankelijk van de watervraag en beschikbare hoeveelheid water. Ten tijde van droogte wordt er geprobeerd om het water zo effectief mogelijk te sturen naar gelang de laatste omstandigheden. Dit betekent dat de lateralen zijn in te schatten op basis van bestaande systeemkennis, historie en waterakkoorden, maar dat de exacte waterverdeling hier van af kan wijken.

Opties

Er zijn enkele opties voor het bepalen van de lateralen op basis van een gegeven afvoerverwachting bij Lobith:

- Stationaire lateralen, gegeven de afvoer bij Lobith: Op basis van bestaande relaties zijn de belangrijkste lateralen te bepalen. Dit is een eenvoudige en transparante aanpak en kan in een later stadium worden uitgebreid. Het nadeel is dat hiervoor een apart script moet worden opgezet om de bestaande relaties op te nemen wat uiteindelijk arbeidsintensief kan worden zonder dat alle kennis en voorspellingen meegenomen worden.
- Gebruik van de Randvoorwaarden-Generator Water-Modellen (RGWM): De randvoorwaarden-generator is in 2018 en 2019 opgezet om hydrodynamische modellen te voorzien van randvoorwaarden en vervangt de Lateralen Afvoer Generator (LAG). Op basis van tijdreeksen van de afvoer zijn andere lateralen af te leiden met behulp van verschillende relaties. Deze relaties kunnen tijdschuivingen en seizoensfluctuaties meenemen in het bepalen van de lateralen in een zelf op te stellen invoerbestand.
- Gebruik van de actuele situatie en voorspellingen voor lateralen: Het nadeel van vooraf opgestelde relaties is dat de actuele situatie niet wordt meegenomen. Enkele belangrijke lateralen worden gemeten en zijn beschikbaar bij Rijkswaterstaat. De instelling van de belangrijkste stuurknoppen van het watersysteem en daarmee de waterverdeling is niet geheel onbekend in de nabije toekomst. Idealiter wordt deze kennis meegenomen in de voorspelling of worden de relaties aangepast op basis van de actuele situatie. Hier kan ook worden gedacht aan hydrologische modellen die een voorspelling geven van de watervraag.

Voor nu is het gebruik van de randvoorwaarden-generator (RGWM) de beste en gekozen optie. Dit is een kant en klare tool waarmee op basis van kennis van hydrologische experts de belangrijkste relaties zijn opgesteld om de lateralen af te leiden. In een later stadium kan dit proces eventueel worden uitgebreid met gegevens over de actuele situatie, hiervoor is nu nog geen methodiek beschikbaar. De lateralen zoals afgeleid met de RGWM op basis van de afvoer bij Lobith zijn direct op te nemen in een hydrodynamisch model voor de Rijntakken.

Iedere Lobith afvoertijdreeks (51 in totaal) levert een set aan lateralen (meerdere toestromingen). Het resultaat van stap C is dus 51 sets aan lateralen.

In theorie is het mogelijk om (net zoals bij de totstandkoming van de afvoertijdreeksen) onzekerheidsinformatie aan de verwachte lateralen toe te voegen, door niet één set te creëren per afvoertijdreeks, maar meerdere door de invoer te variëren binnen realistische grenzen. Daar is nu niet voor gekozen, omdat dit zal leiden tot een exponentiele toename aan simulaties.

Resultaat van stap C

51 sets aan lateralen, afgeleid met de randvoorwaarden-generator (RGWM) met behulp van de 51 afvoertijdreeksen voor Lobith en die als invoer dienen voor het SOBEK3 waterstandsmodel.

2.3.2 Verwachting waterstanden in de Rijntakken (stap D)

De verwachte waterstanden kunnen met behulp van een hydrodynamisch model met actuele bodemligging bepaald. Voor de Rijntakken zijn de volgende modellen beschikbaar:

- 1D model (SOBEK3 schematisatie j19_5-v1), zoals het draait onder RWsOS voor de voorspelling van waterstanden,
- 2D-model (WAQUA 5^e generatie, schematisatie j19_5-v1 of Delft3D (DVR) model).

Een voordeel van een 2D-model is dat er 2D-informatie over waterstanden uit komt, die eenvoudig gecombineerd kan worden met een 2D-bodemligging mits de 2D-roosters hetzelfde zijn. Het WAQUA-model is echter niet op laagwater gekalibreerd, en het Delft3D-model is primair ontwikkeld en gekalibreerd om lange-termijn morfologische ontwikkeling te voorspellen. Op dit moment wordt er gewerkt aan een nieuw 2D-model in D-HYDRO, dat wel op laagwater gekalibreerd zal worden. Het SOBEK3-model is wel op laagwater gekalibreerd (laagwater 2011, met een afvoer van ongeveer 1.000 m³/s). Verder wordt een dwarsverhang op de rivier door het WAQUA-model berekend, en niet door het SOBEK3-model.

Naar verwachting is de onzekerheid in de modelinvoer (afvoeren) op zo'n lange termijn duidelijk groter dan het verschil in nauwkeurigheid tussen de verschillende modellen. Rekeningtijden zijn van belang, aangezien 51 simulaties uitgevoerd dienen te worden. De rekestijd van het SOBEK3-model is aanzienlijk korter (orde minuten) dan van het WAQUA-model (orde meerdere uren). Voor het draaien van het WAQUA-model is enige rekeninfrastructuur nodig (een rekencluster om parallel te kunnen draaien). Er is daarom gekozen voor gebruikmaking van het SOBEK3-model. De benedenstroomse randen van het model bevatten QH-relaties.

Resultaat van stap D

51 waterstandsreeksen voor iedere rivierkilometer in de Rijntakken, berekend met behulp van het SOBEK3 waterstandsmodel.

2.3.3 Waterstanden naar 2D rooster (stap E)

De met SOBEK2 berekende waterstanden worden op een tweedimensionaal rooster geprojecteerd, zodat later in het proces de waterstand en bodem van elkaar kunnen worden afgetrokken waarmee de waterdiepte wordt verkregen. Hiervoor wordt hetzelfde rooster gebruikt als voor de projectie van de bodem in stap F. De bodemdynamiek bepaalt de eigenschappen van het rooster, dus dit wordt nader behandeld bij stap F (§2.4.1).

De invulling van de roostercellen met waarden gebeurt door in langsrichting te interpoleren tussen de kilometerpunten en in dwarsrichting de waterstand constant te veronderstellen. Vooral in bochten kan de waterstand over de breedte variëren. Door dit te verwaarlozen wordt een fout van maximaal een beperkt aantal centimeters gemaakt (zie ook de afweging WAQUA/Delft3D versus SOBEK3; afweging tussen nauwkeurigheid en rekentijd en "modelleergemak").

Resultaat van stap E

Voor iedere tijdstap in de 51 tijdreeksen een tweedimensionale waterstandskaat van de Rijntakken.

2.4 Bodemligging

2.4.1 Projectie meest recente bodemligging op rooster (stap F)

Voor de vastlegging van de bodemligging in de Rijntakken wordt gebruik gemaakt van gemeten data. Er zijn momenteel drie opties voorhanden:

- Een actuele hoge-resolutie multibeam-beheerpeiling (BP): deze peilingen worden tweewekelijks opgenomen als onderdeel van het huidige bagger-onderhoudscontract en geven nagenoeg een momentopname van de bodemligging in de vaargeul. Voor het nieuwe onderhoudscontract wordt de frequentie van deze peiling waarschijnlijk gereduceerd of wordt deze volledig geschrapt.
- De jaarlijkse multibeam-oriëntatiepeiling (JMP) van het gehele zomerbed (tussen de normaallijnen). Deze metingen worden verspreid over enkele weken uitgevoerd. Deze meting is dus geen momentopname. De jaarlijkse peiling wordt tegenwoordig twee keer per jaar ingewonnen, in voorjaar en najaar.
- De CoVadem-gegevens die dagelijks worden bepaald langs tracks van schepen met CoVadem apparatuur. Omdat het tracks (of lijnen) betreft, is er geen informatie van bodemligging tussen de tracks. Het aantal tracks wordt groter wanneer ook tracks van voorgaande dagen worden meegenomen.

De multibeam-peilingen zijn beschikbaar op een 1x1 m raster. Ten opzichte van de multibeam-data geldt: CoVadem-data (i) vragen om een grotere verwerkingsslag, (ii) hebben niet altijd en overal goede dekking, (iii) zijn van mindere kwaliteit dan multibeam-metingen, en (iv) zijn geen eigendom van Rijkswaterstaat.

CoVadem-schepen meten de diepte onder de kiel, deze wordt door CoVadem omgezet in een waterdiepte. Om ieder meetpunt om te rekenen naar een bodemhoogte is de waterstand ter plaatse van en ten tijde van de meting benodigd. Voor de Boven-Rijn en Waal en Duitse Rijn draait er momenteel een operationeel systeem (Van der Mark en Lemans, 2020) dat de waterdiepte omrekenet naar bodemhoogte, voor de overige Rijntakken is dit niet beschikbaar. CoVadem-data bestaan uit gevaren tracks, om te komen tot een rivierdekkende bodemhoogtekaart dienen de tracks te worden omgezet naar een rooster. Ook deze transformatie maakt deel uit van het operationele systeem, en is dus alleen voor de Boven-Rijn en Waal voorhanden. Topprioriteit voor CoVadem Services BV op dit moment is het opschalen van de vloot. Bij de opstart werden met name schepen opgenomen in de vloot die richting Duitsland varen.

Momenteel wordt hierop niet meer geselecteerd, maar de verwachting is dat er nog wel een aanzienlijk betere dekking (iedere week meerdere scheepstracks over de gehele breedte van de rivier) is op de Boven-Rijn/Waal dan de andere Rijntakken. De CoVadem-data worden ingewonnen met het conventionele singlebeam echolood dat standaard aanwezig is op binnenvaartschepen. De kwaliteit hiervan is minder dan van een geavanceerd gevalideerd en gekalibreerd multibeam-echolood. Rijkswaterstaat heeft als launching customer van CoVadem (een aantal schepen van RWS zijn uitgerust met een CoVadem box) wel mogelijkheden om toegang te krijgen tot bewerkte data, maar uitgangspunt van CoVadem is en blijft dat de ruwe data eigendom blijft van de inwinner en dat toestemming nodig is om de data te gebruiken.

Om de bovenstaande redenen is voor nu in het stappenplan gekozen om gebruik te maken van de multibeam-metingen (ofwel JMP ofwel BP, afhankelijk van welke op dat moment het meest actueel is), die in eigendom zijn van RWS. De “fout door ouderdom” achten we kleiner dan de fout die ontstaat door gebruikmaking van CoVadem-data bij het construeren van een actuele bodemkaart (vanwege de genoemde aspecten van dekking, interpolatie, extrapolatie, verwerkingslag, meetkwaliteit).

De meest recente multibeam-peiling (opvraagbaar via CIV) is dus voor de Boven-Rijn/Waal ofwel een JMP (tussen de normaallijnen) ofwel een BP (alleen de vaargeul). Voor het Pannerdensch Kanaal, de Neder-Rijn, Lek en IJssel is dit een JMP. De consequentie van de keuze voor multibeam is, dat de laatst beschikbare peiling niet altijd heel actueel is. Als het stappenplan bijvoorbeeld in september doorlopen wordt, is de JMP-multibeam al enkele maanden oud. De BP-peiling is in theorie maximaal twee weken oud, in de praktijk is dat wellicht anders omdat een peiling door de baggeraar ingeleverd en door RWS gecontroleerd zal worden voordat deze beschikbaar gesteld mag worden.

Omdat er plannen zijn de frequentie van het inwinnen van multibeam-metingen te reduceren, zijn de CoVadem-metingen wel een relevante databron. Nu al, en zeker straks met een nieuw onderhoudscontract, zijn deze metingen het meest actueel. Waarschijnlijk is het daarom op zeker moment¹¹ beter om gebruik te maken van CoVadem-metingen in plaats van van multibeam-metingen om een bodemkaart voor T0 te construeren. Naar de genoemde nadelen (eigendom, dekking van de Rijntakken, kwaliteit, vertaalslag naar bodemligging) dient dan gekeken te worden.

Het voorstel is om de actuele bodemligging te projecteren op een 2D-rooster. De reden hiervoor en keuze voor de afmetingen van de roostercellen worden hieronder nader toegelicht.

Rivierduinen (bodenvormen) wandelen over de bodem van de rivier. De toppen van de duinen kunnen te hoog worden en de scheepvaart hinderen. Vooral op de Midden-Waal worden geregeld duinen “afgetopt”. De duinen groeien in hoogte als de afvoer toeneemt, en worden weer kleiner bij afnemende afvoer. Dit kleiner worden gaat echter niet zo snel (de waterstand daalt sneller), het kan daarom voorkomen dat er nog relatief hoge duinen aanwezig zijn, nadat de waterstand gedaald is. Vooral in die situatie geven duinen hinder voor de scheepvaart.

¹¹ CoVadem werkt continu aan opschaling en verbetering van de kwaliteit van de data. Op dit moment is er vooral goede dekking op de Waal en Boven-Rijn; op een gegeven moment zal door opschaling ook de dekking op de Neder-Rijn en IJssel voldoende zijn. Op dit moment is er onvoldoende inzicht of de kwaliteit van de CoVadem-data in combinatie met de hoeveelheid tracks voldoende is om te allen tijde een nauwkeurige actuele bodemkaart te construeren voor alle Rijntakken. Als CoVadem doorontwikkelt, zal op gegeven moment de ouderdom van een multibeam-peiling tot een grotere fout leiden dan de fout door onvoldoende CoVadem-tracks of onvoldoende kwaliteit. Nadere analyse is nodig om hier inzicht in te krijgen.

Verder kunnen kritieke ondieptes ontstaan op locaties waar een duin en andere ondiepte samenvallen. Een binnenbocht of wijder stuk rivier waar het doorgaans altijd relatief ondiep is, kan kritisch worden zodra daar een duin overheen migreert.

Bij het afgeven van een bodemligging- en diepteverwachting willen we niet pretenderen dat we exact weten waar over een aantal weken een duintop ligt. Dit kan namelijk niet voorspeld worden, enerzijds omdat de peiling al wat ouder kan zijn (beginconditie op T0 is onbekend), anderzijds omdat de morfologische modelconcepten (voorspellen vanaf T0) hiervoor te onzeker en tijdrovend zijn. Dit is de reden om de bodemligging op een rooster te projecteren, zodanig dat de individuele rivierduinen niet meer zichtbaar zijn, maar de ondieptes door (optelling van) rivierduinen en bankenpatronen wel.

Voor het “statische bodem spoor” is het nodig een maatgevende bodemkaart (stap F1 in Figuur 2-1) te creëren (maximale bodem, minimale diepte). Voor het “dynamische bodem spoor” geldt ook dat de minimale waterdiepte gewenst is, maar die wordt pas later in het proces bepaald. De verwachte bodemverandering wordt bepaald ten opzichte van een gemiddelde bodem, dus is het startpunt een gemiddelde bodemkaart (stap F2).

De projectie op een rooster gebeurt voor stap F1 door alle bodemligging meetpunten (1 m x 1 m) binnen iedere roostercel te bepalen en de 95-percentiel waarde van deze meetpunten toe te kennen aan de roostercel. Hiermee wordt, in het midden van de rivier waar de duinen zich voortbewegen, een maatgevende bodem verkregen (Figuur 2-3). De toekenning van waarden aan roostercellen op deze wijze werkt goed, zolang de roostercellen langer zijn dan een rivierduin. Bij te korte cellen blijven de duinen zichtbaar in de resulterende bodem. In dwarsrichting zijn de cellen smal gekozen, zodat breedtevariëaties in de bodem behouden blijven. Ook andere ondiepe locaties blijven op deze manier behouden, zoals de banken of niet-verplaatsende kribvlammen. Het rooster hoeft in principe maar één keer gemaakt te worden (tenzij er tijdens de toepassing aanleiding is om verbeteringen door te voeren), en is daarom niet als aparte actiestap in het stappenplan benoemd. Door de gemeten bodemligging op deze wijze op een rooster te projecteren blijft ook het effect van een mogelijk wat gedateerde bodem (kan zoals gezegd enkele maanden oud zijn) beperkt. De bodemligging verandert in de tijd, maar de grootschalige bankenpatronen, met diepere buitenbochten en ondiepere binnenbochten, en kribvlammen zijn altijd aanwezig. De variatie hier omheen wordt gevangen door de bovengrens te beschouwen.

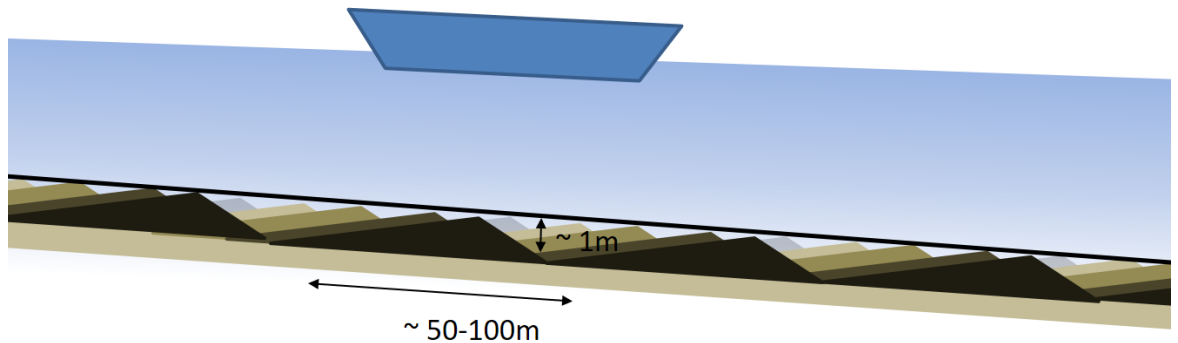
De projectie voor stap F2 is nagenoeg gelijk, namelijk door alle bodemligging meetpunten (1 m x 1 m) binnen iedere roostercel te bepalen en de *gemiddelde* waarde van deze meetpunten toe te kennen aan de roostercel.

Het resultaat van stap F: één maatgevende en één gemiddelde recente bodemkaart voor alle Rijntakken waar de kleinschalige structuren uit zijn weggefilterd.

Resultaat van stap F

1. Voor het “statische bodem spoor” (stap F1): Een kaart van de maatgevende bodemligging voor alle Rijntakken, die wordt gebruikt als T0-bodem.
2. Voor het “dynamische bodem spoor” (stap F2): Een kaart van de gemiddelde bodemligging voor alle Rijntakken, die wordt gebruikt als T0-bodem.

De kaart wordt geconstrueerd aan de hand van de meest recente multibeam-peiling: voor Pannerdensch Kanaal, Neder-Rijn, Lek en IJssel is dit de JMP, voor de Boven-Rijn en Waal is dit zeer waarschijnlijk de BP.



Figuur 2-3 Maatgevende bodem (zwarte lijn), die over de toppen van de duinen ligt.

2.4.2 Verwachting bodemligging (stap G)

Een methodiek of tool voor het voorspellen van de bodemligging 6-8 weken vooruit ligt niet kant en klaar op de plank. Op basis van bestaande kennis is een eerste verkenning gemaakt voor een methodiek (zie ook Bijlage B). Het voorstel voor de verwachting in bodemligging is nog niet gereed en niet compleet.

Op basis van beschikbare kennis en waarnemingen is vastgesteld (zie Bijlage B) dat voor de voorspelling over een periode van 6-8 weken uitsluitend veranderingen in plaatsvasten en verplaatsende bodemvormen hoeven te worden beschouwd (duinen, kribvlammen, baggerwerk, etc.). De toppen van deze bodemvormen zijn bepalend voor de maximaal optredende bodemligging en daarmee de minimale waterdiepte. Uit de eerste analyses volgde dat de groei of afbraak van de hoogte van deze beddingvormen over het algemeen een orde kleiner zal zijn (orde van decimeters, hooguit 1 m) dan de bandbreedte van voorspelde waterstanden (orde van meters). De bijdrage van de veranderende bodemligging telt daardoor mogelijk minder zwaar mee in de voorspelling voor waterdiepte dan de waterstand. Hiermee lijkt het beargumenteerd dat een eerste schatting van waterdiepte mogelijk is door gebruik te maken van een statische bodemligging (de laatst gemeten bodemligging wordt vastgehouden; statische bodem spoor in Figuur 2-1).

Als het toch wenselijk is de dynamiek van de bodem mee te nemen, was het eerste idee om dit te doen via een methode die de demping van actueel gemeten kleinschalige morfologische verschijnselen beschrijft (relaxatiemodel). Dit is redelijk eenvoudig toe te passen zonder grote rekenkracht.

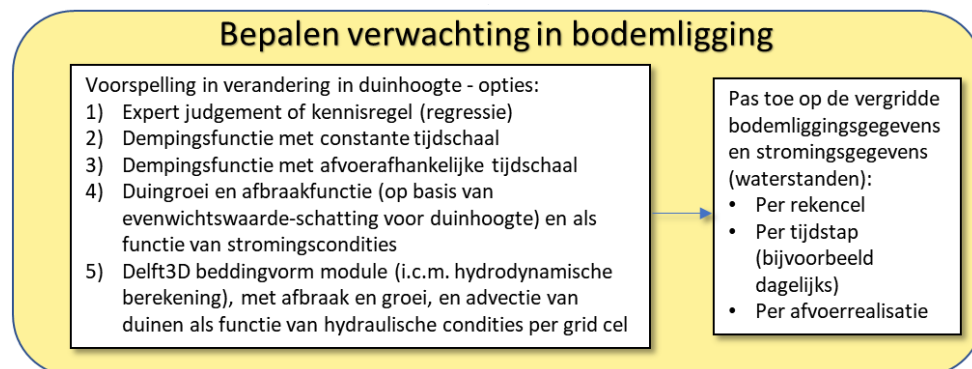
Dit voorstel is daarom verder uitgewerkt, en in het volgende hoofdstuk toegepast voor een stukje Waal van de Pannerdensch Kop tot het Maas-Waalkanaal (i.e., niet voor alle Rijntakken).

Echter, uit analyses bleek dat volgens een relaxatiemodel op de termijn van 6-8 weken een noemenswaardige reductie van duinhoogte mogelijk is, vooral van duinen die zijn gevormd in een voorafgaand hoogwater. Een betere schatting van (minimale) waterdiepte kan dan wellicht worden bereikt door de verandering in bodemvormen te simuleren met de beschikbare opties in Delft3D. Al met al is het in dit stadium lastig om vast te stellen wat de beste aanpak is voor de beoogde toepassing. Validatie van het relaxatiemodel is niet gedaan, en het blijkt nodig dit toegepaste relaxatiemodel nog uit te breiden. Bodemvormen simuleren is mogelijk met de Delft3D duinmodule, maar dit vraagt een veel grotere rekeninspanning, en het is onbekend of de voorspelling daar beter van wordt. Tot nog toe is de duinhoogtevoorspeller in Delft3D niet ingezet in een operationele context, alleen nog maar in scenario analyses. Aanvullende tests zijn daarom noodzakelijk indien doorlopen van het dynamische bodem spoor gewenst is.

Hieronder wordt nader ingegaan op de opties voor het maken van een verwachting van afbraak en groei van bodemvormen, en met name het relaxatiemodel en de Delft3D-optie (Figuur 2-4).

De aanpak om via relaxatiemodel of Delft3D-optie te komen tot een verwachting in bodemligging is als volgt voor iedere roostercel:

- Bepaal de initiële (T0) bodemvorm-gemiddelde bodemligging,
- Bepaal de initiële (T0) duinhoogte,
- Bepaal de ontwikkeling in duinhoogte gedurende de komende 6 weken (verwachting van afbraak en groei van bodemvormen),
- Bepaal de maatgevende (maximale) bodemligging gedurende de komende 6 weken door optelling van de initiële bodemvorm-gemiddelde bodemligging en een halve duinhoogte (per tijdstap en per afvoerrealisatie).



Figuur 2-4 Mogelijkheden om een voorspelling van afbraak en groei van bodemvormen voor een voorspelhorizon van 6 à 8 weken uit te voeren.

Relaxatiemodel (eenvoudige variant toegepast in Hoofdstuk 3)

Om een verwachting in bodemligging te maken via een relaxatiemodel voor duinhoogte zijn om te beginnen benodigd (a) de bodemvorm-gemiddelde bodemligging op T0 (besproken in §2.4.1, Stap F2) en (b) de duinhoogte op T0.

Bodemvormen zijn snel veranderende patronen. De duinhoogte op T0 kan daarom niet afgeleid worden van verouderde multibeam-peilingen, dit in tegenstelling tot de bodemvorm-gemiddelde bodemligging, waarbij in veel gevallen een verouderde multibeam-peiling nog wel representatief zal zijn voor de actuele situatie. De duinhoogte op T0 kan als volgt voor iedere roostercel worden bepaald:

- Als de meest recente multibeam-peiling niet verouderd is (niet ouder dan zeg 2 weken), gebruik dan de multibeam-peiling. Duinhoogte kan dan als volgt bepaald worden:
 - Verschil tussen de maximum en de minimum waarde in de cel, als maat voor de duinhoogte (deterministisch),
 - De standaardafwijking of de 95% -waarde van de bodemligging zowel boven als onder het gemiddelde, als maat voor duintoppen en troggen (statistisch).
- Als de meest recente multibeam-peiling verouderd is (ouder dan zeg 2 weken), gebruik dan:
 - Actuele CoVadem-gegevens, of
 - De duinhoogtemodule van het Delft3D-model.

In Hoofdstuk 3 is een beheerpeiling (jonger dan 2 weken) gebruikt en is het verschil tussen het maximum en minimum bepaald als initiële duinhoogte.

Er zijn vervolgens verschillende mogelijkheden om een voorspelling van afbraak en groei van bodemvormen voor een voorspelhorizon van 6 weken uit te voeren met behulp van een dempingsfunctie (zie Figuur 2-4).

Toegepast in Hoofdstuk 3 is een simpele relaxatievergelijking met constante tijdschaal (optie 2 in Figuur 2-4) voor de situatie waarbij duinen uitdempen na een periode van hoogwater. Deze situatie wordt maatgevend geacht voor het ontstaan van ondieptes door bodemvormen. Immers, de duinhoogte van grote duinen neemt over het algemeen langzamer af dan de waterstand, waardoor nog redelijk lang na een hoogwaterperiode de duinen maatgevend kunnen zijn voor scheepvaartknelpunten.

De methode voorziet niet in een herhaalde groei van de duinen, bijvoorbeeld tijdens een tussentijds zomerhoogwater. Daarvoor moet worden gewerkt met een functie die de actuele duinhoogte relateert aan een evenwichtswaarde voor duinen.

Voor iedere roostercel wordt de initiële duinhoogte berekend door het verschil te bepalen tussen de maximale en minimale bodemhoogte in de cel, of het verschil tussen gemiddelde en maximale bodemligging in een cel maal 2. Tijdschalen voor aanpassing van duinen zijn in de orde van $T = 20$ dagen (Giri et al, 2008). De afname van bodemvormen kan dan door de volgende relatie worden beschreven:

$$z_{\max}(t) = z_{\text{gemidd}}(0) + (z_{\max}(0) - z_{\text{gemidd}}(0)) \cdot \exp\left(\frac{-t}{T}\right) \quad (1)$$

Nadeel van deze formulering is dat deze convergeert naar een situatie zonder duinen ($z_{\max} = z_{\text{gemidd}}$). Daarom is een variant gebruikt waarbij de bodem convergeert naar een aangenomen evenwichtsduinhoogte van 0,1 m (of andere te specificeren waarde).

Deze relatie geeft slechts een grove benadering van de duinafbraak. Omdat deze relatie onafhankelijk is van stromingscondities (en dus niet afhangt van het verwachte afvoerloop) kan deze bodemvorm-afbraak berekening eenmalig direct aansluitend op de bodemprojectie worden uitgevoerd.

Een eerste stap in het verbeteren van deze methode, is het gebruik van een afvoerafhankelijke tijdschaal $T(Q)$ waarbij de tijdschaal T afneemt (processen versnellen) wanneer de afvoer Q toeneemt, en vice versa (optie 3 in Figuur 2-4). Op dit moment zijn er nog onvoldoende gegevens om deze functies te ontwikkelen. Een ander probleem is dat duinhoogte niet alleen afhangt van afvoer, maar ook van andere variabele invloeden zoals retourstroom en schroefstraal van passerende schepen, veranderende bodemsamenstelling, etc.. Daarnaast houdt deze methode geen rekening met tussentijdse groei en de verplaatsing van duinen naar aanliggende roostercellen. De duinen verplaatsen zich over een afstand van 100 tot enkele honderden meters gedurende het voorspeldomein van 6-8 weken, en verplaatsen dus naar benedenstroomse cellen.

Delft3D-optie

De meest complete methode (maar niet eerder in operationele context toegepast) voor duinhoogtevoorspelling (optie 5 in Figuur 2-4) is reeds beschikbaar in Delft3D en direct toepasbaar op een rekenrooster. De aanpak berekent zowel groei als afbraak van duinhoogte bij veranderende stromingsomstandigheden, en de advection (verplaatsing) van de duinen. Delft3D gebruikt hiervoor de duinhoogtemodule in een hydrodynamische berekening. Hoewel deze aanpak niet is toegepast in deze studie, kan worden overwogen deze in de toekomst toe te passen voor een betere voorspelling. De procedure voor een dergelijke berekening is dan als volgt:

- 1 De actuele duinhoogte per roostercel, afgeleid uit de metingen of model *), wordt ingevoerd als initiële duinhoogte in Delft3D.
- 2 De hydrodynamische berekening (inclusief duinhoogtevoorspeller) wordt uitgevoerd voor alle 51 afvoerrealisaties (er hoeft niet morfologisch te worden gerekend). Deze berekeningen kunnen onafhankelijk (dus parallel) van elkaar worden uitgevoerd. Omdat het simulaties zijn voor hooguit 8 weken, zal de rekentijd van elke berekening redelijk beperkt zijn. In principe kunnen deze berekeningen de SOBEK berekeningen zelfs vervangen, omdat het model ook de waterstanden en afvoerverdeling simuleert voor alle Rijntakken (maar dit wordt niet aanbevolen omdat het SOBEK3-model veel beter gekalibreerd is op waterstanden).
- 3 De duinhoogtemodule in Delft3D rekent per roostercel een evenwichtsduinhoogte uit op basis van de lokale stromingscondities. Door middel van een advection- en diffusie-model wordt vervolgens de duinhoogte-ontwikkeling in ruimte en tijd berekend op het rooster. De evenwichtsduinhoogte wordt met een empirische relatie berekend (bijvoorbeeld "Van Rijn" of "Fredse" formules). Deze relaties kunnen worden verbeterd wanneer deze met meetdata worden gekalibreerd.

*) In situaties met verouderde data (bijvoorbeeld bij gebruik van een jaarlijkse multibeam-peiling die al enkele maanden geleden is ingewonnen) is het beter een schatting te maken van de initiële duinhoogte met het Delft3D-model of CoVadem-data in plaats van de duinhoogte uit de multibeam-metingen te halen. De duinhoogtemodule van dit model geeft een benadering van de mogelijke duinhoogte, die is ontstaan door het afvoerverloop van de voorgaande periode. Aanbevolen wordt om in dit geval minimaal 2 maanden terug te kijken.

Resultaat van stap G

Een verwachting in maximale bodemligging voor iedere roostercel, iedere tijdstap en alle 51 realisaties (dwz, 51 tijdreeksen van bodemkaarten, bv iedere dag een kaart) vanaf T0 tot 6 weken vooruit.

De maximale bodemligging volgt uit de som van initiële bodemvorm-gemiddelde bodemligging en de verwachting in halve duinhoogte. De verwachting in (halve) duinhoogte kan ofwel tot stand komen via een relaxatieformule (meerdere varianten, nog te ontwikkelen) ofwel via de duinhoogtemodule, die is ingebouwd in Delft3D.

Hier is nog geen keuze in gemaakt, omdat geen studies beschikbaar zijn waarmee kan worden vastgesteld wat de beste methodiek is. Ook speelt mee: (a) de balans tussen zekerheid in de verwachting en rekentijd (grote rekentijd inzetten, onzeker of hiermee een significant betere voorspelling wordt verkregen), en (b) de bijdrage van de veranderende bodemligging telt mogelijk minder zwaar mee in de voorspelling voor waterdiepte dan de waterstand; met andere woorden: het “statische bodem spoor” volstaat wellicht voor het beoogde doel.

Een eenvoudige relaxatieformule is toegepast in Hoofdstuk 3, maar dit is waarschijnlijk een te simpele aanpak. Nader onderzoek is nodig als het wenselijk wordt geacht verder te gaan met het “dynamische bodem spoor”.

2.5 Waterdiepte

2.5.1 Bepaling waterdiepte (stappen H en I)

Tot slot wordt de waterdiepte verkregen door de bodemligging en waterstand van elkaar af te trekken. Dit wordt gedaan per roostercel, per tijdstap en per realisatie. Dit leidt tot een grote hoeveelheid uitkomsten, namelijk 51 diepterealisaties voor de statische bodem en 51 voor de dynamische bodem. Eén diepterealisatie bestaat uit een reeks van maximaal 1080 dieptevelden als de tijdstap een uur is (45 dagen x 24 uur).

Resultaat van stappen H en I

Twee keer (statisch en dynamisch) 51 tijdreeksen van dieptevelden binnen de vaargeul van de Rijntakken.

2.5.2 Presentatie waterdiepte (stappen J en K)

Het is onmogelijk om al de tijdreeksen van dieptevelden in één figuur te presenteren, enerzijds zijn er teveel dimensies (4-dimensionale figuur), anderzijds bieden de velden waarschijnlijk niet de informatie waar de eindgebruiker behoefte aan heeft.

Het voorstel is om de minste waterdiepte op een MGD-traject te bepalen (kleinste waarde van alle roostercellen in dit traject) voor iedere tijdstap in iedere realisatie, en die te presenteren in een grafiek als functie van de tijd. Dit resulteert in 11 grafieken (voor ieder MGD-traject een grafiek).

