



TKI V D-Hydro Gui, Visualisation and Cloud computing

Vergelijking van een toepassing van D-Hydro 1D-2D voor het berekenen van opstuwning bij bruggen in het hoogwaterbemalingsgebied van Amsterdam

Deltares

21 december 2023

Project TKI V D-Hydro Gui, Visualisation and Cloud computing
Opdrachtgever Deltares

Document Vergelijking van een toepassing van D-Hydro 1D-2D voor het berekenen van
opstuwung bij bruggen in het hoogwaterbemaalingsgebied van Amsterdam
Status Definitief
Datum 21 december 2023
Referentie 128329/23-020.675

Projectcode 128329
Projectleider Drs. W.M. Zijderwijk
Projectdirecteur Ir. H.J. Mondeel

Auteur(s) Dr.ir. J. van Houweligen
Gecontroleerd door Drs. W.M. Zijderwijk
Goedgekeurd door Drs. W.M. Zijderwijk

Paraaf



Adres Witteveen+Bos Raadgevende ingenieurs B.V. | Deventer
Stationsweg 5
Postbus 3465
4800 DL Breda
+31 (0)76 523 33 33
www.witteveenbos.com
KvK 38020751

Het kwaliteitsmanagementsysteem van Witteveen+Bos is gecertificeerd op basis van ISO 9001.

© Witteveen+Bos

Niets uit dit document mag worden veeveelvoudigd en/of openbaar gemaakt in enige vorm zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Witteveen+Bos noch mag het zonder dergelijke toestemming worden gebruikt voor enig ander werk dan waarvoor het is vervaardigd, behoudens schriftelijk anders overeengekomen. Witteveen+Bos aanvaardt geen aansprakelijkheid voor enigerlei schade die voortvloeit uit of verband houdt met het wijzigen van de inhoud van het door Witteveen+Bos geleverde document.

INHOUDSOPGAVE

1	INLEIDING	5
1.1	Aanleiding	5
1.2	Beschrijving van de case	5
1.3	Doel	6
2	SITUATIESCHETS EN AANGELEVERDE GEGEVENS	7
2.1	Locatie	7
2.2	Watersysteem	8
2.3	Bodemligging	9
2.4	Geometrie bruggen 187 en 131	13
2.5	1D Boezemmodel	14
2.6	Praktijkproef opstuwing	14
3	UITGANGSPUNTEN	15
3.1	1D en 2D Model	15
3.2	Periode	15
3.3	Validatie met gemeten opstuwing	15
4	METHODEN	16
4.1	Analytisch	16
4.2	Modelopzet 1D	17
4.3	Modelopzet 2D	20
4.4	Overige instellingen	25
5	RESULTATEN	28
5.1	2D stroombeeld en opstuwing	28
5.2	Vergelijking berekende opstuwingen	30
6	DISCUSSIE	33

7	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	35
7.1	Conclusies	35
7.2	Aanbevelingen	35
8	REFERENTIES	36
	Laatste pagina	36
	Bijlage(n)	Aantal pagina's
I	Stroombeeld op verschillende momenten voor brug 187	5
II	Stroombeeld bij verschillende instellingen van de eddy viscosity/diffusivity	2

1

INLEIDING

1.1 Aanleiding

Momenteel is de gemeente Amsterdam bezig om bruggen en kademuren te renoveren, waarbij zich kansen voordoen om de opstuwing te verminderen. Deze hydraulische ruimte zou (deels) kunnen worden benut om in de rakken tussen de bruggen meer ruimte te reserveren voor ecologische ontwikkeling (waterplanten). Er is op dit moment onvoldoende inzicht in de hydraulische effecten van de beoogde aanpassingen aan deze infrastructuur aangezien dit een nauwkeurig rekeninstrument vergt zoals een tweedimensionaal horizontaal (2DH) hydrodynamisch model. Mogelijk dat daarom kansen onvoldoende worden benut. Met een 2DH hydrodynamisch model (in het rapport verder afgekort als 2D model) kan de waterbeweging rondom bruggen in meer detail worden gesimuleerd dan een 1D hydrodynamisch model of analytisch.

Naast een gedetailleerde simulatie van stroming en opstuwing bij bruggen en kademuren, is een 1D-2D koppeling interessant voor het modelleren van waterkwaliteit (fractiesommen), bijvoorbeeld waar kanalen en meren in elkaar overgaan en elkaar kunnen beïnvloeden, zoals het oostelijk plassengebied waar een interactie bestaat tussen petgaten, sloten en meren met allerlei mogelijke windgedreven circulaties. Voor analyses met waterkwaliteit is het belangrijk om de herkomst fracties te kunnen modelleren en te koppelen aan de waterkwaliteit van deze verschillende bronnen.

Binnen het TKI V Visuals and Cloudcomputing project heeft Witteveen+Bos in samenwerking met Waternet een case uitgevoerd waarbij de toepassing van een 2D D-Hydro model voor het simuleren van de waterbeweging en opstuwing nabij bruggen is onderzocht. De uitkomsten van het 2D D-Hydro model zijn vergeleken met de resultaten van het 1D boezemmodel en met een analytische methode om zodoende inzicht te krijgen in de meerwaarde van een 2D model voor toepassing bij bruggen.

1.2 Beschrijving van de case

De hydraulica rondom meerdelige bruggen in de boezem van Amsterdam is complex. Met de huidige 1D schematisering is sprake van een sterk vereenvoudigde benadering waarbij een intree- en uittreeweerstand en het doorstroomoppervlak bepalend zijn voor de opstuwing. Brugpilaren kunnen sterk vereenvoudigd worden toegevoegd door het opgeven van de breedte (totaal van alle pilaren). Omdat er veel verschillende bruggen zijn en de geometrie sterk uiteenloopt, is het vrijwel onmogelijk om de juiste weerstandparameters voor iedere brug te bepalen.

Met een 2D model kan (met de juiste parameterschattingen) de stroming en opstuwing door en rondom de pijlers van bruggen en andere obstakels in meer detail geschematiseerd worden dan met een 1D benadering. Om dit nader te onderzoeken is een case opgezet die bestaat uit een singel in Amsterdam met daarin twee bruggen die 2D worden gesimuleerd en gekoppeld wordt met het bestaande 1D boezemmodel.

Voor deze case is gekozen voor een locatie waarin zich meerdere bruggen bevinden en waar ook substantiële stroming kan ontstaan en daarmee opstuwing. Het betreft het traject bij brug 187 (Dr. Samuel de Ranitzbrug) en brug 131 (Oude Koekjesbrug) binnen het hoogwaterbemaalingsgebied van Amsterdam.

In het hoogwaterbemaalingsgebied kunnen praktijkproeven worden uitgevoerd waarbij het IJ-front wordt gesloten en gemaal Zeeburg wordt ingezet om de Amstelland boezem te bemalen. Hierdoor ontstaat een aanzienlijke afvoer en verhanglijn over het traject. Voor een eerdere praktijkproef in november 2020 zijn tijdelijke druksensoren opgehangen in het gebied waarmee de waterstand kan worden gemeten. Uit deze meting bleek dat de te beschouwen bruggen opstuwing veroorzaken. Mogelijk kan deze meting worden gebruikt voor validatie van het model.

1.3 Doel

Het doel van de studie is om de opstuwing als gevolg van de bruggen 187 en 131 te simuleren met een 2D D-Hydro model en deze te vergelijken met de opstuwing berekend met een 1D boezemmodel en een analytische methode. Hiermee wordt inzicht verkregen in hoeverre de type modellering van invloed is op de opstuwing van een brug. De voor- en nadelen van de verschillende type modelleringen worden bediscussieerd en advies voor het te gebruiken model voor dit toepassingsgebied wordt gegeven.

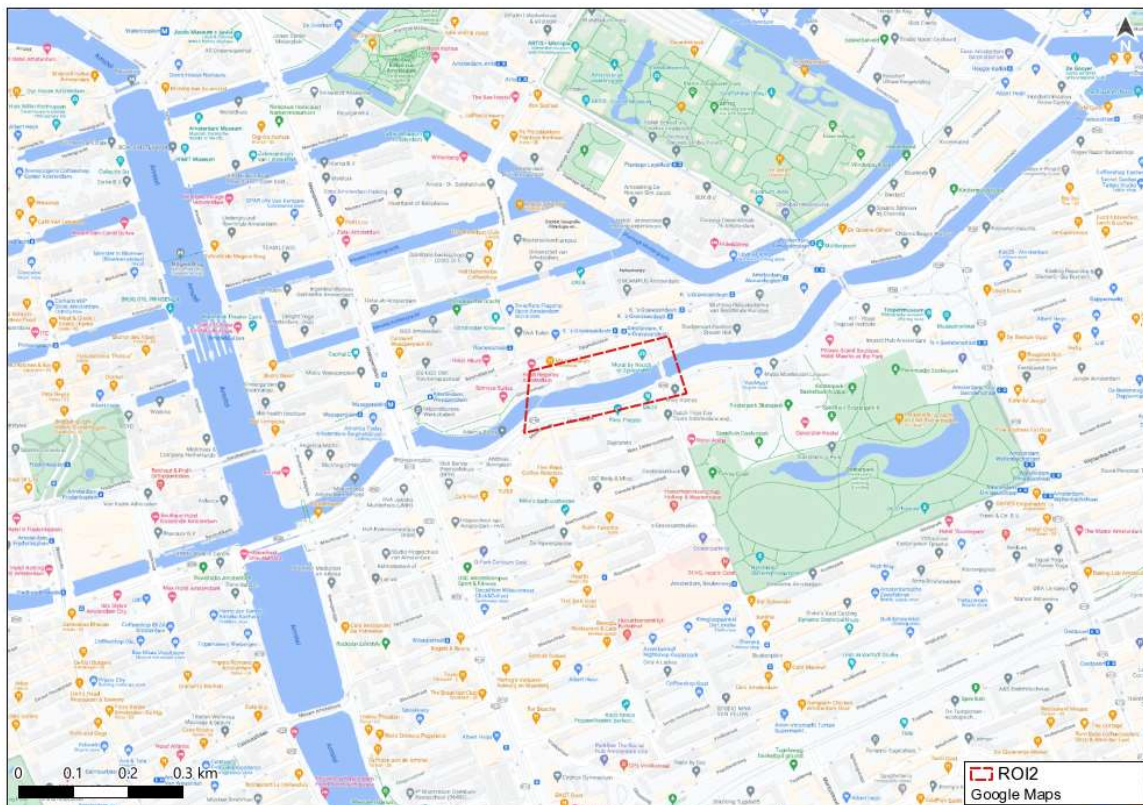
2

SITUATIESCHETS EN AANGELEVERDE GEGEVENS

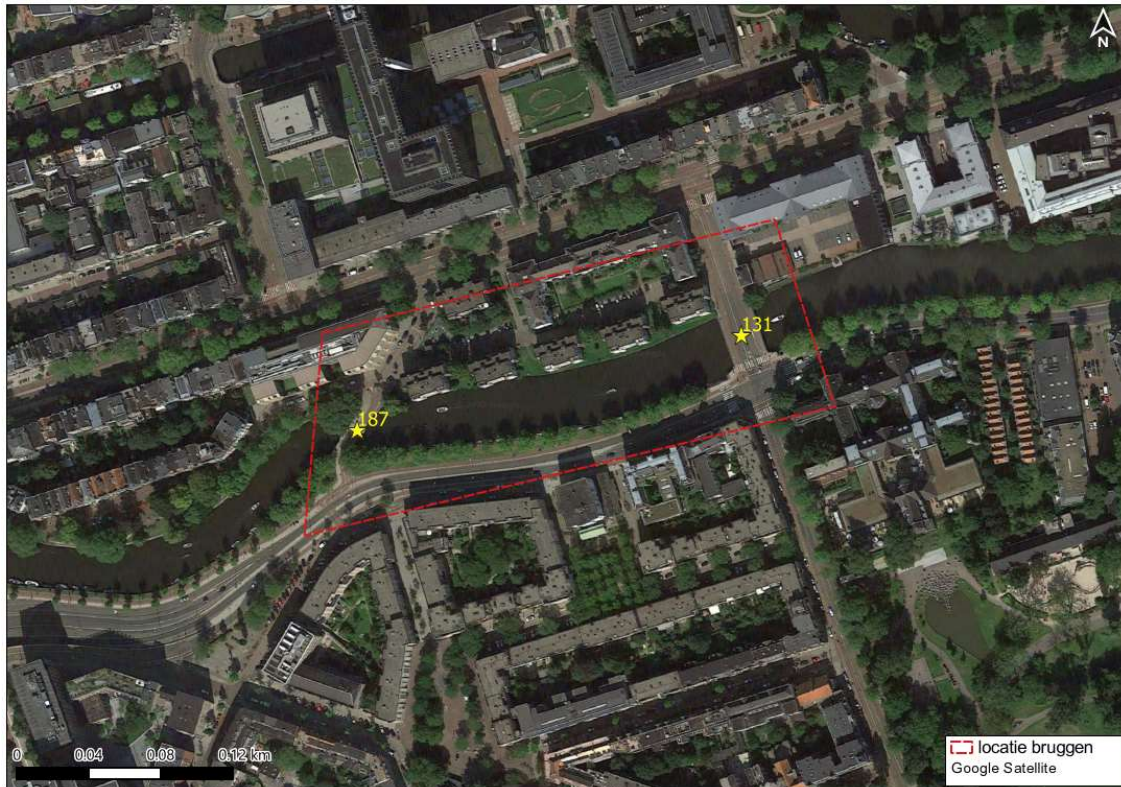
2.1 Locatie

Het te beschouwen tracé met daarin brug 187 (Dr. Samuel de Ranitzbrug) en brug 131 (Oude Koekjesbrug) ligt aan de zuidoostelijke rand van centrum Amsterdam. Het betreft een aftakking van de Amstel, waarlangs de Mauritskade is gevestigd (zie afbeelding 2.1 en afbeelding 2.2).

Afbeelding 2.1 Overzicht van Amsterdam met in de rode belijning het interessegebied aangegeven



Afbeelding 2.2 Luchtfoto ingezoomd op de locatie van de bruggen met daarin de brugnummers aangegeven

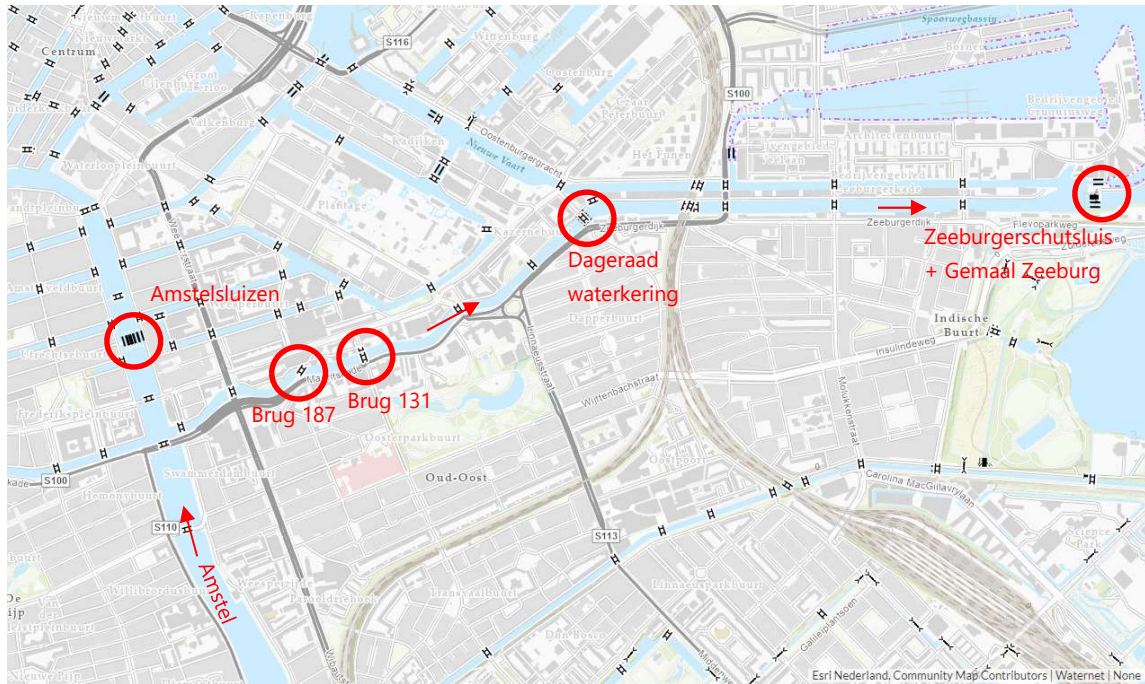


2.2 Watersysteem

Het watersysteem van Amsterdam wordt gekenmerkt door de vele grachten met daarin vele sluisen en bruggen. De Amstel stroomt in noordelijke richting en takt aan de zuidzijde van Amsterdam aan de grachtengordel (afbeelding 2.3). Het traject met daarin de bruggen 187 en 131 staat in open verbinding met de Amstel. Aan de Noordzijde wordt de Amstel begrensd door de Amstelsluisen. Aan de westzijde wordt het traject langs de Mauritskade begrensd door de Dageraad waterkering. In een normale situatie zijn de Amstelsluisen en Dageraad waterkering open verbindingen. Tijdens extreem hoogwater kan het IJ-front (grachten Amsterdam) en het Amsterdam-Rijn-Kanaal-front worden afgesloten en is het traject met de bruggen 187 en 131 onderdeel van de afvoerroute naar gemaal Zeeburg.