Aanvullend is het nog mogelijk een bovenaanzicht te maken van 1 of meerdere realisaties van de waterdiepte, waarmee inzichtelijk wordt waar in de rivier zich de ondieptes bevinden. Aandachtpunten hierbij zijn:

- Het is nodig ver in te zoomen omdat anders niets zichtbaar is.
- Gerelateerd aan het vorige punt (aflezen van kleurenschaal is lastig), er zou een eenvoudige kleurenschaal gekozen kunnen worden, bijvoorbeeld rood als het ergens ondieper is dan vereist (2,80 m op de Boven-Rijn/Waal), blauw als het dieper is (zie ook De Jong en Van der Mark, 2020).
- Om de ontwikkeling in de tijd te zien van een realisatie, is het noodzakelijk een filmpje te maken.
- Informatie over de bandbreedte (de 51 realisaties) raakt geheel verloren, een optie is om het minimum of mediaan van alle realisaties weer te geven, met daarbij een bovenaanzicht waarin de bandbreedte staat weergegeven.
- Het is lastig om in één oogopslag vergelijkingen te maken tussen verschillende realisaties en tijdstappen.

Vanwege deze kanttekeningen is het zeer de vraag of deze wijze van plotten toegevoegde waarde heeft voor de eindgebruiker.

Als een ruimtelijke presentatie toch gewenst is (detail bovenaanzicht), is het te overwegen kaarten te maken met de kans dat de waterdiepte minder is dan “y” m, binnen “x-aantal” weken of op een bepaald tijdstip “x”. Voor de verschillende periodes (x) en dieptewaarde (y) moet een aantal waarden worden gekozen. De kleurschaal geeft aan wat de kans is dat de waterdiepte (y) wordt overschreden, bijvoorbeeld hoe donkerder hoe kleiner de kans, of hoe roder hoe groter de kans.

Resultaat van stappen J en K

Twee keer (statisch en dynamisch) 11 grafieken (1 voor ieder MGD-traject) waarin minimale waterdiepte als functie van de tijd wordt gepresenteerd, waarbij de 51 realisaties gebruikt worden om de bandbreedte van de verwachting weer te geven.

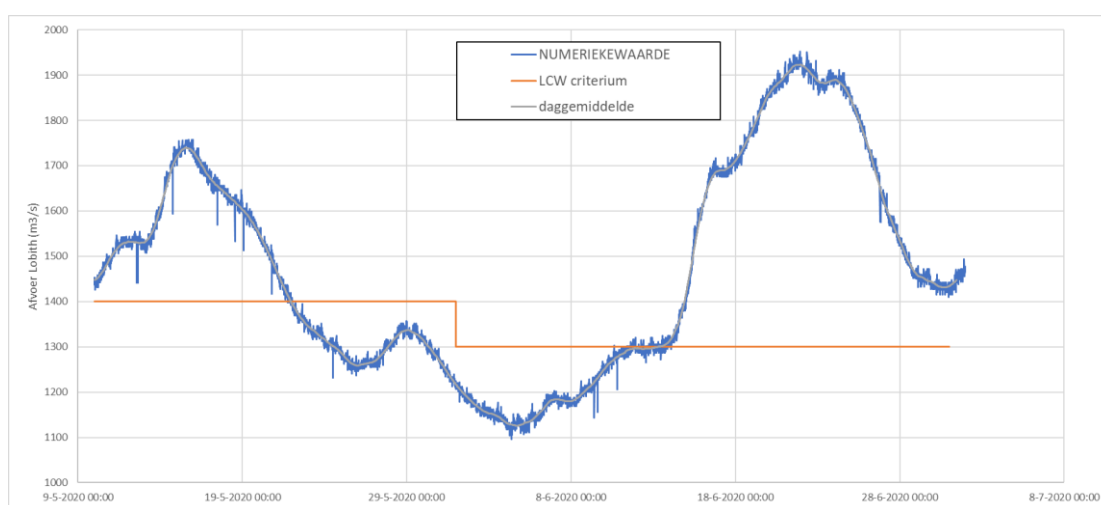
In deze studie zijn de 11 statische dieptegrafieken gecreëerd in een eenmalige toepassing (H3). De dynamische dieptegrafieken zijn niet gemaakt, aangezien de verwachte bodemligging zoals aangegeven nog nadere uitwerking vraagt.

3 Toepassing van het stappenplan

3.1 Inleiding

Het voorgestelde stappenplan wordt een keer doorlopen voor een gekozen begintijdstip T₀, zodat we een beeld krijgen van de uitvoerbaarheid ervan en om aan te tonen dat het inderdaad mogelijk is een verwachting in waterdiepte te construeren. Voor het statische bodem spoor is het stappenplan geheel doorlopen, dit is aan de hand van een aantal figuren geïllustreerd in paragraaf 3.2. Paragraaf 3.3 gaat in op het “dynamische bodem spoor”, en dan vooral op de duinhoogte.

De gekozen T₀, het moment ‘nu’ vanaf wanneer een verwachting 6 weken vooruit zal worden gemaakt, is 18 mei 2020. Het stappenplan zal in de toekomst waarschijnlijk doorlopen gaan worden als er een laagwaterperiode aan komt of als het al laagwater is. Op 18 mei is er een dalende afvoertrend ingezet, en enkele dagen later duikt de afvoer onder het LCW-criterium¹² van 1400 m³/s (Figuur 3-1).



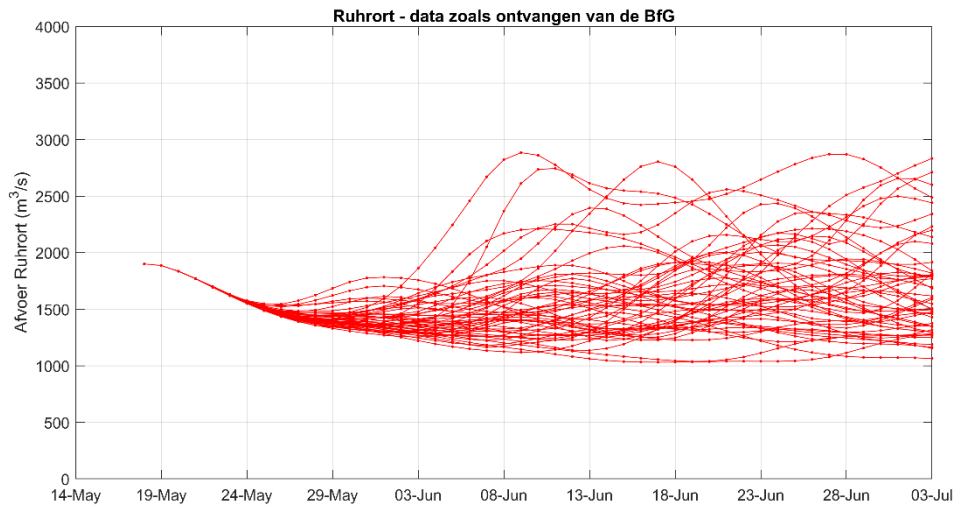
Figuur 3-1 Gemeten afvoer bij Lobith.

3.2 Statische waterdiepte

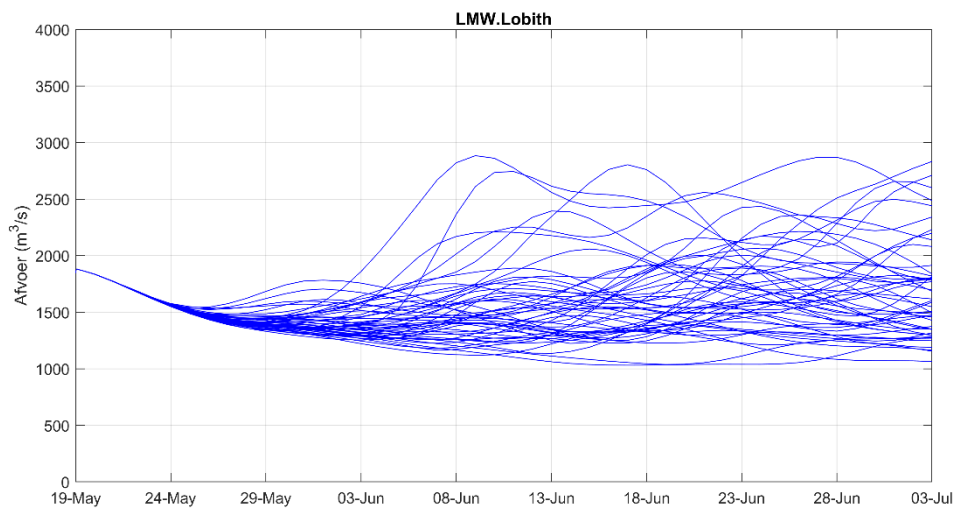
3.2.1 Afvoer

Figuur 3-2 en Figuur 3-3 tonen achtereenvolgens de 51 afvoerrealisaties bij Ruhrort, ontvangen van de BfG (stap A), en de getransleerde afvoerrealisaties bij Lobith (stap B). De tijderschuiving zorgt ervoor dat de gehele reeks opschuift (16 uur).

¹² Het criterium is tijdsafhankelijk (varieert van maand tot maand).



Figuur 3-2 51 afvoerrealisaties voor Ruhrt van de BfG vanaf $T_0 = 18$ mei 2020.

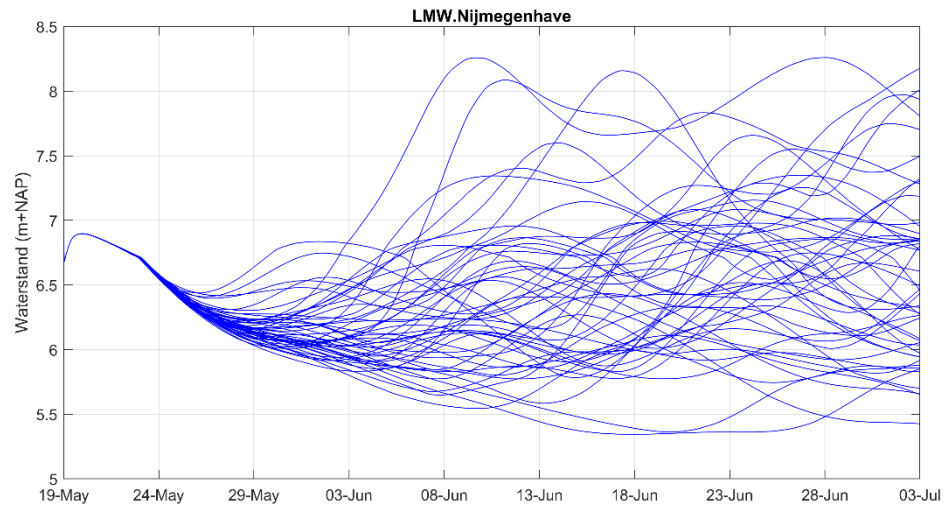


Figuur 3-3 51 afvoerrealisaties voor Lobith.

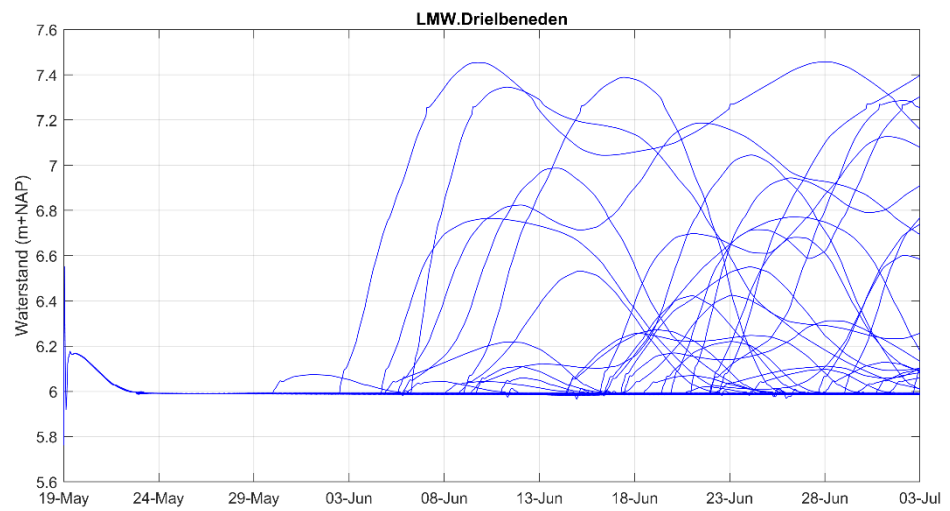
3.2.2 Waterstand

De lateralen en waterstanden zijn berekend met de RGWM en SOBEK3 (51 simulaties; stappen C en D). Figuur 3-4, Figuur 3-5 en Figuur 3-6 tonen voor drie locaties (in de Waal, Neder-Rijn en IJssel bij Nijmegen, Driel en Olst) de waterstandsrealisaties. Dergelijke figuren zijn te produceren voor alle opgegeven uitvoerlocaties (ieder meetstation en iedere rivierkilometer).

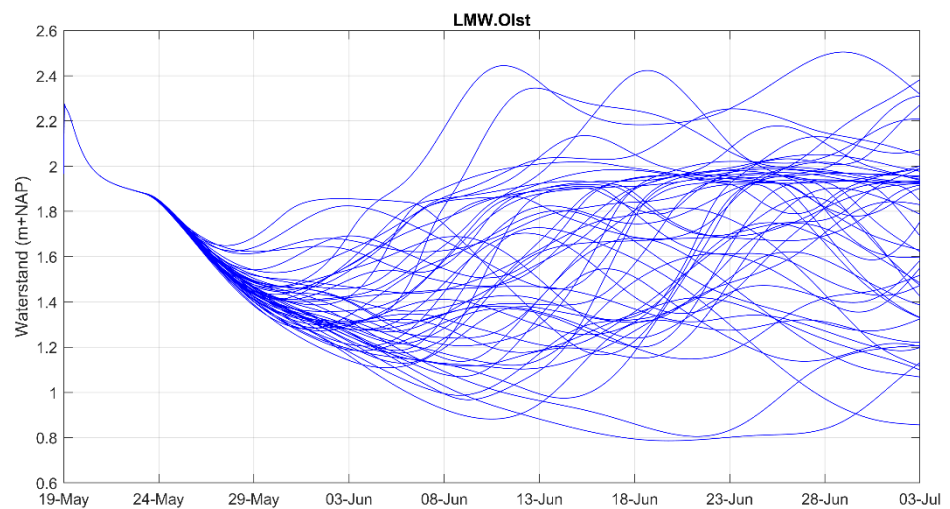
Vervolgens zijn de waterstanden, berekend op kilometerpunten en meetstations, omgezet naar een 2D rooster (stap E), zodanig dat iedere roostercel een waterstandswaarde krijgt (Figuur 3-7).



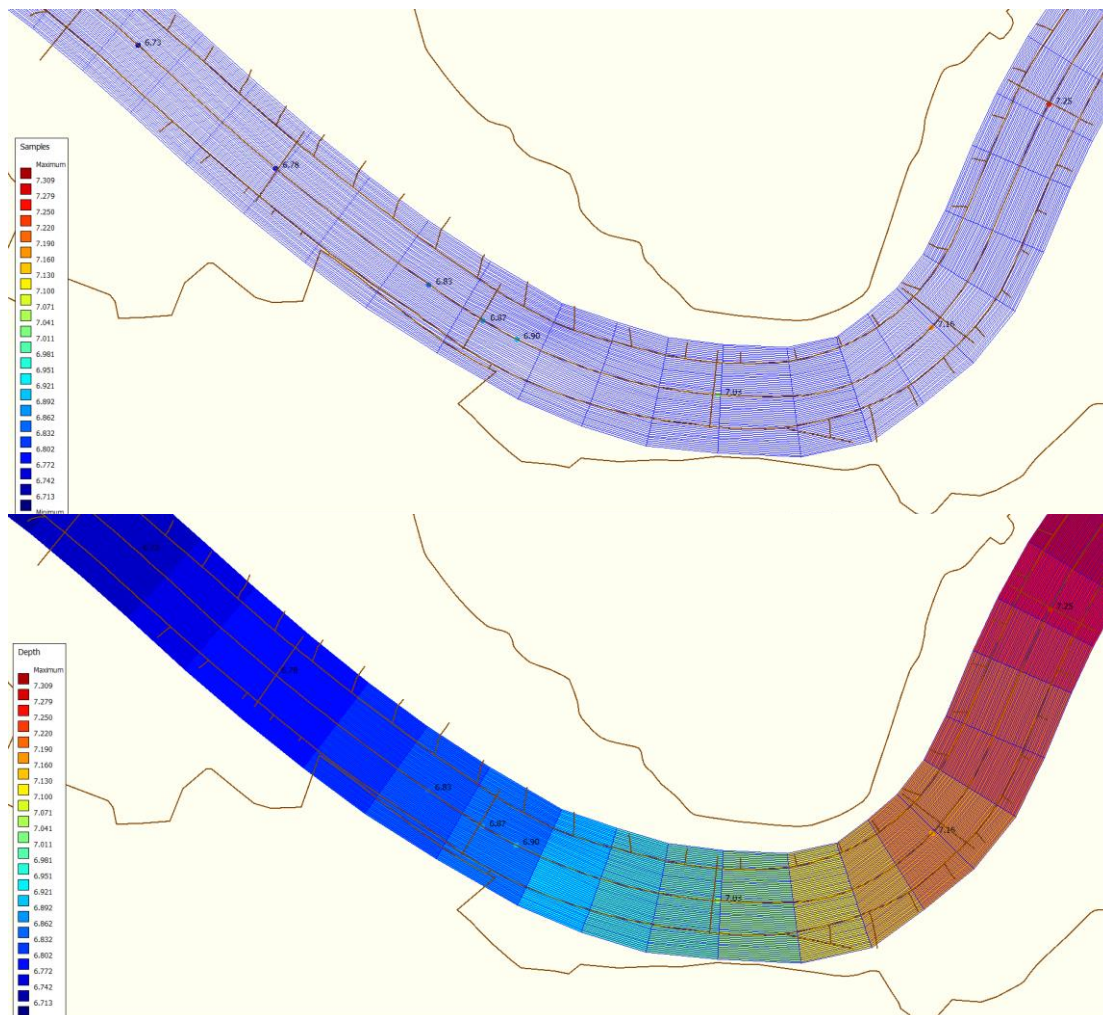
Figuur 3-4 51 waterstandsrealisaties bij Nijmegen (Waal).



Figuur 3-5 51 waterstandsrealisaties bij Driel (Neder-Rijn).



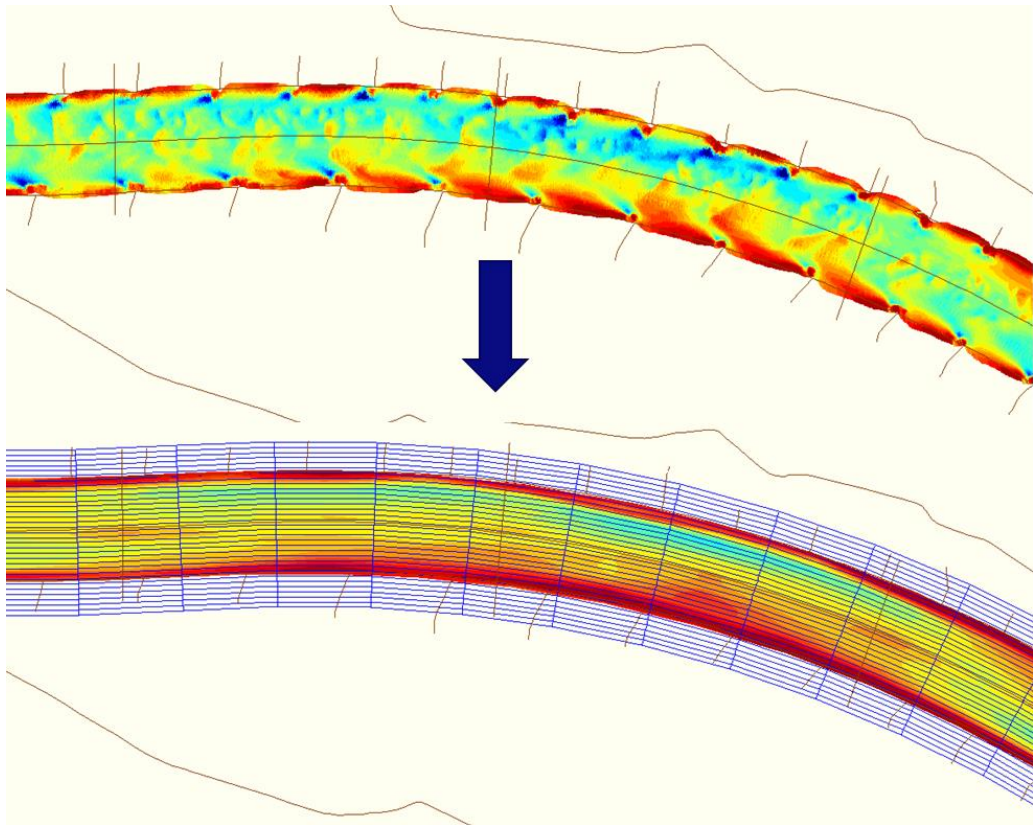
Figuur 3-6 51 waterstandsrealisaties bij Olst (IJssel).



Figuur 3-7 Waterstanden op kilometerpunten en meetstations (boven) worden omgezet (stap E) naar een 2D rooster (onder). Dit figuur illustreert dit voor de bocht bij Nijmegen (realisatie 1, laatste tijdstap).

3.2.3 Bodemligging

Figuur 3-8 illustreert hoe een maatgevende (maximale) bodemkaart wordt gecreëerd door de 95-percentiel waarden binnen cellen toe te kennen aan de roostercellen (stap F1).



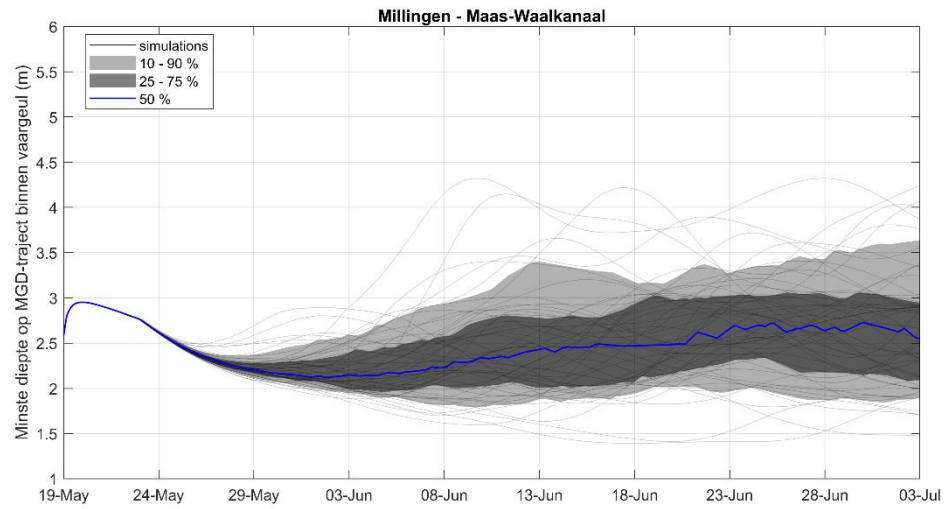
Figuur 3-8 Projectie van recente multibeam-peiling op 2D-rooster.

3.2.4 Waterdiepte

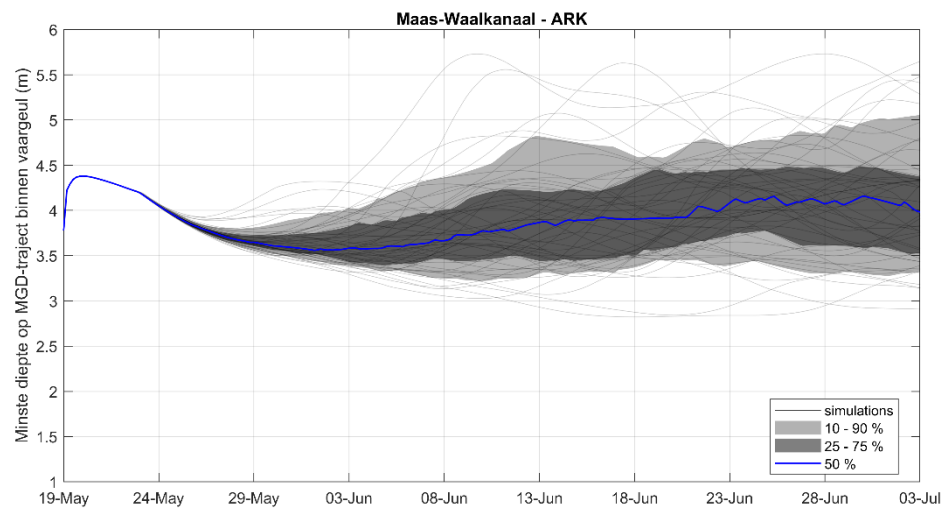
Voor iedere tijdstap in iedere realisatie is de minimum waterdiepte bepaald binnen een MGD-traject binnen de vaargeul (stappen H en J). Dit resulteert in 11 figuren (Figuur 3-9 t/m Figuur 3-19). De realisaties zijn vertaald naar kans van voorkomen, waarbij gebruik gemaakt wordt van de aanname dat alle realisaties even kansrijk zijn. De gebruikte MGD-trajecten zijn te vinden in Tabel 1-1.

Daaronder zijn enkele bovenaanzichten (Figuur 3-20 en Figuur 3-21) getoond die gemiddelde en minimum waterdiepte tonen van de gehele periode en alle afvoerrealisaties. De kaarten slaan echter alle resultaten “plat” en bieden weinig houvast voor gebruikers die bevaarbaarheid moeten inschatten, zoals ook al werd opgemerkt bij de kanttelingen in §2.5.2.

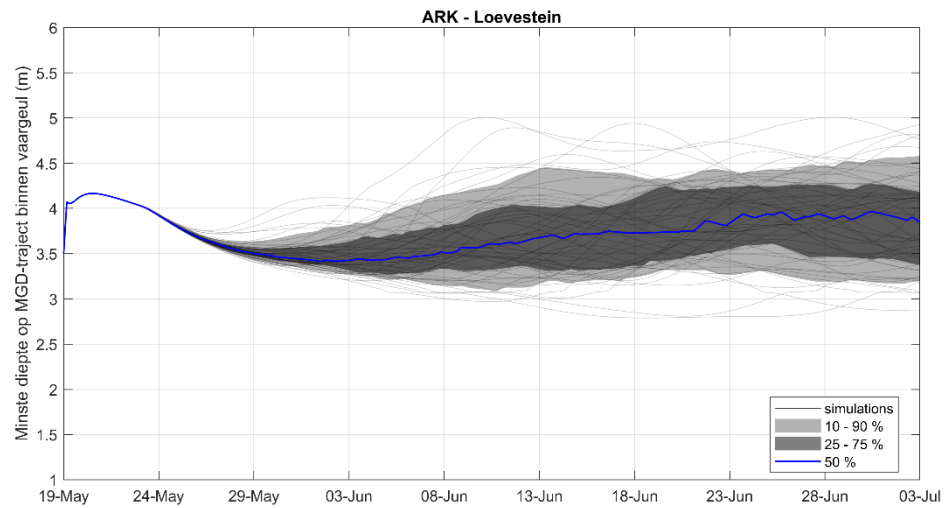
Tot slot is een voorbeeld gegeven voor de Boven-Waal waarbij de waarschijnlijkheid dat de waterdiepte minder is dan 3,5 m wordt getoond (Figuur 3-22). Hierop zijn diverse varianten mogelijk, bijvoorbeeld de overschrijdingskans op een specifiek tijdstip of cumulatief over een bepaalde periode.



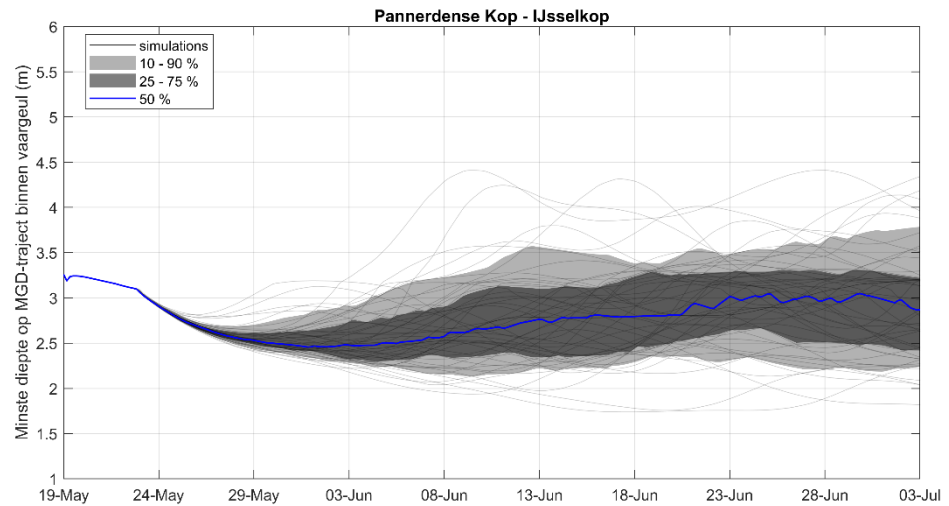
Figuur 3-9 Verwachting minste diepte Boven-Rijn/Waal op MGD-traject (zie titel) binnen de vaargeul.



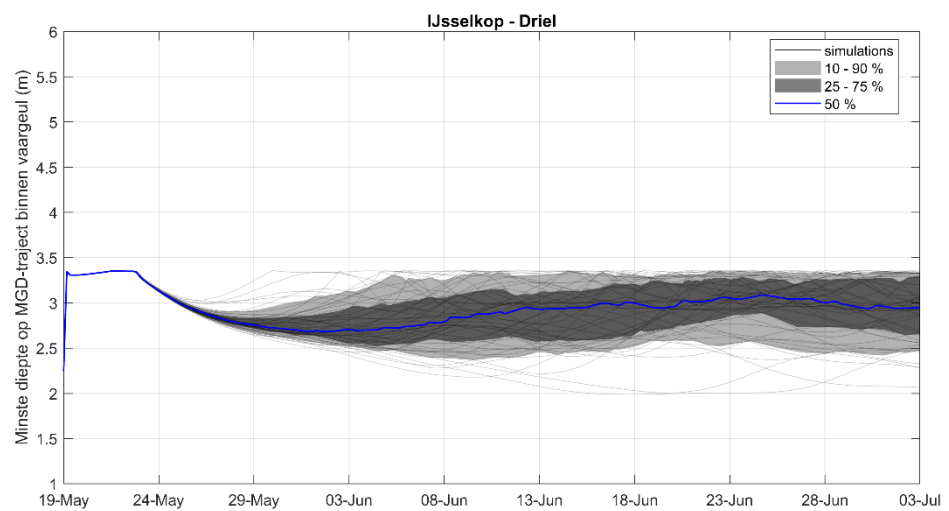
Figuur 3-10 Verwachting minste diepte Boven-Rijn/Waal op MGD-traject (zie titel) binnen de vaargeul.



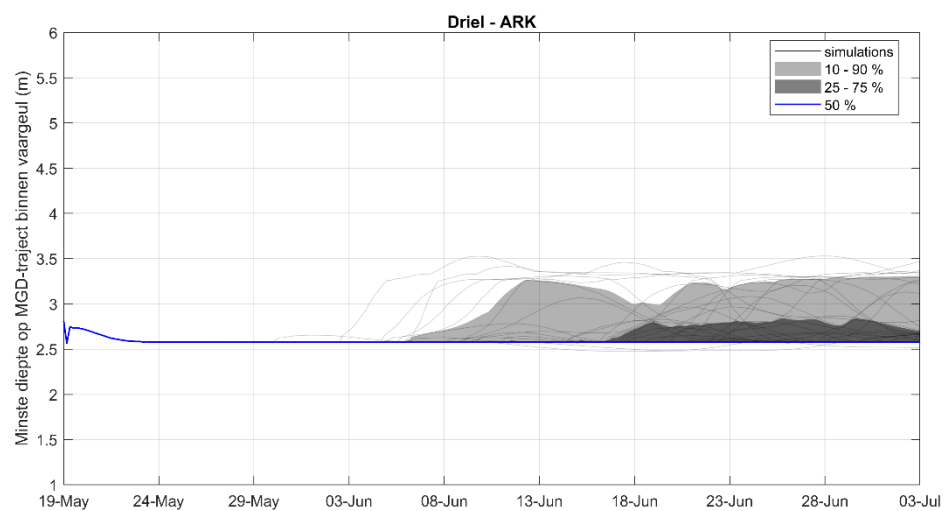
Figuur 3-11 Verwachting minste diepte Boven-Rijn/Waal op MGD-traject (zie titel) binnen de vaargeul.



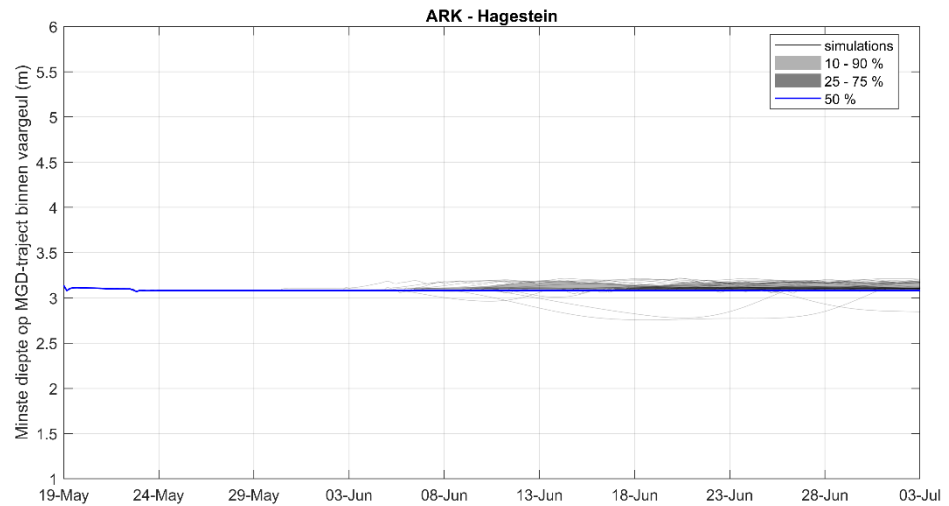
Figuur 3-12 Verwachting minste diepte Pannerdensch Kanaal op MGD-traject (zie titel) binnen de vaargeul.



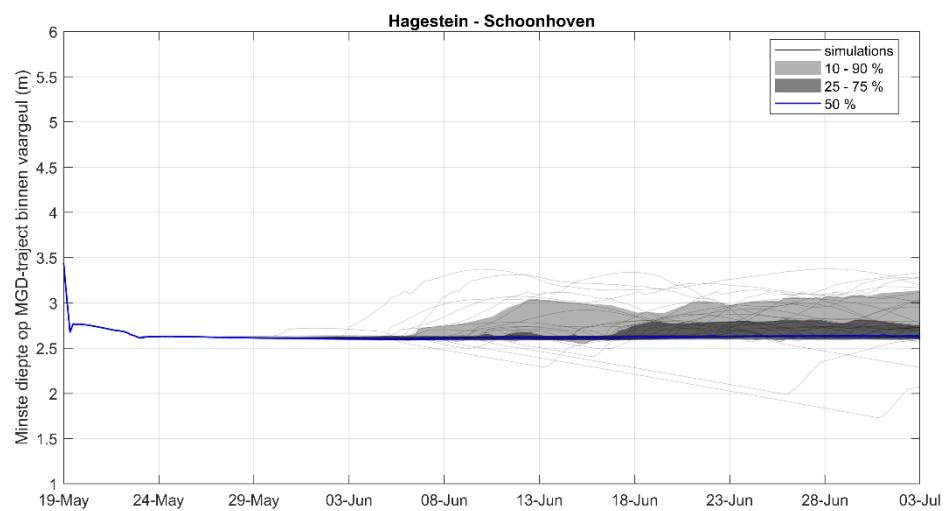
Figuur 3-13 Verwachting minste diepte Neder-Rijn/Lek op MGD-traject (zie titel) binnen de vaargeul.



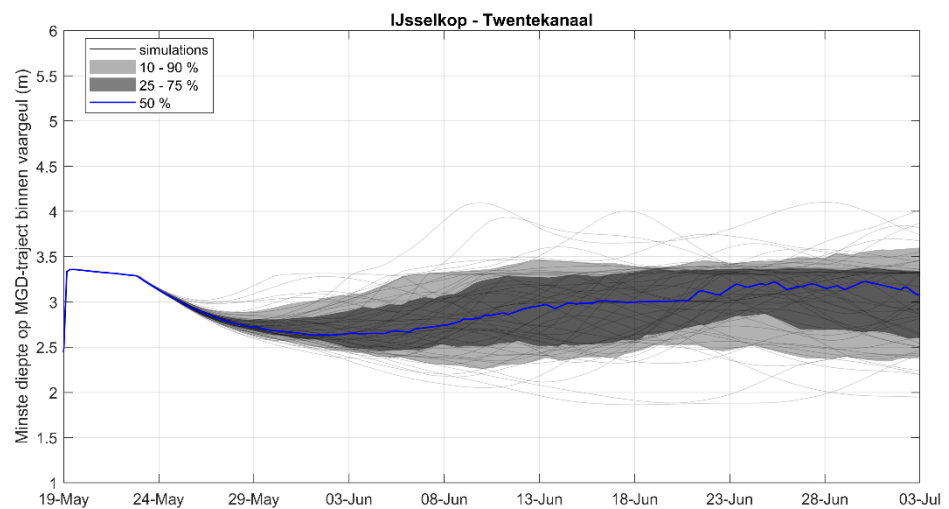
Figuur 3-14 Verwachting minste diepte Neder-Rijn/Lek op MGD-traject (zie titel) binnen de vaargeul.



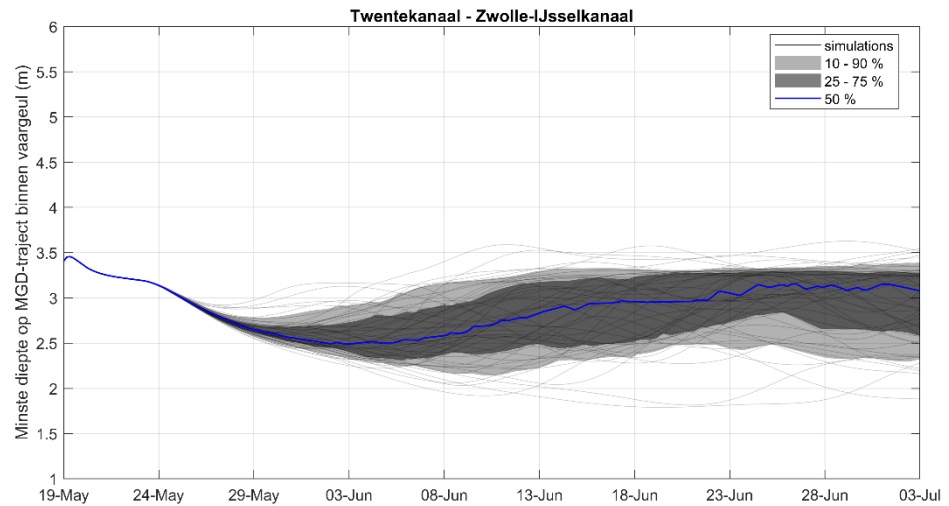
Figuur 3-15 Verwachting minste diepte Neder-Rijn/Lek op MGD-traject (zie titel) binnen de vaargeul.



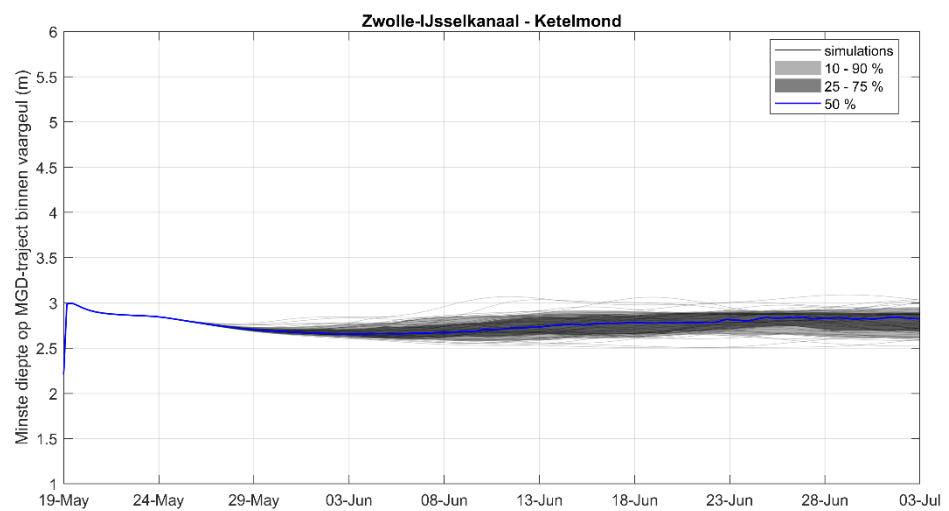
Figuur 3-16 Verwachting minste diepte Neder-Rijn/Lek op MGD-traject (zie titel) binnen de vaargeul.



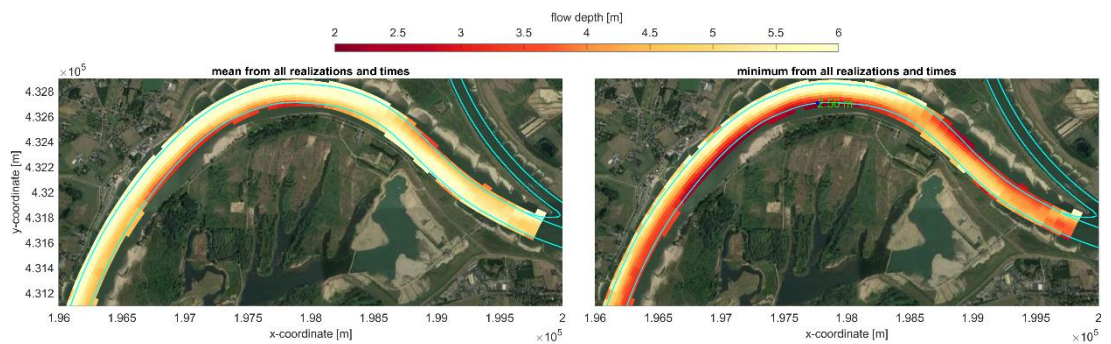
Figuur 3-17 Verwachting minste diepte IJssel op MGD-traject (zie titel) binnen de vaargeul.



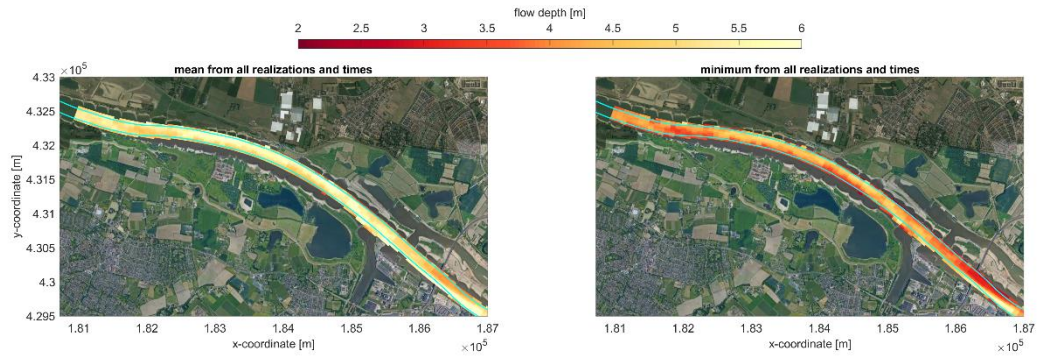
Figuur 3-18 Verwachting minste diepte IJssel op MGD-traject (zie titel) binnen de vaargeul.



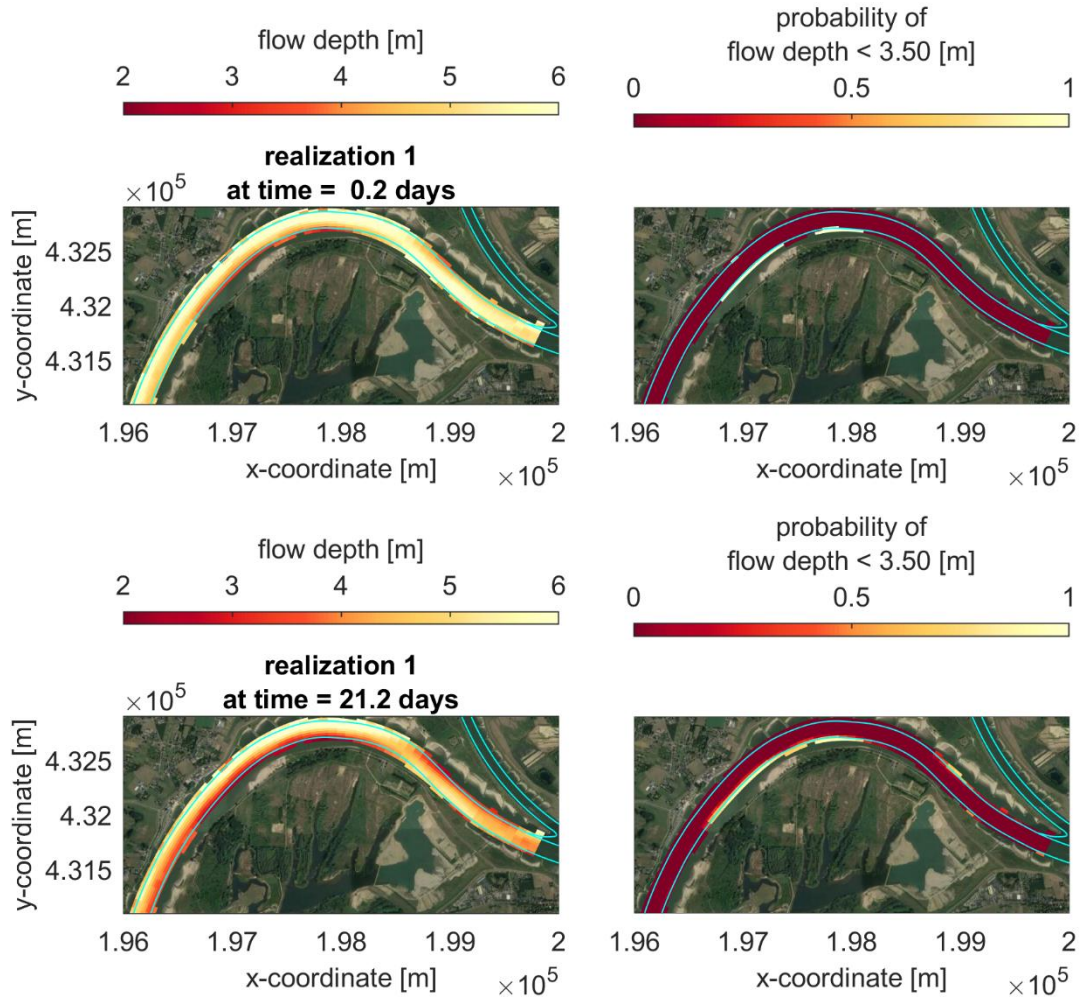
Figuur 3-19 Verwachting minste diepte IJssel op MGD-traject (zie titel) binnen de vaargeul.

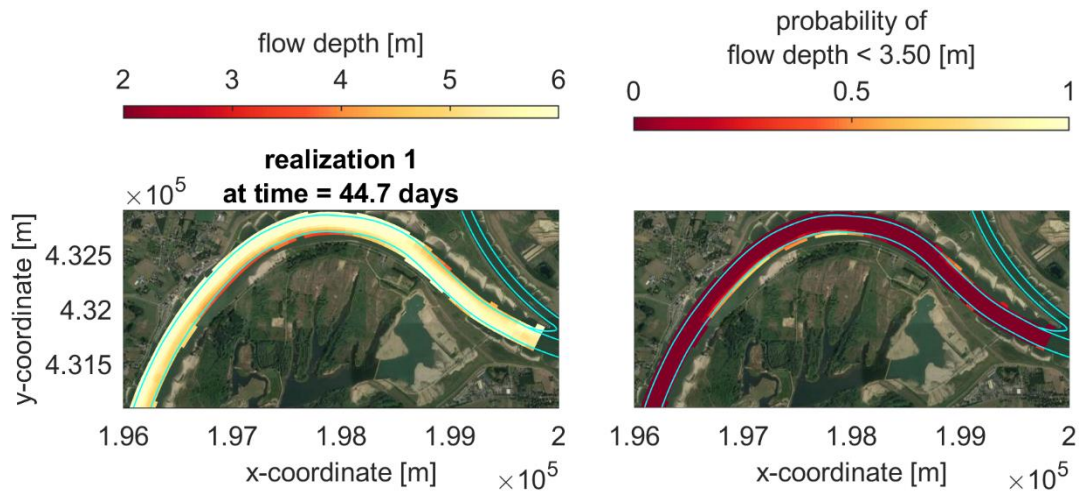


Figuur 3-20 Berekende waterdiepte over de periode van 6 weken; (links) gemiddeld over alle realisaties en alle tijdstappen, en (rechts) minimum waarde per roostercel van alle afvoerrealisaties (Boven-Waal bij Hulhuizen). Minimum waarde voor dit traject bedraagt 2.56 m in de binnenbocht (rechter figuur).



Figuur 3-21 Berekende waterdiepte over de periode van 6 weken; (links) gemiddeld over alle realisaties en alle tijdstappen, en (rechts) minimum waarde per roostercel van alle afvoerrealisaties (Midden-Waal bij Ewijk).



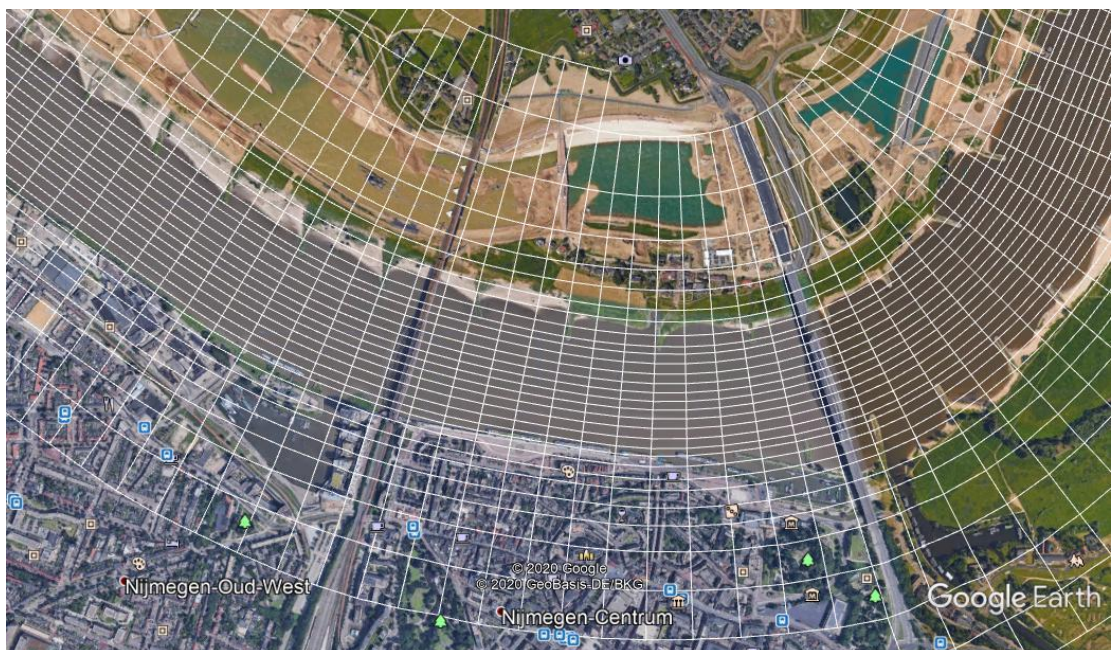


Figuur 3-22 Voorbeeld van weergave van verandering in waterdiepte en waarschijnlijkheid van optreden van waterdiepte kleiner dan 3,50 m als functie van tijd.

3.3 Dynamische waterdiepte

3.3.1 Projectie tot bodenvorm-gemiddelde bodemkaart

Bij de verwerking van de multibeam-data (stap F2) wordt gebruik gemaakt van een kromlijning rekenrooster (idealiter hetzelfde rooster als voor de statische waterdiepte, §3.2, zodat combinatie met de waterstandsvelden uit stap E mogelijk is). Voor de toepassing hier bedraagt de roosterafstand in langsrichting gemiddeld 80 m (tussen 75 m in binnenbochten en 85 m in buitenbochten). De roosterafstand in dwarsrichting bedraagt 20 à 25 m, waarbij het zomerbed door meer dan 10 cellen wordt afgedekt. Voorbeelden van het rooster zijn getoond in Figuur 3-23 en Figuur 3-24. Roosters kunnen vrij eenvoudig aangepast worden (knippen, verfijnen of vergroven) indien daar aanleiding voor is. Er gelden geen strikte eisen ten aanzien van bijvoorbeeld orthogonaliteit.



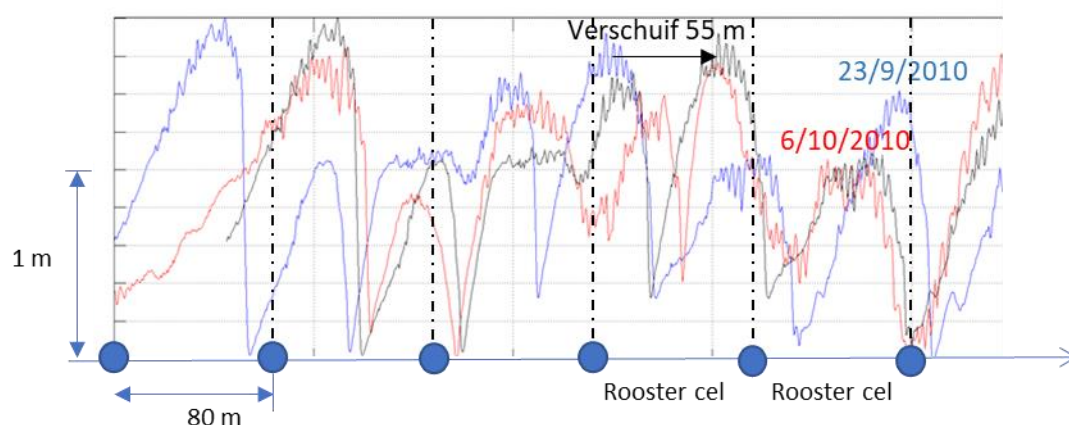
Figuur 3-23 Rekenrooster ter plaatse van Nijmegen (Boven-Waal).



Figuur 3-24 Rekenrooster ter plaatse van Druuten (Midden Waal).

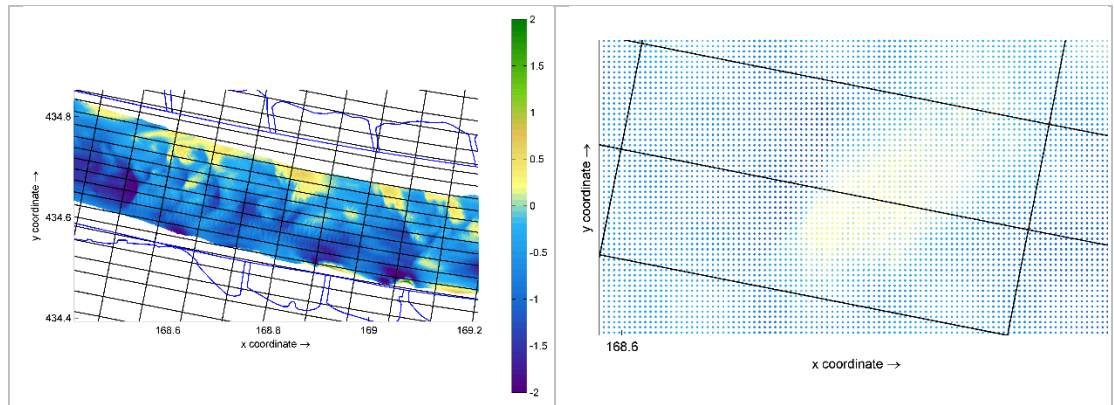
De keuze voor de celgrootte in het rooster is zodanig dat minimaal zowel één trog en één duintop binnen iedere cel vallen. De lengteschalen voor deze vormen zijn in de orde van 1 roostercel, orde 20 tot 80 m (Sieben, 2008). De minimale en maximale bodemligging (samen met de gemiddelde hoogte) karakteriseren de duinhoogte in die cel. Onderstaande Figuur 3-25 geeft een langsgedien van een gemeten duinenveld in de Waal (uit Buschman et al, 2017). In dit voorbeeld is aangegeven hoe deze duinen op het rooster passen:

- De keuze van de celgrootte van orde 80 m zorgt dat minimaal één trog en één duintop binnen iedere cel vallen. De minimale en maximale bodemligging (samen met de gemiddelde hoogte) karakteriseren de duinhoogte in die cel.
- In dit voorbeeld voor de Waal zijn duinen meer dan 1 m hoog, en verplaatsen zich over een afstand van orde 55 m over een periode van 17 dagen bij een gemiddelde afvoer van 1450 m³/s (Buschman et al., 2017). Oftewel, 135 m over een periode van 6 weken.



Figuur 3-25 Langsgedien van grote duinen gemeten in de Midden-Waal (Buschman et al, 2017) met indicatie van roostercellen. De zwarte lijn is gelijk aan de blauwe lijn, maar dan verschoven over een afstand van 55 m, om te tonen dat het patroon over deze afstand is verschoven in de gepresenteerde periode (overlap met rode lijn).

Een voorbeeld van de verwerking op het rooster (stap F2) is gepresenteerd in Figuur 3-26. Gebruik is gemaakt van de multibeam-gegevens van 1x1 m. Iedere roostercel omvat dan circa 1600 bodempunten.

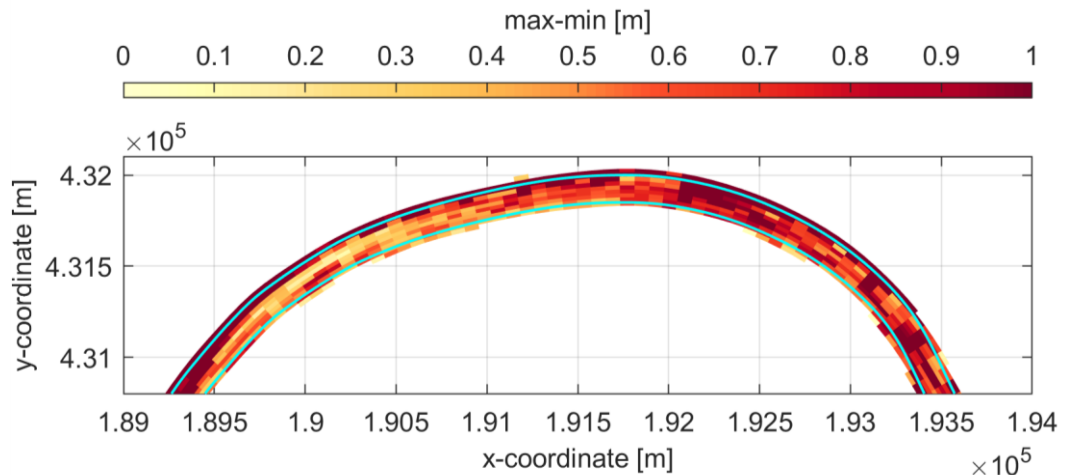


Figuur 3-26 Projectie van multibeam-gegevens (1x1 m grid) op het rekenrooster voor de Midden-Waal (bij Druten): figuur links toont bodemhoogte in meter+NAP; figuur rechts toont een detail voor twee gridcellen in dit domein met bodemligging gegevens als punten weergegeven.

3.3.2 Verwachting bodemligging (stap G)

Zoals aangegeven in §2.4.2, is hier een eenvoudige relaxatieformule toegepast, maar dit is waarschijnlijk een te simpele aanpak. Nader onderzoek is nodig als het wenselijk wordt geacht verder te gaan met het “dynamische bodem spoor”.

Eerst is de initiële duinhoogte per roostercel bepaald als het verschil tussen de maximum en minimum waarde in de cel (Figuur 3-27).

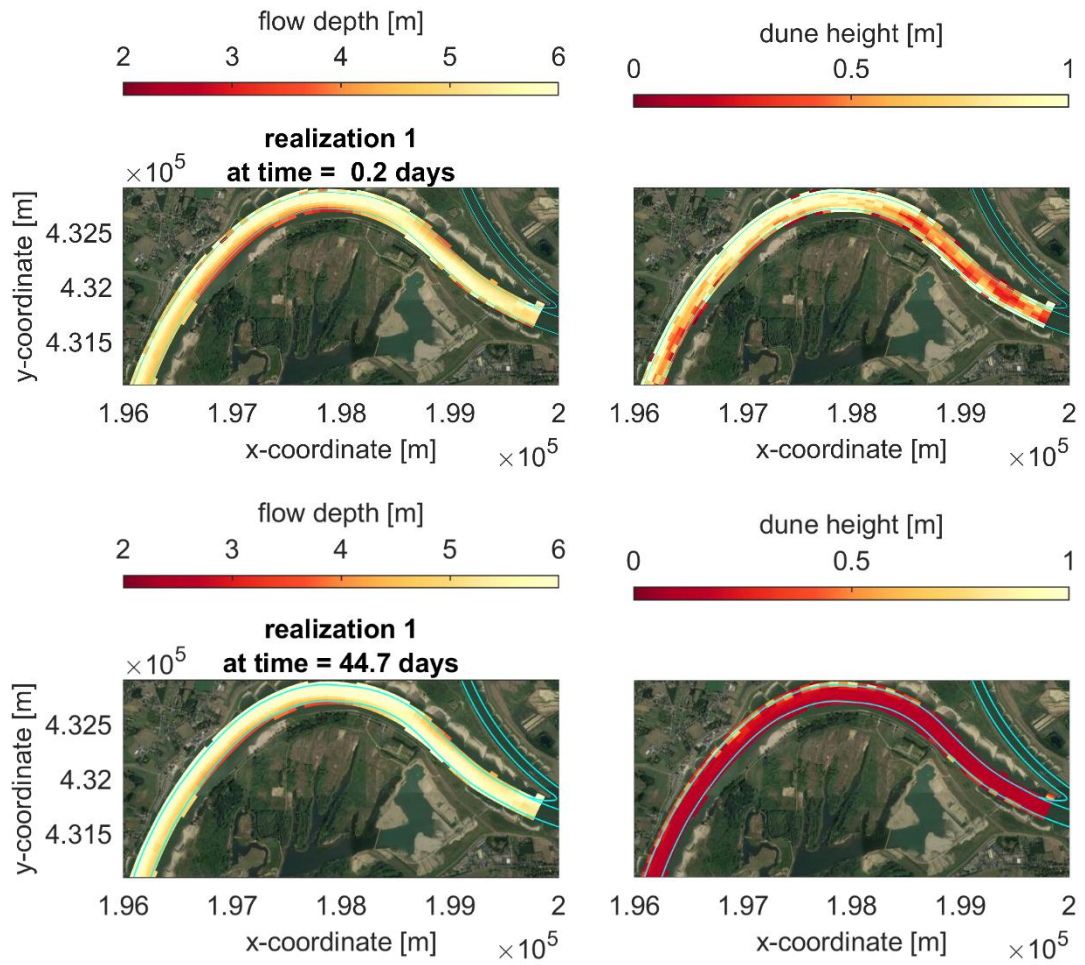


Figuur 3-27 Duinhoogte geprojecteerd op rekenrooster, bepaald uit multibeam-beheerpeiling.

Een voorbeeld van de toepassing van vergelijking (1) in §2.4.2 is getoond in Figuur 3-28. De resultaten tonen hoe de duinen zich in een periode van 6 weken van bijna 1 m hoogte naar circa 0,1 m (vrijwel gelijk aan de evenwichtsdiepte) ontwikkelen.

Door de ontwikkeling in halve duinhoogte vanaf T0 tot aan 6 weken vooruit op te tellen bij de bodenvorm-gemiddelde bodemligging, is de verwachting in bodemligging bekend per roostercel over de periode van 6 weken.

Dit is voor nu niet verder uitgewerkt, omdat we inschatten dat dit waarschijnlijk niet tot het beste resultaat leidt (zie de eerdere overwegingen in §2.4.2, waarin is toegelicht dat het relaxatiemodel te eenvoudig is en wellicht beter met de duinmodule van Delft3D kan worden gerekend).



Figuur 3-28 Berekende ontwikkeling van de duinhoogte voor de Boven-Waal, initiële conditie (boven) en resulterende waarde na 6 weken (onder). Voor dit voorbeeld is aangenomen dat de duinen zich ontwikkelen naar een evenwichtswaarde van orde 0,1 m met een tijdschaal $T=20$ dagen.

4 Betrouwbaarheid en nauwkeurigheid

4.1 Inleiding

Verwachtingen hebben waarde als ze leiden tot betere beslissingen. Voorbeelden van beslissingen kunnen zijn het aanleggen van grotere voorraden of de keuze voor een andere transportmodaliteit. Wil een verwachting waarde hebben, zal deze relevant moeten zijn, dat wil zeggen: de juiste informatie leveren om de beslissing te kunnen nemen. Een beslissing, of die nu leidt tot actie of niet, heeft consequenties. Vaak zijn die financieel van aard. Voor de waarde van een verwachting is het daarom ook van belang dat deze vertrouwd kan worden. Dat is het onderwerp van dit hoofdstuk.

Om een verwachting te vertrouwen is het nodig dat deze valide en betrouwbaar is. Bij validiteit of juistheid gaat het om de vraag of van de gebruikte methodes verwacht mag worden dat ze tot een goede verwachting leiden van het fenomeen waarin men geïnteresseerd is. Betrouwbaarheid heeft betrekking op consistentie. Het gaat dan onder andere om reproduceerbaarheid (kan iemand anders de verwachting herhalen en komt er dan hetzelfde uit?), gevoeligheid en stabiliteit (verandert de verwachting wezenlijk bij kleine aanpassingen aan de invoer of in modelkeuze?).

Deze aspecten kunnen in kwalitatieve zin beschouwd worden. Als wordt uitgegaan van breed gedragen aannames bij de modellering, dan draagt dat bij aan de validiteit. Voor het aspect betrouwbaarheid kan bijvoorbeeld getoetst worden of methodes gedocumenteerd zijn, broncode beschikbaar wordt gesteld, of kennis voldoende breed belegd is, enzovoort. Op basis van dit soort kwalitatieve argumenten is gekozen om bij de uitwerking van de casus gebruik te maken van de afvoerverwachtingen van de BfG.

Bij het kweken en onderhouden van vertrouwen is daarnaast een kwantitatieve insteek van belang. Oftewel, kunnen validiteit en betrouwbaarheid ook getalsmatig onderbouwd worden? Hierbij spelen de statistische begrippen systematische fout en precisie (mate van spreiding) een rol. Deze bepalen tezamen de nauwkeurigheid van een verwachting.