Het studiegebied (de aftakking van de Amstel langs de Mauritskade) valt onder het ARK/NZK (Amsterdam-Rijnkanaal/Noordzeekanaal) boezemsysteem met een streefpeil van -0,4 m NAP. Via sluisen en waterkeringen is de Amstel verbonden met de grachten in Amsterdam. De grachten zijn onderdeel van de stadsboezem en worden in feite gereguleerd door het RWS gemaal in IJmuiden. De Amstel voert via de grachten van Amsterdam het water vanuit de bovenstroomse polders (Amstelland) af richting het IJ. In tijden van hoog water worden de sluisen en keringen rondom het IJ en het Amsterdam-Rijnkanaal gesloten en pompt gemaal Zeeburg het overschot aan water af richting het IJmeer/Markermeer. In tijden van watertekort kan er vanuit gemaal Zeeburg water worden gepompt vanuit het IJmeer richting de grachten. De totale gemaalcapaciteit van gemaal Zeeburg is 60 m³/s verdeeld over vier pompen.

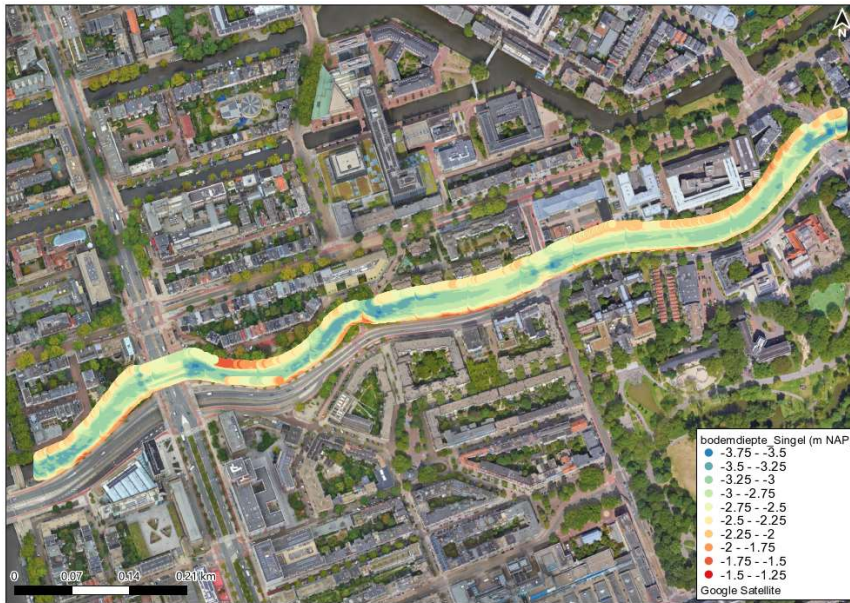
Afbeelding 2.3 Locatie van enkele belangrijke kunstwerken in het watersysteem en stroomrichting in een afvoersituatie



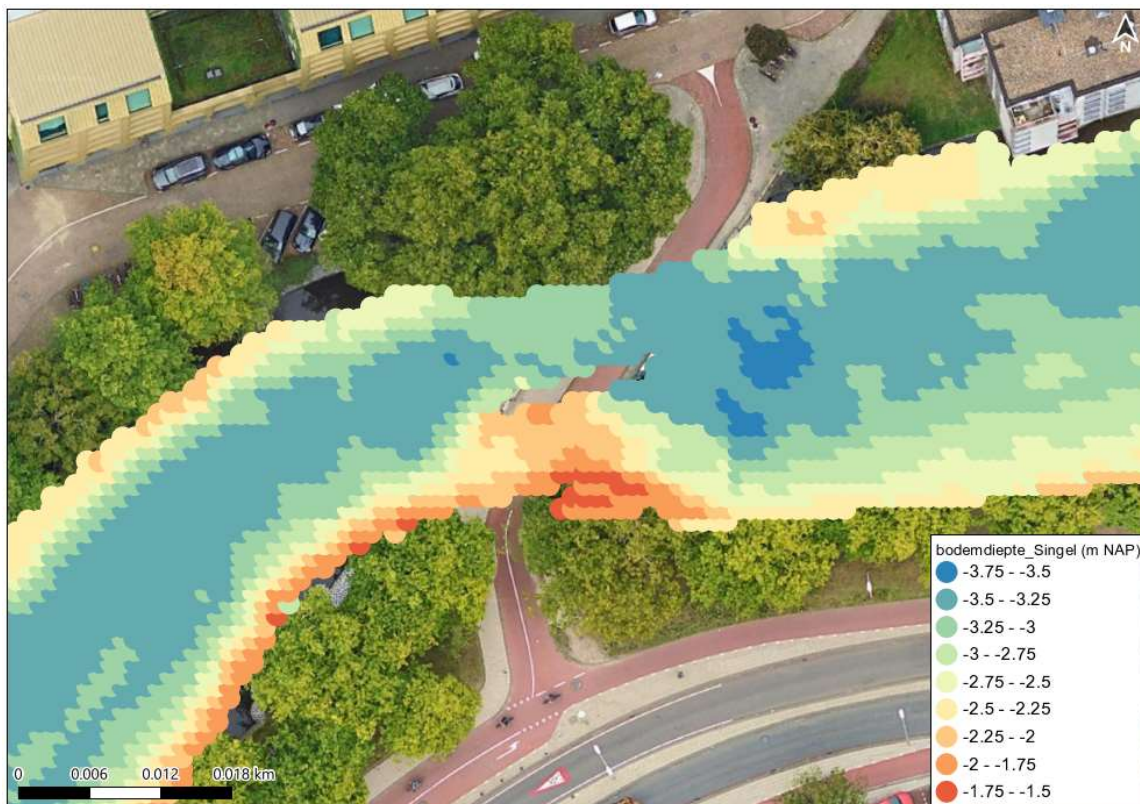
2.3 Bodemligging

Voor het traject van circa de Tulpbrug tot de Henriëtte Pimentelbrug is de bodem van de singel ingemeten met behulp van een multibeam. Dit levert een puntenwolk met een resolutie van 1 m. Deze data is aangeleverd door Waternet ten behoeve van het opstellen van een 2D model. In afbeelding 2.4 is de bodemligging van deze meting weergegeven. In afbeelding 2.5 en afbeelding 2.6 is ingezoomd op de bruggen. Over het algemeen is de diepte in het midden van de singel tussen de NAP -3,3 m en NAP -3,0 m. Door de aanwezigheid van bruggen (en bochten) ontstaan lokale variaties in de bodemligging. Bij bruggen concentreren de stroombanen zich door een versmalling van het stroomprofiel wat leidt tot een diepere bodemligging ter plaatse van de versmalling en net benedenstrooms ervan. In een aantal gevallen liggen de bruggen in bochten en is de stroming in de buitenbocht groter dan de binnenbocht. Dit leidt tot een asymmetrisch bodemprofiel wat goed terug te zien is bij brug 187 (afbeelding 2.5).

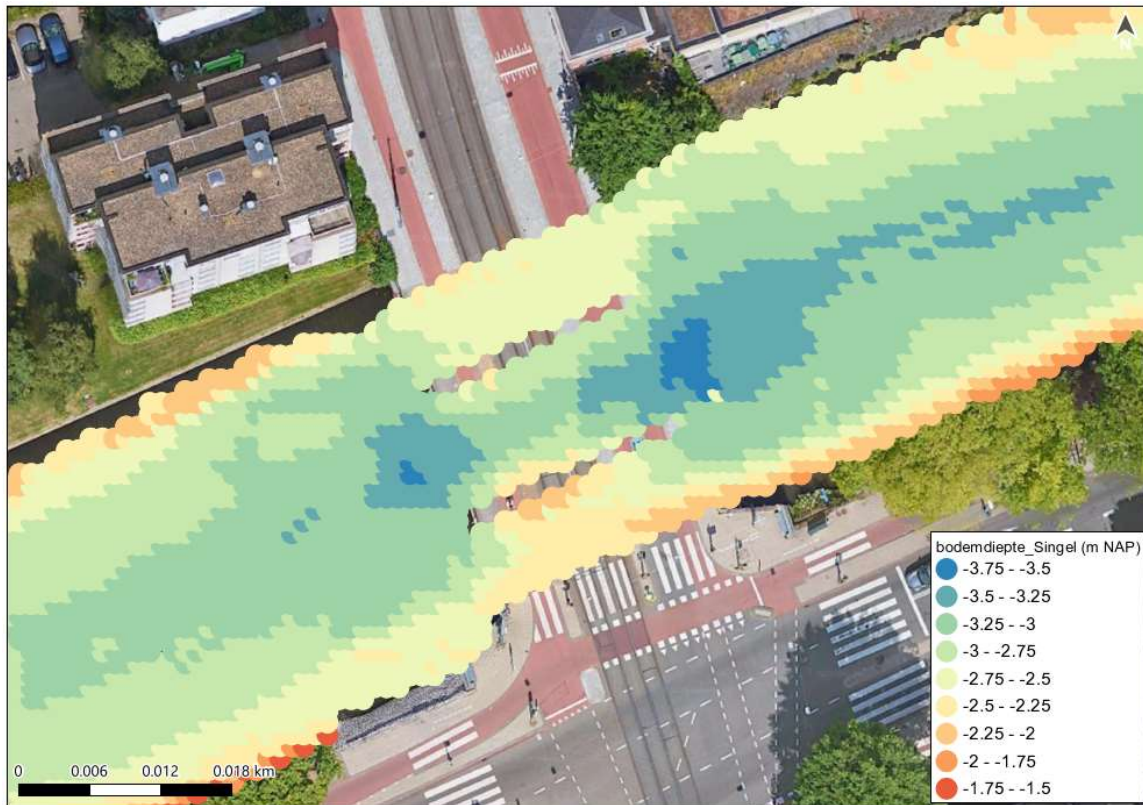
Afbeelding 2.4 Gemeten bodemligging (bron: Waternet)



Afbeelding 2.5 Gemeten bodemligging ingezoomd op brug 187 (bron: Waternet)

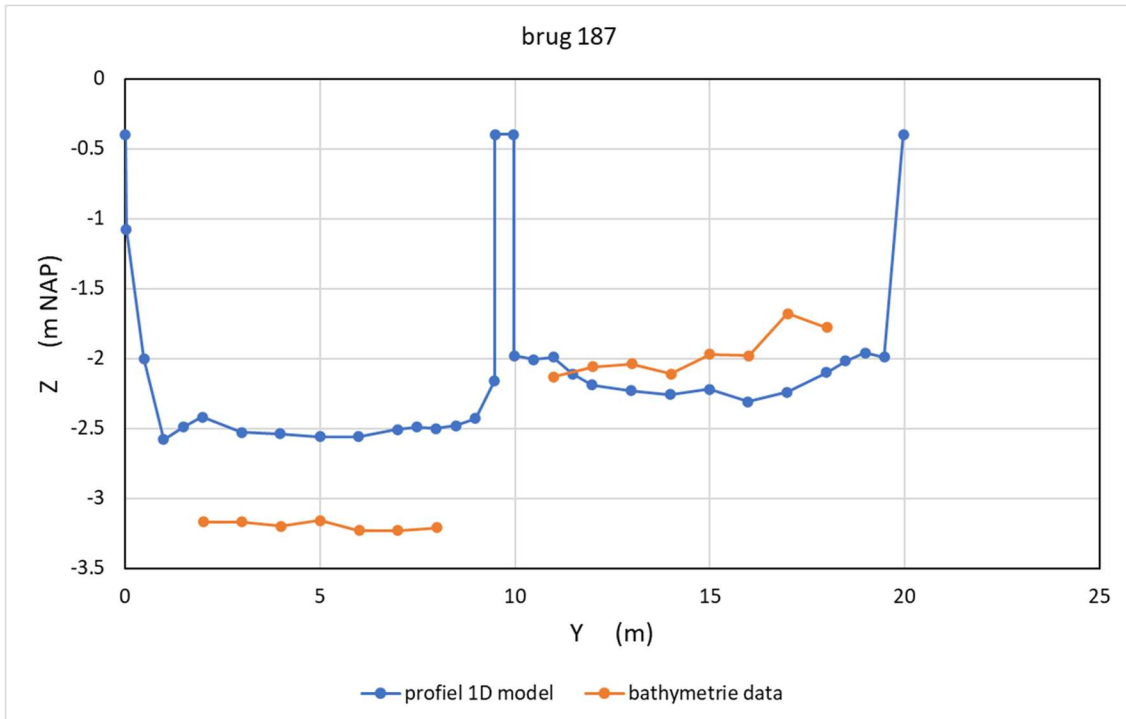


Afbeelding 2.6 Gemeten bodemligging ingezoomd op brug 131 (bron: Waternet)

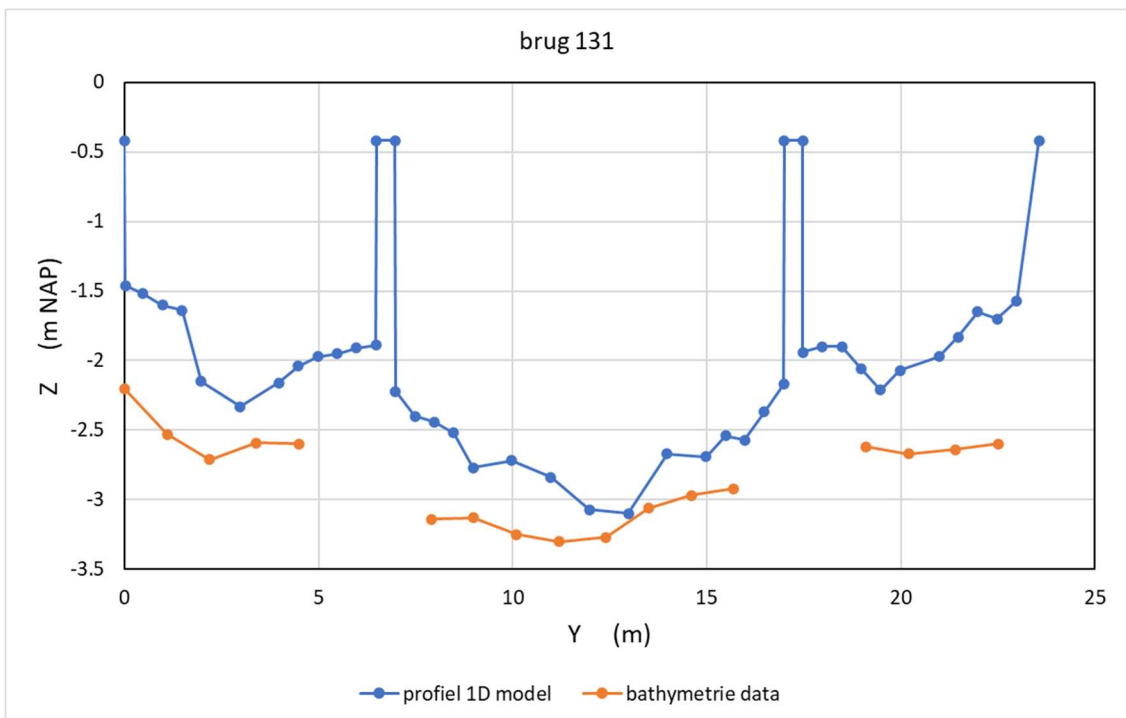


In afbeelding 2.7 en afbeelding 2.8 is de gemeten bodemligging vergeleken met de profielen ter plekke van de bruggen in het boezemmodel. Te zien is dat de profielen afwijken ten opzichte van elkaar. Bij brug 187 is de afwijking aan de linkerzijde circa 0,7 m en rechts is de afwijking tot 0,5 m. Bij brug 131 loopt het verschil op tot 1 m. Dit kan tot verschillen leiden in de resultaten gezien het verschil in doorstroomoppervlak. Om een goede vergelijking te maken tussen de 1D en 1D-2D modelberekeningen zijn in de 1D schematisatie daarom de bodemprofielen van de bruggen gecorrigeerd op basis van deze metingen (paragraaf 4.2).