Voor deterministische verwachtingen (die elk bestaan uit een enkele realisatie) is de statistiek relatief eenvoudig. Door een groot aantal verwachtingen achteraf te vergelijken met metingen kan per zichttijd bepaald worden hoe groot de systematische fout is door het gemiddelde te nemen van alle afwijkingen. Als maat van de spreiding kan bijvoorbeeld de standaarddeviatie van alle afwijkingen worden berekend. Om deze getallen vervolgens op waarde te schatten is het nuttig om ze te vergelijken met die voor een referentieverwachting. De eenvoudigste keuze, tevens de minst ambitieuze, is om het klimatologisch gemiddelde als referentie te hanteren.

De verificatie wordt lastiger als de verwachting bestaat uit meerdere realisaties, zoals in dit onderzoek het geval is. De informatie over de toekomstige toestand van een fenomeen is dan niet beperkt tot tijd en ruimte, maar heeft ook de dimensie "kans". Anders dan bij deterministische verwachtingen kan daarom van een enkele verwachting niet achteraf gezegd worden hoe goed deze was. Alleen op basis van een groot aantal verwachtingen kan ingeschat worden of de kansen kloppen. Daarnaast is het van belang dat een ensembleverwachting voldoende scherp is, dat wil zeggen: vaak kansen oplevert nabij 0% of nabij 100%. Een pluim die net zo breed is als de klimatologie geeft immers gemiddeld genomen wel nauwkeurige kansen, maar is toch niet heel bruikbaar. Bij de verificatie van een ensembleverwachting zijn dus meerdere, complementaire gezichtspunten mogelijk.

4.2 Afvoerverwachting

Van de afvoerverwachtingen van de BfG zijn nog geen verificatieresultaten beschikbaar. Op het moment van schrijven werkt de BfG aan de afronding van een rapport daarover. De verwachting is dat dit eind 2020 gereed komt en ter beschikking kan worden gesteld. Om toch een idee te geven van het soort resultaten dat bij een verificatiestudie wordt behaald, wordt hier het resultaat van een eerste, beperkte analyse van de RWsOS-verwachting (Gijsbers, 2019) beschreven. Op basis van kwalitatieve argumenten mag verwacht worden dat de BfG-verwachting in het algemeen beter zal scoren, maar dit is niet verder te kwantificeren.

Door Gijsbers (2019) is als onderdeel van het KPP-project RWsOS 2019 een korte verificatiestudie uitgevoerd naar de 46-daagse ensembleverwachting in RWsOS. Deze verwachting wordt vanaf 31 mei pre-operationeel gedraaid. Alle verwachtingen vanaf dat moment tot en met 28 oktober 2019 zijn meegenomen in de analyse. Dat komt neer op een totaal aantal van 150 verwachtingen (twee per week). Aangezien het ensemble uit 51 leden bestaat, is dit een relatief gering aantal en moeten de resultaten van de verificatie met voorzichtigheid worden geïnterpreteerd.

Als eerste stap zijn de verwachtingen met het oog vergeleken met de metingen. Ter illustratie worden hier twee verwachtingen getoond (Figuur 4-1, Figuur 4-2). Bij het vergelijk vielen twee zaken op:

- De verwachting begint vaak met een substantieel te lage afvoer. In het hier getoonde voorbeeld van 2 juli 2018 (Figuur 4-1) bedraagt de onderschatting zo'n 100 m³/s, wat dichtbij het gemiddelde van 85 m³/s is. Gijsbers (2019) vermeldt uitschieters tot meer dan 500 m³/s onderschatting, maar incidenteel ook overschattingen tot circa 250 m³/s.
- De verwachtingen laten op de lange termijn regelmatig een concentratie van leden zien die duiden op droog weer. In sommige gevallen klopt dat met de waarneming (Figuur 4-1), in andere gevallen verliep de werkelijkheid natter (Figuur 4-2).

Vervolgens is de systematische fout gekwantificeerd door voor elke zichttijd het gemiddelde van de fout te nemen over alle leden en over alle verwachtingen (Figuur 4-3). Hieruit wordt duidelijk dat de onderschatting op de analysetijd 85 m³/s bedraagt, dat deze vandaar tot 20 dagen zichttijd toeneemt tot ongeveer 230 m³/s en dat voor de rest van de tijdhorizon de fout ruwweg constant blijft. Ter referentie: de gemiddelde afvoer bij Lobith bedraagt circa 2200 m³/s.

In het RWsOS-systeem worden de verwachtingen gecorrigeerd door er een voor alle zichttijden gelijke waarde bij op te tellen, zodat de fout op de analysetijd wordt weggenomen. De hele pluim wordt dan als het ware omhoog (of omlaag) verschoven. De gecorrigeerde verwachtingen hebben dan een systematische fout die tot 20 dagen zichttijd oploopt van 0 naar 145 m³/s en voor langere zichttijden ongeveer constant op dat niveau blijft.

Om de nauwkeurigheid nader te duiden zijn voor een aantal zichttijden Talagrand (of rank-) diagrammen geconstrueerd. Dit is een histogram bestaande uit 52 categorieën, namelijk het aantal ensembleleden vermeerderd met 1. Voor elke verwachting wordt gekeken naar de verzameling van alle leden en de corresponderende waarneming. Deze verzameling wordt op volgorde gezet van laag naar hoog. In het histogram wordt vervolgens bijgehouden in welke categorie (1-52) de waarneming valt. Elk lid in het ECMWF ENS extended ensemble heeft een even grote kans van voorkomen. Voor een nauwkeurige verwachting, zonder over- of onderschatting, zouden waarnemingen dus gemiddeld genomen even vaak in elke categorie moeten vallen. Het Talagrand diagram is in dat geval vlak.

In Figuur 4-4 (ongecorrigeerde verwachting, 10 dagen), Figuur 4-5 (ongecorrigeerde verwachting, 40 dagen) en Figuur 4-6 (gecorrigeerde verwachting, 40 dagen) wordt een kleine selectie getoond van de Talgrand diagrammen voor de ensembleverwachting voor Lobith. Hier wordt duidelijk dat het totaal aantal geanalyseerde verwachtingen eigenlijk te klein is. De diagrammen hebben een onregelmatig verloop en een groot aantal categorieën heeft geen voorkomens (frequentie 0). Toch valt op dat de diagrammen niet vlak zijn. Op 10 dagen zichttijd (Figuur 4-4) is sprake van onderschatting: de waarnemingen vallen veel vaker in de bovenste helft van de pluim dan in de onderste helft, en zelfs het vaakst buiten de pluim (categorie 52). Op 40 dagen (Figuur 4-5) is het diagram vlakker, maar ligt het zwaartepunt nog steeds op de bovenste helft van de verdeling.

Hierboven is beschreven dat het voor het verminderen van de gemiddelde systematische fout aantrekkelijk is om de verwachting op de aangegeven manier te corrigeren. Figuur 4-6 laat zien dat dit voor de verwachting met een zichttijd van 40 dagen leidt tot overschatting: de meeste waarnemingen komen lager uit dan het ensemblelid met de laagste verwachte afvoer (dus in categorie 1). In de figuren zijn de histogrammen opgesplitst naar verschillende afvoerniveaus. Het voert te ver om dit uit te werken, maar vermeldenswaardig is dat voor de gecorrigeerde verwachting op 40 dagen juist de laagste afvoerniveaus het meeste last hebben van de overschatting (Figuur 4-6). Van de waargenomen afvoeren lager dan $800 \text{ m}^3/\text{s}$ viel 70% gemiddeld genomen onder de pluim.

Een vlak Talgrand diagram is een randvoorwaarde voor een nauwkeurige verwachting, maar het garandeert geen voorspelkracht ("skill"). Zo kan bijvoorbeeld een nauwkeurig ensemble worden samengesteld door voor elke dag in het jaar de waarnemingen uit de afgelopen 50 jaar samen te nemen (aangenomen dat hierin geen trend aanwezig is). Een verwachting bestaande uit zo'n klimatologisch ensemble is echter triviaal: het voegt geen informatie toe.

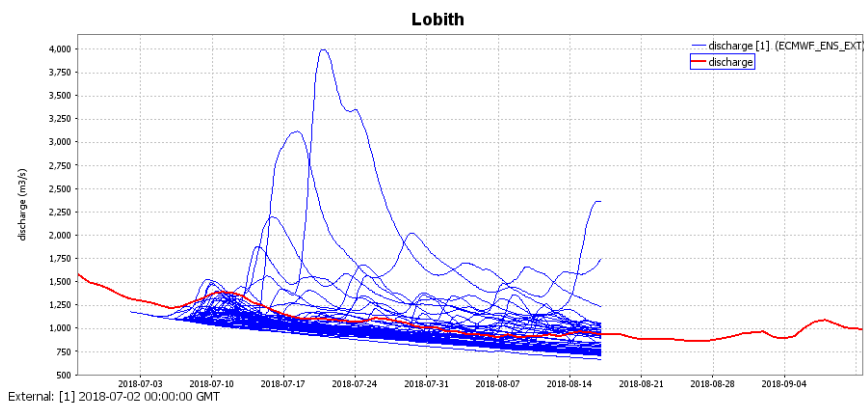
Een veelgebruikte score die zowel nauwkeurigheid als scherpte vangt is de Brier Skill Score (BSS). Een BSS is gerelateerd aan een bepaalde gebeurtenis, bijvoorbeeld 'er valt meer dan 10 mm regen op een dag' of 'de uurgemiddelde afvoer bij Lobith is lager dan $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ '. Uit een ensembleverwachting kan voor zo'n gebeurtenis een kans worden afgeleid. Voor het berekenen van de BSS wordt voor elke verwachting het verschil bepaald tussen de kans en de werkelijke uitkomst, weergegeven als 100% bij het optreden van de gebeurtenis en als 0% bij het uitblijven ervan. Voor een nauwkeurige en scherpe verwachting is dit verschil dus klein. Van de verschillen wordt vervolgens het gemiddelde bepaald van de som van de kwadraten. Dit is de Brier Score. Door deze tot slot te schalen met de Brier Score van een klimatologisch ensemble wordt de BSS verkregen. De score van perfecte verwachtingen is 1 en scores lager dan 0 betekenen dat er geen voorspelkracht is (vergeleken met de klimatologie).

In Figuur 4-7 en Figuur 4-8 worden de Brier Skill Scores getoond van respectievelijk de ongecorrigeerde en de gecorrigeerde ensembleverwachting Lobith, in beide gevallen voor de kans op overschrijding van vijf afvoerniveaus. De ongecorrigeerde verwachting heeft voorspelkracht tot een zichttijd van ongeveer 5 weken (840 uur), behalve voor het voorspellen van afvoeren lager dan $800 \text{ m}^3/\text{s}$ (circa 6,8 m + NAP). Daarvoor wordt de verwachting voor alle zichttijden verslagen door de klimatologie. Dit komt omdat de verwachting (door de systematische onderschatting) veel te hoge kansen toedicht aan het optreden van deze gebeurtenis. Het corrigeren van de verwachting (Figuur 4-8) zorgt voor een verbetering van de voorspelkracht voor zichttijden tot ongeveer 10 dagen. Bij langere zichttijden wordt de overschrijdingskans van $800 \text{ m}^3/\text{s}$ beter weergegeven door de klimatologie dan door de gecorrigeerde verwachting.

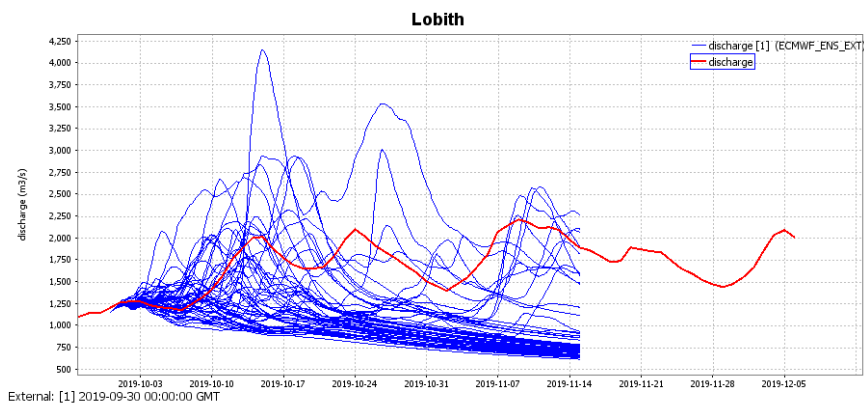
Concluderend kan op basis van het werk van Gijsbers (2019) voorzichtig gesteld worden dat de 46-daagse ensembleverwachting voor Lobith uit het RWsOS-systeem meer voorspelkracht heeft in vergelijking met de klimatologie. Tegelijk lijken wel verbeteringen mogelijk te zijn: gemiddeld genomen komt de ongecorrigeerde verwachting te laag uit, waardoor de kans op het optreden van zeer lage afvoeren te hoog wordt ingeschat. In RWsOS wordt met een eenvoudige verschuiving van de hele pluim de fout op de analysetijd weggewomen. Voor zichttijden tot 10 dagen biedt dit wel soelaas, maar voor langere zichttijden leidt dit gemiddeld genomen vaker tot overschattingen.

De gepresenteerde analyse laat verder het belang zien van een voldoende grote verzameling van verwachtingen voor het uitvoeren van verificatiestudies. De verzameling die Gijsbers (2019) ter beschikking had, is eigenlijk te klein om betrouwbare uitspraken te doen.

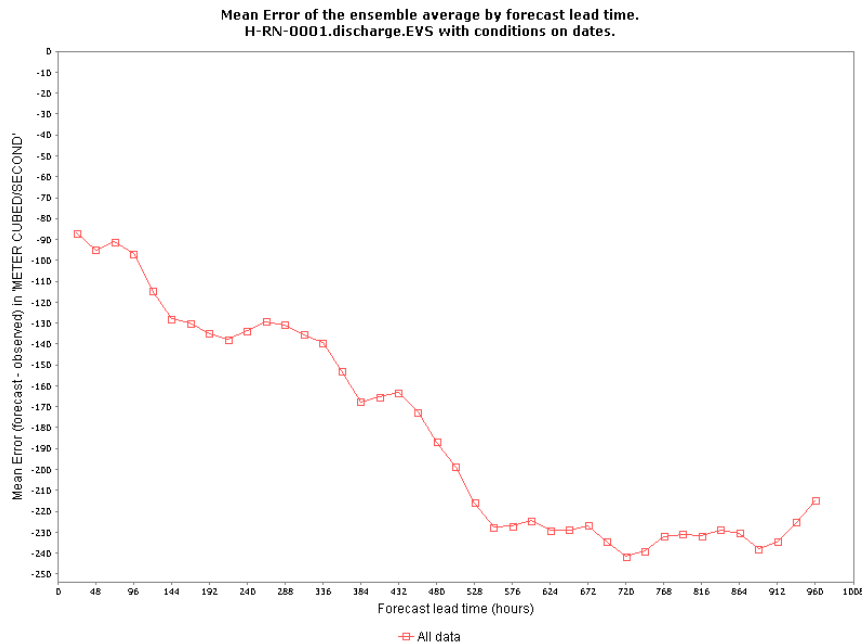
Tot slot wordt opgemerkt dat de hier gepresenteerde scores en verificatiemethodes geen uitputtend overzicht bieden van alle mogelijkheden. Afhankelijk van de achterliggende vraag kunnen andere methodes en scores beter inzicht geven in de kwaliteit van een verwachting.



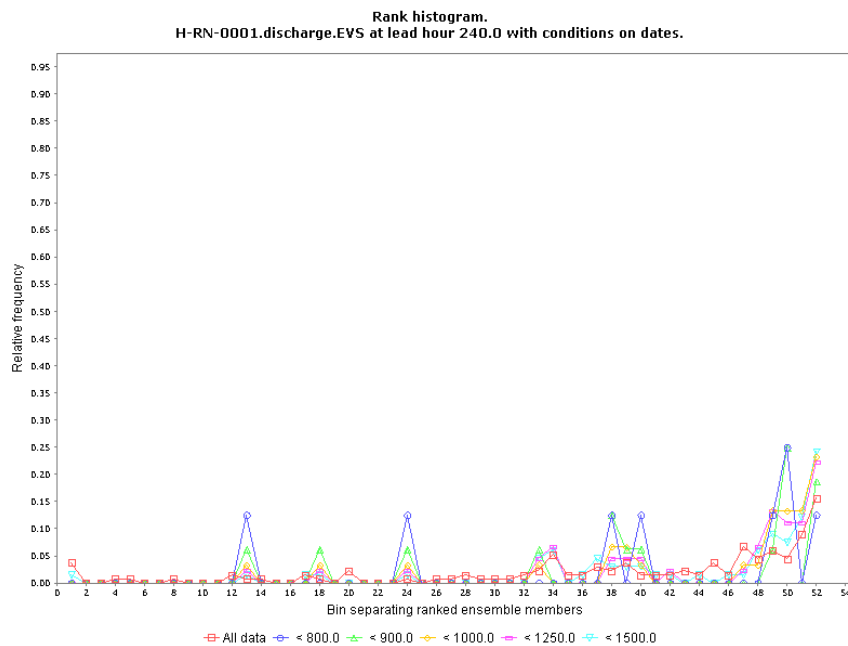
Figuur 4-1 Pluim van de 46-daagse RWsOS-verwachting voor Lobith van 2 juli 2018 (blauw); en waargenomen afvoer (rood).



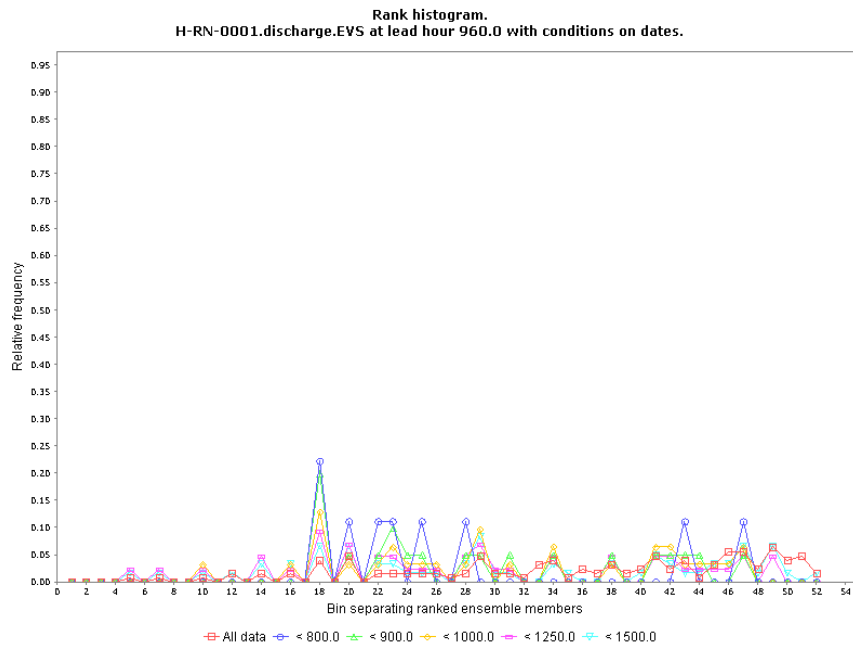
Figuur 4-2 Als Figuur 4-1, maar dan voor 30 september 2019.



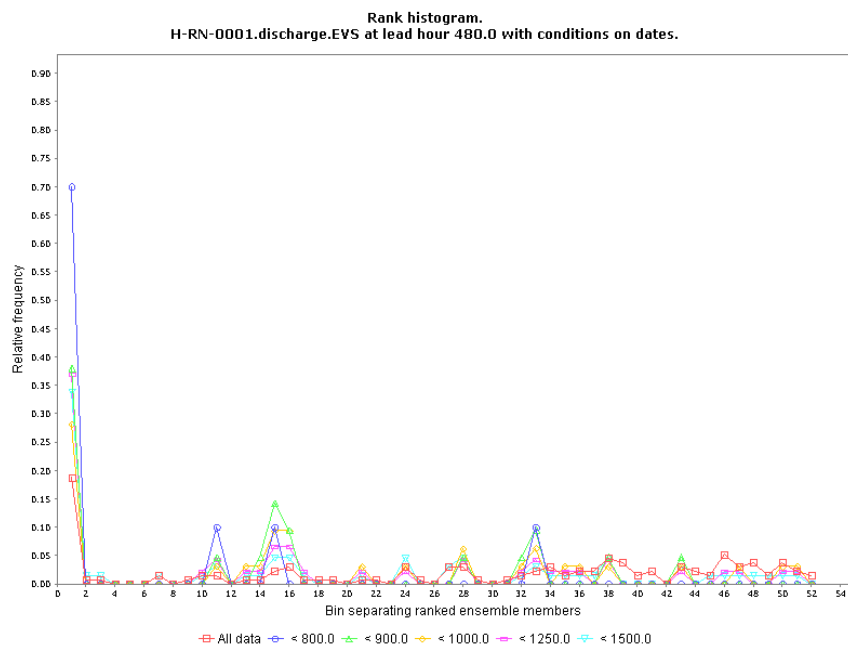
Figuur 4-3 Systematische fout van de 46-daagse RWsOS-verwachting voor Lobith als functie van de zichttijd in uren (960 uur = 40 dagen). Deze is bepaald als het gemiddelde van de fout (verschil tussen simulatie en meting) over alle leden en over alle verwachtingen.



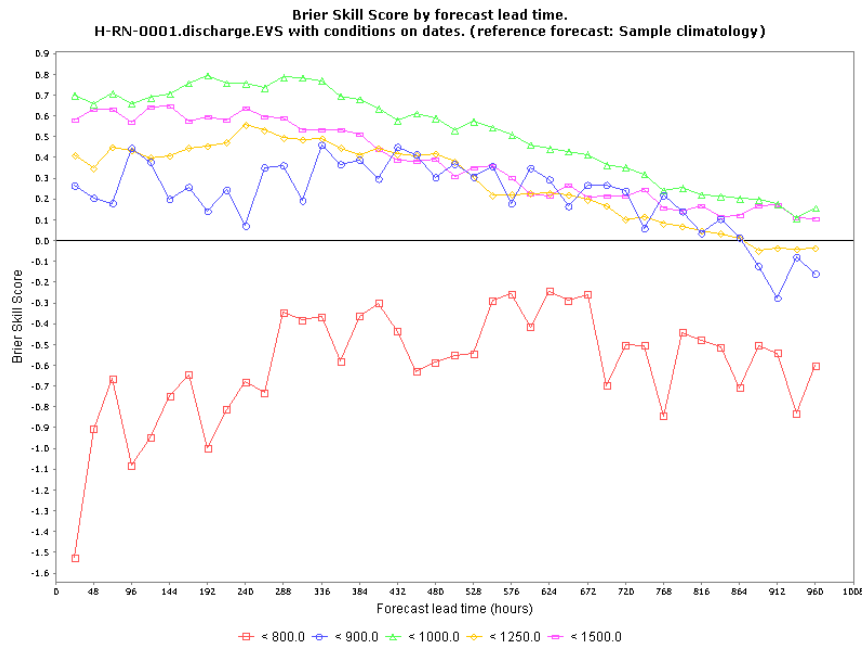
Figuur 4-4 Talagrand diagram voor de ongecorrigeerde ensembleverwachting Lobith met een zichttijd van 10 dagen. In het diagram is de totale dataset (rood) onderverdeeld in klassen op basis van waargenomen afvoer, zoals in de legenda aangegeven. De histogrammen zijn zodanig geschaald dat de relatieve frequenties optellen tot 1.



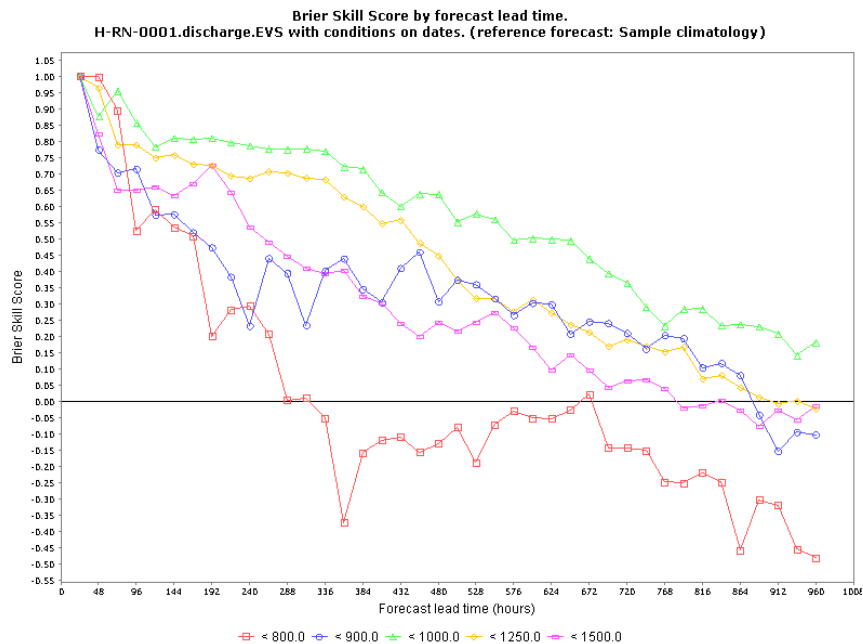
Figuur 4-5 Als Figuur 4-4, maar dan voor de ongecorrigeerde ensembleverwachting Lobith met een zichttijd van 40 dagen.



Figuur 4-6 Als Figuur 4-4, maar dan voor de gecorrigeerde ensembleverwachting Lobith met een zichttijd van 40 dagen.



Figuur 4-7 Brier Skill Scores voor de ongecorrigeerde ensembleverwachting Lobith als functie van de zichttijd. De lijnen betreffen de score voor de kans op de onderschrijding van de in de legenda aangegeven afvoer.



Figuur 4-8 Als Figuur 4-7, maar dan voor de gecorrigeerde ensembleverwachting Lobith.

4.3 Waterstandsverwachting

De betrouwbaarheid en nauwkeurigheid van de waterstandsverwachting is afhankelijk van een aantal parameters:

- Afvoerwachting;
- Lateralen (afhankelijk van de afvoer);
- QH-relatie;
- Modelonzekerheid.

4.3.1 Afvoer - tijdsverschuiving

Logischerwijs zal het waterstandsmodel geen nauwkeurige voorspellingen geven als de afvoer niet klopt. De betrouwbaarheid van de afvoerverwachting is besproken in §4.2. Een belangrijke component voor het model is de tijdsverschuiving tussen Ruhrort en Lobith in voorspelde afvoer. Als de tijdsverschuiving niet klopt zal het model uit de pas lopen waardoor de voorspelde beperkingen in waterdiepte niet op het juiste moment optreden. Er is nu niet een uitgebreide validatie uitgevoerd in dit project om de toegepaste tijdsverschuiving te toetsen. Het is onwaarschijnlijk dat met de gekozen tijdsverschuiving de minimale waterstand meer dan enkele uren zal afwijken tussen het model en de werkelijkheid.

4.3.2 Lateralen

De afvoer bij Lobith is de invoerparameter voor de waarden van de onttrekkingen en lozingen langs de Rijn zoals deze zijn bepaald met de randvoorwaarden-generator (RGWM). Hierdoor weegt de nauwkeurigheid van de afvoervoorspelling ook door in de nauwkeurigheid van de gebruikte lateralen. In dit project is er gebruik gemaakt van standaard relaties die al zijn opgenomen in de RGWM. De relaties voor laagwater 2009 zijn gecombineerd met versimpelde relaties voor synthetische sommen om op basis van de afvoer bij Lobith voor elk van de lateralen een tijdreeks af te leiden.

In werkelijkheid varieert het exacte debiet tijdens droge situaties van deze lateralen en is het gebruiken van een standaard relatie een ruwe aanname. Voor de meeste uitwisselpunten met de Rijntakken zal het verschil in debiet beperkt zijn tot enkele kubieke meters en daardoor een beperkte invloed hebben op de waterstand. De instelling van de grote regelwerken in het hoofdwatersysteem kan in droge situaties afwijken van de standaard relatie om bijvoorbeeld bepaalde regio's te voorzien van zoet water. Een voorbeeld hiervan is het sturen van extra water naar de Lek en Amsterdam-Rijnkanaal ten koste van de Waal. Dit kan lokaal leiden tot een waterstandsval van 5-10 centimeter. Het niet goed meenemen van de lateralen, los van de afhankelijkheid van de voorspelde afvoer, kan in extreme gevallen leiden tot een afwijking van 15 – 20 centimeter in de voorspelde waterstand.

In de ideale situatie zou het wenselijk zijn om de huidige situatie van de inname- en uitwisselpunten op te nemen in de voorspelling en/of de relaties van de RGWM. Daarnaast zijn de relaties uit te breiden met meer invoerparameters om de staat van het systeem zo volledig mogelijk mee te nemen in de voorspelling van de toekomst.

4.3.3 Benedenstroomse modelranden

Op het benedenstroomse deel van de Waal en Lek wordt de invloed van het getij steeds groter. Bij lage afvoeren is de invloed van het getij zichtbaar tot Zaltbommel en Hagestein. Het is mogelijk om de astronomische waterstand op zee ver vooruit te voorspellen, maar dit houdt geen rekening met de invloed van wind en afvoer. Of deze voorspelling is te gebruiken om een waterstand op te leggen op de benedenranden van het model is maar de vraag. Er is daarom gebruik gemaakt van een QH-relatie die het verband tussen de waterstand en de afvoer beschrijft. Bij lage afvoeren omschrijft de relatie een specifiek moment in het getij waar die afvoer representatief voor is. In dit geval gaat het om de gemiddelde waterstand. Het gevolg hiervan is dat de waterstanden in het benedenstroomse deel van de Waal enkele tientallen centimeter hoger en lager zullen zijn elke dag afhankelijk van het getijdemoment.

Op het IJsselmeer is er geen sprake van getij, maar kan het peil van het meer worden aangepast afhankelijk van de wensen in waterbeheer. In de winter zal het peil lager staan om genoeg ruimte te hebben in geval van hoogwater. Aan het begin van de zomer wordt veelal het peil verhoogd om een zoetwaterbuffer te creëren. Tijdens de zomer wordt de buffer langzaam gebruikt en zakt het peil dus uit.

Als gevolg hiervan kan de opgelegde rand bij het IJsselmeer 10 – 20 centimeter afwijken van de werkelijke situatie en zal in het benedenstroomse deel van de IJssel de waterstand 10 – 20 centimeter afwijken. Het kan aan te raden zijn om de QH-relatie te vervangen door een actueel meerpeil en te verwachten toekomstig meerpeil.

4.3.4 Modelonzekerheid

Het SOBEK3 model sobek-rijn-j19_5-v1 is in 2018 gekalibreerd voor extreem lage afvoeren (Visser, 2018). De afwijking (bias) in de waterstanden voor het extreem lage en lage afvoerbereik is enkele centimeters (0 – 4 centimeter). De afvoerverdeling tussen de verschillende riviertakken is nauwkeurig tot op enkele kuubs bij het lage en extreem lage afvoerbereik (-3 – 6,5 m³/s). Deze waarden zijn op basis van een hindcast waarbij zo veel mogelijk variabelen al bekend zijn, zoals de aansturing van de stuwen en onttrekkingen. Voor een forecast worden de stuwen aangestuurd met een versimpeling van de sturingsregels. In de praktijk kan hier, door bijvoorbeeld veranderende wensen of onderhoud, van worden afgeweken. Een voorbeeld hiervan is dat tijdens de zomer van 2018 stuw Driel werd onderhouden en de sturingsregels niet op zouden gaan. Als gevolg hiervan zullen de berekende waterstanden afwijken van de werkelijkheid omdat de bestaande situatie niet is opgenomen of niet is op te nemen in het model.

4.3.5 Samenvatting

Afzonderlijk van de onzekerheid in de afvoervoorspelling is het mogelijk om de waterstand tot 10 – 20 centimeter nauwkeurig te voorspellen. Lokaal kan dit verschil oplopen als onderdelen van het systeem niet goed zijn opgenomen in de randvoorwaarden. In het benedenstroomse deel van het model zal de voorspelling niet alle variabelen meenemen die van belang zijn, zoals het effect van het getij. Voor een meer nauwkeurige voorspelling is het wenselijk om zo veel mogelijk kennis van de staat van het systeem, zoals het debiet door de sluisen en stuwen, op te nemen in de voorspelling.

4.4 Bodemverwachting

Er zijn meerdere onzekerheidsbronnen te identificeren ten aanzien van de voorspelling van bodemligging. Belangrijkste onzekerheden komen voort uit de toegepaste gegevens (bodempeilingen) en de gebruikte voorspelmethode. In deze paragraaf wordt een aantal van deze onzekerheden kwalitatief beschreven, want een kwantitatieve waarde voor de onzekerheden kan op dit moment niet worden gegeven.

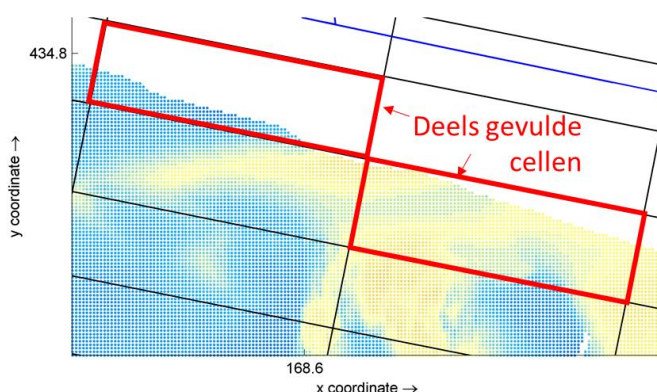
De onzekerheden in de gebruikte gegevens komt voort uit ontbrekende of schaarse gegevens, verouderde gegevens en modelonzekerheden.

Ontbrekende en schaarse gegevens

Er ontbreken soms gegevens in delen van roostercellen (of volledige cellen). Deze situatie treedt op als niet alle delen van de vaargeul zijn gepeild en voor de delen buiten de vaargeul wanneer de tweewekelijkse beheerpeilingen worden gebruikt (zie bijvoorbeeld Figuur 4-9). Ook wanneer CoVadem-data zouden worden gebruikt¹³, zijn cellen niet volledig gevuld. Dan zijn de gegevens slechts langs een beperkt aantal tracks beschikbaar.