Afbeelding 2.7 YZ profiel boezemmodel ter plekke van brug 187 en gemeten bodemligging



Afbeelding 2.8 YZ profiel boezemmodel ter plekke van brug 131 en gemeten bodemligging

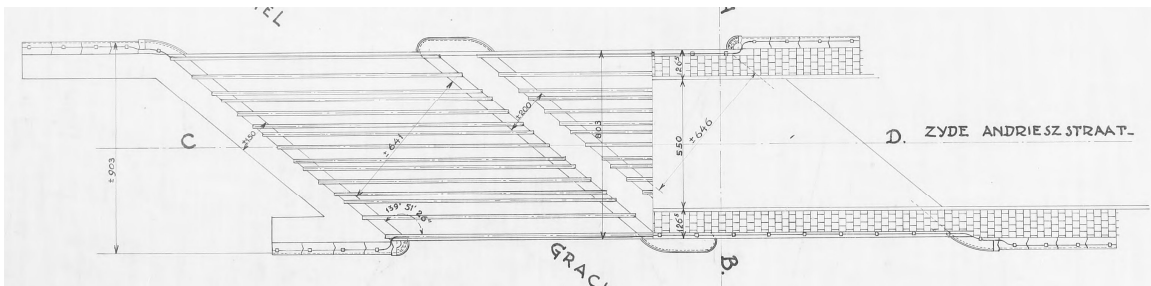


2.4 Geometrie bruggen 187 en 131

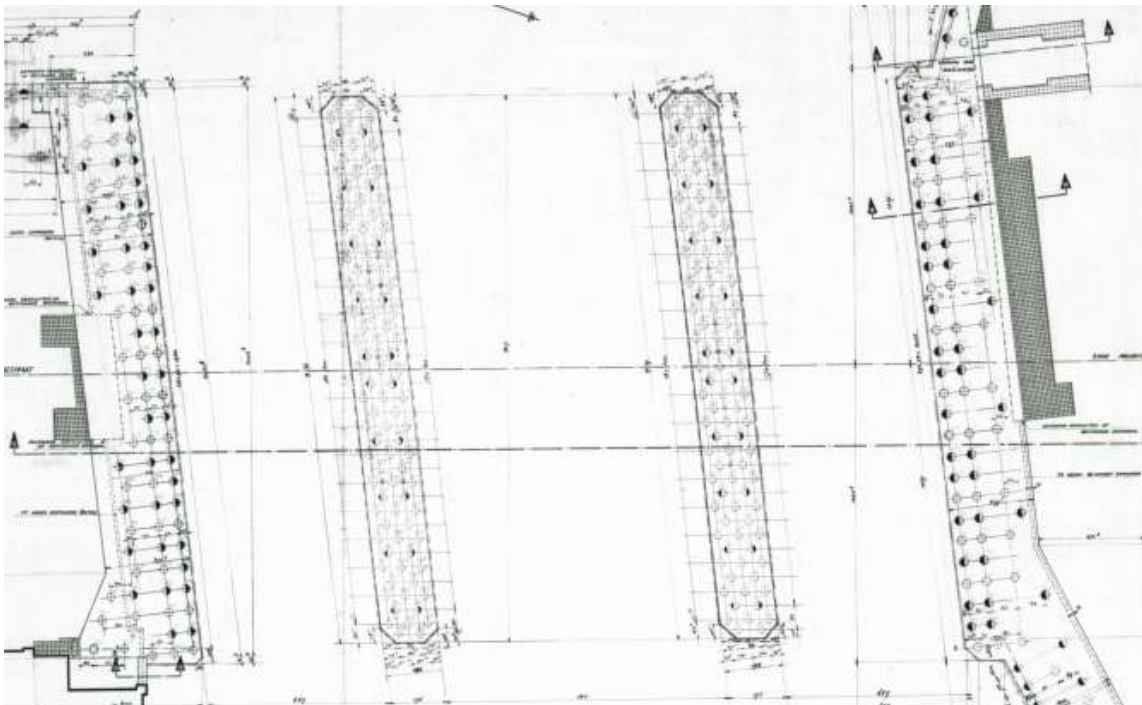
Brug 187 en brug 131 zijn twee opeenvolgende bruggen met respectievelijk 2 en 3 doorstroomopeningen. Brug 187 is voorzien van stroomlijnschotten vanwege de relatief grote opstuwing van de brug. Voor het aanbrengen van deze schotten zijn al eerder berekeningen uitgevoerd met een Computational Fluid Dynamics (CFD) model.

In afbeelding 2.9 en afbeelding 2.10 zijn de bouwtekeningen van respectievelijk de bruggen 187 en 131 te zien [Ref. 1]. De dwarsdoorsnede van de brugpilaar van brug 187 (loodrecht op stroomrichting) is circa 2 m. De doorstroombreedte is bijna 13 m (inclusief brugpilaren 15 m). De breedte van de twee brugpilaren van brug 131 zijn 1,95 m. De doorstroombreedte is circa 23 m (inclusief pilaren 27 m). Met behulp van deze informatie kunnen de profielen van de bruggen in het 1D model worden aangepast. Te zien is dat de pilaarbreedte in het originele boezemmodel een stuk smaller is (zie afbeelding 2.7 en afbeelding 2.8).

Afbeelding 2.9 Bouwtekening brug 187 [Ref. 1]



Afbeelding 2.10 Bouwtekening brug 131 [Ref. 1]



2.5 1D Boezemmodel

Gedurende dit TKI is het 1D Sobek-CFRR boezemmodel van Waternet omgezet naar een D-Hydro model inclusief RR module. Ook is op verschillende locaties RTC (real time control) sturing toegevoegd, waarmee het model binnen een FEWS omgeving kan worden ontsloten.

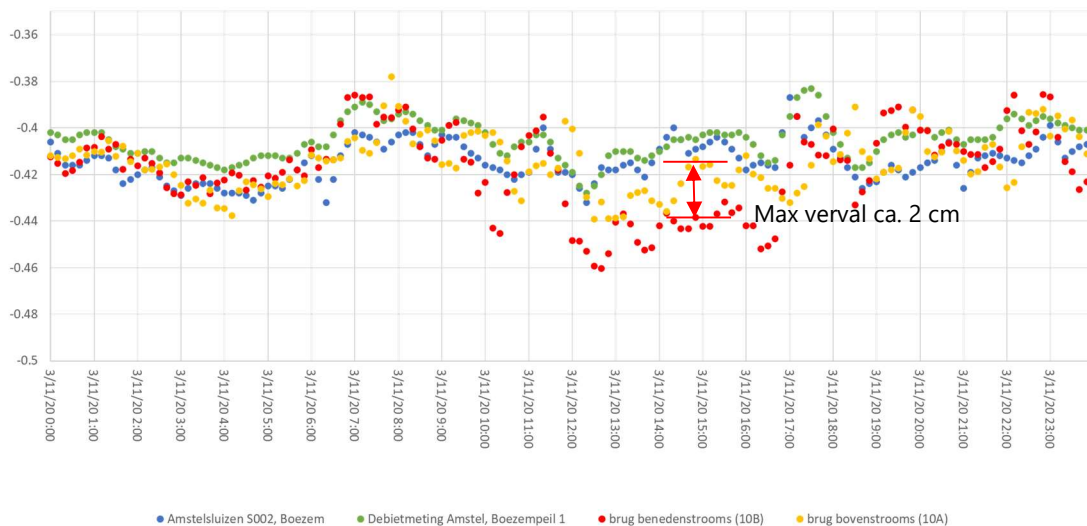
In het model zijn de sluisen opgenomen als (gestreken) stuwen, zodoende fluctueren de peilen mee met het peil van het IJ. Op het IJ zijn peilfluctuaties aanwezig door voornamelijk spuien en bemaling bij gemaal IJmuiden.

Wat opvalt aan het aangeleverde D-Hydro model is dat niet alle bruggen als kunstwerk zijn opgenomen in het model. Zo is bijvoorbeeld De Oude Koekjesbrug (brug 131) niet aanwezig in de schematisatie van het boezemmodel. Wel zijn er in het YZ-profiel van de watergang ter plekke van de brug pijlers zichtbaar. Na analyse van Waternet blijkt dat alle bruggen van het type 'pillar' (in Sobek) niet expliciet zijn overgenomen in het D-Hydro model.

2.6 Praktijkproef opstuwing

In november 2020 heeft Waternet een pompproef uitgevoerd bij Zeeburg, waarbij het gemaal Zeeburg op grote capaciteit (71,8 m³/s) is ingezet. Wanneer gemaal Zeeburg wordt ingezet is ook de afvoer door de singel fors hoger (circa 10 tot 14 m³/s). Tijdens deze proef is boven- en benedenstrooms van brug 187 een druksensor opgehangen voor het meten van waterstand. Het verval op basis van deze metingen is maximaal circa 2 cm. Deze meting geeft een indicatie van de opstuwing maar er is te weinig over de meting bekend om het als validatie voor de onderhavige studie te gebruiken.

Afbeelding 2.11 Waterstandsmetingen (druksensoren) uit een eerdere praktijkproef in 2020 op 4 verschillende locaties. De rode en gele metingen zijn respectievelijk beneden- en bovenstrooms van brug 187



3

UITGANGSPUNTEN

3.1 1D en 2D Model

De basis wordt gevormd door het D-Hydro boezemmodel, zoals aangeleverd door Hydrologic. Dit model is versimpeld om reketijden te beperken en resultaten goed te kunnen duiden.

Voor deze pilot is een deel van de schematisatie uit het boezemmodel geknipt om de reketijden te beperken. Het model is omgezet naar D-Hydro versie 2023.02. De aanpassingen aan het geknipte model worden toegelicht in de modelopzet (H4).

De randvoorwaarden (afvoer tijdreeks) voor het geknipte model volgen uit het oude Sobek boezemmodel. Deze resultaten zijn geleverd door Waternet.

De neerslagafvoermodule (RR) en de RTC module zijn uitgeschakeld in deze pilot. De bijdrage van neerslagafvoer voor het relatief kleine interesse gebied is zeer beperkt. Sturing is niet nodig omdat met het ingeven van de randvoorwaarden hier in feite rekening mee wordt gehouden.

Een 2D grid is opgesteld voor het stuk van de singel waarop de bruggen 187 en 131 liggen. Dit 2D grid is in het verlengde lateraal gekoppeld aan het 1D model.

In de praktijk is bij brug 187 een stroomlijnschot aanwezig. Deze is niet meegenomen in de modellering omdat de details hiervan niet bekend zijn.

3.2 Periode

In overleg met Waternet is er voor gekozen om december 2017 door te rekenen omdat er sprake was van een afvoersituatie met inzet van gemaal Zeeburg. Gemaal Zeeburg heeft in de periode 14 t/m 16 december met een capaciteit van 57 m³/s met een duur van 2 dagen gedraaid. Bij deze afvoer ontstaat een verhanglijn over het hoogwaterbemalingsgebied.

3.3 Validatie met gemeten opstuwing

De enige informatie rondom de opstuwing van brug 187 komt voort uit de praktijkproef van november 2020, waarbij een opstuwing is gemeten van maximaal 2 cm. Omdat informatie ontbreekt waar precies de meetinstrumenten (druksensoren) waren bevestigd en hoe afvoer de door de singel in de tijd is verlopen, kan de meting niet goed gebruikt worden als validatie van de resultaten uit de modellen en analytische methode.

4

METHODEN

De opstuwing van de bruggen is met verschillende modellen en methoden berekend en onderling vergeleken:

1. analytisch: met maximalisatie afvoercoëfficiënt, omdat in D-Hydro 1D deze coëfficiënt op 1 wordt begrensd in verband met numerieke stabiliteit [ref. 2];
2. analytisch: zonder maximalisatie van de afvoercoëfficiënt voor vergelijking met het 2D resultaat;
3. 1D model: met een pillar bridge definitie met YZ profiel;
4. 2D fijnmazig model: met een roosterresolutie van circa 0,5 m ter plekke van de bruggen. Brughoofden en pilaren zijn geschematiseerd door middel van droge cellen;
5. 2D grofmazig model: met een roosterresolutie van circa 2,5 m ter plekke van de bruggen waarbij de pilaren zijn toegevoegd als 'subgrid structures'.

4.1 Analytisch

De opstuwing door een brug is in eerste instantie analytisch berekend. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van de volgende formule:

$$Q = \mu A_f \sqrt{2g(\zeta_1 - \zeta_2)} \quad (1)$$

waarin Q de afvoer door de brug is in m^3/s , μ de afvoercoëfficiënt afgeleid vanuit de verliescoëfficiënten, A_f het natte doorstroomoppervlak van de brug (op basis van bodemniveau en waterdiepte aan bovenstroomse zijde inclusief pilaren) in m^2 , g de zwaartekrachtversnelling en $(\zeta_1 - \zeta_2)$ de opstuwing in m [ref. 2].

De afvoercoëfficiënt is opgebouwd uit verschillende verliescoëfficiënten:

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{\xi_i + \xi_f + \xi_o + \xi_y}} \quad (2)$$

waarbij ξ_i , ξ_f , ξ_o , ξ_y respectievelijk de entreeverlies-, wrijvingsverlies-, uittreeverlies- en pilaarverliescoëfficiënt zijn. Om numerieke redenen is deze afvoercoëfficiënt begrensd op 1. Dit betekent dat voor een gegeven afvoer, de berekende opstuwing door een brug mogelijk groter is dan kan worden verwacht.

Deze verliescoëfficiënten zijn afhankelijk van een aantal parameters en gekozen constanten. De entreeverliescoëfficiënt ξ_i is een constante input parameter en is op basis van ervaringsgetallen voor deze studie gekozen op 0,25. Een andere inschatting van deze parameter kan significante invloed hebben op de opstuwing.

De wrijvingsverliescoëfficiënt is gedefinieerd als:

$$\xi_f = \frac{2gL}{C^2R} \quad (3)$$

met L de lengte van de brug (in de stroomrichting), C de Chézy coëfficiënt ($\text{m}^{1/2}/\text{s}$) en R de hydraulische straal.

De Manning weerstand die is toegepast in het 1D model is voor de analytische berekening omgezet naar een Chézy coëfficiënt. Een Manning weerstand van $0,023 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ komt overeen met een Chézy weerstand van 38,3 voor brug 187 en 37,5 voor brug 131. De hydraulische straal ($R=A_f/P_w$ met P_w de lengte van het profiel) is ingeschat aan de hand van het bodemprofiel. De lengte van de brug is bekend (respectievelijk 11 en 20 m voor brug 187 en 131).

De uittreeverliescoëfficiënt is gedefinieerd als:

$$\xi_o = k \left(1 - \frac{A_f}{A_{f2}} \right)^2 \quad (4)$$

met k de constante uittreeverliescoëfficiënt, A_f het natte doorstroomoppervlak aan de bovenstroomse zijde inclusief brugpilaren en A_{f2} het natte doorstroomoppervlak aan de benedenstroomse zijde. k is een constante input parameter en voor deze studie gekozen op 1. De natte doorstroomoppervlakken zijn bepaald aan de hand van de profielen. Voor de analytische berekening is voor het doorstroomoppervlak geen tijdsafhankelijkheid verondersteld. Het natte doorstroomoppervlak ten tijde van de hoogste waterstand is aangenomen.

Tot slot is de pilaarverliescoëfficiënt gedefinieerd als:

$$\xi_y = \beta \frac{\alpha_y}{A_f} \quad (5)$$

met β de vormfactor, en α_y het natte oppervlak van de pilaar loodrecht op de stromingsrichting (bovenstroomse zijde). De vorm factor is een constante input parameter en is op basis van ervaringsgetallen gekozen op 0,75. Voor de analytische berekening is voor het natte oppervlak geen tijdsafhankelijkheid verondersteld. Het natte oppervlak van de pilaren is bepaald ten tijde van de hoogste waterstand.

Een tijdserie van de opstuwing is verkregen door de afvoer tijdserie bovenstrooms van de bruggen, volgend uit het 1D model, toe te passen. Uit het 1D model volgt ook de hoogste waterstand waarmee het doorstroomoppervlak is bepaald. Door dit doorstroomoppervlak constant in de tijd te veronderstellen wordt er een kleine fout gemaakt in de analytische berekening.

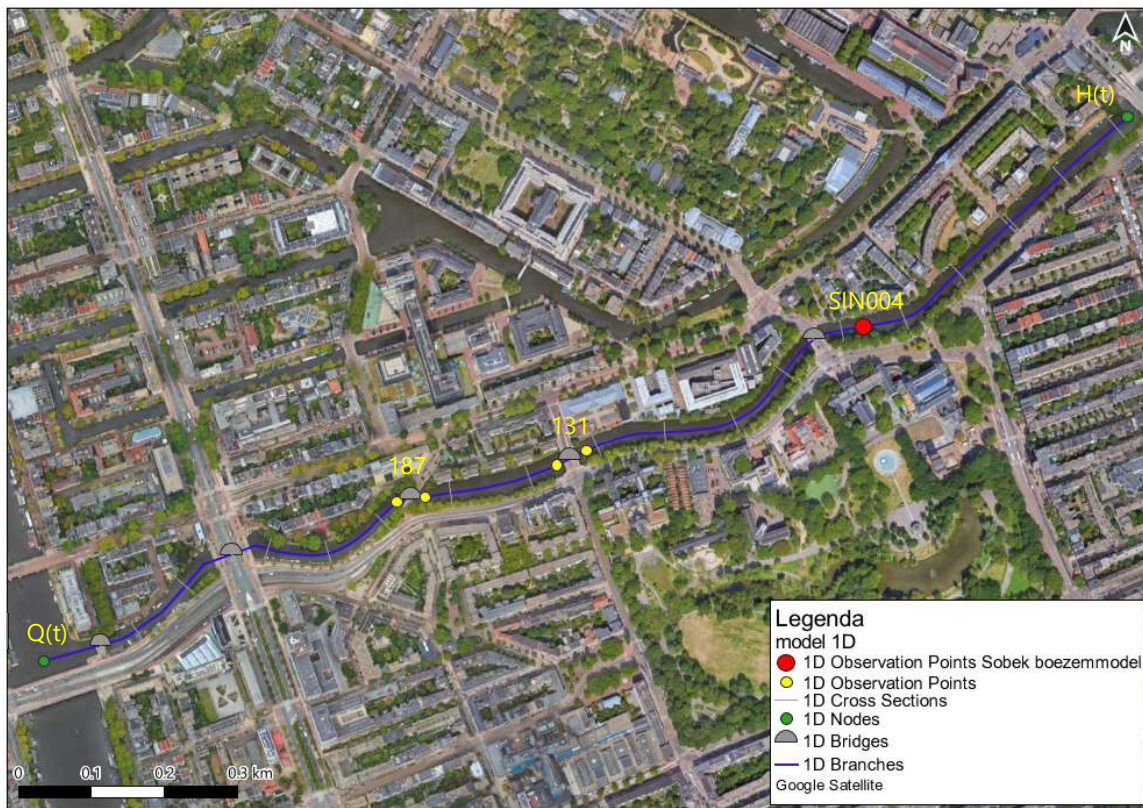
Op basis van de berekende verliescoëfficiënten is de afvoercoëfficiënt door middel van formule 2 berekend voor brug 187 en brug 131 op respectievelijk 1,15 en 1,27.

4.2 Modelopzet 1D

In afbeelding 4.1 is de modelopzet van het 1D model weergegeven. Het model bestaat uit één branch lopende van de Amstel (west) tot aan de Dageraad waterkering (oost). In dit tracé zijn vijf bruggen aanwezig. De instellingen en resultaten rondom de bruggen 187 en 131 zijn in meer detail onderzocht. De instellingen van de overige bruggen volgen direct uit het boezemmodel.

Er zijn geen laterale watergangen aangesloten op het tracé en het neerslagafvoermodel (RR) is uitgeschakeld. Er komt dus in het model geen extra (laterale) afvoer bij in dit deel van de singel.

Afbeelding 4.1 Opzet van het model in 1D. De groene punten geven de locaties van de randvoorwaarden aan, het rode punt geeft de locatie aan van het uitvoerpunt in het Sobek model (SIN004) waarvan de randvoorwaarden zijn afgeleid



Randvoorwaarden

De locatie van de randvoorwaarden zijn aangegeven met groene punten in afbeelding 4.1. Aan de westzijde van het model (nabij de Tulpbrug) is een afvoerrandvoorwaarde ($Q(t)$) toegepast, met de tijdserie van het uitvoerpunt SIN004 (verder op de singel) uit het Sobek model. Aangezien er geen laterale toestroming is, is aangenomen dat dit een valide randvoorwaarde is.

Aan de oostzijde van het model (ten westen van de Dageraad kering) is een waterstandsrandvoorwaarde ($H(t)$) toegepast. Hiervoor is ook de tijdserie van het uitvoerpunt SIN004 gebruikt uit het Sobek boezemmodel. Tussen dit uitvoerpunt en de oostelijke rand van het model liggen geen kunstwerken die nog voor extra opstuwung kunnen zorgen. Aangenomen is dat de waterstand ter plekke van de rand gelijk is aan die van het uitvoerpunt.

Rekenrooster 1D

Er zijn elke 25 m rekenpunten toegevoegd. Rondom kunstwerken zijn indien nodig extra rekenpunten toegevoegd op een afstand van 5 m.

Uitvoerpunten

Er zijn uitvoerpunten toegevoegd aan de boven- en benedenstroomse zijde van brug 187 en 131, waarmee de waterstand en afvoer tijdens de simulatie worden geregistreerd. Deze zijn als gele punten weergegeven in afbeelding 4.1.

Ruwheid

De ruwheid is aangepast naar een uniforme ruwheid van Manning $0,023 \text{ s/m}^{1/3}$.

Kunstwerken

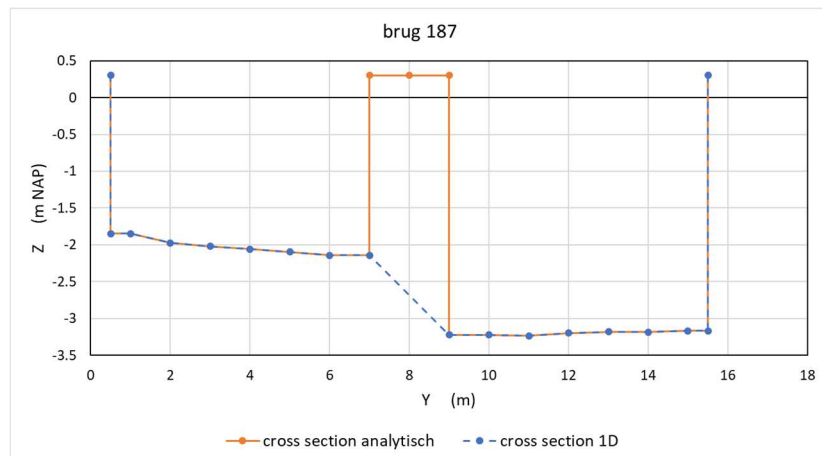
Niet alle bruggen zijn overgezet van Sobek naar D-Hydro. Zo mist er ook een kunstwerk bij brug 131. Er is ter plekke van de brug wel een profiel (inclusief pilaren) aanwezig. Dit profiel is verwijderd en vervangen door een brug (YZ definitie) met aangepast profiel.

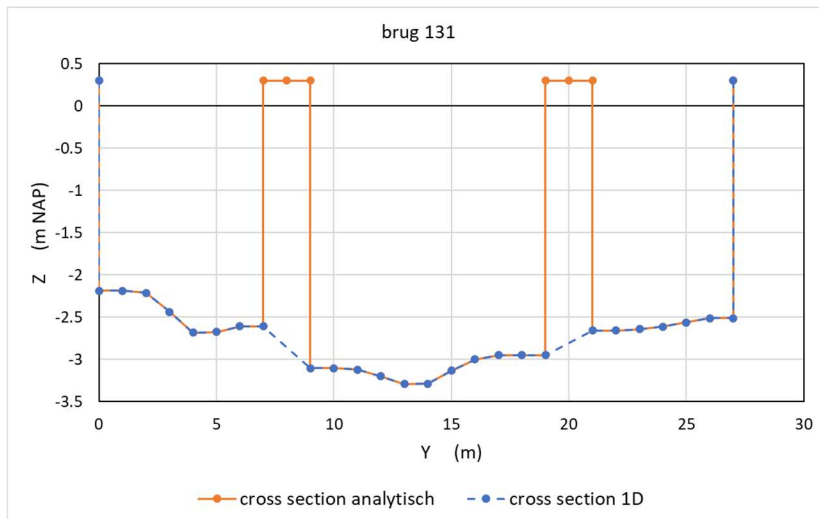
Het kunstwerk (tabulated bridge) dat al aanwezig was voor brug 187 is aangepast naar een brug met YZ definitie. Door YZ definities te gebruiken kan het bodemprofiel ter plekke van de brug worden meegenomen.

De YZ-profielen van de bruggen zijn gecorrigeerd op basis van de gemeten bodemligging en de afmetingen uit de bouwtekeningen. De gemeten bodemligging is actueler dan de profielen uit het boezemmodel (overgenomen uit het Sobek model). Bovendien zal dezelfde data de basis vormen voor de bodemligging in het 2D model. De brughoofden komen terug in de YZ profielen, de pilaren niet.

De pilaardefinitie is toegevoegd met daarin de breedte van de pilaar of pilaren. De pilaardefinitie wordt gebruikt om een zekere blokkade van de pilaren op het doorstroomoppervlak te schematiseren. Dezelfde profielen worden ook aangehouden in de analytische berekeningen, maar dan inclusief de pilaren. Verder zijn de verliescoëfficiënten overgenomen uit de analytische berekeningen, zodat deze in overeenstemming zijn. De profielen van de bruggen zijn weergegeven in afbeelding 4.2. De profielen worden toegevoegd zonder pilaren (blauwe lijn), de daadwerkelijke locatie van de pilaren in het profiel is weergegeven met de oranje lijn. Merk op dat bij toevoeging van een pilaardefinitie in het model de hoogte van de pilaar wordt gebaseerd op het diepste punt in het profiel. Dit is een conservatieve aanname omdat dit in beide bruggen niet helemaal het geval is en er dus meer doorstroomoppervlak geblokkeerd wordt dan in werkelijkheid het geval is. Daarnaast moet in het geval van meerdere pilaren de totale pilaarbreedte worden opgegeven. De pilaren worden dus niet afzonderlijk beschouwd.

Afbeelding 4.2 De profielen van de bruggen zoals toegepast in de analytische en D-Hydro 1D berekeningen





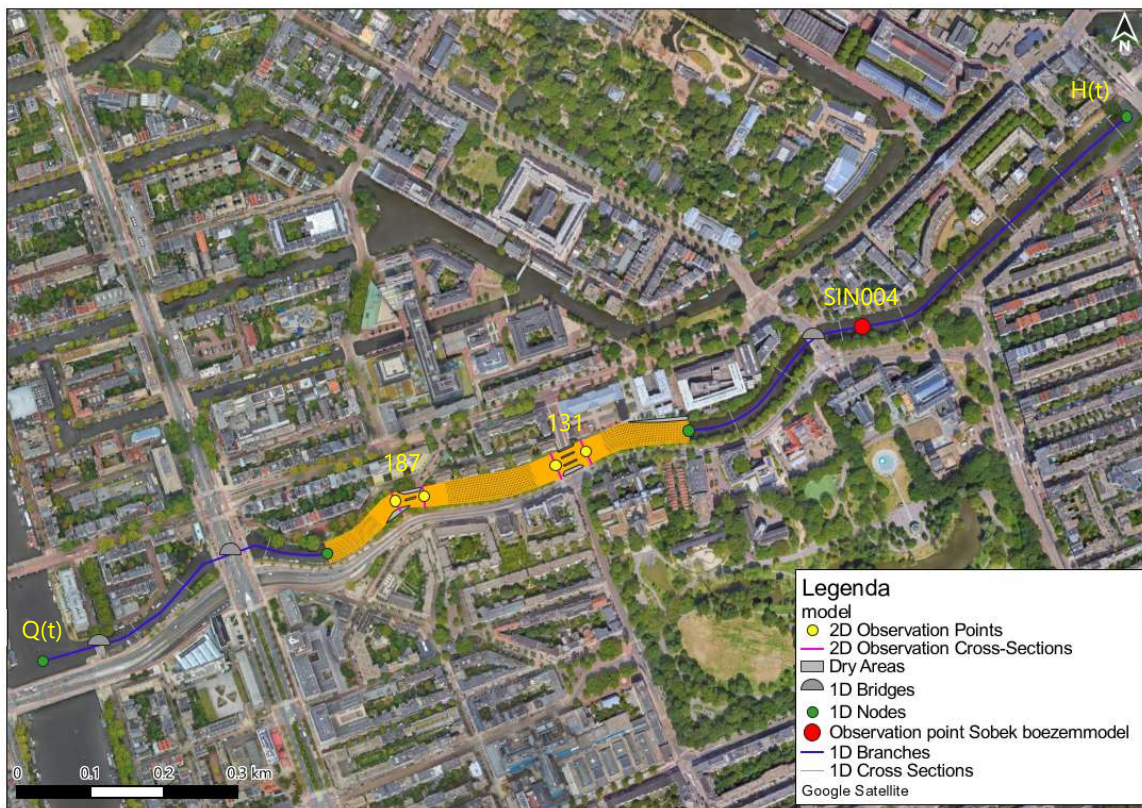
Problemen met toevoegen/aanpassen Bridge structure

De bruggen zijn toegevoegd met een YZ definitie om zo goed mogelijk het profiel van de bodem ter plekke van de brug mee te kunnen nemen. D-Hydro GUI liep echter vast tijdens de initialisatie op deze YZ definitie. De pilaardefinitie wordt niet ondersteund door de GUI en is dus ook niet beschikbaar in het menu. Beide opties worden wel ondersteund door het rekenhart. Er is daarom een dimr export van het model gemaakt. In de achtergrond zijn de bestanden aangepast.

4.3 Modelopzet 2D

In afbeelding 4.3 is de opzet van het 1D-2D model weergegeven. Het 1D-2D model beslaat het tracé als het 1D model. In het 1D-2D model is het gedeelte 150 m ten westen van brug 187 tot 170 m ten oosten van brug 131 in 2D geschematiseerd in 2 varianten, grofmazig en fijnmazig. Het 1D model is lateraal gekoppeld aan het 2D grid zoals te zien is in de onderstaande afbeelding.

Afbeelding 4.3 Opzet van het 1D-2D model. De groene punten geven de locaties van de randvoorwaarden aan, het rode punt geeft de locatie aan van het uitvoerpunt in het Sobek model (SIN004) waaruit de randvoorwaarden zijn afgeleid



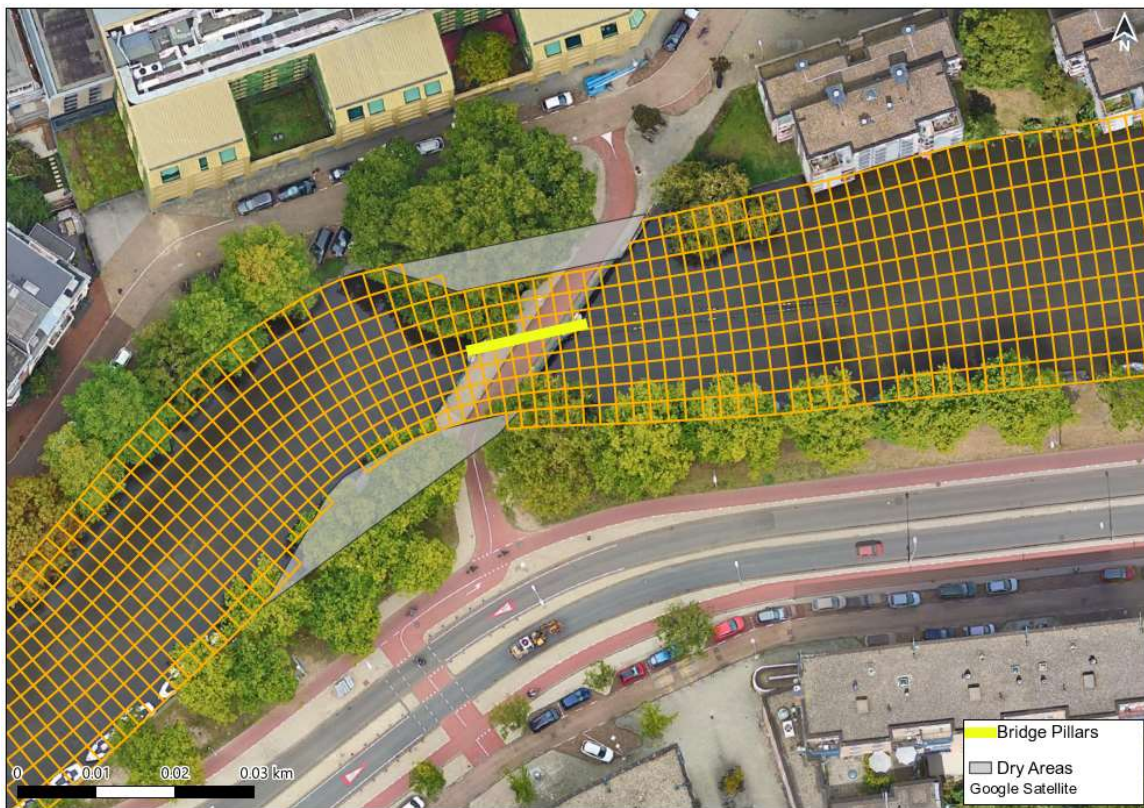
2D grid

Er zijn voor de modellering twee verschillende 2D grids aangemaakt. Als basis is een curvilinear grid opgesteld zodat de bochten (planform) en dominante stroomrichting van de singel gevolgd wordt. Voor de keuze van de resolutie van het grid spelen de volgende factoren mee:

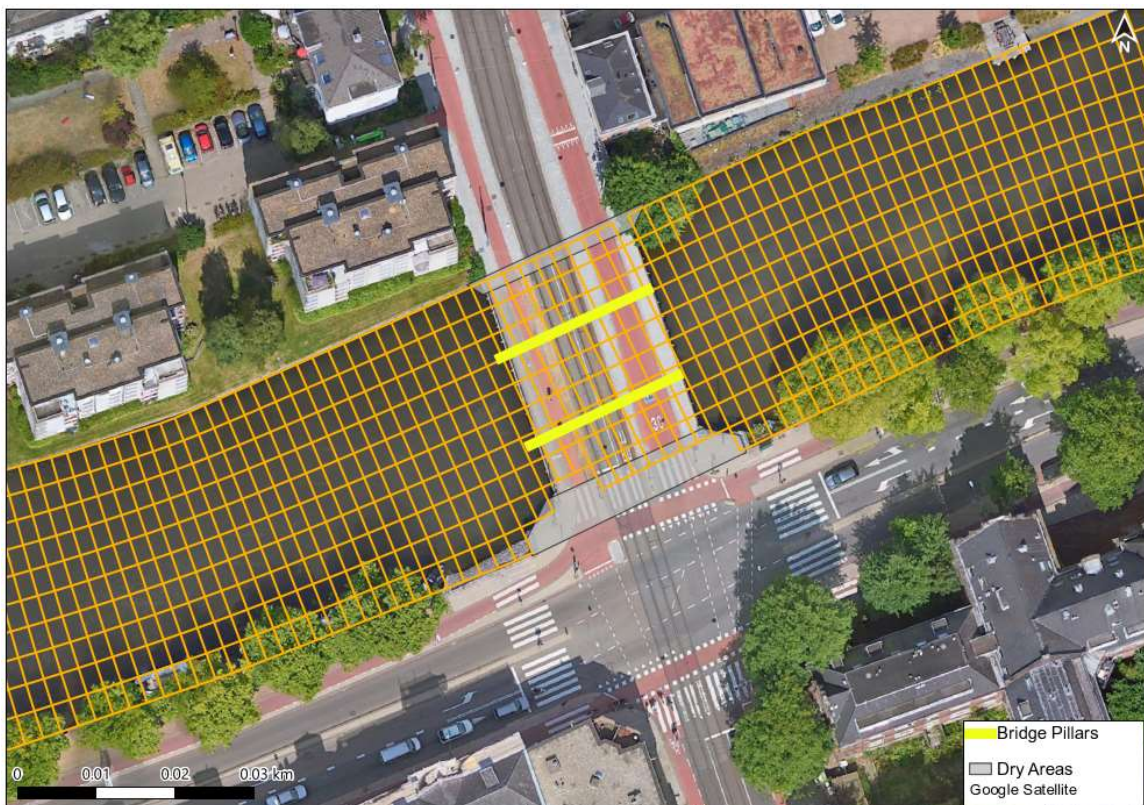
- de rekentijd die niet al te lang moet worden. Hoe meer gridcellen (hoe hoger de resolutie), hoe groter de rekentijd;
- de celgrootte moet passen bij de geometrie van de bruggen en bij de verwachte hydraulische processen nabij de bruggen zoals neervorming.