¹³ In de procesbeschrijving (stap F in Figuur 2-1) is voorlopig geadviseerd om multibeam-data te gebruiken. In de toepassing (Hoofdstuk 3) is dit ook gebruikt. Echter, de frequentie in inwinning van multibeam-beheerpeilingen neemt vermoedelijk in de toekomst af en de kwaliteit en dekking van CoVadem-data nemen in de toekomst toe. Daarom is het waarschijnlijk beter om op termijn CoVadem-data te gebruiken in plaats van multibeam-data. Vandaar dat hier ook wat aandacht wordt geschonken aan deze databron. Wanneer het moment is bereikt over te stappen op CoVadem, is lastig te zeggen, daarvoor is (a) nadere analyse nodig naar de huidige en toekomstige kwaliteit en dekking van CoVadem-data, (b) moet het nieuwe onderhoudscontract bekend zijn, en (c) moet onderzocht worden wat het effect van ouderdom van de multibeam-peiling is op de vergrilde bodemkaart (stap F).

Dat aantal tracks is vooral beperkt als slechts data van enkele voorgaande dagen kan worden toegepast om te voorkomen dat duinen teveel zijn verschoven in de meetperiode: voor een periode van 1 week kan geschat worden dat duinen circa 25 m zijn verschoven, wat voor deze aanpak nog als acceptabel wordt beschouwd (ook Van der Mark en Lemans (2020) hanteren een week). Voor de bovengenoemde situaties zal door interpolatie of extrapolatie worden geprobeerd de informatie over het rooster te verdelen. In de eerstgenoemde gevallen kan ervoor worden gekozen om de deels gevulde cellen leeg te laten, of de informatie van bodemvormen te interpoleren of extrapoleren uit nabijgelegen cellen eventueel gecombineerd met oudere metingen voor gemiddelde bodemligging (vergelijkbaar met de zogenaamde P-map procedure toegepast door RWS-ON). Een eenvoudige zijwaartse extrapolatie van duinhoogte is niet mogelijk omdat beddingvormen over de breedte van de rivier niet gelijk zijn. Vaak zijn duinen verschillend in de linker en rechterhelft van de vaargeul en kan er invloed zijn van bochten en oevers (kribvlammen). De mogelijkheden voor extrapolatie zijn in deze studie niet verder uitgewerkt.



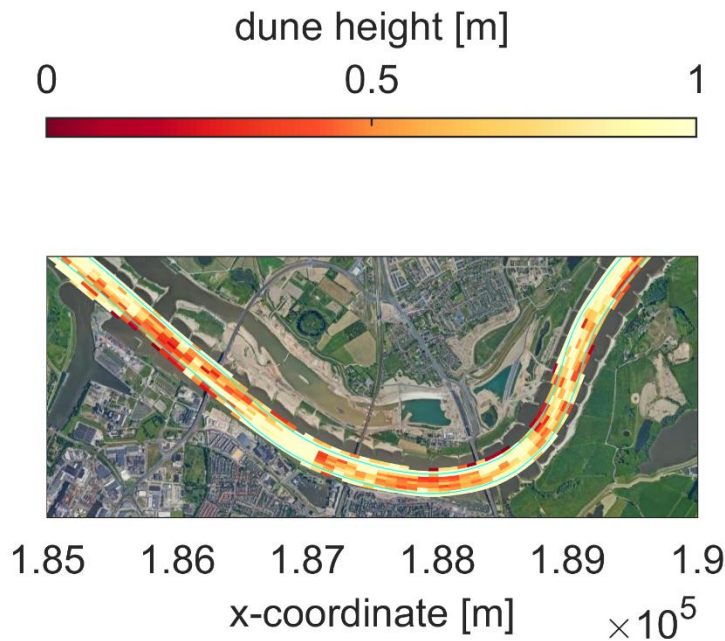
Figuur 4-9 Voorbeeld van deels gevulde cellen.

Verouderde gegevens

Bij toepassing van de jaarlijkse multibeam-peilingen kunnen de gegevens mogelijk maanden, tot zelfs een half jaar oud zijn. In dit geval is het niet mogelijk de resulterende bodemvormen direct te gebruiken als maat voor de actuele situatie. Voorgesteld is om de actuele bodemvormdimensies (bij benadering) af te leiden uit actuele CoVadem-gegevens, of via een duinhoogtevoorspeller te schatten. Deze kunnen dan worden geprojecteerd op een duingemiddelde bodem. In veel gevallen zijn de duingemiddelde waarden van de oude peilingen mogelijk nog wel representatief voor de actuele situatie, hoewel dit in deze pilot niet verder is bestudeerd. Voor een schatting van de actuele beddingvormen is het mogelijk de Delft3D-DVR modellen toe te passen met gebruik van de duinhoogtemodule. Maar ook andere methoden voor een schatting van duinhoogte (bijvoorbeeld expert judgement, regressierelaties, etc.) kunnen bruikbare resultaten opleveren.

Onzekerheden van de projectie op het rooster

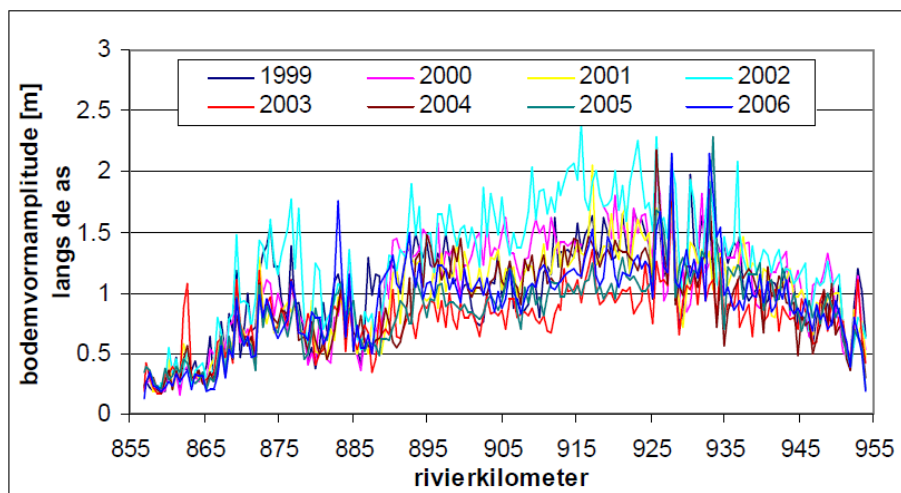
Bij de verwerking van bodemhoogte tot duinhoogte wordt nu uitgegaan van het verschil in maximum en minimum bodemligging binnen een rooster cel (van trog tot kruin). Dit is niet altijd een goede aanname, ook als de peiling niet verouderd is, blijkt uit de toepassing ervan. Zo zal bij diepe stabiele erosiekuilen als het ware een grote initiële duinhoogte worden gesignaleerd, welke daarna door het rekenmodel zal worden opgepakt. Een voorbeeld hiervan is getoond in Figuur 4-10, waarbij direct na de vaste laag bij Nijmegen een erosiekuil aanwezig is (coördinaat 1.87×10^5 m in de figuur), en waar duinen > 1 m zijn gedetecteerd, die er in werkelijkheid niet zijn. Alternatieve methoden zoals gepresenteerd in Bijlage B voor detectie van duinen kunnen worden overwogen om deze onzekerheden te voorkomen.



Figuur 4-10 Duinhoogte berekend per roostercel, vaste laag Nijmegen.

Modelonzekerheden

De nauwkeurigheid van voorspelde bodemligging is afhankelijk van het toegepaste modelconcept. De meer geavanceerde methode gepresenteerd in §2.4.2 (de Delft3D-optie) simuleert de processen beter dan de eenvoudige relaxatiemodellen, en levert daardoor meer betrouwbare resultaten op. Daar staat dan tegenover dat deze methode meer rekenintensief is. Wanneer gebruik wordt gemaakt van een empirische duinhoogtevoorspeller (voor evenwichtsduinhoogte) dan is het van belang dat deze is afgeregeld/gekalibreerd op de locatie, het tijdstip en de condities waar deze wordt toegepast. Figuur 4-11 toont bijvoorbeeld hoe sterk waargenomen duinhoogtes op de Waal rivieras variëren per locatie en per jaartal. De hoogste duinen worden waargenomen op de Midden-Waal. Ook andere effecten zorgen voor een forse bandbreedte, zoals hysteresis (verschil in duinhoogte bij stijgend of vallend hoogwater) en scheepvaart (verschil links en rechts). De beschikbare voorspellers houden hier over het algemeen geen of weinig rekening mee.



Figuur 4-11 Langsprofiel van de halve duinhoogte langs de rivieras van de Waal volgens Sieben (2008).

4.5 Diepteverwachting

De waterdiepte wordt verkregen door aftrekken van waterstand en bodemligging. Hier komt geen model of aanname aan te pas, dus de fout die in deze processtap wordt gemaakt zal nihil zijn. De onzekerheid van de waterdieptevelden wordt bepaald door die van de waterstand en bodemligging.

Een verschil in berekende minimale waterdiepte (waterstand minus bodemligging en dan minimum op traject binnen de vaargeul zoeken) en gemeten minimale waterdiepte (MGD) kan optreden, dit is dan zeer waarschijnlijk veroorzaakt doordat de vaargeul een rooster cel doorsnijdt die dan net wel wordt meegenomen. Deze problematiek wordt beschreven in De Jong (2020). De fout kan in de orde van decimeters liggen. Dit kan deels voorkomen worden door smalle rooster cellen te hanteren. De Jong (2020) stelt voor om op een andere manier de minimale waterdiepte op een traject te bepalen. Het wordt aanbevolen hier nog eens goed naar te kijken indien het stappenplan daadwerkelijk gebruikt zal worden.

5 Verkenning toepassingswaarde

5.1 Inleiding

Een verwachting heeft alleen waarde, als deze de juiste informatie levert om een beslissing te kunnen nemen. In dit hoofdstuk wordt de verkenning gepresenteerd naar de toepassingswaarde van de diepteverwachtingen. Eerst wordt een kort overzicht gegeven van enkele voorbeelden waaruit blijkt dat er behoefte is aan langere termijn waterstands- of diepteverwachtingen (§5.2). Vervolgens komen de bevindingen uit een klankbordbijeenkomst aan bod (§5.3), en tot slot wordt de enquête besproken, die is uitgezet bij de transportsector (§5.4). De klankbordbijeenkomst had als doel om te toetsen bij experts of de verwachting op de juiste wijze tot stand komt, de enquête als doel om bij potentiële eindgebruikers na te gaan welke informatie benodigd is om welke beslissingen te nemen.

5.2 Behoeftte aan langere termijn verwachtingen

Dat er een behoefte is aan langere termijn verwachtingen blijkt uit het aantal uitgevoerde onderzoeken en berichten over dit onderwerp. Hieronder geven we daarvan enkele voorbeelden.

In 2017 hebben we gesprekken gehad met een binnenvaartbevrachter over de mogelijkheden om korte en middellange termijn prognoses te maken van waterstanden op de Rijn. Er bestaat een nadrukkelijke wens om verder vooruit te kijken dan 4 dagen, zeg 14-20 dagen, om effectief en efficiënt te kunnen plannen. Daarnaast bestaat er behoefte aan inzicht in waterstandsvoorspellingen voor zeg een jaar vooruit, voor het aannemen van ladingen later in het jaar. Een statistische analyse op basis van historische data is toen ter sprake geweest als eerste stap. Aan de hand van historische data kunnen analyses worden uitgevoerd zoals bijvoorbeeld:

- Analyseren van waterstanden per dag van het jaar. Hiermee wordt ook inzichtelijk hoe gedurende een jaar het verloop is (seizoensinvloeden).
- Afleiden van conditionele kansen. Wat is de kans op een bepaalde waterstand gegeven de huidige waterstand?
- Het afleiden van kansen dat de waterstand onder bepaalde drempelwaarden dreigt te zakken, gegeven een bepaalde huidige waterstand (bv wat is de kans dat de waterstand over 10 dagen lager wordt dan 10 m + NAP, gegeven het feit dat de waterstand vandaag 12 m + NAP is?).

Dergelijke analyse kan puur op basis van jarenlange gemeten tijdreeksen (minimaal 20 jaar) worden gedaan. Seizoensinvloeden (in de winter zijn andere trends zichtbaar dan in de zomer) kunnen uit de data gehaald worden, en zullen waarschijnlijk meerwaarde bieden aan eindgebruikers. Ook tijdens de klankbordbijeenkomst (zie hierna) waarin de bevindingen uit deze studie werden besproken, werd dit benoemd ("seizoenvariatie van te voren aangeven in de vorm van een soort van klimaatatlas, vooral tbv voorraadbeheersing").

Een inmiddels bekend voorbeeld van een bedrijf dat actief bezig is met aanpassingen aan de bedrijfsprocessen in geval van droogte is BASF. Van BASF is bekend dat het 250 miljoen schade heeft geleden in 2018 door productievermindering (Streng en Van Saase, 2020). Het bedrijf werkt nu aan 'early-warning systems', huurt schepen in met minder diepgang, maakt laadhavens meer flexibel en is samen met partners bezig met de ontwikkeling van een laagwaterschip (BASF, 2019). Er is een soort beslisboom ontwikkeld wat te doen als verwacht wordt dat de waterstand bij Kaub onder bepaalde grenzen duikt.

Volgens Streng en Van Saase (2020) wordt in alle sectoren (bouw, landbouw, chemie, staal, containers), dus niet alleen BASF, gewerkt aan het beter gebruikmaken van waterstandsvoorspellingen. Dit concluderen zij op basis van eigen enquêtes en interviews.

De werkzaamheden van de BfG naar verbeterde verwachtingen van afvoer en waterstand, onder andere die met een zichttijd van 46 dagen is uitgevoerd binnen het Europese Horizon 2020 project IMPREX, en daarnaast binnen "Seamless Prediction" en "OptiVor", gefinancierd door het Bondsministerie voor Verkeer en digitale Infrastructuur. De omvangrijke studie van de BfG naar verbeterde voorspelling en risicomangement voor de watergedragen transportsector toont aan dat hier een grote behoefte aan is (in ieder geval in Duitsland). Voorspellingen met een langere zichttijd geven bedrijven een basis voor betere logistieke planning, waarmee het mogelijk is de laadcapaciteit maximaal te benutten (bron: IMPREX factsheet Transport). In deze factsheet wordt vermeld dat de mogelijke besparing in de range ligt van rond de 5 miljoen euro per jaar.

Ionita en Nagavciuc (2020) tonen dat early warnings voor opkomende laagwatersituaties gemaakt kunnen worden door gebruik te maken van grootschalige klimatologische en oceanische patronen in data van eerdere maanden of seizoenen¹⁴.

5.3 Klankbordbijeenkomst

De klankbordbijeenkomst had als doel om te toetsen of de verwachting op de juiste wijze tot stand komt, oftewel of men het eens is met de procesbeschrijving, en om te "klankborden" over visualisatie en de waarde van de verwachting. De genodigden waren inhoudelijk experts vanuit Rijkswaterstaat (WVL, VWM, ON) op het gebied van hydrologie, hydrodynamica en morfologie, droogte, scheepvaart en vanuit LCW. Het Deltares-projectteam was ook aanwezig, ook met expertise in de genoemde gebieden.

De belangrijkste punten uit het overleg zijn (het verslag is te vinden in Bijlage C):

- Onzekerheid in waterstanden is waarschijnlijk groter dan het verschil in morfologische ontwikkelingen. Dit betekent dat als eerste stap een verwachting met statische bodem al best heel waardevol kan zijn.
- Er is een tijd gesproken over de tweewekelijks ingewonnen beheerpeilingen die waarschijnlijk in het nieuw te formuleren onderhoudscontract niet meer met deze frequentie worden opgenomen. De minister hecht grote waarde aan de bevaarbaarheid van de rivieren en de vraag wordt opgeworpen of het wenselijk is dat deze peilingen verdwijnen. Momenteel worden deze peilingen overigens helemaal niet door de transportsector gebruikt, terwijl dit waarschijnlijk zeer waardevol kan zijn.
- In lijn met het vorige punt is gesproken over CoVadem-data. Deze data zouden op termijn de beste bodemgegevens kunnen geven, want ze zijn altijd actueel. De aanwezigen zijn het eens dat op dit moment nog beter oudere multibeam-data gebruikt kunnen worden.
- De CoVadem-data worden ingewonnen door de binnenvaartsector zelf, en door deze te gebruiken geven we de sector weer waardevolle informatie terug. Hiermee willen mogelijk ook meer schippers zich bij CoVadem aansluiten.
- De historische CoVadem database kan ook ingezet worden om een verwachting in bodemligging te construeren. Hiermee zou een pluim in bodemligging gemaakt kunnen worden, zoals we ook een pluim in waterstand maken.
- Er is voorgesteld seizoensvariatie mee te geven in de verwachting, een soort van klimaat- of seizoensatlas. Dit zou gemaakt moeten worden aan de hand van historische waterstandsgegevens.

¹⁴ De Scheepvaartkrant van 19 augustus 2020 besteedt hier aandacht aan op de voorpagina.

- Er is gesproken over de voorspelhorizon, en welke gebruiker welke voorspeltermijn nodig heeft. Het is bekend dat schippers behoefte hebben aan orde dagen, verladers en industrie op weken tot maanden.
- De gegevens van de BfG zijn nu opgenomen in het stappenplan in plaats van die van RWsOS. De BfG neemt een correctie mee in de meteorologische verwachtingen en zijn daarmee naar verwachting de beste. Vanzelfsprekend kan het stappenplan altijd eenvoudig doorlopen worden met de afvoerverwachtingen vanuit RWsOS (in plaats van of naast die van de BfG) zodra het in werkelijkheid toegepast wordt bij een droogte. Het RWsOS-systeem wordt ook continu doorontwikkeld en verbeterd, en zou op termijn de reeksen van BfG in het stappenplan wellicht kunnen vervangen.
- Vanuit de LCW is er interesse in de resultaten van de verkenning naar de behoefte vanuit de transportsector. Voor de LCW is het interessant om te weten voor hun eigen werkzaamheden hoe informatie over verwachtingen gewenst is.
- De suggestie is gedaan om data scientists te betrekken bij het maken van verwachtingen. Zij kijken op een heel andere manier naar data. Binnen de Digitale Rivier is gewerkt aan het voorspellen van de MGD tot 4 dagen vooruit.

5.4 Enquête transportsector

Om te verkennen welke behoeften eindgebruikers in de transportsector hebben ten aanzien van verwachtingen, hoe de informatie hen kan helpen en welke beroepsgroepen baat hebben bij middellange-termijn verwachtingen, is een beknopte enquête opgezet. De enquête had als doel om bij potentiële eindgebruikers na te gaan welke informatie benodigd is en hoe die informatie hen helpt bij het nemen van beslissingen. De enquête is verspreid onder de leden van Koninklijke BLN-Schuttevaer, CBRB en Evofenedex. De doelgroepen die hiermee we vooral beoogd hebben te benaderen, waren verladers, bevrachters, operators, rederijen en coöperaties.

Na een toelichting werden in de enquête 9 inhoudelijke vragen gesteld. Aan het einde was er de mogelijkheid om gegevens achter te laten (vraag 10). De vragen hadden betrekking op de voorspeltermijn, hoe de verwachtingen worden gebruikt, welke parameter en locatie/traject gewenst is, presentatie, de bandbreedte, en welke functie men vervult. De vragen en antwoorden van de respondenten zijn te vinden in Bijlage D, hieronder geven we de belangrijkste bevindingen.

De enquête is ingevuld door 23 respondenten.

De helft van de respondenten heeft behoefte aan een voorspeltermijn van 1 week of minder. Er wordt vermeld dat er onderscheid is tussen enerzijds de operationele planning, en dan is 1 week voldoende, en anderzijds de langere-termijn planning, en dan is er behoefte aan maanden, zodat geschoven kan worden met transporten.

Het merendeel van de respondenten heeft behoefte aan waterdiepte, dit bepaalt immers de diepgang van de schepen. Een kwart geeft aan waterstand als meest relevante parameter. Dit is de parameter die op dit moment op Elwis (BfG) en Vaarweginformatie (RWS) wordt gecommuniceerd, en naar verwachting hebben ondernemers op basis van ervaring of historische data vuistregels die aan de waterstand bij een pegel zijn gerelateerd.

De helft van de respondenten geeft aan dat een voorspeltermijn van 6-8 weken niet nuttig is (een week is genoeg), en er is wat scepsis over de nauwkeurigheid (een week vooruit is al lastig). De andere helft benoemt bij de vraag hoe de verwachtingen kunnen helpen in hun bedrijfsvoering: besparen op laagwatertoeslagen, lange termijn opdrachten, voorraadbeheer, betere planning van de vloot, betere verdeling van de vervoerscapaciteit, interne opslagcapaciteit, vrachtonderhandeling.

Verwachtingen zijn gewenst voor de volgende locaties en trajecten: specifieke pegels (zie ook Bijlage D), Maxau en Ruhrort zijn de meest genoemde. Verder is behoefte aan de MGD's op de Rijntakken. Uit de toelichtingen valt op te maken dat een deel van de respondenten vooral binnen Nederland vaart, en dus zijn de verwachtingen van waarde. Ook enkele respondenten die wel de grens over gaan geven aan dat elke vorm van informatie van belang kan zijn.

Met betrekking tot bruikbaarheid in relatie tot onzekerheden, dit hangt af van de breedte van de pluim, maar er wordt ook gezegd dat een pluim enige richting kan geven aan waar het naartoe gaat.

De meeste respondenten hebben een voorkeur voor een kansverdeling en de waterdiepte uitgezet als functie van de tijd. Deze wijze van presentatie is ook toegepast in Hoofdstuk 3.

Meer dan de helft van de respondenten is een varende ondernemer. Dit werd al duidelijk op basis van de eerdere antwoorden en reacties, namelijk dat voorspellingen voor een week vooruit voldoende zijn.

Conclusie:

Er kan geconstateerd worden dat we met de enquête wellicht de doelgroep die het meeste baat heeft bij langere-termijn voorspellingen (verladers, bevrachters) niet voldoende bereikt hebben. Het aantal respondenten is niet groot, zodat aan de resultaten geen al te grote conclusies verbonden kunnen worden. De respondenten die aangeven behoefte te hebben aan langere termijn, bevestigen het beeld dat de voorspellingen gebruikt kunnen worden voor strategische beslissingen in de sfeer van voorraadbeheer, opslagcapaciteit, en planning.

6 Jaarlijkse inspanningen

In dit hoofdstuk wordt op een rij gezet welke modellen en data vereist zijn om het voorgestelde stappenplan te kunnen doorlopen. Dit betekent dat deze modellen beheerd en onderhouden moeten worden/blijven en dat de data beschikbaar moeten blijven, om het stappenplan ten tijde van een toekomstige droogte te doorlopen. Als het beheer en onderhoud en inwinning van data niet al ergens belegd zijn, vraagt dit om een jaarlijkse inspanning en investering. Het financiële aspect is hier niet uitgewerkt, maar dit zal voor de verwachting met statische bodem beperkt zijn, omdat gebruik wordt gemaakt van bestaande modellen en data.

Mocht in de toekomst een databron of model wegvallen, dan moet een alternatieve aanpak gekozen worden.

Minimaal benodigd om het proces te doorlopen:

Statische bodem:

- Afvoerrealisaties van BfG (of bij geen beschikbaarheid, die uit RWsOS).
 - Dit is nog nergens belegd. Benodigd: overeenkomst met de BfG dat zij de meest recente afvoerreeksen leveren (binnen een dag?) zodra het wenselijk is het stappenplan te doorlopen.
- Randvoorwaardengenerator. Deze draait mee in RWsOS, dus beheer/onderhoud is belegd.
- Geactualiseerd SOBEK3 model van de Rijntakken. Dit model wordt jaarlijks geactualiseerd of verbeterd binnen KPP.
- Recente multibeam-bodemligging voor het maken van maatgevende/gemiddelde bodem.
 - Het is lastig om exact aan te geven wat hier “recent genoeg” is. Onze indruk is dat voor het statische bodem spoor het minder noodzakelijk is een actuele bodem te gebruiken. Weken oud is geen probleem, aangezien het bankenpatroon, binnenbochten en kribvlammen altijd wel aanwezig zijn.
 - De beheerpeilingen met frequentie van 2 weken zullen waarschijnlijk in het nieuwe onderhoudscontract verdwijnen. CoVadem data kan op termijn uitkomst bieden. Afspraken voor het gebruik dienen nog te worden vastgelegd.
- Verder is in de toepassing gebruik gemaakt van een gridgenerator, Python en Matlab voor het verwerken van de data en simulaties tot grafieken.
 - Op dit moment is het proces niet geautomatiseerd. Het is verstandig scripting op orde te brengen als RWS het stappenplan in de toekomst wil gaan toepassen.

Dynamische bodem:

- Duinhoogtes en verwachting duinhoogtes.
 - Voor het dynamische bodem spoor zijn actuele/initiële duinhoogtes benodigd. Als de meest recente multibeam-peiling minder dan zeg 2 weken oud is, kunnen deze gebruikt worden. Als alternatief zijn er een Delft3D-model met duinhoogtevoorspelmodule (wordt onderhouden) of CoVadem-metingen (afspraken benodigd).
 - Voor het dynamische bodem spoor zijn verwachte duinhoogtes benodigd. Hiervoor is ook Delft3D nodig. NB: Het voorstel voor de verwachting in bodemligging is nog niet gereed en niet compleet, zie §2.4.2. Deze paragraaf stelt dat de duinmodule in Delft3D mogelijk de beste verwachting in duinhoogte levert, maar dit is niet getoetst in deze studie.

7 Conclusies en aanbevelingen

7.1 Conclusies

De volgende conclusies kunnen worden getrokken:

- Er is een stappenplan opgesteld hoe te komen tot een diepteverwachting met een zichttijd van 6 weken. Voor de situatie met statische bodem is het plan concreet. Dit kan eenvoudig toegepast worden indien een droogte periode zich aandient. Voor de situatie met dynamische bodem is de beste aanpak nog niet uitgekristalliseerd, en dan specifiek hoe te komen tot een verwachting in duinhoogte.
- De toepassing laat zien dat daadwerkelijk gekomen wordt tot een diepteverwachting (met statische bodem), met andere woorden het stappenplan werkt.
- De bijdrage van de veranderende bodemligging telt waarschijnlijk minder zwaar mee in de voorspelling voor waterdiepte dan de bandbreedte van voorspelde waterstanden. Een verwachting in waterdiepte is daarom goed mogelijk door gebruik te maken van een statische bodemligging. De voorspelling in bodemligging is complex en heeft grote onzekerheid, zodat afgevraagd kan worden of het nodig is deze mee te nemen. Aanvullend onderzoek hierop is nodig (zie ook de aanbevelingen).
- Er is voorzichtig geconcludeerd dat de ensemble afvoerverwachting voor Lobith uit het RWsOS-systeem meer voorspelkracht heeft dan de klimatologie (tot een zichttijd van ongeveer 5 weken). Op basis van kwalitatieve argumenten wordt verwacht dat de BfG-ensemble afvoerverwachting, die is voorgesteld in het stappenplan, in het algemeen beter zal scoren dan die uit RWsOS.
- Aan de hand van (wetenschappelijke) literatuur, media-aandacht en eerdere onderzoeken is geconcludeerd dat er behoefte is binnen de natte transportsector naar langere-termijn verwachtingen.
- De uitgevoerde enquête wijst ook in die richting, al was het aantal respondenten niet groot en werd de meest relevante doelgroep (verladers, bevrachters) waarschijnlijk niet goed bereikt. Circa de helft van de respondenten is varend ondernemer, zij hebben aan een zichttijd van een aantal dagen genoeg.

7.2 Aanbevelingen

7.2.1 Algemene aanbevelingen m.b.t. stappenplan

- Het stappenplan (statische bodem) is concreet, werkt, en kan toegepast worden in tijden van droogte. Het zou goed zijn om in 2021 als pilot langere termijn diepteverwachtingen te gaan afgeven tijdens droogte, en te ontdekken of de afgifte meerwaarde heeft. Het is dan nodig om de benodigde scripting op orde te hebben, en volgend bullet te implementeren.
- De bepaling van minimale waterdiepte binnen de vaargeul op een traject is nu gebeurd door de kleinste waarde binnen een polygoon te zoeken. We raden aan hiervoor in de plaats de methodiek van De Jong (2020) te gebruiken.
- Een validatie van de verwachte waterdiepte met MGD-metingen kan waardevol zijn. Zie ook De Jong en Van der Mark (2020), waarin een vergelijking is gemaakt tussen een vergride waterdiepte en MGD.
- Qua presentatie is nu een eerste voorzet gemaakt. De vorm van de presentatie zou idealiter moeten worden uitgewerkt tezamen met de eindgebruikers.
- Het verdient aanbeveling de bevindingen te bespreken met LCW en het Watermanagementcentrum Nederland.

- Mocht na deze studie blijken dat er vanuit RWS behoefte is aan een structurele of operationele datalevering van de afvoerverwachting, dan is het noodzakelijk dat RWS hierover concrete afspraken maakt (overeenkomst opstelt) met de BfG. Sowieso werkt de BfG al enige tijd aan onderzoeken naar verwachtingen in relatie tot de meerwaarde voor de transportsector, en is het verstandig samen op te trekken en te leren van hun ervaringen en studies.
- De huidige studie gaat uit van het genereren van verwachtingen op basis van modellen (weer, hydrologie, hydrodynamica). Er kan ook veel geleerd worden uit gemeten tijdreeksen. Waarschijnlijk kunnen seizoensinvloeden uit de data gehaald worden, en dit kan al meerwaarde bieden aan de transportsector. Het opstellen van een soort seizoensatlas aan de hand van puur data zal zeker interessant zijn voor binnenvaartondernemers.
- In de procesbeschrijving is geadviseerd om multibeam-data te gebruiken voor het maken van een actuele bodem. Echter, de frequentie in inwinning van multibeam-beheerpeilingen neemt vermoedelijk in de toekomst af en de kwaliteit en dekking van CoVadem-data nemen in de toekomst toe. Daarom is het waarschijnlijk beter om op termijn CoVadem-data te gebruiken in plaats van multibeam-data. Wanneer het moment is bereikt over te stappen op CoVadem-data, is lastig te zeggen, daarvoor is (a) nadere analyse nodig naar de huidige en toekomstige kwaliteit en dekking van CoVadem-data, (b) moet het nieuwe onderhoudscontract bekend zijn, en (c) moet onderzocht worden wat het effect van ouderdom van de multibeam-peiling is op de vergridde bodemkaart. Een overeenkomst over het gebruik van CoVadem-data is dan ook nodig.
- Het stappenplan voor de dynamische bodem is nog niet gereed. De allereerste vraag is, of het relevant is om de dynamiek van de bodem mee te nemen (kwantitatieve diepte-bijdrage van bodemdynamiek). Indien ja, dan zal het stappenplan voor dynamische bodem verder uitgewerkt moeten worden. Specifieke aanbevelingen hiervoor worden hieronder gegeven.

7.2.2 Specifieke aanbevelingen m.b.t. afvoerverwachtingen

- Om inzicht te krijgen in de kwaliteit van verwachtingen en om gericht te kunnen sturen op verbeteringen daarin, is het raadzaam om verwachtingen op regelmatige basis te verifiëren.
 - Enerzijds vergt dit gereedschap voor het berekenen en visualiseren van scores. Voor de ontwikkeling van een (web-gebaseerde) verificatie-omgeving zijn binnen KPP RWsOS 2020 de eerste stappen gezet, waarbij de focus lag op het ontsluiten van de kwaliteit van deterministische verwachtingen. Aanbevolen wordt deze ontwikkeling in komende jaren voort te zetten, zodat binnen die omgeving ook ensemble-verwachtingen kunnen worden geverifieerd.
 - Anderzijds is het nodig om binnen de Crisis Adviesgroepen kennis en ervaring op te doen met verificatie, zodat voor elke vraag de geschikte verificatiemethodes worden gehanteerd en de resultaten ervan op waarde geschat kunnen worden. Zodoende kan verificatie van meerwaarde zijn voor de operationele berichtgeving, maar ook voor de sturing op de ontwikkeling van kennis en methoden.
- Hoewel het nuttig is om in de berichtgeving ook de resultaten van andere partijen mee te wegen, verdient het aanbeveling om als Rijkswaterstaat alle operationele watervraagstukken op basis van het eigen RWsOS-instrumentarium te kunnen beantwoorden. Alleen op die manier kan de consistentie in de berichtgeving gewaarborgd worden. Het gaat dan niet alleen om de numerieke uitkomsten, maar ook de duiding die daaraan gegeven wordt door de leden van de Crisis Adviesgroep. In sectie 4.2 is besproken dat de 46-daagse verwachting uit RWsOS nog voor verbetering vatbaar is. Om dit gestalte te geven gelden de volgende handreikingen:

- De hydrologische modellen die in RWsOS worden gebruikt zijn niet formeel in beheer. Aanbevolen wordt dit alsnog te organiseren, zodat eisen en wensen centraal geregistreerd worden en afgewogen beslissingen genomen worden over de ontwikkeling van de modellen (Den Toom en Spruyt, 2020).
- Zowel voor de ontwikkeling van hydrologische modellen en de verbetering van verwachtingen, als voor de validatie van modellen en de verificatie van verwachtingen is het van belang dat het beheer van (operationele) data optimaal is ingericht. Op dit moment wordt echter niet alle relevante data gearchiveerd en wordt in opslag en ontsluiting maar deels gebruik gemaakt van standaarden. In KPP RWsOS zijn al stappen gezet naar verdere uniformering. Aanbevolen wordt deze koers vast te houden en daarbij ook aansluiting te zoeken bij het KPP-programma Hydraulica Schematisaties.
- Voor het vergroten van de kwaliteit van ensembleverwachtingen is vanuit de wetenschappelijke literatuur een groot aantal methodes bekend. Met een aantal hiervan hebben partners van Rijkswaterstaat, zoals het ECMWF en de BfG, ook operationele ervaring. Aangeraden wordt van hun ervaringen te leren. Daarnaast is het zinvol te sturen op het voor Rijkswaterstaat toepasbaar maken van beschreven technieken. Naast verdere uitwerking in de KPP-lijn bieden het corporate innovatieprogramma van Rijkswaterstaat en het Strategisch Onderzoek bij Deltares hiervoor kansen.