Het grove model heeft 10 cellen in de breedterichting (N-richting), zodat er wel enige variaties in de dwarsrichting kunnen worden berekend. Dit komt overeen met een resolutie van ongeveer 2,5 tot 3,5 m, afhankelijk van de breedte van de singel. De breedte van de brugpilaren valt hiermee binnen de celbreedte, waardoor deze als een 'subgrid structure' zijn toegevoegd. De cellengte is 2 m. Het basis grid wordt gebruikt in het grove model. afbeelding 4.4 en afbeelding 4.5 tonen het grove grid nabij brug 187 en brug 131. Op deze afbeelding is ook de locatie van de subgrid pilaren (geel) toegevoegd. Ook is te zien welke rekencellen zijn verwijderd door het toevoegen van de landhoofden.

Afbeelding 4.4 Visualisatie van het grove grid (incl. uitsnede van de landhoofden en weergave van de subgrid pilaren) rondom brug 187

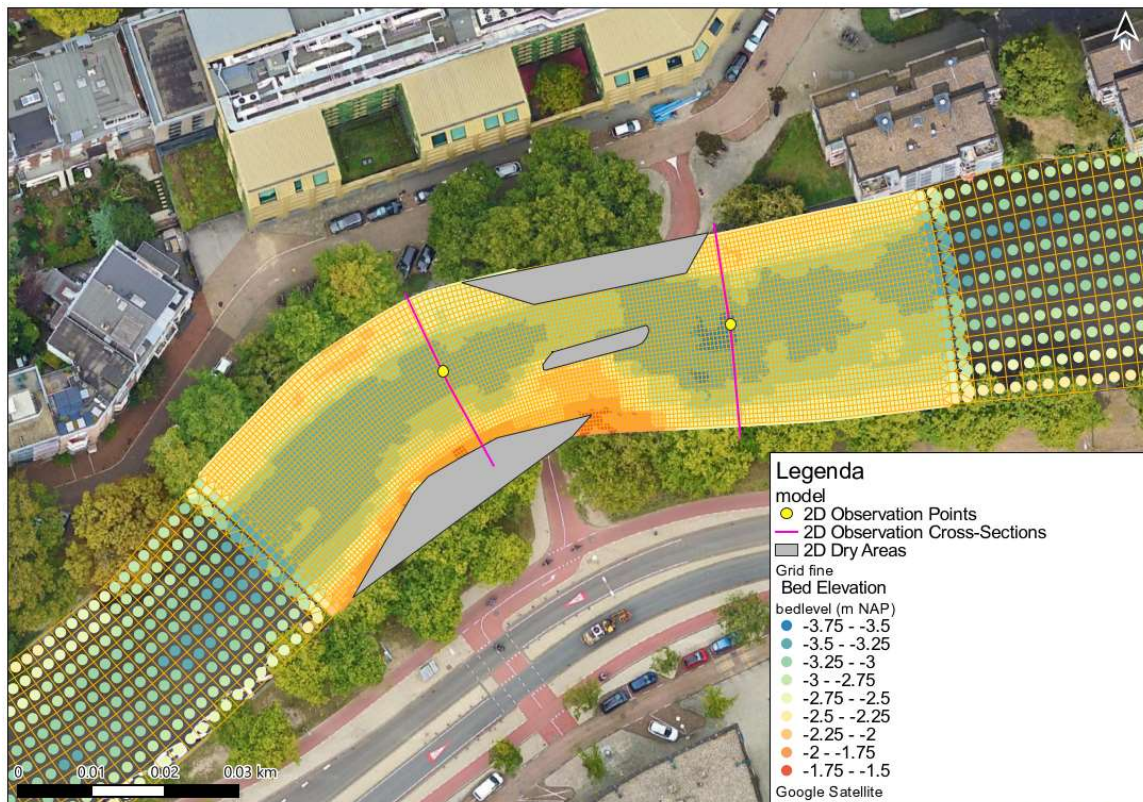


Afbeelding 4.5 Visualisatie van het grove grid (incl. uitsnede van de landhoofden en weergave van de subgrid pilaren) rondom brug 131

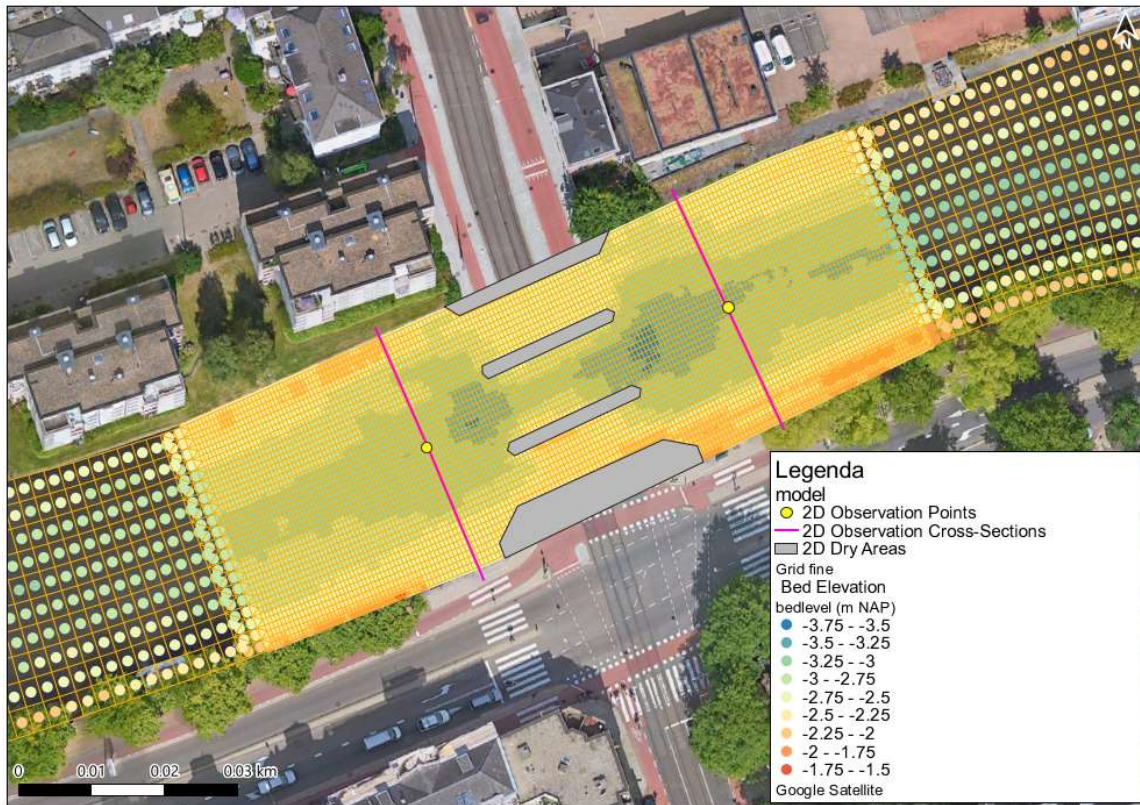


Voor het fijne model is de resolutie rondom beide bruggen verfijnd (zie afbeelding 4.6 en afbeelding 4.7), zodat de waterbeweging rondom de pilaren wordt opgelost door middel van de ondiep watervergelijkingen in plaats van subgrid, zoals bij het grove model het geval is. Naar verwachting treden rondom de bruggen meer fluctuaties in de waterbeweging op. Dit vereist een hogere resolutie. Bovendien kan met een hogere resolutie ook beter de vorm van de pilaren en landhoofden aan het model worden toegevoegd. Circa 50 m boven- en benedenstreams, is het grid verfijnd tot 40 cellen in de richting loodrecht op de singel. Dit komt overeen met een celgrootte van 0,5-0,7 m. Dit betekent dat er over de breedte van de pilaren ongeveer 4 cellen liggen.

Afbeelding 4.6 Visualisatie van het grid (incl. verfijning) rondom brug 187



Afbeelding 4.7 Visualisatie van het grid (inclusief verfijning) rondom brug 187



Bodemligging

De ontvangen bathymetrie data is geïnterpoleerd over het 2D grid met behulp van IDW interpolatie met een relatieve zoekruimte van 1,8 cellen (zie punten in afbeelding 4.6 en afbeelding 4.7). Vervolgens is voor de cellen met missende data nogmaals een IDW interpolatie uitgevoerd met een zoekruimte van 3 cellen.

Ruwheid

Er is een uniforme ruwheid aangenomen van Manning $0,023 \text{ s/m}^{1/3}$, dit komt overeen met de ruwheid in het 1D model.

Kunstwerken (bruggen)

De bruggen zitten deels verdisconteerd in de bodem data, maar wordt deels teniet gedaan door de interpolatie van de bodemhoogte. In het model met het fijne grid zijn de pilaren van de bruggen expliciet toegevoegd aan het model aan de hand van droge cellen (zie afbeelding 4.6 en afbeelding 4.7). Ook de landhoofden zijn als 'droge cellen' toegevoegd, zodat deze cellen niet actief zijn.

In het grove model zijn de pilaren toegevoegd met behulp van het subgrid structure bridge pillars, met een weerstandscoefficiënt van 1 (default waarde). Vanuit een eerdere studie wordt geadviseerd om een waarde van 1 toe te passen. De weerstandscoefficiënt is veel minder van invloed dan de breedte van de brugpilaren [ref. 4]. Voor brug 131 zijn twee pilaren met een breedte van 1,95 m toegevoegd. Voor brug 187 is één pilaar toegevoegd met een breedte van 2 m (zie gele lijnen in afbeelding 4.4 en afbeelding 4.5).

Uitvoerpunten

Er zijn uitvoerpunten (voor onder andere de waterstand) en uitvoer-cross-sections (voor onder andere de afvoer) toegevoegd aan de boven- en benedenstroomse zijde van brug 187 en 131, op dezelfde locatie als het 1D model.

4.4 Overige instellingen

Tijdstap en initiële waterstand

De user time step (tijdstap waarmee external forcing wordt geüpdatet) is 1 min. De maximale tijdstap is 600 s. De output op de uitvoer- en rekenpunten en het 2D grid is 10 min. De initiële waterstand is -0,4 m NAP overeenkomstig met het stuurpeil.

Eddy viscositeit

Hydrostatische modellen (op basis van de ondiep water vergelijkingen) zijn vaak te grof (ruimtelijk en temporeel) om de turbulente bewegingen van het water volledig op te lossen. De turbulente processen zijn zogeheten 'sub-grid'. De impact van turbulentie op de stroming wordt berekend door een subgrid model [ref. 3].

Voor het berekenen van het effect van de verticale turbulente viscositeit en diffusiviteit is het k-epsilon turbulentie model standaard geselecteerd. De uniforme verticale achtergrond viscositeit is $1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. De horizontale achtergrond viscositeits- en diffusiviteitscoëfficiënten zijn vaak veel groter (een aantal orde groottes) dan de verticale coëfficiënten.

Voor het oplossen van de turbulente schalen in het numerieke model wordt de horizontale eddy viscositeit opgesplitst in drie verschillende componenten/bijdragen:

$$v_H = v_{H,achtergrond} + v_{H,3D} + v_{H,2D}, \quad (6)$$

namelijk de horizontale achtergrond viscositeit ($v_{H,achtergrond}$), de (3D) bijdrage van verticale variatie in de horizontale stroming ($v_{H,3D}$) en de 2D subgrid bijdrage van de horizontale bewegingen en forceringen die niet kunnen worden opgelost door het rooster ($v_{H,2D}$).

De horizontale achtergrond viscositeit (en diffusiviteit) worden in deze studie constant in de ruimte verondersteld. De coëfficiënt moet altijd gelijk of groter zijn dan de kinematische viscositeit. Deze parameter wordt gebruikt om het resultaat te kalibreren/tunen.

De zogenaamde 3D bijdrage in een 2DH model kan worden toegevoegd door de Elder term toe te voegen. De Elder term is in deze simulaties geactiveerd. Voor het oplossen van de 2D bijdrage aan de horizontale eddy viscositeit wordt gebruik gemaakt van het Smagorinsky model. De Elder term en Smagorinsky constante zijn ingesteld op respectievelijk 1,0 en 0,2, conform Deltares [ref. 3].

Praktische toepassing eddy viscositeit

Merk op dat de fysische instellingen rondom (eddy) viscositeit en diffusiviteit niet goed zijn aan te passen in de GUI. Bij gebruik van D-Hydro 1D2D is het gebruik van Elder en Smagorinsky standaard uitgeschakeld. Het wordt geadviseerd om een dimr export te maken van het model en al deze instellingen na te lopen alvorens de simulaties te starten.

Keuze eddy viscosity/diffusivity parameter

Bij 2D modellering moet een juiste instelling voor de eddy viscositeit en diffusiviteit worden gevonden, omdat dit bepalend kan zijn voor de stromingskarakteristieken. De viscositeit kan pas impact hebben als er snelheidsgradiënten optreden. Daarom wordt verwacht dat deze instelling bij het grove grid minder van toepassing is dan bij het fijnmazige model, omdat bij gebruik van het fijne grid grotere snelheidsgradiënten zullen optreden.

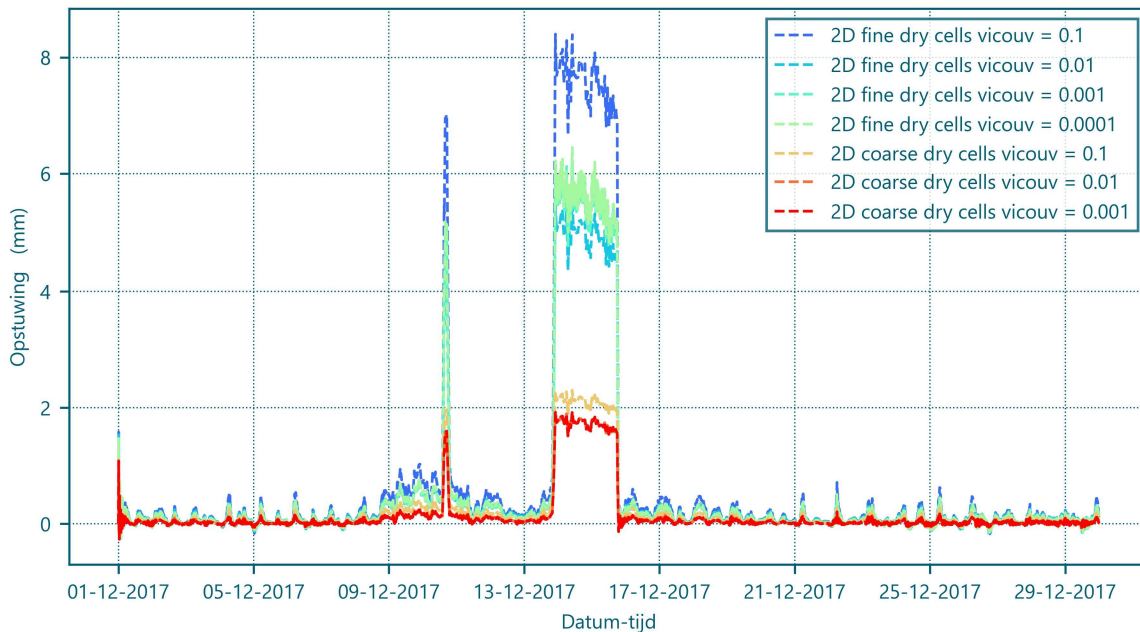
Om deze reden is een gevoeligheidssom uitgevoerd om te kijken of de oplossingen convergeren bij een zekere setting. Uitgaande van de celgrootte van het grove grid is initieel een instelling van $0,1 \text{ m}^2/\text{s}$ aangenomen. Deze is vervolgens een paar orde groottes verkleind totdat het resultaat tussen twee instellingen niet meer verandert.

In afbeelding 4.8 en afbeelding 4.9 is de opstuwing bij de bruggen te zien bij verschillende horizontale achtergrond eddy viscositeits- en diffusiviteitsinstellingen (vicouv en dicouv in .mdu file). Te zien is dat deze instelling de resultaten sterk beïnvloedt. Grofweg is te zien is dat bij afname van de viscositeit en diffusiviteit de opstuwing afneemt, maar dat dit wel naar een bepaalde waarde convergeert. De opstuwing neemt af doordat bij een lagere eddy viscositeit/diffusiviteit de effectieve viscositeit en diffusiviteit afnemen. Hierdoor stroomt het water 'makkelijker', omdat het minder weerstand (shear stress door snelheidsgradiënten) ervaart. Bij de resultaten van het fijne 2D model is te zien dat de opstuwing eerst fors afneemt en vervolgens weer iets toe lijkt te nemen, mogelijk door numerieke schommelingen.

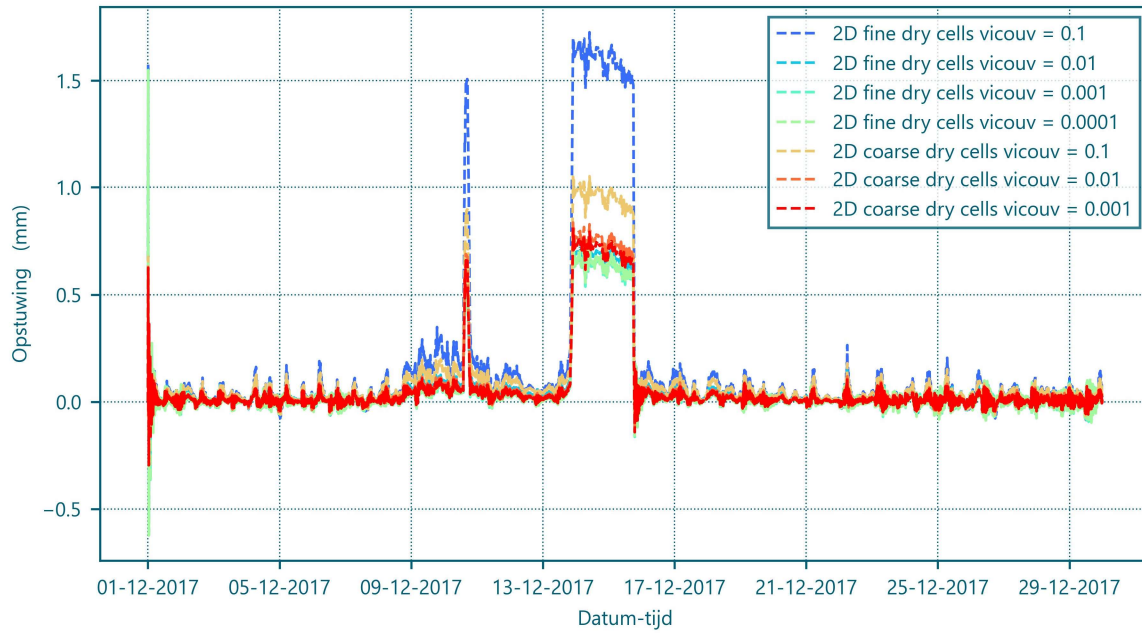
Op basis van deze resultaten is ervoor gekozen om voor de simulaties met het grove grid een uniforme horizontale eddy viscositeit van 0,01 m²/s aan te houden. Bij simulaties met het fijne grid wordt een setting van 0,001 m²/s aangehouden, een orde grootte lager.

In bijlage II is ook het effect op het stroombeeld weergegeven. Te zien is dat bij grotere waarden van de eddy viscositeit en diffusiviteit de effecten sneller uitdoven (diffuus worden).

Afbeelding 4.8 De invloed van de uniforme horizontale eddy viscositeit instelling op de opstuwing bij brug 187



Afbeelding 4.9 De invloed van de uniforme horizontale eddy viscositeit instelling op de opstuwing bij brug 131



5

RESULTATEN

In dit hoofdstuk zijn de resultaten van de verschillende modellen en methode (analytisch, 1D en 2D) en met elkaar vergeleken. Eerst wordt het stroombeeld en opstuwing van het 2D fijnmazige model gepresenteerd en vervolgens worden de berekende opstuwingen met elkaar vergeleken.

5.1 2D stroombeeld en opstuwing

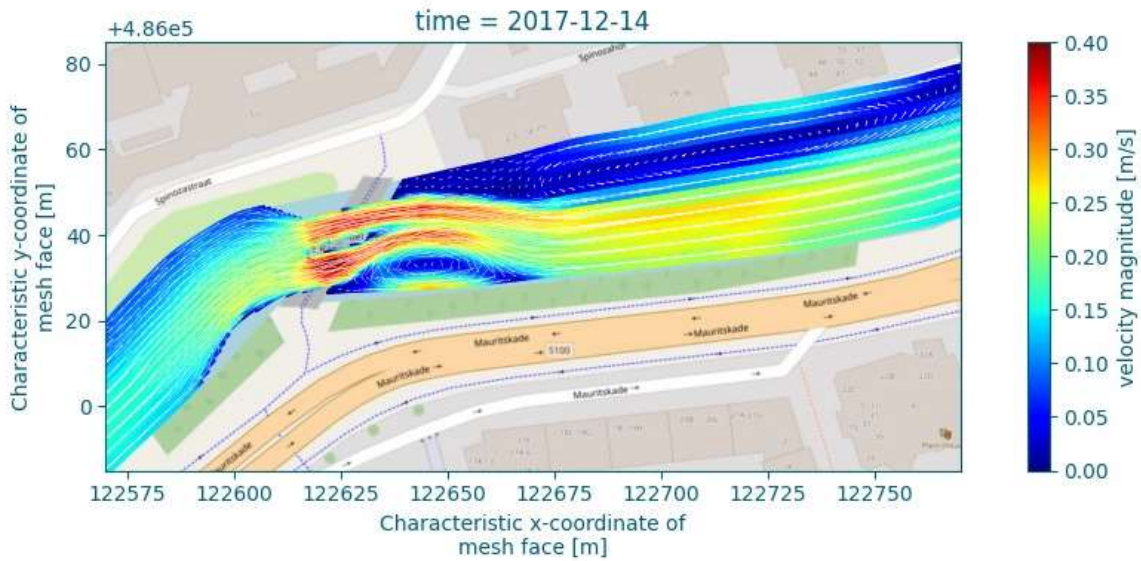
In afbeelding 5.1 en afbeelding 5.2 is het stroombeeld weergegeven ter plaatse van brug 187 en 131. De afvoer door de singel is $10 \text{ m}^3/\text{s}$ (stroomrichting is van west naar oost).

Te zien is dat bij brug 187 de stroombanen sterk beïnvloed worden door de bocht in de singel en de ligging van de landhoofden. Net benedenstrooms van de brug zijn neren zichtbaar langs beide oevers. De stroomsnelheden zijn bij brug 187 maximaal $0,40 \text{ m/s}$ ($0,15 \text{ m/s}$ voor de brug). De afbuiging van het zog lijkt te fluctueren met veranderende afvoer door de singel. Dit is te zien in de afbeeldingen van het stroombeeld voor verschillende afvoeren in bijlage I. Zoals te zien in afbeelding 5.1 zijn er grote snelheidsgradiënten achter de brug. In werkelijkheid liggen benedenstrooms van de brug stroomlijnschotten in het verlengde van de brugpijler. Deze stroomlijnschotten hebben invloed op het stroombeeld. Waarschijnlijk wordt er hierdoor in de praktijk minder weerstand en opstuwing gezien dan in het model.

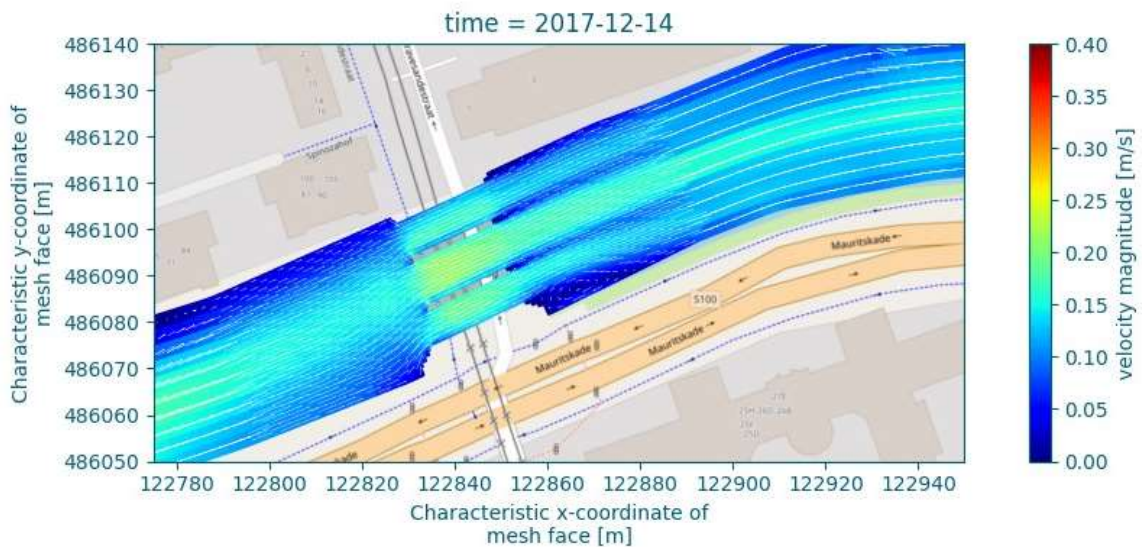
De landhoofden en pilaren van Brug 131 liggen parallel aan de stroomrichting in een recht deel van de singel waardoor deze recht aangestroomd wordt, in tegenstelling tot Brug 187. Het effect van deze brug op het stroombeeld is daardoor duidelijk kleiner dan brug 187. De pilaren blokkeren een deel van het doorstroomoppervlak waardoor de stroomsnelheid tussen de brugpijlers hoger is (van $0,15$ tot $0,21 \text{ m/s}$). Het zog van de pijlers is terug te zien in het stroombeeld door de lokaal lagere snelheid aan de benedenstroomse zijde van de pijlers.

Het model lijkt goed in staat om de ruimtelijke en temporele fluctuaties van de neren te simuleren. Mogelijk is er een klein effect van de overgang in roosterresolutie te zien bij brug 187, omdat hier precies een neer lijkt te ontstaan. Dit kan toeval zijn maar is in deze studie niet verder onderzocht. Verder lijkt het zog van de bruggen vrij ver benedenstrooms impact te hebben op het stroombeeld. Mogelijk dat de gekozen viscositeit/diffusiviteitswaarde aan de lage kant is omdat verwacht mag worden dat de effecten uitdoven in de benedenstroomse richting.

Afbeelding 5.1 Brug 187: Maximale stroomsnelheden bij 10 m³/s afvoer. Boven: snelheidsmagnitude, onder snelheidsrichting en magnitude)

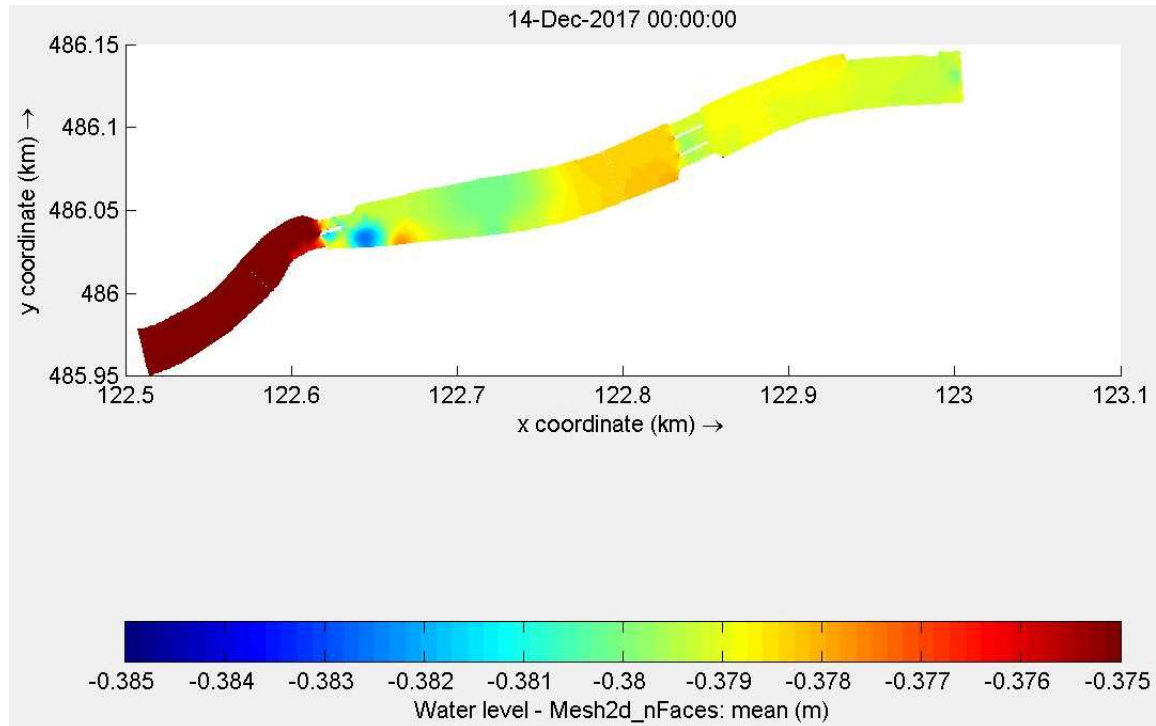


Afbeelding 5.2 Brug 131: Maximale stroomsnelheden bij 10 m³/s afvoer. Boven: snelheidsmagnitude, onder snelheidsrichting en magnitude)



In afbeelding 5.3 is het ruimtelijk beeld van de opstuwung te zien. Brug 187 zorgt voor een grotere opstuwung dan brug 131, circa 7 mm ten opzichte van circa 1 mm. Brug 187 veroorzaakt een grotere opstuwung door een kleiner effectief doorstroomoppervlak en sterkere neervorming. Deze neervorming leidt tot een groter energieverlies, en dus tot een hogere uittreewerstand. Brug 131 wordt recht aangestroomd en is het uittreewerlies kleiner.

Afbeelding 5.3 Ruimtelijk beeld van de opstuwung uit het fijnmazige 2D model



5.2 Vergelijking berekende opstuwungen

Afbeelding 5.5 is de opstuwung van brug 187 en brug 131 voor de periode december 2017 volgens de verschillende berekeningsmethodieken weergegeven:

- analytisch volgens vergelijking (1) (blauw);
- analytisch volgens vergelijking (1), maar met een afvoercoëfficiënt begrensd op 1, omdat deze ook is gemaximaliseerd in de 1D berekeningen (zwart);
- een berekening met D-Hydro 1D met een pillar bridge definitie (oranje);
- een berekening met D-Hydro 1D-2D met een grof grid en subgrid brug pillaren (rood);
- een berekening met D-Hydro 1D-2D met een fijn grid en de pillaren toegevoegd als droge cellen (groen).

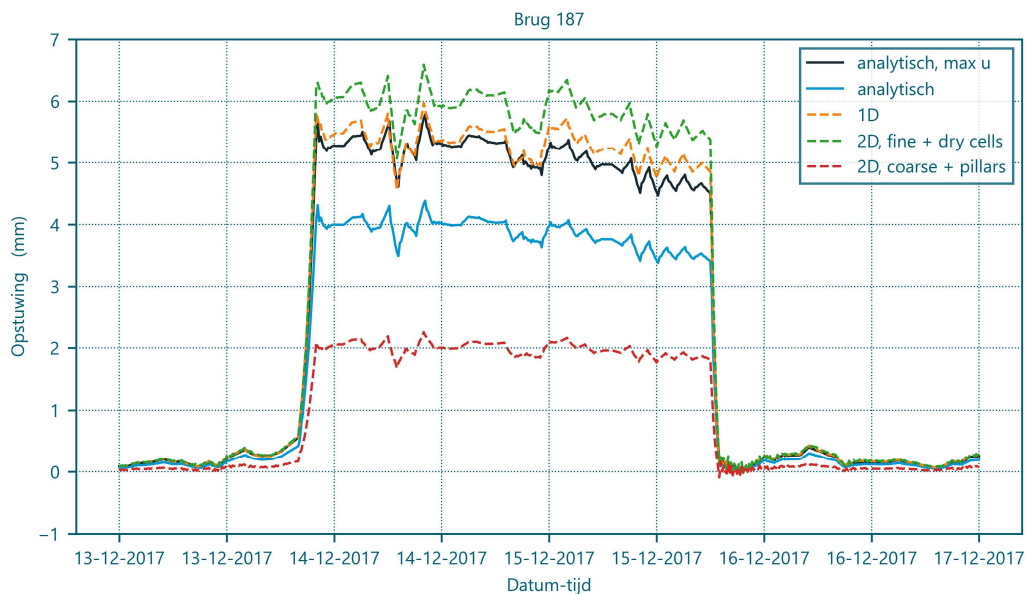
Te zien is dat het fijnmazige 2D model de hoogste opstuwung berekend bij brug 187. Deze brug ligt in een bocht en heeft een relatief complexe geometrie waardoor 2D stromingsprocessen van belang zijn en die worden met het fijnmazige model beter gesimuleerd. Het 2D resultaat met het grove model vertoont echter een veel lagere opstuwung. Mogelijk is het grove grid niet grof genoeg voor de toepassing van het subgrid structure brugpilaar in deze situatie. Wanneer gridcellen voor een groot deel worden 'geblokkeerd' door het subgrid structure kan dit leiden tot onnauwkeurigheden. De celgrootte ligt ter plekke van de brugpijler rond de 2,2 m, waardoor de cellen voor 90 % worden geblokkeerd. De wijze waarop de subgrid brug is geïmplementeerd leidt mogelijk tot een onderschatting van de stromingsweerstand. Het zou in dit geval beter zijn om de pilaar te modelleren aan de hand van droge cellen [ref. 4]. Voor 2D kan dus het beste worden uitgegaan van de resultaten van het model met het fijne grid.

Zoals gezegd in paragraaf 4.1 is de afvoercoëfficiënt in het 1D model begrensd op één. Hierdoor wordt de opstuwung in 1D overschat indien de daadwerkelijke afvoercoëfficiënt hoger is dan 1. De verwachting is dus dat in de praktijk de opstuwung lager kan uitvallen dan de met een 1D model bepaalde opstuwung. Te zien is dat voor beide bruggen de 1D resultaten (oranje) goed overeenkomen met de analytische som (zwart). Dit valt ook te verwachten, omdat van dezelfde vergelijking gebruik wordt gemaakt.

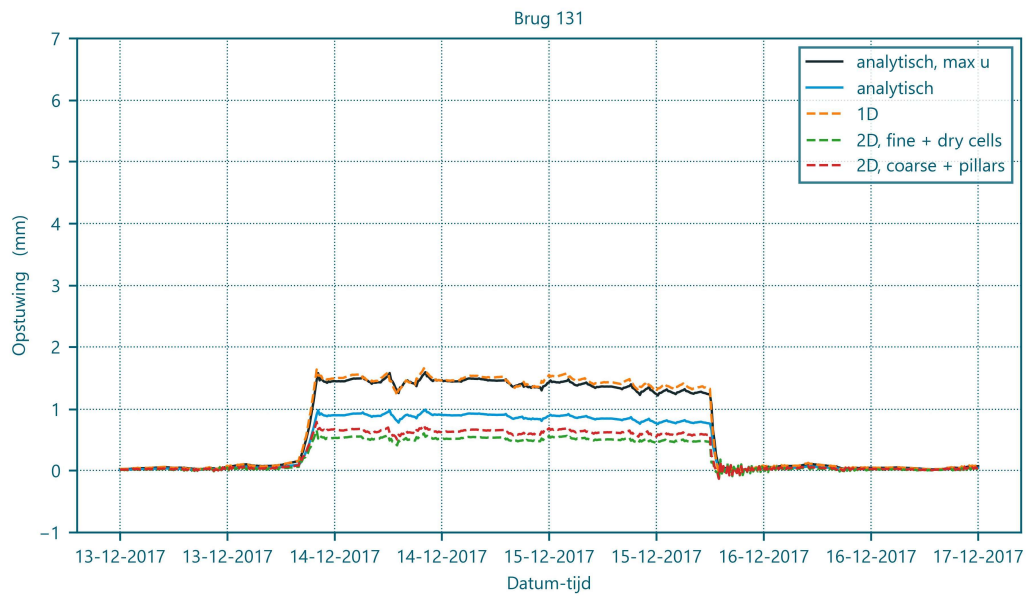
De kleine verschillen die er nog te zien zijn, vallen onder andere te wijten aan de toegepaste hydraulische radius en doorstroomoppervlak in de analytische som. Deze is in de analytische som niet voor elke tijdstap afzonderlijk bepaald (het doorstroomoppervlak ten tijde van de maximale waterstand is toegepast voor de gehele periode).

Gezien de opmerkingen hierboven, lijken de resultaten van brug 131 plausibel. Het analytische resultaat waarmee 2D wordt vergeleken ligt iets hoger dan de 2D resultaten van de modellen, doordat in de analytische som, de pilaren op het diepste punt van het profiel zijn gekozen en er dus, wat zorgt voor een fractie meer opstuwning. De 1D resultaten geven een hogere opstuwning dan de 2D resultaten door de maximalisatie van de afvoercoëfficiënt in 1D. Er zit een klein verschil tussen de berekende opstuwning van het grove en fijne 2D model. Dit heeft er waarschijnlijk te maken dat de gridcellen die vallen binnen de 'dry areas' iets minder breed zijn dan de daadwerkelijk pilaren. Een gridcel wordt pas meegenomen als de droge cel als het grootste gedeelte van de gridcel binnen de dry area valt. Geconcludeerd wordt dat de absolute afwijkingen bij brug 131 tussen beide 2D modellen en de analytische methode klein zijn (bandbreedte van de opstuwning vallen binnen 0,4 mm) en dus goed met elkaar overeenkomen en dat het 1D model een conservatieve berekening geeft van de opstuwning.

Afbeelding 5.4 Opstuwning van brug 187 voor de periode december 2017



Afbeelding 5.5 Opstuwing van brug 131 voor de periode december 2017



In tabel 5.1 is de maximale opstuwing voor beide bruggen en de beschouwde methoden samengevat.

Tabel 5.1 Maximaal berekende opstuwing (in mm) tijdens de afvoerpiek van 10 m³/s

Brug	Analytisch max μ	Analytisch	1D	2D grob	2D fijn
brug 187	5,8	4,4	6,0	1,9	6,2
brug 131	1,6	1,0	1,6	0,8	0,7

6

DISCUSSIE

Afhankelijk van het doeleinde van de studie kan overwogen worden bruggen 1D, 2D, 3D of zelfs met een Computational Fluid Dynamics (CFD) te implementeren. Implementatie van '2D/3D bruggen' in het gehele boezemmodel zou te hoge rekentijden opleveren maar is ook niet nodig omdat de stroomsnelheden in grote delen van de boezem te laag zijn om opstuwing bij bruggen te veroorzaken. Mogelijk is de 2D/3D schematisatie van bruggen wel van meerwaarde in het hoogwaterbemalingsgebied waar de stroomsnelheden tijdens afvoersituaties relatief hoog kunnen oplopen. Het 2D/3D model kan gebruikt worden om een betere inschatting van de opstuwing te krijgen en indien gewenst maatregelen te implementeren om de opstuwing bij bruggen te verminderen of ecologische maatregelen te implementeren (gebruikmakend van de ruimte die ontstaat bij bruggen waarvan de opstuwing wordt overschat in 1D).

Te zien is dat de 2D resultaten sterk bepaald worden door de instellingen van de uniforme horizontale achtergrond eddy viscositeit. Het is daarom aan te raden om allereerst een gevoeligheidsanalyse op deze parameter uit te voeren alvorens de simulaties uit te voeren. Hoe fijnmaziger het grid hoe kleiner de horizontale achtergrond eddy viscositeit moet worden gekozen.

Omdat de afvoercoëfficiënt in een 1D model is begrensd op 1 geeft deze een overschatting van de opstuwing. Dit is dusdanig van invloed op het resultaat dat het maar de vraag is of een brug ook gekalibreerd kan worden door de verliescoëfficiënten (vormfactoren, uittreecoëfficiënten en weerstandscoëfficiënten) van de brug aan te passen binnen het 1D model. Indien deze niet is begrensd, bepalen deze verliescoëfficiënten in grote mate de uitkomst, aangezien dit lineair schaalbaar is met de opstuwing. Mogelijk dat deze limitatie opgeheven kan worden voor een standaard brug (geen invloed van bochten, pilaren parallel aan stroomrichting) zodat dit minder conservatieve berekening van opstuwing oplevert. Daarnaast kan de inschatting van de verliescoëfficiënten (met name het intreeverlies) ook significant van invloed zijn op de opstuwing, vooral bij complexe bruggen. Een inschatting maken van deze parameter is lastig, omdat deze indirect afhankelijk is van het stroombeeld en de geometrie aan de aanstroomzijde van de brug.

In de 2D modellen worden minder aannames gedaan ten opzichte van het 1D model. Daarmee is de verwachting dat deze resultaten betrouwbaarder zijn dan de analytische en 1D resultaten. Echter, ook in een 2D model worden nog versimpelingen gedaan. Het is bekend dat rondom pijlers complexe 3D stromingsstructuren optreden die niet worden gesimuleerd in een 2D model. Bovendien is aangegeven door Waternet dat de bouw van de brug boven water niet altijd is doorgevoerd tot op de bodem. Het kan goed zijn dat onder water alleen brugpalen staan. Dit kan mogelijk een vertekend beeld geven van de pijlers. Hier is te weinig informatie over bekend om dit mee te nemen in de schematisatie.

Helaas konden de modelresultaten en uitkomsten van analytische berekeningen niet goed worden vergeleken met metingen, omdat er geen data voor dezelfde periode beschikbaar was. Mocht er in de toekomst nog een praktijkproef plaatsvinden dan kan een vergelijkbare studie worden uitgevoerd inclusief validatie met metingen. Het wordt dan geadviseerd om nauwkeurige waterstandsmetingen boven- en benedenstrooms van de bruggen uit te voeren. Ook moet het debiet door de singel worden gemeten.

De berekende opstuwingswijken sterk af van de gemeten 2 cm voor brug 187 tijdens een praktijkproef. Merk op dat deze praktijkproef niet goed gebruikt kan worden voor validatie van de berekende opstuwing omdat het een andere periode betrof.

Voor een goede vergelijking moeten de gemeten en gesimuleerde condities met elkaar overeenkomen. Ook moet de locatie van de uitvoerpunten in het model overeenkomen met de meetpunten in de praktijk. Zodoende zou het model ook gekalibreerd en gevalideerd kunnen worden. Daarnaast wordt verwacht dat het meenemen van de stroomlijnschotten van invloed kan zijn op het stroombeeld.

7

CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

7.1 Conclusies

Uit de studie blijkt dat het gebruik van een fijnmazig 2D model om de opstuwing nabij bruggen in relatief snel stromende watergangen toegevoegde waarde heeft ten opzichte van een 1D model en analytische methode:

- in het geval van een brug in een bocht met een complexe geometrie zoals brug 187 ontstaat een complex stroombeeld met sterke stroomsnelheidsverschillen en neren. Het gesimuleerde stroombeeld met het fijnmazige 2D model en de opstuwing lijken plausibel. Het grofmazige 2D model, 1D model en analytische methode houden hier geen rekening mee. Daarom leiden deze methoden waarschijnlijk tot een onderschatting van de opstuwing;
- voor berekening van de opstuwing van standaard brug die recht aangestroomd zoals brug 131 blijkt dat het fijnmazige 2D model de minste opstuwing berekend en zijn overige modellen en methoden dus conservatiever. Eventueel kan de (hoogstwaarschijnlijke) overschatting van de opstuwing van het 1D model gebruikt worden als ruimte om ecologische ontwikkelingen die weerstand verhogen en/of doorstroomoppervlak verkleinen te implementeren.

7.2 Aanbevelingen

De berekende stroombeelden en opstuwing met 2D model nabij de bruggen 187 en 131 zouden gevalideerd kunnen worden met metingen tijdens een afvoermoment waarbij een substantiële stroming ontstaat:

- met een Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) kan de stroming in 3 richtingen (x y, z richting) gemeten worden in meerdere profielen voor en na de brug en in de doorstroomopeningen. Hieruit kan ook de afvoer afgeleid worden;
- de stroomsnelheden aan het wateroppervlak kunnen opnames met een camera gemaakt worden die daarna nabewerkt kunnen worden om zo stroombeelden te verkrijgen;
- waterstanden met druksensoren net boven- en benedenstrooms van de bruggen. De locatie van de waterstandsmetingen moet ingemeten worden. Opgemerkt wordt dat druksensoren een onnauwkeurigheid hebben van circa 5 mm (orde grootte van de opstuwing). Daarom moet de gemeten opstuwing aanmerkelijk hoger zijn dan de meetonnauwkeurigheid.

8

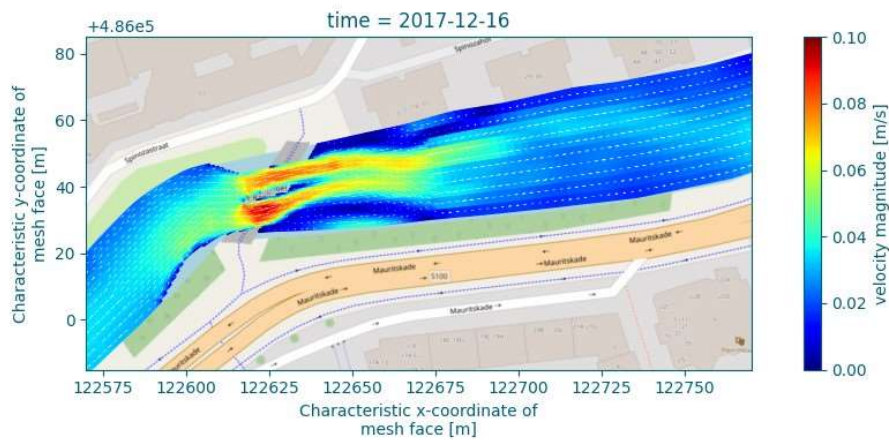
REFERENTIES

- 1 Bouwtekeningen bruggen, Ingenieursbureau Gemeente Amsterdam.
- 2 D-Flow Flexible Mesh User Manual, released for D-Hydro Suite 1D2D 2023 (2023) Deltares.
- 3 M. Yossef (2017) Memo: Horizontal eddy viscosity settings for the 6th generation models. Deltares.
- 4 J. de Jong, J. van Kester, E. de Goede (2019) Memo: Implementation, validation and application of bridge piers in D-Flow Flexible Mesh, Deltares.

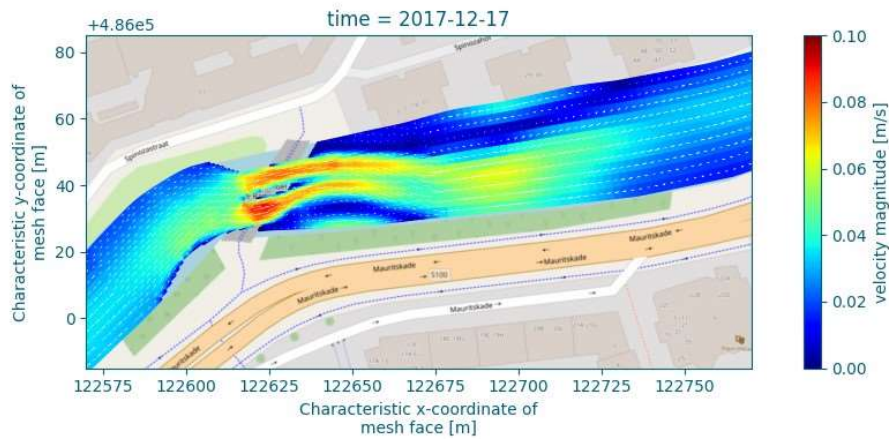
Bijlage(n)

BIJLAGE: STROOMBEELD OP VERSCHILLENDE MOMENTEN VOOR BRUG 187

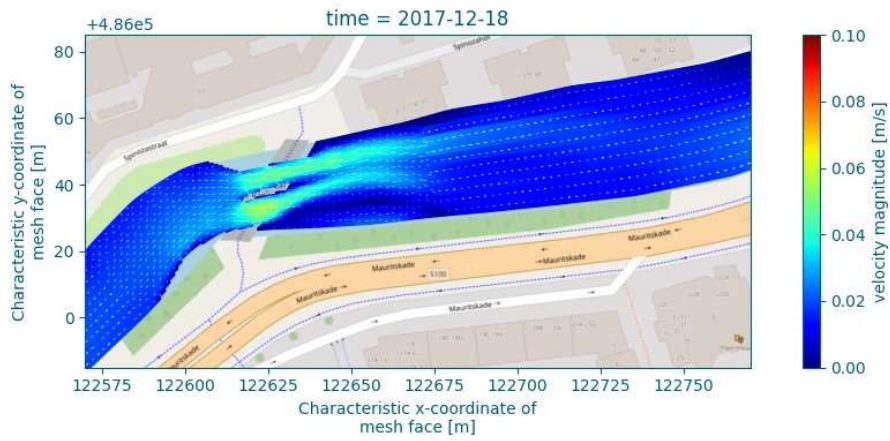
De afbeeldingen zijn gemaakt met tussenpozen van één dag (16 t/m 30 december 2017). De kleurschaal over de afbeeldingen is hetzelfde. Merk op dat de stroming op 26 december in tegengestelde richting is.



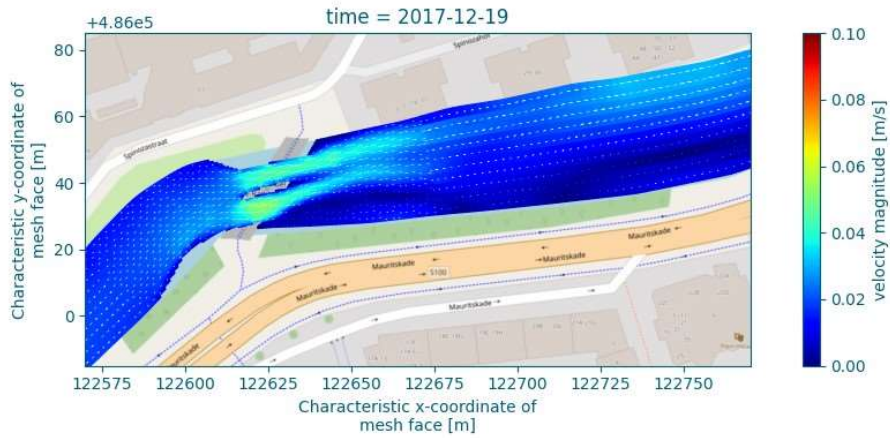
Witteveen+Bos - H042, 2023-10-10, 20230919 Singel Brug 102D fine pillars C502 Elder1 vicou0001



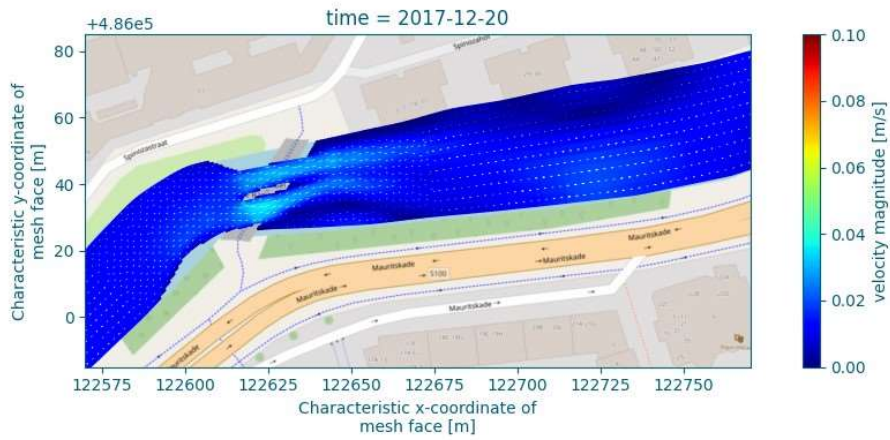
Witteveen+Bos - H042, 2023-10-10, 20230919 Singel Brug 102D fine pillars C502 Elder1 vicou0001



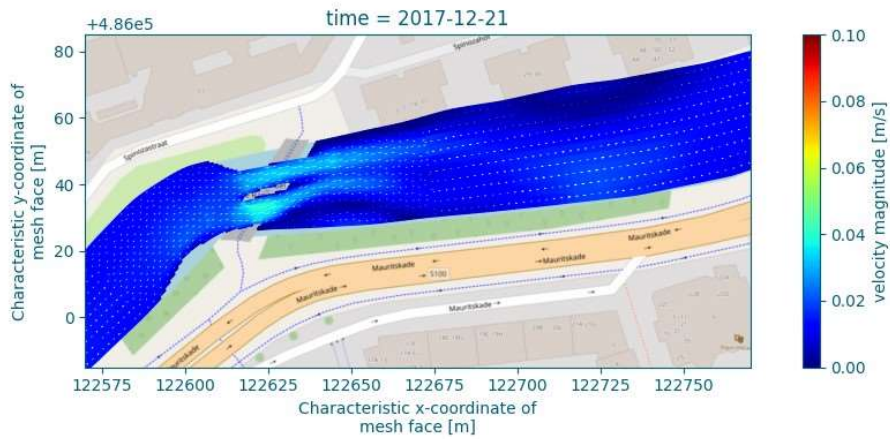
Witteveen+Bos - HOU2, 2023-10-10, 20230919 Singel Brug 102D fine pillars Cs02 Elder1 vicou0001



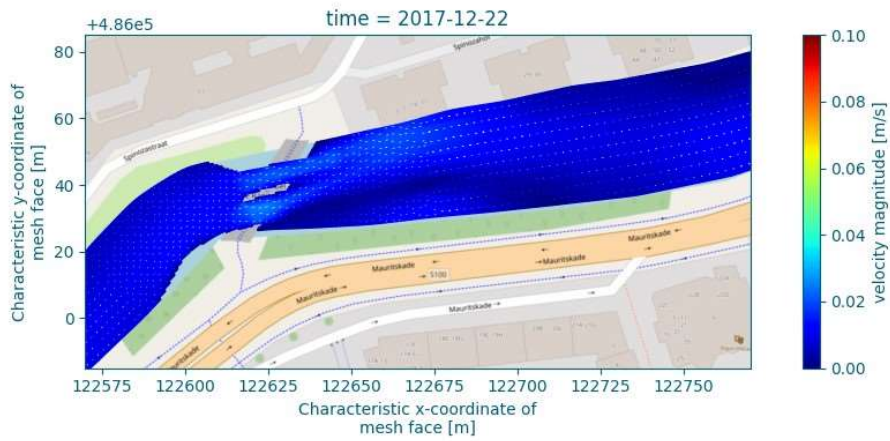
Witteveen+Bos - HOU2, 2023-10-10, 20230919 Singel Brug 102D fine pillars Cs02 Elder1 vicou0001



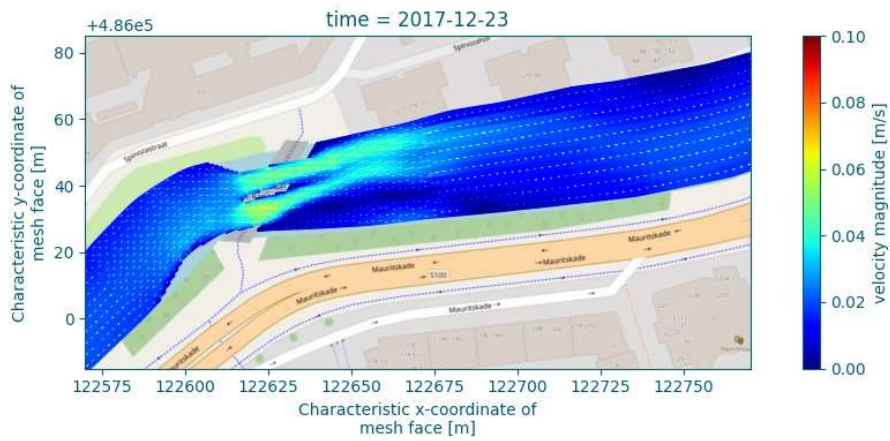
Witteveen+Bos - HOU2, 2023-10-10, 20230919 Singel Brug 102D fine pillars Cs02 Elder1 vicou0001



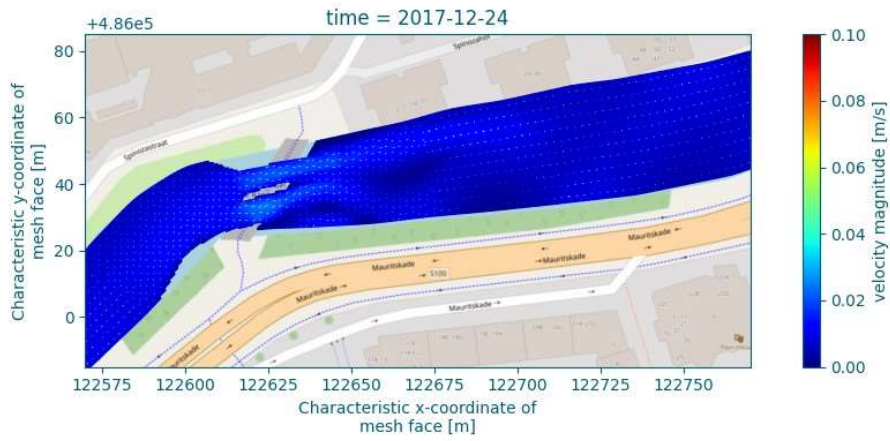
Witteveen+Bos - HOU2, 2023-10-10, 20230919 Singel Brug 102D fine pillars Cs02 Elder1 vicou0001



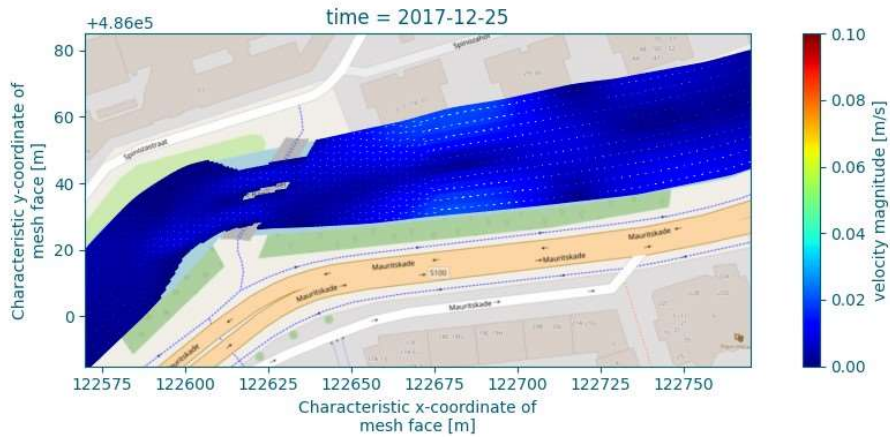
Witteveen+Bos - HDU2, 2023-10-10, 20230919 Singel Brug 102D fine pillars Cs02 Eider1 vicou0001



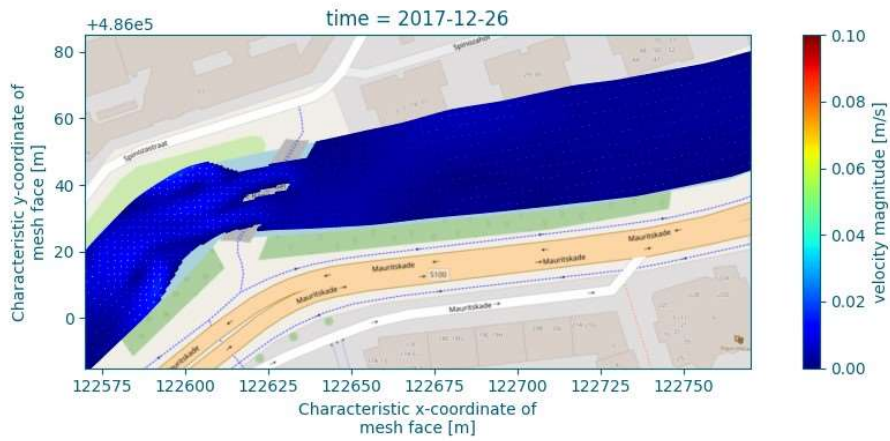
Witteveen+Bos - HDU2, 2023-10-10, 20230919 Singel Brug 102D fine pillars Cs02 Eider1 vicou0001



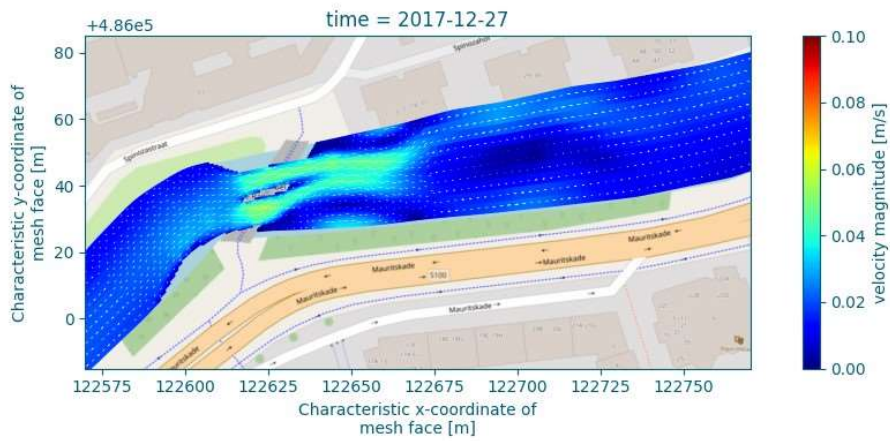
Witteveen+Bos - HDU2, 2023-10-10, 20230919 Singel Brug 102D fine pillars Cs02 Eider1 vicou0001



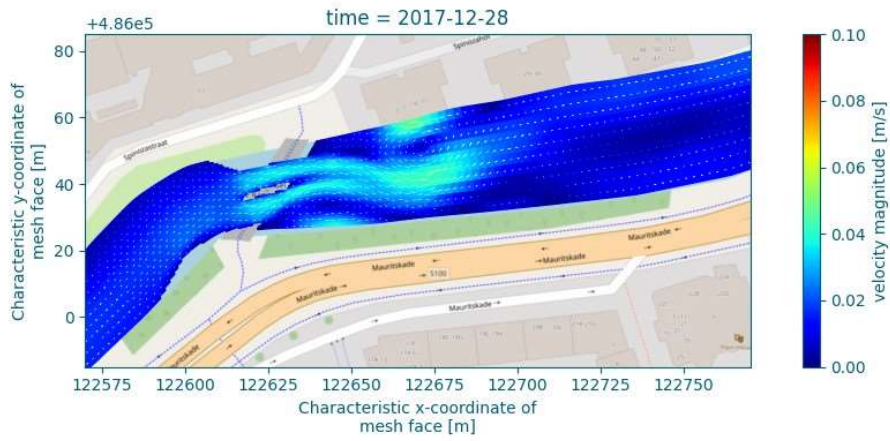
Witteveen+Bos - HDU2, 2023-10-10, 20230919 Singel Brug 102D fine pillars Cs02 Eider1 vicou0001



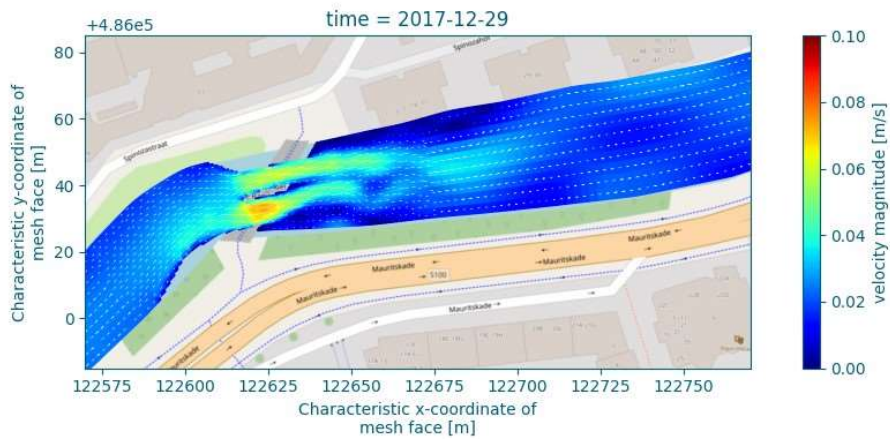
Witteveen+Bos - HDU2, 2023-10-10, 20230919 Singel Brug 102D fine pillars Cs02 Elder1 vicou0001



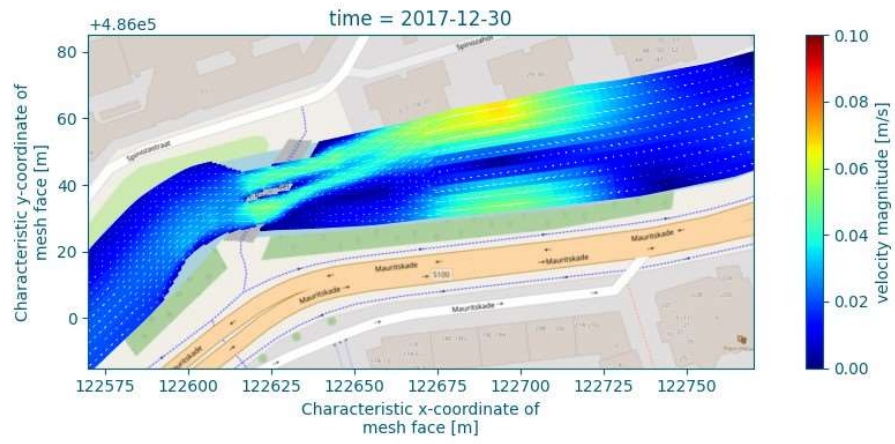
Witteveen+Bos - HDU2, 2023-10-10, 20230919 Singel Brug 102D fine pillars Cs02 Elder1 vicou0001



Witteveen+Bos - HDU2, 2023-10-10, 20230919 Singel Brug 102D fine pillars Cs02 Elder1 vicou0001



Witteveen+Bos - HDU2, 2023-10-10, 20230919 Singel Brug 102D fine pillars Cs02 Elder1 vicou0001



Witteveen+Bos - H062, 2023-10-10, 20230919 Singel Brug 102D fine pillars C03 Eiter1 viraov001



BIJLAGE: STROOMBEELD BIJ VERSCHILLENDE INSTELLINGEN VAN DE EDDY VISCOSITY/DIFFUSIVITY

De afbeeldingen zijn allen gemaakt voor het stroombeeld bij brug 187 ten tijde van een hoge stroomsnelheid (00:00 14 december 2017). Van onder naar boven zijn de eddy viscosity en diffusivity respectievelijk ingesteld op een waarde van 0,1, 0,01, 0,001, 0,0001.