7.2.3 Specifieke aanbevelingen m.b.t. duinhoogte en bodemligging-verwachtingen

- De beschikbaarheid van recente multibeam-gegevens is niet overal en voor altijd gegarandeerd. Enerzijds bieden de tweewekelijkse beheerpeilingen alleen gegevens van de vaargeul, en anderzijds is het niet zeker of deze nog beschikbaar zullen zijn in de toekomst. Op termijn zouden daarom CoVadem-data kunnen worden ingezet om bodemvormen (duinhoogte) af te leiden. Er zijn nog enkele uitdagingen die het op dit moment lastig maken de CoVadem-data direct in te zetten:
 - De dekking en meetnauwkeurigheid vragen onderzoek. De absolute bodemligging (ligging t.o.v. NAP) is mogelijk in eerste instantie nog niet relevant wanneer de gegevens alleen worden gebruikt voor de relatieve hoogte van de duinen (bepaald per track), en deze worden gekoppeld aan een oudere ‘gemiddelde’ bodem bepaald uit multibeam-gegevens.
 - De CoVadem-data moet op slimme wijze op het rekenrooster worden geprojecteerd. De wijze van interpolatie (en extrapolatie) is mogelijk relevant en moet nog nader worden onderzocht (de tracks vullen mogelijk niet alle roostercellen). Idem voor de maximale periode waarover tracks kunnen worden gecombineerd tot een actueel beeld.
- Binnen de Digitale Rivier is door data scientists gewerkt aan het voorspellen van MGD's enkele dagen vooruit. Die procedure is niet zomaar te gebruiken voor een voorspelling van 6 weken vooruit, maar het is wellicht wel goed om te verkennen of een alternatieve methode puur op basis van data hier soelaas zou bieden. Met behulp van statistische methodes kan met multibeam- en CoVadem-data mogelijk een pluim in bodemligging-verwachting gecreëerd worden.
- Omdat in erosiekuilen en bij andere sterke gradiënten in de bodem de gekozen methode voor afleiden van duinhoogte onterecht hoge duinen detecteert, kan worden overwogen om andere methoden voor het afleiden van duinen/bodemvormen (dune-track, wavelets, Delft3D) te bestuderen.
- De op dit moment meest geavanceerde en voor de rivier toepasbare voorspelmethode voor duinontwikkeling is via een Delft3D simulatie. Deze methode zou verder moeten worden getest, ook met oog voor performance (bijvoorbeeld, krijgen we een betere voorspelling, en wat kost dat qua rekentijd?).

- In deze studie is voor bodemvormveranderingen alleen gerekend met een simpele relaxatie formule met een constante tijdschaal. De uitkomsten zijn niet getoetst aan de werkelijk opgetreden veranderingen, en het is dus nog niet bekend of deze simpele aanpak heeft volstaan voor de gekozen periode. Daarnaast is geconstateerd dat de methode onvoldoende generiek is voor alle te verwachten afvoercondities en nog geen rekening houdt met een berekende evenwichtsduinhoogte. De verschillende voor- en nadelen van deze simpele en meer geavanceerde methodes zouden nader moeten worden onderzocht.

8 Referenties

- Arnal, L., H. L. Cloke, E. Stephens, F. Wetterhall, C. Prudhomme, J. Neumann, B. Krzeminski en F. Pappenberger (2018). Skilful seasonal forecasts of streamflow over Europe? *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 22, 2057–2072. <https://doi.org/10.5194/hess-22-2057-2018>.
- BASF (2019). BASF Annual Report 2019.
- Buschman, F., A. Blom, T. van Dijk, M. Kleinhans, R. van der Mark (2017). Informatiebehoefte en aanbevelingen voor monitoring in de Bovendelta van de Rijn. NKWK-pilot 2016 - A2. Deltares rapport 11200356-000-ZWS-0004, Mei 2017.
- De Jong, J.S. (2020). Bepaling representatieve vaardiepte en verbetering afvoer-vaardiepte relatie (DPZW en KBN). Deltares memo 11203738-005-BGS-0012 d.d. 1 maart 2020.
- De Jong & Van der Mark (2020). KBN-HVWN Stresstest droogte Rijntakken: Toestand van het Systeem en Kwetsbaarheid gebruiksfunctie. Deltares memo 11205274-004-BGS-0001.
- Den Toom, M. (2018). Langetermijnvisie onzekerheidsinformatie RWsOS. Deltares memo onder referentie 11202217-004-ZWS-0005.
- Den Toom, M. en A. Spruyt (2020). Werkplan inbeheername beheergebiedsoverschrijdende watermodellen. Deltares rapport onder referentie 11203707-000-ZWS-0014.
- Fleischer C., B. Frielingsdorf, E. Nilson, T. Recknagel, M. Helms, B. Klein en D. Meißner (2020). LARSIM als verkehrswasserwirtschaftliches Prognosetool - Vorhersage- und Projektionsprodukte der BfG. Presentatie op de Internationaler LARSIM-Anwenderworkshop 2020 van 24 maart 2020 te Duisburg. Online vindbaar op http://www.larsim.de/fileadmin/files/Anwendertreffen/2020/Fleischer_Frielingsdorf_BfG_LarsimAlsVerkehrswasserwirtschaftlichesPrognosetool.pdf (geraadpleegd 1 juni 2020).
- Gijsbers, P. (2019). Verificatie ECMWF_ENS_EXT verwachting Lobith, Deltares memo onder referentie 11203707-000-ZWS-0012.
- Giri, S. van Vuren, W. Ottevanger, K. Sloff and A. Sieben (2008), A preliminary analysis of bedform evolution in the Waal during 2002-2003 flood event using Delft3D, *Marine and River Dune Dynamics*, Proc. Int. Conf. MARID April 1-3, 2008, Leeds, UK, Eds. D. Parsons, T. Garlan and J. Best p. 141-148.
- Ionita, M., Nagavciuc, V. (2020). Forecasting low flow conditions months in advance through teleconnection patterns, with a special focus on summer 2018. *Sci Rep* 10, 13258 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70060-8>.
- Meißner, D., B. Klein en M. Ionita (2017). Development of a monthly to seasonal forecast framework tailored to inland waterway transport in central Europe. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21, 6401–6423. <https://doi.org/10.5194/hess-21-6401-2017>.
- Sieben, J. (2008). Taal van de rivierbodem. Parameters voor morfodynamiek in rivieren. Waterdienst rapport WD 2008-049. 13 juni 2008.

- Streng, M. en Van Saase, N. (2020). Effectanalyse droogte op de Rijntakken en de Maas; Een overzicht van de financiële effecten van klimaatverandering voor de scheepvaart en verladers. Erasmus UPT, november 2020.
- Todini, E. (2007). A mass conservative and water storage consistent variable parameter Muskingum-Cunge approach. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11, 1645–1659. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1645-2007>.
- Twedt, T. M., J. C. Schaake en E. L. Peck (1977). National Weather Service extended streamflow prediction. *Proceedings Western Snow Conference*, Albuquerque, New Mexico, 52–57.
- Van Osnabrugge, B., R. Uijlenhoet en A. Weerts (2019). Contribution of potential evaporation forecasts to 10-day streamflow forecast skill for the Rhine River. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 23, 1453–1467, <https://doi.org/10.5194/hess-23-1453-2019>.
- Van der Mark, C.F. & M. Lemans (2020). Operational 2D water depth prediction using echo sounder data of inland ships. *Proc River Flow 2020*. ISBN 978-0-367-62773-7.
- Visser, T. (2018). Verbeteringen SOBEK3-model Rijntakken. Deltares rapport 11202220-004-ZWS-0027.
- Wanders, N., S. Thober, R. Kumar, M. Pan, J. Sheffield, L. Samaniego en E.F. Wood (2019). Development and Evaluation of a Pan-European Multimodel Seasonal Hydrological Forecasting System. *J. Hydrometeor.*, 20, 99–115, <https://doi.org/10.1175/JHM-D-18-0040.1>. Zie ook <http://edge.climate.copernicus.eu/Apps/#seasonal>
- Wetterhall, F. en F. Di Giuseppe (2018). The benefit of seamless forecasts for hydrological predictions over Europe. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 22, 3409–3420. <https://doi.org/10.5194/hess-22-3409-2018>.

Rolien van der Mark

From: Klein@bafg.de
Sent: zaterdag 18 juli 2020 08:46
To: Matthijs den Toom
Cc: Rolien van der Mark; eric.sprokkereef@rws.nl; Stam, Jasper (VWM); janpaul.kors@rws.nl; Maarten Smoorenburg; Meissner@bafg.de; Frielingsdorf@bafg.de
Subject: AW: Data 6-Wochen-Vorhersage

Hi Matthijs,
we are doing all fine. All people working from home works surprisingly smoothly. In the next weeks most of us will return to office.
I don't see a problem that you can get the underlying discharge ensemble data of our 6-week forecasts, also on an operational basis. As far as I remember results for Lobith are also available, but currently without AR correction due to missing observation data. Adding this in future wouldn't be a problem.
The skill for the last forecast weeks is still relatively limited. We are currently finalizing a report with a detailed skill analysis. We can send it to you after finalization that you can get an impression of the forecast skill. There are still a lot of things to improve, especially post-processing of the raw ensembles and bias correction of the input based on the re-forecast data. I am on holidays for the next three weeks, Dennis is currently on holidays. I will discuss this with Dennis after the vacation time and we come back to you. If you need a 6-week forecast during the next 3 weeks, please contact Barbara (in CC) and Dennis, they can send the discharge ensemble of the forecast for Ruhrort to you on a short notice.
Just a short feedback to the ensemble dressing data you sent to me: till now I had unfortunately no time to verify the probabilistic forecasts, it's one of the first point on my list after my holidays.
Hope to meet you soon again, to discuss all these issues.
Cheers
Bastian

-----Ursprüngliche Nachricht-----

Von: Matthijs den Toom [mailto:Matthijs.denToom@deltares.nl]
Gesendet: Freitag, 10. Juli 2020 13:03
An: Meissner, Dennis, M2, B40; Klein, Bastian, M2, B40
Cc: Rolien van der Mark; 'Sprokkereef, Eric (VWM) (eric.sprokkereef@rws.nl)'; Stam, Jasper (VWM); Kors, Jan Paul (WVL); Maarten Smoorenburg
Betreff: Data 6-Wochen-Vorhersage

Dear Dennis, dear Bastian,

How are you doing? Although I am not entirely aware of the Covid-measures in Germany, I can imagine they have (had) quite some impact on your daily work. Is the extension of your FEWS system still on track? Hopefully we can meet again soon.

The reason I am contacting you now, is because I have a question on behalf of Rijkswaterstaat regarding the BfG's six week prediction. Namely: Would it be possible for you to provide the discharge ensemble data that underlies the reports that are published on the BfG ftp? The idea at this point is not to set up an operational feed, but rather that an incidental request for this data can be done.

Let me provide some background: Rijkswaterstaat and Deltares are involved in a desk study regarding long-term (6-8 weeks) predictions for planning of inland shipping and water allocation in the Netherlands. This follows policy makers recommendations after the drought and low flow conditions of 2018. The predictions should allow Rijkswaterstaat to provide shipping companies with information so they can better anticipate periods of reduced water depth. However,, to make effective strategic decisions longer lead times are needed than Rijkswaterstaat currently provides operationally. The study therefore seeks to identify which existing models and sources of data can be used to create a

6-8 week water depth prediction, to assess the applicability thereof, and to specify what would be needed to maintain such combination of tools and data.

A prediction of water depth in the Netherlands will at least require a discharge boundary condition for Lobith. Given the lead times of interest only probabilistic approaches are considered. Based on a literature scan I have compared the applicability of several potential data sources for this. One is the HBV forecast driven by ECWMF-ENS extended, as included in the operational system of Rijkswaterstaat. However, a first assessment of this product showed relatively poor skill, especially for discharges below 1000 m³/s. This is not entirely surprising given that the HBV model is calibrated for high flows, and no attempt is done to bias-correct the meteorological input. I therefore also reviewed the products of the BfG, EFAS, SMHI and Utrecht University. Amongst these the BfG's product appears to have to most potential, because it was developed specifically for (shipping on) the Rhine, is based on relatively fine-grained meteorology with bias-correction applied, takes the form of a discharge ensemble with daily timesteps, is regularly disseminated and might be available for Rijkswaterstaat. One point of attention, obviously, would be to translate the discharges at Ruhrort to Lobith.

In case you would be open to share this data, under what conditions could you do so?

Part of the study is to also execute the proposed tool chain once, preferably for a relatively dry period. Therefore I'd like to ask whether it would be feasible to provide the data for the six week prediction issued May 19th?

Of course I would be happy to answer any questions you might have. And please share your thoughts regarding this matter; that would be highly appreciated.

Thank you, best regards,

Matthijs

dr. Matthijs den Toom

adviseur/onderzoeker operationeel waterbeheer, Deltares

bereikbaar ma, di, do, vr

e: matthijs.dentoom@deltares.nl <<mailto:matthijs.dentoom@deltares.nl>> | t: +31(0)6 4691 4573

s: [matthijsdentoom](https://eur03.safelinks.protection.outlook.com/?url=http%3A%2F%2Fwww.deltares.nl%2F&data=02%7C01%7C%7Cb81817ea8dea43bfddf808d82ae647c0%7C15f3fe0ed7124981bc7cfe949af215bb%7C0%7C0%7C63730651583402332&data=vUq7mE2AACmDT7KUMsMDXOyDZf%2FW2scglgrlSICTp1Q%3D&reserved=0) | w:

<https://eur03.safelinks.protection.outlook.com/?url=http%3A%2F%2Fwww.deltares.nl%2F&data=02%7C01%7C%7Cb81817ea8dea43bfddf808d82ae647c0%7C15f3fe0ed7124981bc7cfe949af215bb%7C0%7C0%7C63730651583402332&data=vUq7mE2AACmDT7KUMsMDXOyDZf%2FW2scglgrlSICTp1Q%3D&reserved=0>

B Memo Voorspellen waterdiepte: morfologie

Deltares

Memo

Aan

Rollen van der Mark

Datum

30 juni 2020

Contactpersoon

Kees Sloff

Doorkiesnummer

+31(0)88 335 8152

E-mail

Kees.Sloff@deltares.nl

Aantal pagina's

1 van 14

Onderwerp

Voorspellen waterdiepte: morfologie (CONCEPT)

Voorspellen vaardiepte: morfologie

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
0.2	30-06-2020	Sloff, C.J.	-	v.d. Mark, R.	-		-

Status: Concept

1 Inleiding

Vanwege de behoefte aan een waterdiepte-voorspelling in situaties met extreme droogte, is onderzocht of het met bestaande middelen mogelijk is deze voorspelling te verbeteren. In essentie bestaat de waterdieptevoorspelling uit een waterstand en een bodemhoogte voorspelling (immers waterdiepte is waterstand minus bodemhoogte). De beoogde voorspeltermijn bedraagt 6-8 weken.

De onderzoeksvraag betreft:

- Welke mogelijkheden zijn er om basis van beschikbare meetgegevens een voorspelling te maken van de bodemontwikkeling in de tijd, voor een periode van 6-8 weken?

In het memo beantwoorden we de volgende deelvragen:

- Hoe bepaalt de bodemhoogte de beschikbare maatgevende vaardiepte?
- Welke morfologische verschijnselen zijn relevant voor de vaardiepte?
- Welke morfologische verschijnselen zijn relevant voor verandering in de vaardiepte op een termijn van 6-8 weken?
- Hoe kan met een combinatie van gegevens en theoretische methoden een voorspelling worden gemaakt van de bodemveranderingen bij de ondieptes?
- Hoe zou een eerste versie (mock-up) van het instrument kunnen worden opgesteld?

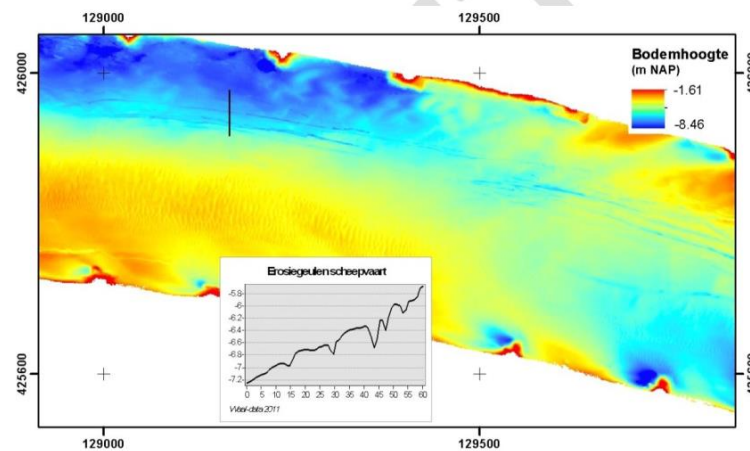
Voorbeeld van de problematiek tijdens de droogte zomer 2018 (aqualink.biz, okt 2018):

In artikel 28 van de Akte van Mannheim verbindt Nederland zich om het vaarwater van de Rijn in behoorlijke staat te brengen en te onderhouden voor het waarborgen van de bevaarbaarheid en de streefdiepte. Ook artikel 3 lid b van de Scheepvaartverkeerswet beoogt dit. Maar vanwege de droogte van de zomer 2018 en de hiermee gepaard gaande lage waterstanden, zakte het water op de Waal zo laag, dat uiteindelijk langdurig nog maar met een beladingsgraad van minder dan 40% gevaren kon worden. De streefdiepte van 2,80 meter en het OLR zijn gebaseerd op internationale afspraken vanuit de Centrale Commissie voor de Rijnvaart (CCR). Het OLR is vastgesteld op een afvoer van 1020 m³/sec bij Lobith en een waterstand van 739 NAP. Normaliter zou bij deze afvoer en waterstand rond de 2,80 m waterdiepte beschikbaar moeten zijn. Bij een tijdens de droogte minst gepeilde was volgens het Centraal Overleg Vaarwegen (COV) op de Waal 40 tot 60 centimeter te weinig waterdiepte beschikbaar.

2 Ondieptes en benodigde vaardiepte voor de scheepvaart

2.1 Ondieptes in de vaarweg

De aflaaddiepte wordt bepaald door de minimale diepte op de geplande route. Dagelijks wordt de minstgepeilde diepte (MGD) gemeld door Rijkswaterstaat. Over het algemeen zijn de relevante ondieptes gerelateerd aan een te hoge bodemligging (ten opzichte van de waterspiegel) en hebben dan een morfologische oorsprong. De MGD wordt bepaald voor een aantal vastgestelde trajecten (routes), maar geeft geen inzicht over de details van de ondiepte, en over de aanwezigheid van andere (minder ernstige) ondieptes. Bijvoorbeeld, vanuit het oogpunt van bevaarbaarheid is niet elke ondiepte hetzelfde: ondiepte door duintoppen kunnen wellicht met weinig of geen kielspeling nog wel worden gepasseerd, maar bij grote zandbanken kan dezelfde vaardiepte weer leiden tot vastlopen. Dit biedt de mogelijkheid tot gebruik van verschillende marges voor de nauwkeurigheid van voorspelde vaardiepte (d.w.z. met name de minimale kielspeling) voor verschillende typen ondiepte en scheepvaarttypen. Dergelijke marges zijn niet beschreven en vragen wellicht nader onderzoek.



Figuur 2.1 Voorbeeld van erosiegeulen door de scheepvaart in de Waal

Buschman et al (2017) tonen een mooi voorbeeld van multibeamdata waarin lange sporen veroorzaakt door schepen zijn te zien, Figuur 2.1. Deze sporen zijn veroorzaakt door de belasting van schepsschroeven en retourstroming. De vormen en volumes van deze sporen van schepen kunnen gekoppeld worden aan scheepsinformatie (AIS-data) om zo de relatie te leggen tussen bijvoorbeeld type schip en diepgang. Door de vormen en volumes ook te koppelen aan afvoer, kan de relatieve bijdrage van schepen op bodemerosie en op het totale sedimenttransport in de rivier worden onderzocht.

Bij het voorspellen van de toestand van de vaardiepte voor een periode van 6-8 weken is het belangrijk met de volgende aspecten rekening te houden:

- In de MGD trajecten zijn meerdere ondiepten gelijktijdig aanwezig (de MGD is dan de "maatgevende" ondiepte). Hoe de bodemhoogte bij deze ondieptes zich in de tijd ontwikkelt is met onzekerheid omgeven. Iedere ondiepte kan zich in de beschouwde voorspelperiode tot een MGD ontwikkelen door morfologische processen.

- Door combinatie van verschillende gegevensbronnen kan een ruimtelijk beeld worden gekregen van de tijdsgemiddelde bodemhoogte en de variaties eromheen.
- De bodemligging wordt bepaald door gelijktijdig optredende verschijnselen (bijvoorbeeld banken, duinen, kuilen) met verschillende ruimte- en tijdschalen. Het zijn vooral de verschijnselen met snelle veranderingen die voor de termijn van 6-8 weken relevant zijn.
- De verandering in bodemligging is afhankelijk van een complexe interactie tussen stroming, sediment transport, bodemsamenstelling, scheepvaart en bodemvormen. Een gedetailleerde simulatie (en voorspelling) van de bodemligging met deze interacties is daarom complex en onvoldoende betrouwbaar. Vandaar dat hiervoor beter kan worden uitgegaan van semi-empirische benadering, die zijn gebaseerd op de lokale waarnemingen.

2.2 Karakteristiek van de MGD

Zoals in voorgaande aangegeven is de minstgepeilde diepte MGD het maatgevende criterium voor de beschikbare vaardiepte op een traject. In de huidige praktijk wordt de minstgepeilde diepte (MGD) dagelijks vastgesteld op basis van een aantal bodemhoogte-peilingen door patrouillevaartuigen van Rijkswaterstaat met behulp van een singlebeam-echolood. De locaties van deze peilingen volgen uit een gedegen kennis van de actuele situatie in de rivier bij de rivierbeheerder (District). De MGD's treden over het algemeen op bij bekende ondieptes, zoals de ondiepte na de vaste laag bij Sint Andries.

De MGD wordt bepaald door verschil in waterstand en bodemhoogte, welke beide variabel zijn in tijd en plaats. De variabiliteit van bodemhoogte is vooral gerelateerd aan morfodynamiek, dus door de continue vormverandering van de rivierbedding onder invloed van stroming en sedimenttransport. Ook vaste elementen in de bedding (zoals de vaste laag bij Nijmegen, sluisdrempels of slecht erodeerbare keileem pakketten) kunnen een ondiepte vormen wanneer waterstanden blijven dalen terwijl deze elementen in hoogte vastliggen. Echter, over het algemeen worden tot heden de MGD's op de riviertrajecten voornamelijk veroorzaakt door morfologische variaties in de alluviale bedding.

Van de diverse ondiepten op een traject kan de MGD worden beschouwd als de ondiepste locatie. Wanneer de ondiepte op deze MGD-locatie wordt opgelost (bijvoorbeeld door baggeren of afvlakken van duinen door de stroming) wordt de eerstvolgende ondiepte op de ranglijst de nieuwe MGD. De beheerder heeft meestal een redelijk beeld van de aanwezige ondieptes, en kan daardoor gericht monitoren. Het is echter lastig om te voorspellen wanneer specifieke ondieptes weer afnemen of juist gaan groeien, en wanneer ondieptes maatgevend (een MGD) worden. In sommige situaties kan door onverwachte effecten, bijvoorbeeld invloeden van sedimentsuppleties of het achterloops raken van een krib, een nieuwe ondiepte ontstaan. Van belang is dat deze op tijd worden gesignaleerd en meegenomen worden in de monitoring. In de bestaande methodiek bestaat er een risico dat dergelijke onverwachte ondieptes worden gemist in de dagelijkse peilingen.

Procedure MGD (<https://www.binnenvaartkennis.nl/minst-gepeilde-diepten-mgd/>)

In riviervakken van de Geldersche IJssel, Pannerdensch Kanaal, Neder-Rijn en Lek en Waal, worden systematisch peilingen verricht om te bepalen wat de minste waterdiepte in de vaargeul is. Het bekendmaken van deze Minst Gepeilde Diepte vindt plaats zodra en zolang deze, ergens in de vaargeul, de volgende grens onderschrijft.

- Geldersche IJssel 300 cm of minder
- Pannerdensch Kanaal, Neder-Rijn en Lek 300 cm of minder
- Waal 350 cm of minder

Daarnaast wordt als extra service een Minst Gepeilde Diepte bekend gemaakt voor:

- Sluis Weurt (beide kolken) 350 cm of minder → westsluis Weurt is 100 cm meer dan de oostsluis
- Uitvaardiepte sluis Eefde 280 cm of minder

Tijdens de huidige laagwaterperiode wordt van het traject Millingen-Loevestein de detailinformatie gegeven voor de 3 deeltrajecten:

- Millingen tot Maas-Waalkanaal
- Maas-Waalkanaal tot Amsterdam-Rijnkanaal
- Amsterdam-Rijnkanaal tot Loevestein

De exacte locatie van de MGD wordt in het bericht niet vermeld.

3 Morfologie

3.1 Karakteristiek van de morfodynamiek

In de Nederlandse rivieren bestaat de bedding voornamelijk uit zand en grind dat makkelijk wordt getransporteerd onder de invloed van het erover stromende water (en deels door passerende schepen). De stroming in een rivier is voortdurend aan verandering onderhevig, met name door de variatie van de afvoer, maar ook door veranderingen in de bodem zelf. Er bestaat dus een gecompliceerde interactie tussen de bodem en het er overheen stromende water. De bodemtopografie van een rivier verandert dan ook voortdurend. Men spreekt van een dynamisch evenwicht wanneer de bodemligging ondanks allerlei fluctuaties gemiddeld genomen constant blijft. Op een schaal van enkele jaren kan men stellen dat de bodem van de Waal in dynamisch evenwicht is. Een goed inzicht in de verschijnselen die de fluctuaties veroorzaken is een voorwaarde voor het voorspellen van bodemveranderingen in de tijd.

In onderstaande tabel is een overzicht gegeven van de verschillende morfologische verschijnselen die optreden in de Nederlandse Rijnakken (voor verdere toelichting zie Klaassen en Sloff, 2000). Daarbij zijn naast een korte beschrijving van de betreffende ondieptes, ook de lengteschalen en bijbehorende tijdschalen van ontwikkeling van deze ondieptes aangegeven.

Type	Lengteschaal	Tijdschaal	Visualisatie
<i>Geforceerde morfologie (opgedrongen verschijnselen, gedwongen structuren)</i>			
"Autonome" bodemerrosie: de bodem daalt langzaam (millimeters of centimeters/jaar) over grote lengte. Vaste delen zakken niet mee.	100 km	> 100 jaar	
Natuurlijke bochten (meanderbochten): gekenmerkt door diepe buitenbocht en ondiepe binnenbocht (point bar) onder invloed van "spiraalstroming". Bij hoogwater kan point bar groeien.	Orde één à enkele kilometers	1 jaar	
Bochten met vaste laag of bodemkribben. Binnenbocht is iets dieper, maar wordt gekenmerkt door grotere duinen. Aan eind van constructie ontstaan erosiekuil en ondiepe zandbank.	Orde 100 m (lokale ondiepte) à enkele kilometers (point bar)	1 jaar	

Type	Lengteschaal	Tijdschaal	Visualisatie
Bochtovergangen: Kan ondieptes ontwikkelen in midden van vaarweg	Orde enkele honderden meters	1 jaar	
Kribvlammen en erosiekuilen (door oeverbelijning): verschijnselen die 'uitstralen' vanuit onregelmatige oevers/belijning door uitwaaiende stroming.	Orde 100 m	Weken tot maanden	
Hoogwatersedimentatie:	Orde 200 m	Maanden à 1 jaar	
<i>Vrijbewegende morfologie (vrije structuren)</i>			
Alternerende banken: Translatie en groei/demping van alternerende banken	Orde 1 kilometer	1 jaar	
Beddingvormen (duinen en ribbels)	Orde 50 m	Weken	
Suppleties /baggeren-storten	Tientallen tot honderden meters	Maanden à 1 jaar	

Voor de termijn van 6-8 weken zullen de grootschalige verschijnselen met een tijdschaal van orde 1 jaar (of hoogwaterseizoen) slechts een geringe verandering vertonen. Wanneer deze tot een ondiepte leiden, kan worden aangenomen dat deze na 6-8 weken nog steeds aanwezig zullen zijn in een vergelijkbare mate. Verondersteld wordt dat veranderingen in bodemhoogte van orde millimeters en centimeters over grote oppervlakten niet significant zijn te veronderstellen ten opzicht van onzekerheden in waterdieptevoorspelling. Voor voorspellingen van bodemontwikkeling op deze termijn zijn dan alleen de relatief kleinschalige en snel veranderende verschijnselen relevant waarbij veranderingen in de orde van decimeters optreden. In de tabel zijn dat: beddingvormen, kribvlammen (d.w.z. ondieptes gerelateerd aan oeverbelijning) en herstel van beheermaatregelen (bagger-/stort-/suppletie-maatregelen).

Het onderscheid in verschijnselen biedt de mogelijkheid gericht gebruik te maken van combinaties van voorspeltechnieken voor specifieke processen, en recente en historische gegevens van de bodemligging.

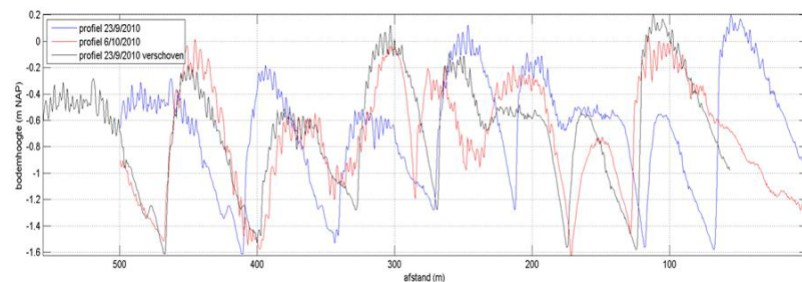
3.2 Voorspelling van bodemhoogteverandering

Welke mogelijkheden zijn er om basis van beschikbare meetgegevens de voorspelling van de bodemontwikkeling in de tijd? Gezien de complexiteit van de processen in de rivier ligt een semi-empirische methode of een hybride methode voor de hand waarbij actuele metingen en theoretische relaties worden gecombineerd. In het volgende wordt eerst ingegaan in de methoden voor het bepalen van snel veranderende bodemvormen en daarna over de mogelijkheden voor het voorspellen van hun ontwikkeling.

3.2.1 Detecteren en karakteriseren van bodemvormen uit metingen

Uitgaande van een voorspelhorizon van 6-8 weken zijn alleen de 'snelle' bodemvormen relevant voor voorspellingen. Op diverse manieren wordt informatie over bodemhoogte ingewonnen, maar niet alle methoden zijn geschikt voor het bepalen van deze bodemvormen:

- MGD, dagelijks bepaalde met singlebeam-echolood (alleen afgegeven diepte-waarde en locatie). Hoewel deze gegevens de uiteindelijke bron zijn van de MGD, zal geen of slechts beperkte informatie beschikbaar zijn over de oorzaak (of er sprake is van een duin, kribvlam, ondiepe bocht, combinaties van verschijnselen, etc.).
- Beheerpeilingen (multibeam) in vaargeul (baggercontract) met interval van 2 weken (of mogelijk langer in toekomstige contract). Omdat deze peilingen de gehele vaargeul omvatten met hoge resolutie, bieden deze een goede beeld van de kleinschalige snelle bodemvormen. Bij een tweewekelijkse peiling bedraagt de verplaatsing van de duinen circa 1 duinlengte (bij lage afvoer) en kunnen dune-track methoden worden toegepast. Bij grotere tijdsintervallen wordt dit lastiger. Een voorbeeld van bewerkte data van een beheerpeiling met duinen is gepresenteerd in Figuur 3.1.
- Oriëntatiepeilingen (multibeam) omvatten het zomerbed tussen de normaallijnen, jaarlijks gemeten in laagwaterseizoen. De peilingen worden elk jaar eenmalig, maar wel in fases (over meerdere weken) ingewonnen, en zijn daarom vooral geschikt voor lange-termijn en bodemvorm-gemiddelde analyses.
- Covadem, waterdiepte langs tracks van varende schepen, continue update van schepen uitgerust met Covadem apparatuur. Deze data zijn alleen beschikbaar langs de gevaren tracks, en er zijn nog geen methodes om deze eenvoudig ruimtelijk te combineren (daarvoor wordt een methode nog ontwikkeld).



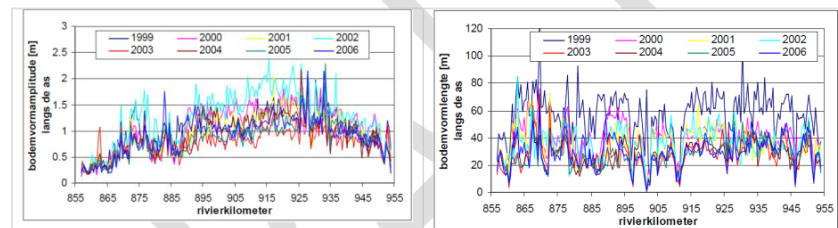
Figuur 3.1 Analyse van waargenomen duinenveld bij een afvoer van 1450 m³/s (23/09-06/10/2010), met verplaatsingssnelheid 4.2 m/dag (Buschman et al., 2017).

Diverse studies naar methodiek voor verwerken en karakteriseren van de morfologische verschijnselen in de Rijntakken zijn afgelopen decennia uitgevoerd door Arjan Sieben (Sieben, 2008, 2014). Om de meerjaren-trends van snelle bodemfluctuaties te onderscheiden in de bodempeilingen wordt op een tijdstip t gemeten bodemhoogte per positie $z(x,y,t)$ in 2 componenten ontleed: een door ruimtelijke middeling gefilterde bodem \bar{z} en het residu ervan Δz :

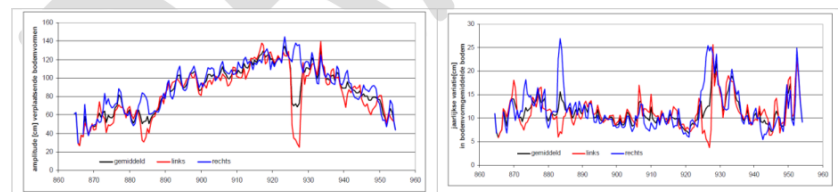
$$z(x, y, t) = \bar{z}(x, y, t) + \Delta z(x, y, t)$$

Met deze filtering is het mogelijk de veronderstelde tijdsgemiddelde en plaatsvast bodemligging te scheiden van de tijdsafhankelijke en verplaatsende bodemligging. De tijdsafhankelijke component bevat een gecombineerd signaal van langzame meer-jaren trends en de snelle veranderingen door de duinen en kribvlammen. Sieben heeft deze methode toegepast op diverse data sets in de Rijntakken en Maas, en voor verschillende periodes en locaties.

Voor het afleiden van de parameters van beddingvormen (duinhoogte, duinlengte en verplaatsingssnelheid) uit de peilingen zijn verschillende methoden voorgesteld. Sieben (2007, 2008) ontwikkelde een 'dune-tracking' methode waarbij op basis van theoretisch gedrag van bodemvormen zowel vaste (kribvlammen) als verplaatsende bodemvormen (duinen) zijn te onderscheiden. De methode is verwerkt in een aantal tools voor analyse van multibeam peilingen. Sieben (2008) berekend bijvoorbeeld met deze aanpak voor de Waal dat de amplitude van duinhoogtes varieert van orde 0,2 m tot wel 2 m, met grootste amplitudes in de Midden Waal, zie Figuur 3.2 en Figuur 3.3. De duinlengtes variëren van orde 20 m tot orde 80 m blijkt uit de figuren, maar wel relatief gelijkmatig over de lengte van de rivier. Ook voor de variaties in dwarsrichting volgt dat deze min of meer het door de bochten opgedrukte bankpatroon volgt. Het onderscheid in plaatsvast en verplaatsende bodemvormen wordt echter wel belangrijk geacht voor een goede beschrijving en interpretatie van de morfodynamiek.



Figuur 3.2 Langsprofil van de duinhoogte (links) en duinlengte (rechts) langs de rivieras van de Waal volgens Sieben (2008)



Figuur 3.3 Profiel van de duinhoogte van verplaatsende duinen (links) en van de jaarlijkse fluctuatie in bodemligging (rechts) langs de rivieras van de Waal volgens Sieben en van der Loo (2014)

Ten Brinke et al (1999) en Wilbers (2004) passen eveneens dune-tracking methoden toe voor het parameteriseren van duinen in de Rijntakken (o.a ook in ten Brinke en Wilbers, 2003 e.a.). Daarvoor is de DT2D tool ontwikkeld (Dune Track in Twee Dimensies). Evenals in de bovengenoemde aanpak van Sieben wordt deze methode vooral toegepast op de beschikbare multibeampeilingen in de rivier. In de betreffende en daarop gebaseerde studies wordt de methode ook gebruikt voor het afleiden van bodemtransport door aannames te doen over de vorm van de duinen en deze te combineren met de dune-track methode.

Deltares heeft een methode ontwikkeld, waarin kam-, trog- en inflectiepunten (en ook brinkpunten) semi-geautomatiseerd worden bepaald, waaruit de vormen (duinlengten, -hoogten en -asymmetrie)

van individuele bodemvormen kunnen worden bepaald (Van Dijk et al., 2008). Indien toegepast op tijdreeksen, kunnen ook de groei en migratie van duinen worden bepaald. In een pilotstudie is de methode ook succesvol toegepast op de morfologie van kleinere bodemvormen in de Waal, maar het volgen van deze kleine duinen is niet mogelijk omdat kleine duinen niet individueel te identificeren zijn in de tijd (Frings & Kleinhans 2008, Van Dijk et al., 2012). Een alternatief voor de dune-tracking methodes is de kruiscorrelatietechniek (Buschman et al. 2017). Een 2D-kruiscorrelatie wordt gebruikt voor het analyseren van de verplaatsing van grootschaligere patronen die verscheidene bodemvormen bevatten (plan-view migratie), resulterend in een migratievector met grootte en richting. Een 1D-analyse bepaalt de afstand van verplaatsing voor dwarsdoorsnedes van een serie bodemvormen.

Ook De Ruijscher et al. (2020) leidt karakteristieken van banken en duinen van een analyse van de multibeam bodempeilingen. Daar maakt hij gebruik van de methoden, met onderscheid in bodemvormen met verschillende schalen, volgens van der Mark en Blom (2007). De Ruijscher past de methode toe om inzicht te verschaffen in het effect van de langsdammen in de Midden Waal. Het resultaat van de methode bevestigt de observaties van de voorgaande onderzoekers.

In recente studies voor ontwikkeling van tijdsafhankelijk gedrag van de bodemligging heeft Pepijn van Denderen (bijv. van Denderen, 2019) gebruik gemaakt van een 'wavelet analyse' voor het detecteren en interpreteren van het in de tijd veranderlijke bodemliggingsignaal (na aftrek van het tijdgemiddelde) in peilingen. Het biedt net als bovengenoemde methoden inzicht in de karakteristieken van duinen en andere bodemvormen.

Naast de snelle bodemontwikkeling door duinen en door oevers en kribben geforceerde bodemvormen, is het belangrijk ook rekening te houden met invloed van intensief beheer in de peilingen. Na het uitvoeren van baggerwerk zal het gebaggerde traject van bovenstrooms weer worden aangevuld door instromend sediment. Dit herstel is een functie van sedimenttransport op het traject, het 'inlopen' van beddingvormen en eventuele zelfstandige groei van beddingvormen in een vlakgemaakte bedding (Sloff, 2001b).

3.2.2 Voorspelmethoden

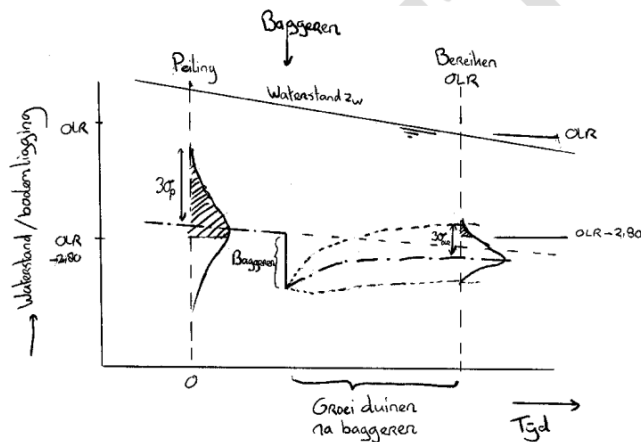
De bodemveranderingen waarvoor deze methode van toepassing zijn bestaan uit:

- Lokale plaatsvaste bodemvormen veroorzaakt door de oeverbelijning (vooral kribben). De vormen groeien en dempen als functie van de afvoer, maar met enige traagheid. De relatie tussen amplitude en afvoer is lokatieafhankelijk en zal door de traagheid een hysteresis effect vertonen. Dit kan mogelijk worden benaderd door een eenvoudig relaxatie model met een empirische relatie voor amplitude. In principe zou voor iedere kribvlam (lokatieafhankelijk) een dergelijke relatie kunnen worden vastgesteld.
- Verplaatsende bodemvormen (vooral duinen en herstel van bagger en stort). Naast groei en demping, zal ook verplaatsing een rol spelen. De duinen verplaatsen zich met een snelheid van orde 5 tot tientallen meters per dag, afhankelijk van het optredende sedimenttransport (afvoer). De verplaatsing van duinen kan daardoor over de periode van 6-8 weken in de orde van enkele honderden meters tot enkele kilometers bedragen. De bodemvormen kunnen zich dan verplaatsen naar diepere (of ondiepere) delen van de 'vaste opgedrongen bodemligging'. Tegelijkertijd kunnen eventuele grote duinen in die periode ter plaatse van een grootschalige ondiepte arriveren en daarbij leiden tot een nieuw maatgevend knelpunt.

De volgende typen voorspelmethoden kunnen worden ingezet:

- Expert judgement: een aanpak waarbij een expert op basis van de voorspelde afvoerloop en kennis van de rivier bepaalt hoe de bodemvorm zich zou kunnen ontwikkelen.

- Volledig empirische aanpak (mogelijk met AI of machine learning) voor locatieafhankelijk en afvoerafhankelijk doorontwikkeling van de bodemligging. In deze aanpak wordt geen rekening gehouden met fysische verschijnselen en kunnen alleen eerdere opgetreden en gemeten situaties worden nagebootst. Onderscheid moet worden gemaakt voor de periode van toename van afvoer en afname van de afvoer tijdens hoogwater (hysterese) en invloeden van beheer (baggerwerk e.d.) zijn niet mee te nemen.
- Toepassing semi-empirische relaties voor ontwikkeling in de tijd van morfologische processen als functie van de voorspelde afvoer. De betreffende methode is gebaseerd op een theoretische beschrijving van het tijdsafhankelijke gedrag van de duinparameters in combinatie met plaatsafhankelijke empirische coëfficiënten.
- Toepassen 2D morfologisch rekenmodel. Gebruik kan worden gemaakt van het DVR (Duurzame Vaardiepte Rijndelta) model dat wordt beheerd door Deltares, en gebruikt wordt voor morfologische berekeningen van de Rijntakken. Het model bevat een duinhoogtevoorspeller, maar deze is bedoeld voor gemiddelde duinhoogte. Desondanks kan deze inzicht geven in de ruimtelijke verplaatsing en demping/groei van de duinhoogte.
- Combinaties van bovenstaande methoden.



Figuur 3.4 Principe van bodemontwikkeling op een willekeurige locatie met baggerwerk als functie van de tijd (Sloff, 2001b)

In Figuur 3.4 is door middel van een schets aangegeven hoe de gebaggerde bodem zich ontwikkelt na afloop van het hoogwater volgens Sloff (2001b). In het geschetste geval treedt na een peiling een daling op van de gemiddelde opgedrongen bodem en een herstel van de bodemhoogte na de baggeroperatie. Om deze gemiddelde bodem is met behulp van een kansverdeling aangegeven hoe, met name onder invloed van beddingvormen, de werkelijke bodem om dit gemiddelde varieert. De spreiding van de kansverdeling (parameter σ_p in de figuur) neemt af met de tijd, hetgeen weergeeft dat de duinhoogte afneemt naarmate de afvoer daalt in de tijd. Echter, door het baggerwerk worden de duinen verwijderd, waardoor direct na de baggeroperatie de kansverdeling verdwijnt. Deze neemt daarna weer toe door langzame herstel van de duinhoogte.

In Sloff (2001b, 2002) wordt aangenomen dat het herstel verloopt volgens:

$$\frac{\partial \Delta z'}{\partial t} = \frac{1}{T} (1 - \Delta z') \quad \text{met oplossing} \quad \Delta z'(t) = 1 - \exp\left(\frac{-t}{T}\right) \quad (3.1)$$

$\Delta z'$ = tijdsafhankelijke dimensieloze bodemafwijking (relatief ten opzichte van de initiële afwijking Δz_{bo}), Δz_{bo} = door bagger of stort opgelegde beginafwijking ten opzichte van de evenwichtsbodemligging of tijdsgemiddelde bodem, T = tijdschaal (functie van afvoer, locatie, etc.). Wanneer de korte termijn wordt beschouwd, orde 2 maanden, bedraagt het "gemiddelde" herstel van een gebaggerde geul $T = 0,4$ à $0,6$ jaar bedraagt bij een afvoer van $1600 \text{ m}^3/\text{s}$ en ongeveer $T = 0,2$ à $0,3$ jaar bij een afvoer van $2400 \text{ m}^3/\text{s}$.

Giri et al. (2008) beschrijven hoe het advectie/relaxatie gedrag van duinen is geïmplementeerd in het Delft3D modelsysteem. Het model van Allen (1976) is hiervoor geïmplementeerd (Sieben 2006):

$$\frac{\partial H}{\partial t} + c_{Hx} \frac{\partial H}{\partial x} + c_{Hy} \frac{\partial H}{\partial y} = \frac{H_e - H}{T_H} \quad (3.2)$$

Waarin c_{Hx} en c_{Hy} zijn karakteristieke voortplantingssnelheden, H is de actuele duinhoogte, H_e is evenwichtsduinhoogte, en T_H is tijdschaal voor aanpassing van duinhoogte. De evenwichtsduinhoogte wordt berekend met de formule van Fredsøe (1982) in combinatie met Meyer-Peter en Müller sedimenttransportmodel, die een goede fit geeft met de gemeten duinhoogtes (Sieben, 2008). Een constante tijdschaal van circa 20 dagen geeft redelijke resultaten voor een eerste analyse.

Gerealiseerd moet worden dat de bovengenoemde semi-empirische relaties het gedrag van de morfologie slechts grof benaderen. Bijvoorbeeld, in grote delen van het Rijnakken gebied zijn de bodemvormen beïnvloed door sediment sorteringprocessen, waarbij complexe interacties optreden in stroming, vormruwheid, bodemsamenstelling en sedimenttransport (Kleinans, 2005). De sorteringprocessen beïnvloeden de hysteresis in duinparameters, maar hun effecten zijn moeilijk te kwantificeren. De effecten zullen daarom geparameteriseerd (empirisch) worden meegenomen. Desondanks wordt verwacht dat deze aanpak redelijke voorspellingen kan bieden voor de Rijnakken mits de empirische coëfficiënten per locatie worden bepaald. Sieben (2008) laat bijvoorbeeld zien dat er een duidelijke koppeling bestaat tussen de geforceerde (tijdgemiddelde) bodemligging en de duinhoogte, en het verloop van schuifspanning langs de rivier.

3.3 Mogelijk aanpak voor verdere uitwerking

Om de voorspelling van vaardiepte voor 6-8 weken te faciliteren en te presenteren, is de bedoeling de bodemhoogtevoorspelling te combineren met de waterstandvoorspelling (d.w.z. de afvoervoorspelling en waterhoogte). De wijze waarop de resultaten kunnen worden gepresenteerd is nog onderwerp van studie en discussie met de gebruikers. Gedacht wordt bijvoorbeeld aan een ontwikkeling van MGD als functie van tijd per MGD traject, met lijnen die de diverse realisaties van toekomstig afvoerloop betreffen. Deze data kan bijvoorbeeld worden gecombineerd met een kaart met een ruimtelijke visualisatie van de ligging van het knelpunt op verschillende tijdstippen.

Vooruitlopend op de discussies over de uiteindelijke vorm van het voorspelinstrumentarium, wordt aanbevolen een eerste versie, "mock-up", van de voorspelling van bodemhoogte in vereenvoudigde vorm op te zetten. Deze kan als demonstratie-tool worden ingezet om gezamenlijke beslissingen tot verbetering en definitieve implementatie te kunnen nemen.

Vorgesteld wordt in ieder geval de hybride methodiek te gebruiken, waarbij theorie en empirie (verwerking van meetgegevens) worden gecombineerd op een vergelijkbare wijze zoals in de vorige paragraaf beschreven. De methode beschrijft de demping en, eventueel, de verplaatsing van actueel gemeten kleinschalige morfologische verschijnselen.

Voor de methode zijn 2 typen meetdata beschikbaar:

- Covadem gegevens: de gegevens (lijndata en naar een rooster geïnterpoleerde data) zijn in principe voor alle Rijntakken beschikbaar, maar er is geen toestemming voor het gebruik Covadem voor dit doel.
- Tweewekelijkse multibeam gegevens (beheerpeilingen): de gegevens zijn ruimtelijke met hoge mate van detail beschikbaar voor Bovenrijn en Waal maar niet voor de overige Rijntakken.

Vanwege het ontbreken van toestemming voor gebruik Covadem data, wordt voorgesteld een eerste demonstratieversie te maken op basis van multibeam data voor een beperkt traject in de Waal.

Voor de opzet van een mock-up zijn de volgende stappen nodig:

1. Genereren van een 'duingemiddelde'-bodem (Z_{avg}) door een reeks multibeampeilingen van voldoende lange periode te middelen (bijvoorbeeld 1 jaar).
2. Definitie van een kromlijning rooster over de vaargeul. De roosterafstand wordt zodanig gekozen met twee of meer cellen in dwarsrichting en met een lengte van meerdere malen de duinafstand in langsrichting (100 à 500 m).
3. Algoritme voor het verwerken van de lokale ondieptes tot relatieve beddingvormen op het rooster:
 - a. Inlezen van de meest recente beheerpeilingen (multi-beam)
 - b. Bepaald verschil met de 'duingemiddelde' bodem (Z_{avg}) en combineer met het kromlijning rooster: voor ieder gridcel wordt het hoogste punt bepaald van de beheerpeiling (Z_m) en vervolgens de afwijking van de duingemiddelde bodem ter plaatse van die maximale bodemhoogte (als een maat voor de duinhoogte of afwijking van het evenwichtsprofiel), $\Delta Z = Z_m - Z_{avg}$. Locatie van dit punt is x_m, y_m voor iedere grid cel afzonderlijk. Er wordt niet gemiddeld over grid cellen.
 - c. Voor de mock-up nemen we voorlopig even een demping aan van de actuele duinhoogte op punt x_m, y_m per grid cel op basis van een eenvoudig relaxatiemodel vergelijkbaar met formule (3.1). Daarin wordt bij voorkeur de afwijking ΔZ toegepast ten opzichte van de evenwichtsdueinhoogte, maar om het eenvoudig te houden kan worden gekozen om hiervoor de afwijking ten opzichte van de duingemiddelde bodem te hanteren $\Delta Z = Z_m - Z_{avg}$ (de demping wordt mogelijk iets overschat). De verplaatsing van duinen wordt in dit model (voorlopig) nog niet beschouwd. Aangenomen wordt als ruwe benadering dat in de beschouwde periode van 6-8 weken duinen enkele honderden meters zijn verplaatst, en dat daarmee de duinen zich binnen 1 à 2 grid cellen hebben bewogen.
 - d. Ga uit van een tijdschaal van 20 dagen. In iedere grid cel kan op deze wijze de ontwikkeling van ΔZ als functie van tijd worden gesimuleerd. In werkelijkheid zal deze tijdschaal variëren per locatie en als functie van voorspelde afvoer. Dat is in de mockup vooralsnog niet nodig.
 - e. Combineer de resulterende bodemligging voor alle tijdstippen van 0 tot 8 weken met een ruimtelijk veld voor waterstand bij elke voorspelde afvoer. Het is voldoende om elke grid cel als een "tegeltje" te beschouwen met één waterstand. Wel betekent dit voor elke cel een vooraf vastgestelde Qh-relatie nodig is.
 - f. De rekentools zullen mogelijk worden geprogrammeerd als een Python applicatie via een GIS koppeling. Een flexibele of modulaire aanpak wordt aanbevolen om mogelijke voortschrijdende inzichten in de theorie en gewenste uitbreidingen snel te kunnen implementeren.
4. Selectie van een demonstratietraject: het is zinvol de methode toe te passen, testen en te verfijnen op basis van een beperkt traject met bodemvormen en goede beheerpeilingen (bijv. Midden-Waal). Dit hoeft niet noodzakelijk een MGD locatie te zijn maar kan voor demonstratie natuurlijk wel relevant zijn.

5. Demonstratieberekeningen. Vanwege de eenvoudige aanpak is de mock-up vooral bedoeld voor het dempen en afnemen van ondieptes na afloop van hoogwater. Bij voorkeur vergelijken met waarnemingen (hindcast) om een eerste validatieslag te kunnen maken.
6. Verwerking in presentatiemateriaal (kaarten, tijdgrafiek, etc.) na combinatie met voorspelling van de waterstand

Als op basis van de presentatie en discussies kan een plan worden opgezet voor het verder uitrollen van het systeem: aanbevolen wordt deze aanpak te concentreren voor een beperkt aantal locaties waar de ondieptes vaak optreden (dus alleen binnenbochten, een aantal bochtovergangen, MGD locaties, etc.). De meerdere realisaties van de afvoervoorspelling leiden tot een ensemble van bodemhoogtevoorspellingen (te combineren met de ensemble van waterhoogtes). Een belangrijk aandachtspunt is dat de voorspelling uitgaat dat de beddingvormen zich op natuurlijke wijze (via groei/demping en advection) ontwikkelen, maar in werkelijkheid kunnen tussentijds baggerwerkzaamheden worden uitgevoerd waardoor potentiële ondieptes (risico's op ondieptes) niet zullen optreden zoals voorspeld. Uiteraard biedt dit een zinvolle toepassingsmogelijkheid voor het beheer en onderhoud van de vaarweg, maar leidt wel tot extra onzekerheden voor gebruik door planners en verladers. Het is goed dergelijke (en andere) onzekerheden in de presentatie van de voorspellingen mee te nemen.

4 Conclusies

De maatgevende minstgepeilde diepte (MGD), welke wordt vastgesteld voor een aantal trajecten (vaarroutes), is afhankelijk van veranderingen in bodemhoogte. Onder invloed van stroming en sedimenttransport kunnen ondieptes verdwijnen of groeien. Voor de termijn van 6-8 weken zijn deze veranderingen vooral toe te schrijven aan plaatsvasten en verplaatsende bodemvormen met lengte schalen tot orde 100 m, en een tijdschaal van dagen tot maanden. Het betreft duinen, "kribvlammen" (ondieptes veroorzaakt door oeverbelijning) en bagger- en stortmaatregelen. De diverse filter/dune-track methoden die zijn ontwikkeld en toegepast in de afgelopen decennia kunnen worden toegepast om de relevante verschijnselen te identificeren, waarna met een semi-empirisch (hybride) model kan worden voorspeld of bestaande ondiepte locaties kunnen leiden tot MGD's. Diverse componenten voor een dergelijk model zijn beschikbaar, maar zijn nog niet gecombineerd tot een rekentool voor voorspellingen. Omdat de vorm en presentatie van een voorspellingstool voor vaardiepte nog wordt bediscussieerd wordt aanbevolen eerst een 'mock-up' (demonstratieversie met beperkte betrouwbaarheid) om te bespreken met de stakeholders. De aanpak hiervoor is in het memo verder uitgewerkt.

Referenties

- Allen, J.R.L. (1976) Computational models for dune time-lag: general ideas, difficulties and early results. *Sedimentary Geology* 16. p. 225-279.
- Brinke, W.B.M. ten, A.W.E. Wilbers, C. Wesseling (1999) Dune growth, decay and migration rates during a large-magnitude flood at sand and mixed sand-gravel bed in the Dutch Rhine River system. *Spec. Pub. Int. Assoc. Sedimentol.*, 28, 15-32.
- Buschman, F., A. Blom, T. van Dijk, M. Kleinhans, R. van der Mark (2017) Informatiebehoefte en aanbevelingen voor monitoring in de Bovendelta van de Rijn. NKWK-pilot 2016 - A2. Deltares rapport 11200356-000-ZWS-0004, Mei 2017.
- Dijk, T.A.G.P. van, Lindenbergh, R.C. & Egberts, P.J.P. (2008). Separating bathymetric data representing multi-scale rhythmic bedforms: A geostatistical and spectral method compared. *Journal of Geophysical Research*, 113, F04017, doi:10.1029/2007JF000950.
- Dijk, T.A.G.P. van, van der Mark, C.F., Doornbal, P.J., Menninga, J., Keppel, J.F., Rodriguez Aguilera, D., Hopman, V. and Erkens, G. (2012b). Onderzoek Meetstrategie en Bodemdynamiek. Deltares-rapport 1203849-000-BGS-0006, 92 pp.
- Fredsoe, J. (1982) Shape and dimensions of stationary dunes in rivers. *J. Hydr. Div., ASCE*, 108, HY8.
- Frings, R.M., and Kleinhans, M.G. (2008) Complex variations in sediment transport at three large river bifurcations during discharge waves in the river Rhine. *Sedimentology* 55, 1145-1171, <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-3091.2007.00940.x>
- Giri, S., S. van Vuren, W. Ottevanger and K. Sloff (2008) A preliminary analysis of bedform evolution in the Waal during 2002-2003 flood event using Delft3D. *Proceedings of MARID-2008*, Leeds, UK.
- Kleinhans, M.G. (2005) Dune-phase fluvial transport and deposition model of gravelly sand. *Fluvial Sedimentology VII*, geredigeerd door Michael Blum, Susan Marriott, Suzanne Leclair. *Spec. Pubs. Int. Ass. Sediment*, 35, 75-97.
- Mark C.F. van der, Blom A. 2007. A new and widely applicable tool for determining the geometric properties of bedforms. In: *Civil Engineering and Management Research Reports 2007R-003/WEM-002 1568-4652*: Enschede, Netherlands.
- Ruijscher, T.V. de, S. Naqshband and A. J. F. Hoitink (2020) Effect of non-migrating bars on dune dynamics in a lowland river. *Earth Surf. Process. Landforms*, ESPL, Wiley Online Library, DOI: 10.1002/esp.4807
- Sieben, J. (2001) Voorstel duinen in het bos. RIZA WSR memo 2001/025. 26 nov 2001.
- Sieben, J. (2006) Bed level changes during flood, a case study of the Waal River. Rijkswaterstaat, RIZA Werkdocument 2006.014.
- Sieben, J. (2007) Ruimtelijke variaties in duinhoogte. RIZA Werkdocument 2004.166x, 20 Maart 2007.
- Sieben, J. (2008) Taal van de rivierbodembodem. Parameters voor morfodynamiek in rivieren. *Waterdienstrapport WD 2008-049*. 13 juni 2008.
- Sieben, J. en G. van der Loo (2014) Inschatting representatief minimum uit actuele bodemligging, methodiek en toepassing Rijntakken. RWS Waterdienst en CIV, memo 19 mei 2014.
- Sloff, C.J. (2001a) Morfologische studie BOS Baggeren met Delft2D-Rivieren. Verslag parallelstudie. WL | Delft Hydraulics rapport Q2844.00. Oktober 2001.

- Sloff, C.J. (2001b) Morfologische module BOS Baggeren Fase 1. WL | Delft Hydraulics rapport Q3162.00. Dec 2001.
- Sloff, C.J., M. Ververs, J. Boelens, D. Waardenburg, A. Sieben (2002) Morfologische Module BOS Baggeren fase 2. Implementatie. WL | Delft Hydraulics rapport Q3261.00. Nov. 2002.
- Wilbers, A.W.E. (2003) The development and hydraulic roughness of subaqueous dunes.
- Wilbers, A.W.E., en W.B.M. Ten Brinke (2003) The response of subaqueous dunes to floods in sand and gravel bed reaches of the Dutch Rhine. *Sedimentology*, Volume 50, Issue 6, December 2003. Pages 1013-1034. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3091.2003.00585.x>

DRAAFT

C Verslag klankbordbijeenkomst



Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

Aan Klankbord leden "Verwachte waterdiepte op de Rijntakken voor een termijn van 6-8 weken (zie "deelnemers" en "afschrift aan")

**Rijkswaterstaat Water,
Verkeer en Leefomgeving**

Lange Kleiweg 34
2288 GK RIJSWIJK
Postbus 2232
3500 GE UTRECHT
T 088 7970700
F
www.rijkswaterstaat.nl

Contactpersoon
Jan Paul Kors

T +31621803324
janpaul.kors@rws.nl

Datum

11 september 2020

verslag

Verslag van klankbord bijeenkomst

Omschrijving	Klankbord (SKYPE) bijeenkomst onderzoek Verwachte waterdiepte op de Rijntakken over een periode van 6-8 weken.
Datum bespreking	10 september 2020
Deelnemers	Jan-Paul Kors, Vincent Beijk, Frederik Vinke, Marc Philippart, Jaap Paauwe, Hendrik Buiteveld, Jan Hendrik Beks, Arjan Sieben, Roelof Weekhout Deltares: Rolien van der Mark, Matthijs den Toom, Kees Sloff, Remi van der Wijk
Afschrift aan	Deelnemers en Milou Wolters, Anne-Marie Alewijn, Saskia van Vuren, Neeltje Kielen, Eric Sprokkereef, Jasper Stam, Jeroen Wensink, Nathaly Dasburg-Tromp,

Dinsdag 10 september 2020 heeft het RWS-DELTARES-projectteam "Verwachte waterdiepte op de Rijntakken over een termijn van 6-8 weken" de onderzoeksresultaten tot op dat moment gepresenteerd.

Doel onderzoek

Verkrijgen van inzicht in de betrouwbaarheid en nauwkeurigheid waarmee op dit moment, gebruikmakend van bestaande modellen, tools en informatiestromen, een verwachting van de waterdiepte kan worden afgegeven voor de Rijntakken voor een voorspeltermijn van 6-8 weken voor een scenario met een vaste bodem en een dynamische bodem.

Doel bijeenkomst

Aan de deelnemers is gevraagd feedback te geven op de behaalde onderzoeksresultaten tot dit moment, waarmee het projectteam e.e.a. binnen het onderzoek, de doelstellingen en/of benoemde eindproducten kan aanscherpen en/of bijstellen en eventueel de opzet van het onderzoek kan aanpassen.

Welkom / Voorstelrondje.

Na een welkomwoord stellen de aanwezigen (SKYPE-bijeenkomst) zich kort voor en maken duidelijk welke rol en/of relatie men heeft t.a.v. het onderzoek.

Introductie onderzoek

RWS INFORMATIE

Pagina 1 van 5

De aanwezigen worden kort meegenomen in de aanleiding, opdracht en uiteindelijk op te leveren producten voor het onderzoek.

Rijkswaterstaat Water,
Verkeer en Leefomgeving

Aanleiding

N.a.v. evaluatie Droogte periode 2018 heeft de Beleidstafel Droogte de aanbeveling overgenomen te onderzoeken in hoeverre voorzien kan worden in de behoefte:

- Een lange(re) termijn verwachting van de waterdiepte op de Nederlandse rivieren voor een termijn van 6-8 weken, en in het bijzonder voor de Rijntakken (Waal, Neder-Rijn, Lek, Pannerdensch Kanaal en IJssel).

Datum
11 september 2020

Doel

Het onderzoek is opgestart vanuit de volgende doelen:

- Verkrijgen van inzicht in de betrouwbaarheid en nauwkeurigheid waarmee op dit moment, gebruikmakend van bestaande modellen, tools en informatiestromen, een verwachting van de waterdiepte kan worden afgegeven voor de Rijntakken voor een voorspeltermijn van 6-8 weken voor een scenario met een vaste bodem en een dynamische bodem;
- Verkennen wat de toepassingswaarde is van een verwachting van de waterdiepte;
- Verkrijgen van inzicht in jaarlijkse Inspanningen.

Opdracht

Presenteren van betrouwbare verwachting van waterdieptes i.r.t. rivier afvoeren en bodemligging tot voor termijn van 6-8 weken. op basis van bestaande modellen en informatiestromen

Door hiervoor inzicht te genereren in:

- Verwachte rivierafvoeren over deze termijn,
- Verwachte waterstanden over deze termijn,
- Verwachte bodemdynamiek over deze termijn,
- en het uiteindelijk combineren van waterstand- en bodem informatie (dynamisch en statisch) over deze termijn met als resultaat inzicht in bruikbaarheid, nauwkeurigheid van de gepresenteerde waterdiepte (t.b.v. toepasbaarheid LCW en Transport Sector).

Producten

Uitvoering van de opdracht moet de volgende producten opleveren:

- Rapportage met hierin o.a. de procesbeschrijving, nauwkeurigheid en betrouwbaarheid, toepassingswaarde, jaarlijkse inspanningen, en overige bevindingen,
- Het resultaat van het eenmalig doorlopen van de procesbeschrijving.

Resultaten tot nu

Het onderzoek bestaat uit 3 onderdelen:

- Onderdeel 1 – in hoeverre kan een verwachting in waterdiepte worden afgegeven voor 6-8 weken vooruit, gebruikmakend van bestaande info/data/tools, voor statische en dynamische bodem
- Onderdeel 2 – Verkenning toepassingswaarde
- Onderdeel 3 – Inzicht in jaarlijkse inspanningen

Tijdens deze bijeenkomst wordt ingegaan op de behaalde resultaten t.a.v. onderdeel 1 met het volgende onderscheid:

- a) Opstellen procesbeschrijving

- b) Eenmalig genereren van verwachting
- c) Inzicht in betrouwbaarheid en nauwkeurigheid

Rijkswaterstaat Water,
Verkeer en Leefomgeving

Bij begin van de presentatie resultaten tot nu worden de aanwezigen gewezen op de grootste uitdagingen:

Datum
11 september 2020

- Brede pluim van afvoeren door grote onzekerheid in weersverwachting
 - Onzekerheden (modelconcept, invoer) stapelen zich op.
 - Welke waarde heeft een waterdiepte-verwachting en voor wie?
- Hoe visualiseren, zodat modelresultaten leiden tot waardevolle informatie voor gebruiker
 - Complex om diepte te plotten (diepte, x, y, t, bandbreedte)

Daarna wordt ingegaan op de onderzoeksresultaten t.a.v.:

- Procesbeschrijving "statische bodem":
 - o Afvoer
 - o Waterstand
 - o Bodemligging
 - o Waterdiepte
- Procesbeschrijving "dynamische bodem":
 - o Bodem

Discussie – Feedback

Na de presentatie over de behaalde resultaten tot nu ontstaat een levendige discussie. Deze discussie kan samengevat worden onder de volgende thema's:

Nauwkeurigheid

- Geconstateerd wordt dat de onzekerheid in waterstanden groter is dan verschil in morfologische ontwikkelingen.
- Bandbreedte in mogelijke waterstanden is behoorlijk groot voor deze periode (3 meter!), dat is meer dan de morfologische variatie (1 meter).
- Lastig om nauwkeurigheid te vangen in 1 waarde, aangezien de bandbreedte in afvoeren (pluim) door het jaar heen niet hetzelfde is. Goed om te realiseren dat de getoonde figuren een willekeurige momentopname zijn.

Kwaliteit / Betrouwbaarheid

- Vergelijk de op basis van BfG verkregen Lobith reeks waterafvoeren met die van RWSoS. Een vergelijking is mogelijk echter op voorhand is duidelijk dat er een verschil is omdat de BFG afvoerreeks op een andere wijze tot stand komt dan die van RWSoS
- Valideren van de bodemligging aan de hand van de CoVadem gegevens, of eventueel gebruik maken van de CoVadem bodem als gemeten bodem (2 wekelijks MBP) ouder is;
- Echter liever oude multibeam peilingen in plaats van CoVadem data in dit stadium (opgemerkt wordt dat er nog wordt gewerkt aan de nauwkeurigheid van CoVadem, daarbij blijft de vraag staan of een CoVadem vloot van 200 schepen voldoet).

Toepasbaarheid / Bruikbaarheid

- Voorgesteld wordt om te werken naar kansen van een bepaalde waterdiepte in plaats presenteren van pluimen als informatie naar beoogde gebruikers.

- Voorstel t.a.v. gebruik van de informatie richting de industrie en producenten is de seizoenvariatie van te voren aan te geven in de vorm van een soort van klimaatatlas (dit dan vooral t.b.v. voorraadbeheersing).
- Waarschijnlijk komen er veel tegenstrijdige behoeftes vanuit de markt (schippers en verladers (verlader kan tevens industrie zijn)); Schippers verwachtingen tot 5 dgn, marges/bandbreedte 10 cm, dus geen meters, Verladers zitten op weken, industrie meer naar seizoen voorspelling)
- Verwachting horizon voor verschillende stakeholders kwantificeren (incl. nauwkeurigheid).
- Het zou de LCW ook helpen om te zien hoe de informatie gewenst is voor hun werkzaamheden.
- Voor de LCW verschillen de instellingen van de regelwerken als stip op de horizon, niet alleen voor de waterdiepte maar ook voor andere afwegingen. Afweging doet LCW o.b.v. minst economische schade.

Rijkswaterstaat Water,
Verkeer en Leefomgeving

Datum
11 september 2020

Processen:

T.a.v. de processen wordt feedback gegeven als:

- Heb aandacht voor alternatieve onderzoeksmethode. Denk i.h.k.v. omdenken aan Voorspelling m.b.t bodemligging puur op basis van data uitgevoerd door data scientists zoals uitgevoerd binnen de projecten MGD 2.0 en Digitale Rivier Experiment MGD (aandachtspunt hierbij is het ontbreken van fysica bij onderzoek MGD 2.0).
- Waarom de gegevens van de BfG gebruiken in plaats van RWSOS? Eerste reactie hierop van het projectteam: Die van de BfG nemen een correctie mee in de metrologische verwachtingen en zijn daarmee naar verwachting de beste, echter dat is nu nog niet gekwantificeerd.

Aandachtspunten

- 2-wekelijkse multibeam data gaat mogelijk verdwijnen vanwege een verschil in toetsen van baggercontract. Controle vervalt hiermee. Zou dit project gebruikt kunnen worden om het belang van multibeam gegevens aan te kaarten. Minister hecht grote waarde aan bevaarbaarheid van vaarwegen/rivieren. Jaap Paauwe checkt of dit aan de orde is. Indien actie opgestart moet worden is RWS ON aan de lat om dit aan te kaarten. Beslissing te stoppen met 2 wk MBP is verantwoordelijkheid van RWS ON en niet RWS PPO.
- Op termijn zou CoVadem de beste bodemgegevens kunnen geven, dat gaat nog even(tjes) duren (CoVadem werkt aan de maximalisatie, slim algoritme, verbeteringen, meer deelnemende schepen);
- CoVadem kan ook gegevens bieden voor buiten de vaargeul boven op de multibeam data;
- Nuttig om CoVadem te gebruiken om gegevens terug te geven aan de markt, al dan niet met een statistische beschouwing voor de bodemgegevens. Feitelijk krijg je dan een "pluim" voor de bodem data.
- In Duitsland is men al enige tijd bezig met onderzoek naar verwachtingen (vraag is dit waterdiepte verwachtingen of waterstanden?), daar is duidelijk behoefte aan vanuit de scheepvaartsector;
- BfG gaat de MGD (??) voorspellen en valideren met extra metingen in de Rijn (~5 weken vooruit);
- In een eerder opgesteld 8-Puntenplan is een aantal gewenste verbeteringen voor Duitsland vastgesteld.

- Probeer te achterhalen hoe de Duitsers de voorspellingen gaan verstrekken en hoe zien zij de toepasbaarheid, beeld van de kwaliteit en betrouwbaarheid?

**Rijkswaterstaat Water,
Verkeer en Leefomgeving**

Datum
11 september 2020

Afsluiting, dankwoord

De aanwezige worden hartelijk bedankt voor inzet, voorstellen en goede feedback. De aanwezigen bedanken de organisatoren van deze bijeenkomst voor de goede opzet en begeleiding.

Acties:

Klankbordgroep-leden zullen presentatie "Behaalde resultaten tot nu, en bijbehorende filmpjes, toegestuurd krijgen.

- Klankbordgroep-leden zullen op hoogte gehouden worden de nog uit te voeren toepasbaarheid onderzoek onder gebruikers, waarbij ingegaan zal worden op de zgn "verwachtingen horizon" van de verschillende beoogde gebruikers (Sector: verladers-vervoerders-producenten-industrie).

D Enquête transportsector

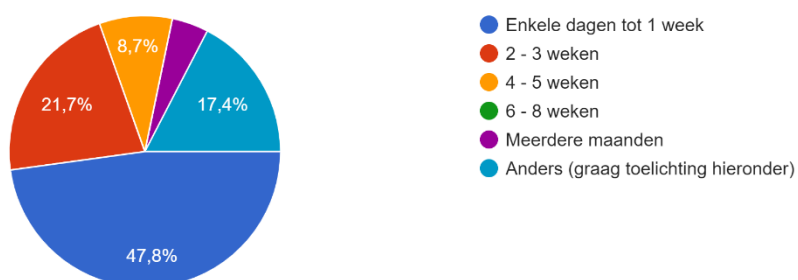
D.1 Vraag 1

Over het algemeen geldt dat toekomstvoorspellingen/verwachtingen steeds onzekerder worden naarmate de termijn langer wordt.

1. Aan welke voorspel-termijn heeft u behoefte om uw bedrijfsvoering verder te verbeteren? *

- Enkele dagen tot 1 week
- 2 - 3 weken
- 4 - 5 weken
- 6 - 8 weken
- Meerdere maanden
- Anders (graag toelichting hieronder)

23 antwoorden

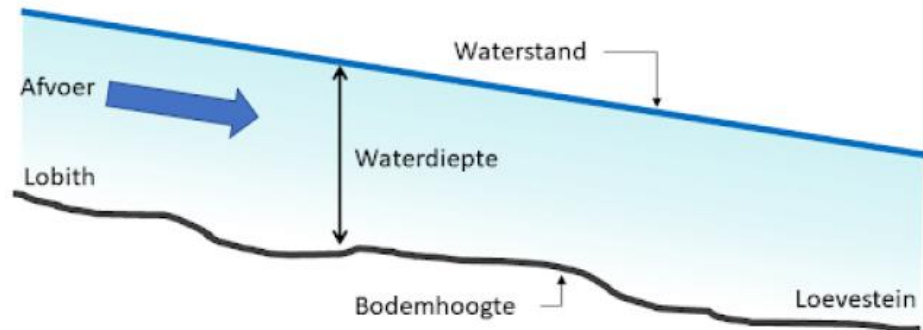


Toelichtingen:

Ik laad vaak op de maas/Waal en ben binnen enkele dagen voorbij de droge punten op de rivier, verder zijn mijn laadpartijen niet een vast tonnage zodat ik tot het laatste moment de diepgang van het schip aan kan passen aan de waterstand
Een accurate voorspelling
Vrachtenmarkt kun je niet verder als een week beïnvloeden
Voor de operationele planning is 7 dagen voldoende. Voor de lange termijn planning geldt hoe langer van tevoren hoe beter. Je kunt dan nl. beslissen eventuele transporten naar voren te halen of naar achteren te schuiven teneinde laagwater toeslagen te voorkomen cq verminderen
Graag zouden we het nog wel langer willen maar naar mijn inziens niet haalbaar, niks zo veranderlijk als het weer dus ook de voorspellingen van hoeveel water er komt. En wie is dan de schuldige als het water niet komt?
Korte termijn: 1 week én middellange termijn: tot 2 maanden
Een termijn waarbij met een bepaalde zekerheid de uitkomst te verwachten is. Een lange termijn met een grote mate van onzekerheid heeft geen waarde en doet eerder afbreuk aan planning- en verwachtingsmodellen.
Laten we nu gewoon nuchter blijven. Ik had hierboven natuurlijk gewoon "enkele dagen tot 1 week" aan moeten klikken. Kijk nu gewoon naar de waterstandvoorhersage van Baden-Wurtemberg. Tot 12 dagen van te voren kan het zijn dat het water nog een eind daalt, máár, als het regent komt er water bij. Jongens, we zijn hopelijk toch nuchtere en normaal denkende mensen mag ik hopen. Voor 1 week is het al moeilijk om aan te geven wat de waterstand dan zal zijn, laat staan voor langere tijd. Dat is gewoon natte vingerwerk, en gewoon nooit exact te voorspellen.
Waterstand voorspellingen kan ik op elwis.de vinden. En regen voorspellen ? Langer als 1 week is onbetrouwbaar
Onze besteltermijnen gaan niet over 1 maand heen
Het tijdig kunnen inrichten van alternatieven.

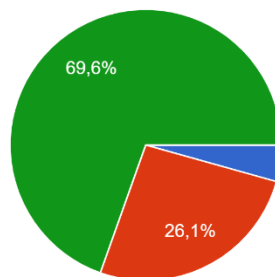
D.2 Vraag 2

2. Wat is uw specifieke behoefte, welke parameter is voor u het meest van belang? Inzicht in (toekomstig verloop in): *



- Rivier-afvoer (in m³/s)
- Waterstand (in meter+NAP of in meter+PNP)
- Bodemhoogte (in meter+NAP)
- Waterdiepte (in meter)
- Anders (graag toelichting hieronder)

23 antwoorden



- Rivier-afvoer (in m³/s)
- Waterstand (in meter+NAP of in meter+PNP)
- Bodemhoogte (in meter+NAP)
- Waterdiepte (in meter)
- Anders (graag toelichting hieronder)

Toelichtingen:

Op een bepaald vak de minste diepgang weergeven. Bv het vak vreeswijk schoonhoven.

Waterdiepte is de parameter i.v.m. diepgang van de schepen.

Dat bepaalt vaardiepte van de schepen

D.3 Vraag 3

De volgende vragen gaan over een voorspel-termijn van 6-8 weken.

3. Hoe zou een diepteverwachting voor een voorspel-termijn van 6-8 weken u helpen in uw bedrijfsvoering? *

Jouw antwoord

Het geeft mij inzicht, waar ik strategisch op kan in spelen bij vrachtonderhandeling.
Mocht blijken dat het water blijft zakken, of er juist een piek komt, kunnen zowel de schippers als de klanten hierop inspelen door tijdig de voorraden aan te vullen of juist op de voorraden in te teren. Let wel, hiermee zal de markt en marktwerking terdege worden beïnvloed!
Weinig, zoals al aangegeven in vraag 1. Ik denk dat veel collega's die over langere afstand varen hier wel veel baat bij hebben
6-8 weken voorspellen zal mij zeker helpen maar om de betrouwbaarheid zou 1 tot 2 weken voorspelling al genoeg zijn omdat ik als schipper nie verder vooruitkijk dan 1 week
Niet. Omdat deze toch niet nauwkeurig is. Ze kunnen het weer van een week in de toekomst al niet eens nauwkeurig voorspellen.
Voor een schipper met vast werk heeft dit zeker toegevoegde waarde. Voor mij, actief op de spotmarkt, is een week vooruit al voldoende.
Niet
zeer zeker, door een beter inzicht kunnen wij besparen op laag water toeslagen
Niet veel, is veel te ver vooruit.
Het is bijna onmogelijk om een voorspelling van 6 tot 8 weken te maken
Beperkt
Het helpt bij het plannen van de vloot en voorzien ik klantbehoefte
Het bevordert de optimale inzet van de vloot en geeft beter inzicht in de ontwikkelingen van onze markt in die periode. Waterdieptes en daarmee geladen tonnen naar Rijnbestemmingen hebben invloed op de vraag naar binnenvaart schepen
Het efficiënt afladen van een binnenvaartschip
Betere planning en verdeling van vervoerscapaciteit.
Voegt niets toe. Er kan nog geen betrouwbare voorspelling gegeven worden over 2 of 3 dagen, laat staan een voorspelling voor langere termijn. Een 'voorspelling' over een langere periode is leuk voor een waterschap of dergelijke instantie maar niet voor de commerciële binnenvaart. Bij hun maakt het niets uit of het water 30cm hoger of lager staat. Elke cm die afwijkt van de werkelijkheid die kost ons geld. Lig je te diep dan moet je lichten, is de waterstand hoger dan had je meer kunnen laden. Elke 10cm afwijking in de waterstand, die afwijkt van de voorspelde waterstand, is een minimaal verschil van 100 ton. Kom eerst maar een met een betrouwbare voorspelling van 3 dagen dan is er al een hele verbetering, en praat dan later over een lagere termijn. Een voorspelling van 6-8 weken is luchtfietserij of wensdromen en heeft niets met realiteit te maken.
Eigenlijk niet want wij nemen een transport max 1 week van te voren aan, dus ials de waterstand op het moment van belading ca 1,week van te voren bekend is is dit voldoende.Het zou zelfs nadelig kunnen zijn omdat op deze manier verladers lading alleen maar gaan laten vervoeren bij verwachte hogere waterstanden. Dit zou er in resulteren dat er bij laag water geen lading te vervoeren zou zijn. Voor de binnenvaart ondernemer een slechte zaak.

Niet veel. Een week tot 14 dagen vooruit zou meer dan genoeg zijn
Zie antwoord op vraag 1. DIT IS NOOIT EXACT TE VOORSPELLEN. Alstublieft mensen, gebruik je nuchtere verstand. Het probleem is dat WIJ alles maakbaar en onder controle willen hebben. En gelukkig, dat is niet zo!
Voor lange termijn opdrachten interessant .
6-8 weken is erg ver vooruit voor onze bedrijfstak en we zijn bang voor grotere onnauwkeurigheid
Zorgen voor minimale verschepingen tijdens laagwater.
plannen is vooruitzien. je moet zeker zijn dat je productie afgevoerd kan worden, anders lopen bij ons de interne opslagcapaciteiten vol. Voorts maak je afspraken met afnemers inzake hoeveelheden. Deze afspraken wil/moet je nakomen.

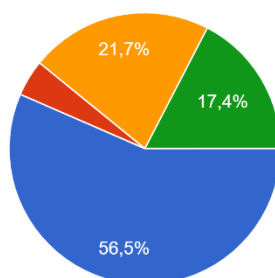
D.4 Vraag 4

4. Voor welke locatie / welk traject wenst u een toekomstige verwachting? *

Rijntakken	Totaaltraject	MGD-traject
Waal	Millingen-Loevestein	Millingen-Maaswaalkanaal Maaswaalkanaal-ARK ARK-Loevestein
Pannerdensch Kanaal	Pannerdensch Kop – IJsselkop	Pannerdensch Kop – IJsselkop
IJssel	IJsselkop-Ketelmond	IJsselkop-Twentekanaal Twentekanaal-Zwolle-IJsselkanaal Zwolle-IJsselkanaal-Ketelmond
Neder-Rijn	IJsselkop - Amsterdam Rijn Kanaal (ARK)	IJsselkop-Driel Driel-ARK
Lek	Amsterdam Rijn Kanaal-Krimpen ad IJssel	ARK-Hagestein Hagestein-Krimpen ad IJssel

- Een specifieke pegel in Duitsland (geef hieronder aan welke)
- Een specifiek meetstation in Nederland (geef hieronder aan welke)
- Het ondiepste punt op een MGD-traject (zie tabel, geef hieronder aan welke)
- Andere locatie / traject (graag hieronder aangeven welke)

23 antwoorden



- Een specifieke pegel in Duitsland (geef hieronder aan welke)
- Een specifiek meetstation in Nederland (geef hieronder aan welke)
- Het ondiepste punt op een MGD-traject (zie tabel, geef hieronder aan welke)
- Andere locatie / traject (graag hieronder aangeven welke)

Toelichtingen:

Alle in de tabel genoemde locaties.
Pegels: Karlsruhe, Kaub, Duisburg en Nijmegen; MGD: waal, ijssel, nederrijn
Nijmegen is een belangrijk punt, daar valt de vaardiepte van de Waal vanaf het Maas-Waal kanaal tot Millingen uit af te leiden en de waterstand van tiel voor het aansluitende traject tot Gorinchem
pegel kaub want die spreekt over bijna heel de rhein
Nijmegen
Duisburg Ruhrort
Per aangegeven vak aub
wij bevrachten in geheel West Europa, dus alle rivieren zij voor ons van belang
Niet specifiek, eigenlijk vooral Kaub, Koblenz, Köln, Rhur, emmerich, Gelderse IJssel, Waal
Ijssel
Duisburg
Mgd op de Waal. Alsmede pegel Keulen, Kaub en Maxau
Kaub, Oestrich, Maxau
caub
Alle betreffende trajecten. Uiteraard incl. de ondiepste punten.
Kaub en Maxau
In het traject zeehavens- Duits achterland zijn diverse pegels van belang. Bv de gehele waal, maar ook de IJssel en Nederrijn. Verder ook de pegels in Duitsland afhankelijk van de bestemming.
Rijn: maxau, kaub, Koblenz, Duisburg
tsjonge jonge zeg, er word verwacht. Maar of het ook uitkomt?????????
Maxau, kaub
alle trajecten voor ons van toepassing
Duisburg
Keulen/

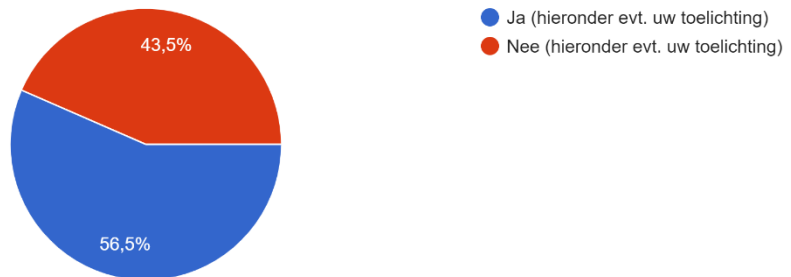
D.5 Vraag 5

De verkenning naar verwachte waterdiepte voor een voorspel-termijn van 6-8 weken beperkt zich op dit moment tot de Rijntakken in Nederland, dat wil zeggen de Waal, Neder-Rijn, Lek, Pannerdensch Kanaal en IJssel.

5. Hebben verwachtingen voor de Nederlandse rivieren voor u waarde, als vergelijkbare verwachtingen over de grens niet beschikbaar zijn? *

- Ja (hieronder evt. uw toelichting)
- Nee (hieronder evt. uw toelichting)

23 antwoorden



Toelichtingen:

Er is veel transport naar het Ruhrgebied net over de grens en ook voor transport naar de Maas is het zinvol. Daarnaast werkt men in Duitsland aan gelijksoortige initiatieven.
Op enkele binnenlandse trajecten na gaan veel ladingstromen richting Duitsland, de kennis over waterstanden daar is belangrijker aangezien het er veelal ondieper vaarwater betreft
Ik vaar vooral binnenlands, maar het zou zeker toegevoegde waarde hebben als de belangrijkste Duitse pegels ook voor langere termijn voorspeld kunnen worden
Jazeker verwachtingen zijn zeer belangrijk ook in Nederland
Als jullie 6-8 weken vooruit kunnen voorspellen dan kunnen de Duitsers die data vast ook wel gebruiken voor hun eigen verwachtingen
Vanwege internationale vaart door mij, is de diepte in Nederland niet altijd maatgevend voor mij.
elke extra informatie die wij kunnen krijgen is van belang. Een lage waterstand op de IJssel betekent nl. automatisch ook een lage waterstand op de Rijn in Duitsland
Opkomend of dalend water komt vanaf Duitsland dus is deze informatie noodzakelijk
Nee want een en ander is onlosmakelijk met elkaar verbonden
Alles is beter dan niets. Maar liever ook waterstanden boven Rijn
In de mindere mate dan Rijn pegels, maar toch van interesse
Ja, maar wel beperkt omdat veel van onze transporten verder de Rijn opgaan.
De voorspelling is van belang voor het gehele traject wat met worden gevaren .
Wij varen internationaal, dus alleen in NL heeft voor mij geen zin.
Veel binnenlandse trajecten
Binnenlands-transport
Hoewel we ook al gebaat zijn met NL waarden, is de waterstand van de Rijn in Duitsland (monheim am Rhein) voor het meest belangrijk.

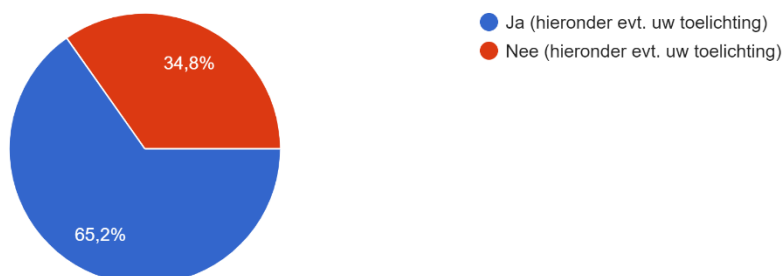
D.6 Vraag 6

Een toekomstige verwachting (in afvoer, waterstand, of waterdiepte) heeft altijd een bandbreedte door de grote onzekerheid in de weersverwachting. Het (a) interpreteren van dergelijke pluimen en vervolgens (b) besluiten nemen op basis van een onzekere toekomstverwachting kan lastig zijn. De werkelijkheid kan ook buiten de pluim vallen.

6. Heeft een verwachting met zekere bandbreedte voor u toch toegevoegde waarde, ziet u toepassingsmogelijkheden voor uw bedrijfsvoering? *

- Ja (hieronder evt. uw toelichting)
- Nee (hieronder evt. uw toelichting)

23 antwoorden



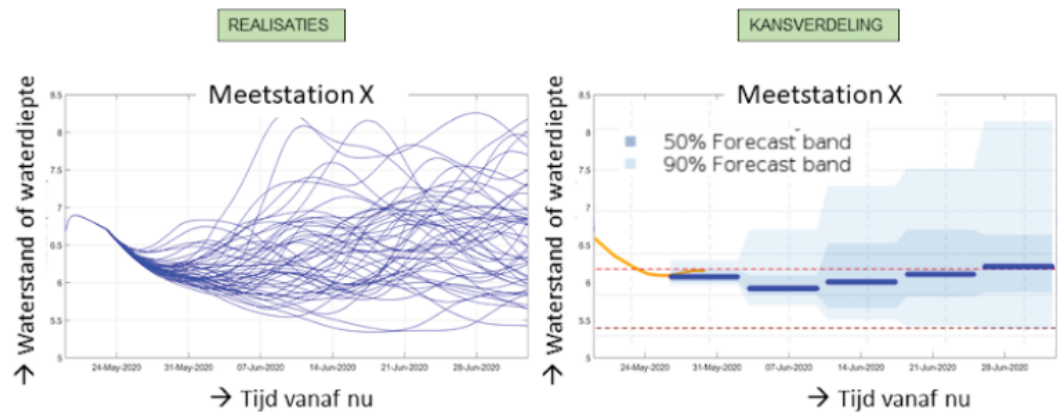
Toelichtingen:

Maximaal 2 decimeter.
Dat ligt aan de grootte van de bandbreedte. Als dit om 20-25 cm zou gaan is dit acceptabel, wanneer er een breedte van 0,5m is, is de voorspelling niet echt toe te passen in de praktijk mij als schipper kan het een hoop rust geven als je ongeveer weet waar je aan toe bent! Als je maar een beetje eenrichtlijn hebt dan weten wij al of het "volle bak" wordt of op waterstand
Zoals jullie al aangeven. Voorspellingen zijn veel te onnauwkeurig.
een bandbreedte van 50 cm diepgang is voor ons al een enorme verbetering omdat dit een trend aangeeft waarop wij kunnen plannen
Onze planning is altijd op korte termijn
Altijd goed. Hoe verder vooruit, hoe beter.
Ja ,aar zoals eerder aangegeven, er moet wel een redelijke mate van zekerheid zijn. Lukt dat niet is het beter de termijn te verkorten waarbij meer zekerheid kan worden gegeven.
Wij zitten in de spotmarkt. Weten soms nog niet wat we de volgende dag gaan doen.
De bruikbaarheid valt of staat met de mogelijke nauwkeurigheid van de weergaven
Geeft mogelijkheid om tijdig te schakelen
ik ga er wel vanuit dat de waarde binnen de bandbreedte blijft.

D.7 Vraag 7a en 7b

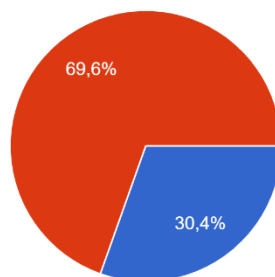
Een pluim komt tot stand door computerberekeningen uit te voeren met meerdere verschillende weersverwachtingen. Zo ontstaat een reeks aan mogelijke uitkomsten (realisaties), die allemaal plausibel zijn. De bandbreedte kan worden weergegeven mbv deze realisaties of uitgedrukt als kansverdeling.

7a. Heeft u voorkeur voor weergave in mogelijke realisaties (links) of in kansen (rechts)? Hieronder ter illustratie een voorbeeld. *



- Mogelijke realisaties (hieronder evt. uw toelichting)
- Kansen (hieronder evt. uw toelichting)

23 antwoorden

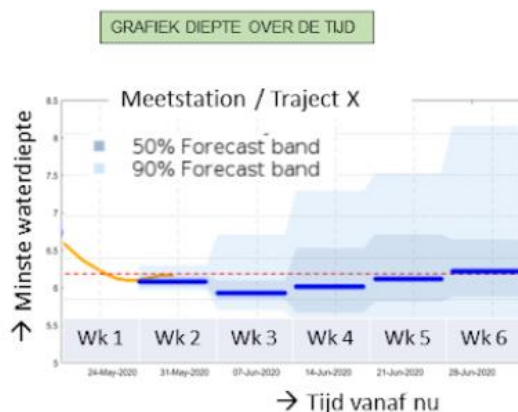
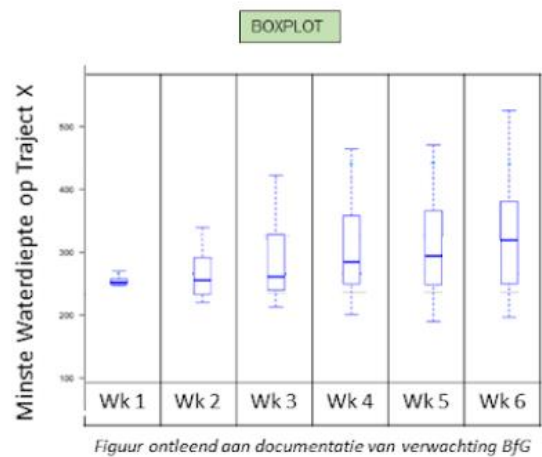


- Mogelijke realisaties (hieronder evt. uw toelichting)
- Kansen (hieronder evt. uw toelichting)

Toelichtingen:

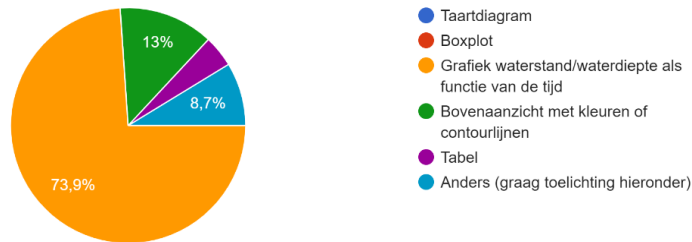
De tabel kansverdeling is overzichtelijker en makkelijker leesbaar.
Hier kan eventueel een duidelijker trend ontdekt worden, en persoonlijke inschattingen beter worden overgenomen
De eerste grafiek geeft voor een leek een zeer onduidelijk beeld, de 2e geeft een duidelijke en naar mijn mening realistische verwachting
dat gebruiken ze bij pegel maxau ook is zeer nuttig
Dit ziet er overzichtelijker uit
weergave in kansen heeft de voorkeur. Dit is nl. overzichtelijker.
Is een stuk duidelijker, hoewel het bij beide altijd onzeker blijft wat er komt of niet komt
Zekerheid heeft de voorkeur
Praktischer dan de realisatie tabel.
Realisaties is een warboel van lijnen. Op zich prachtig, maar daar heb ik niets aan.
Pluimen / realisaties te druk
meest eenvoudig

7b. Welke wijze van presentatie heeft uw voorkeur / kunt u goed interpreteren? *



- Taartdiagram
- Boxplot
- Grafiek waterstand/waterdiepte als functie van de tijd
- Bovenaanzicht met kleuren of contourlijnen
- Tabel
- Anders (graag toelichting hieronder)

23 antwoorden



Toelichtingen:

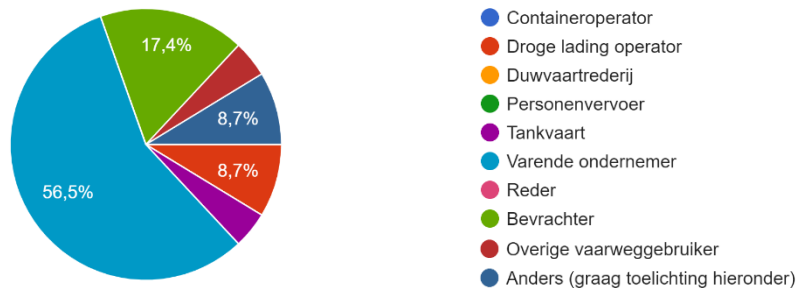
Het bovenaanzicht geeft visueel het snelst inzicht, enige nuancering (een legenda) naar meeteenheden is wel belangrijk.
De grafiek en boxplot geven beide een duidelijke en gedetailleerde weergave van de verwachting
Hou het simpel zie waterstand tabel rws
grafiek is het meest overzichtelijk
Als dit een exacte weergave is van diepte, of droogte dan vind ik dit prachtig.
Grafiek of tabel beiden het helderst afleesbaar
geen mening

D.8 Vraag 8

8. Wilt u aangeven wat voor functie u vervult in de logistieke keten? *

- Containeroperator
- Droge lading operator
- Duwvaartrederij
- Personenvervoer
- Tankvaart
- Varende ondernemer
- Reder
- Bevrachter
- Overige vaarweggebruiker
- Anders (graag toelichting hieronder)

23 antwoorden



Toelichtingen:

Nautisch advies.
bevrachtingskantoor voor droge lading in de binnenvaart
Tankvaart bevrachter
Bevrachter Tankvaart
We zijn verlader, logistiek dienstverlener en reder
wij zijn verlader van goederen en maken gebruik van beroepgoederenvervoer (bevrachter)

D.9 Vraag 9

9. Heeft u aanvullende adviezen, suggesties, opmerkingen ten aanzien van voorspellingen van het riviersysteem, die u graag aan Rijkswaterstaat wilt meegeven? Al uw feedback is welkom.

Jouw antwoord

zorg voor zeer goed contact met Duitsland want daar komt uiteindelijk het water vandaan dus informeer bij hun vooral wat het beste is
De voorspellingen worden altijd weergegeven per vijf of tien cm. Zeker bij laagwater zou dit per cm moeten, zoals ook in Duitsland al gebeurt.
Het is al jaren goed zoals het is. Je kunt gewoon niet dieper. Wat je ook meet... Je hebt nu covadem.... allemaal onzin weggegooid geld. Er zijn hele simpele berekeningen te maken qua diepgang. En wat vergeten word de ervaring van de schipper..... Neem van mij aan als u de diepes gaat afgeven zullen de schepen minder meenemen. Denk daar maar eens over na....
Goede monitoring van de resultaten. Het is m.i. erg lastig dergelijke voorspellingen te doen (vergelijk met de weersverwachting, die klopt regelmatig ook niet). Als vastgesteld wordt dat het niet goed werkt dan gelijk stoppen
Probeer eerst een verwachting van 2a3 weken mogelijk te maken
Geen
Begin maar eens met een betrouwbare voorspelling voor 3 dagen.
Gezien het feit dat de huidige voorspelling er regelmatig flink naast zit heb ik persoonlijk weinig verwachting van een bruikbare voorspelling van 6-8 weken. En zoals al opgemerkt heeft het voor ons als varende ondernemer geen toegevoegde waarde, het zou zelfs nadelig kunnen zijn voor ons.
Beter nauwkeurige waterstanden van maximaal een week dan onnauwkeurige van ver vooruit
Lees nu mijn antwoord op vraag 1 nog maar eens.
Gaan jullie hier o.a. de gegevens van Covadem mede in verwerken? Want ook die info nog niet accuraat genoeg door te weinig deelnemers. Zeker op de zijrivieren

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl