



Vlaanderen
is wetenschap



00_153_1
WL rapporten

Inschatten van de meet- en modelonzekerheden van hydrologische, hydraulische en GIS data en modellen

Samenvatting van Resultaten
en aanbevelingen voor Verder Onderzoek

DEPARTEMENT
MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN

waterbouwkundiglaboratorium.be

Inschatten van de meet- en modelonzekerheden van hydrologische, hydraulische en GIS data en modellen

Samenvatting van Resultaten en aanbevelingen voor Verder Onderzoek

Heredia, M.; Van Hoey, S.; Rocabado, I.; Nopens, I.; Glas, H.; Deruyter, G.; De Maeyer, P.; Pereira, F.; Mostaert, F

Juridische kennisgeving

Het Waterbouwkundig Laboratorium is van mening dat de informatie en standpunten in dit rapport onderbouwd worden door de op het moment van schrijven beschikbare gegevens en kennis.

De standpunten in deze publicatie zijn deze van het Waterbouwkundig Laboratorium en geven niet noodzakelijk de mening weer van de Vlaamse overheid of één van haar instellingen.

Het Waterbouwkundig Laboratorium noch iedere persoon of bedrijf optredend namens het Waterbouwkundig Laboratorium is aansprakelijk voor het gebruik dat gemaakt wordt van de informatie uit dit rapport of voor verlies of schade die eruit voortvloeit.

Copyright en wijze van citeren

© Vlaamse overheid, Departement Mobiliteit en Openbare Werken, Waterbouwkundig Laboratorium 2021
D/2021/3241/026

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Heredia, M.; Van Hoey, S.; Rocabado, I.; Nopens, I.; Glas, H.; Deruyter, G.; De Maeyer, P.; Pereira, F.; Mostaert, F (2021). Inschatten van de meet- en modelonzekerheden van hydrologische, hydraulische en GIS data en modellen: Samenvatting van Resultaten en aanbevelingen voor Verder Onderzoek. Versie 1.0. WL Rapporten, 00_153_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

Overname uit en verwijzingen naar deze publicatie worden aangemoedigd, mits correcte bronvermelding.

Documentidentificatie

Opdrachtgever:	Waterbouwkundig Laboratorium	Ref.:	WL2021R00_153_1
Trefwoorden (3-5):	Risico; Overstromingen; Onzekerheden		
Kennisdomeinen:	Waterbeheer > Risico > Overstromingen > Numerieke modelleringen		
Tekst (p.):	20	Bijlagen (p.):	/
Vertrouwelijk:	☒ Nee	☒ Online beschikbaar	

Auteur(s):	Heredia, M.; Van Hoey, S.; Rocabado, I.; Nopens, I.; Glas, H.; Deruyter, G.; De Maeyer, P.
------------	--

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Pereira Fernando	Getekend door: Fernando Pereira (Signat Getekend op: 2021-10-18 15:26:54 +02:0 Reden: Ik keur dit document goed <i>Fernando Pereira</i>
Projectleider:	Pereira Fernando	Getekend door: Fernando Pereira (Signat Getekend op: 2021-10-18 15:27:30 +02:0 Reden: Ik keur dit document goed <i>Fernando Pereira</i>

Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Mostaert, F. Voor het afdelingshoofd, afwezig Patrik Peeters, ingenieur, belast met de leiding van de afdeling Waterbouwkundig Laboratorium	Getekend door: Patrik Peeters (Signature) Getekend op: 2021-10-18 17:17:40 +02:0 Reden: Ik keur dit document goed <i>Patrik Peeters</i>
-----------------	--	--



Abstract

Dit rapport geeft vooreerst een overzicht en samenvatting van de verschillende doelstellingen van het project van Modelonzekerheden.

Ten eerste, een van de hoofddoelstellingen van de eerste phase van het onderzoek was het kwantificeren van onzekerheden binnen het modellerproces om tot de uiteindelijke onzekerheid op overstromings- en schadekaarten te komen. Daarvoor werd de onzekerheid op maximale waterhoogte en debieten ten gevolge van verschillende onzekerheden bekeken.

Ten tweede, dit rapport behandelt de onzekerheid die optreedt bij het bepalen van schade en risico aan de hand van Latis, vertrekkend van overstromingskaarten. Er wordt omschreven hoe men met fouten bij schade- en risicoberekening moet omgaan en er wordt een opsomming gegeven van de verschillende foutbronnen met een inschatting van hun grootte. Verder wordt er een methodologie uitgewerkt om de totale onzekerheid te bepalen, die werd toegepast in een Excel-rekenblad.

Bovendien worden de nodige elementen ter identificatie van verder onderzoek m.b.t. de onzekerheden op de volledige modeltrein en de ontwikkeling van een methodologie voorgesteld.

Inhoudstafel

Abstract	III
Inhoudstafel.....	V
Lijst van de tabellen.....	VI
Lijst van de figuren	VII
1 Inleiding	1
2 Doelstelling van het project.....	2
3 Resultaten van het project	4
4 Verder onderzoek.....	5
4.1 Inleiding	5
4.2 Aanvullend onderzoek van onzekerheden	5
4.2.1 Input/meet onzekerheden karakteriseren	9
4.2.2 Debietsmetingen	10
4.2.3 Hydrologische modellering.....	11
4.2.4 Hydraulische modellering.....	12
4.2.5 Schade en risico model.....	13
4.3 Bepaling en verificatie van de totale predictieve onzekerheid	15
4.3.1 Bepaling van de totale predictieve onzekerheid	15
4.3.2 Verificatie van de bekomen procedure	16
4.4 Validatie van de methodologie.....	17
4.5 Ontwikkeling van een operationele tool	17
5 Referenties	19

Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Beschrijving doelstellingen van deelopdrachten	2
Tabel 2 – Beschrijving resultaten van deelopdrachten	4
Tabel 3 – Overzicht van de verschillende onzekere toestandsvariabelen en hun connectie met de volgende deelstap.	7
Tabel 4 – Lijst van gesuggereerde codes	17

Lijst van de figuren

Figuur 1 – Overzicht van de volledige modeltrein met de verschillende bronnen van onzekerheid aangegeven per deelaspect	5
Figuur 2 – Typische banden van onzekerheid voor (a) neerslagmetingen, (b) peilmetingen en (c) debietsmetingen bij verschillende methoden.....	10

1 Inleiding

De algemene doelstelling van deze opdracht was de begroting van de onzekerheid op gebruikte data en modellen en de ontwikkeling van een instrumentarium dat de opdrachtgever toelaat bij modelopbouw en scenarioberekeningen een inschatting mee te geven van de onzekerheidsmarge op zijn studieresultaten. Deze opdracht omvatte de volgende deelopdrachten.

- Begroting onzekerheden meetgegevens
- Begroting onzekerheden hydrologisch model
- Begroting onzekerheden hydraulisch model
- Begroting onzekerheden schade- en risicomodel
- Inschatten van onzekerheden bij de volledige modeltrein
- Ontwikkeling en toepassing van een methodologie + bruikbaar instrumentarium

Omwille van de omvang en de details die nodig zijn voor het uitvoeren van deze opdracht, werd een opsplitsing gemaakt in twee fases: De eerste fase omvat deelopdrachten 1 tot 4 voor de begroting van de onzekerheden van de verschillende componenten. De tweede fase omvat een aanvulling op de resultaten uit deelopdracht 3 (i.e. onzekerheden van de hydraulische structuren).

Onderhavige nota geeft vooreerst een overzicht en samenvatting van de verschillende doelstellingen (Hoofdstuk 2) en de bereikte resultaten (Hoofdstuk 3) van het project. In Hoofdstuk 4 worden de nodige elementen ter identificatie van verder onderzoek mbt de onzekerheden op de volledige modeltrein en de ontwikkeling van een methodologie voorgesteld.

2 Doelstelling van het project

Onderstaande tabel geeft de deelopdrachten en details, zoals gepubliceerd in het bestek van het Waterbouwkundig Laboratorium, weer.

Tabel 1 – Beschrijving doelstellingen van deelopdrachten

Deelopdracht	Titel	Beschrijving
DO1	Begroting onzekerheden meetgegevens	Onzekerheden op neerslag, waterstanden, snelheden en debieten. Daarnaast ook onzekerheden op instrumenten en het afleiden van Q-h verbanden en de invloed van onzekere meetgegevens en Q-h verbanden op de modelresultaten.
DO2	Begroting onzekerheden hydrologisch model	Inschatting van de onzekerheden op de debieten die de uitkomst zijn van neerslag-afvoermodellen (NAM-modellen, DHI). Invloed van de verschillende ijkingparameters en het gebruik van Thiessen polygonen.
DO3	Begroting onzekerheden hydraulisch model	Onzekerheden gerelateerd aan keuzes die gemaakt dienen te worden bij MIKE11 en de door het Waterbouwkundig Laboratorium gebruikte invoerdata: de keuze van de invoerdata en initiële condities; de keuze van de tijdstap en de gridcelgrootte; de manier van schematisatie met o.a.; keuze voor parallelle takken of reservoirs; de afstand tussen de dwarsdoorsneden en hun kwaliteit; ruwheden.
DO4	Begroting onzekerheden schade- en risicomodel	De bronnen van onzekerheid zijn de samenstelling van de bodemgebruikkaart; de combinatie van databronnen met een verschillende kwaliteit; de vaststelling van de maximale schade voor verschillende bodemgebruik categorieën; het verloop van de schadefuncties en hun afhankelijkheid van de waterdiepte; het combineren van de schade bij verschillende terugkeerperioden tot een risico.

Deelopdracht	Titel	Beschrijving
DO5	Inschatten van de onzekerheden in de volledige modeltrein	Welke bronnen van onzekerheid het belangrijkst zijn doorheen de volledige cyclus vanaf de data-inwinning tot en met het doorrekenen van het risico.
DO6	Ontwikkeling en toepassing van een methodologie + bruikbaar instrumentarium voor het inschatten onzekerheden resultaten	De belangrijkste resultaten waarnaar gekeken dient te worden zijn de waterstanden en debieten in de beschouwde waterloop; de uitgestrektheid van de overstroming en waterdiepte in het overstromingsgebied; de plaatsafhankelijke schades en risico's.

3 Resultaten van het project

Het project werd uitgevoerd in twee fases met relevante resultaten voor de begroting van de onzekerheden van verschillende elementen. Onderstaande tabel geeft een samenvatting van de bereikte resultaten.

Tabel 2 – Beschrijving resultaten van deelopdrachten

Deelopdracht	Titel	Beschrijving van bereikte resultaten
DO1	Begroting onzekerheden meetgegevens	• onzekerheid ten gevolge van onzekerheid in hoogte-debietrelaties
DO2	Begroting onzekerheden hydrologisch model	• onzekerheid ten gevolge van kalibratie van een neerslag-afvoermodel (i.e. NAM model) met onzekere hoogte-debietrelaties • onzekerheid in parameters NAM model • onzekerheid Thiessen gebiedsneerslag
DO3	Begroting onzekerheden hydraulisch model	• onzekerheid ten gevolge van de onzekerheid op de bathymetrie • sensitiviteit analyse van Manning: invloed van Manning's coëfficiënt over de resultaten (Bovendijle en Demer) • onzekerheden van modellering van structuren
DO4	Begroting onzekerheden schade- en risicomodel	• onzekerheid schade-risico model

Deze deelopdrachten zijn de basis en de fundamentele deelcomponenten voor de begroting van de onzekerheid op de volledige modeltrein. De belangrijkste bronnen van onzekerheid werden geïdentificeerd en geanalyseerd. Die resultaten zijn beschikbaar in Vandenbergh et al. (2021) en De Wit et al. (2021).

Vervolgens is het de taak deze componenten te verzamelen voor het begroten van de totale onzekerheid. Dit is nuttig voor de ontwikkeling van een nieuwe methodologie die kan worden toegepast op andere stroomgebieden.

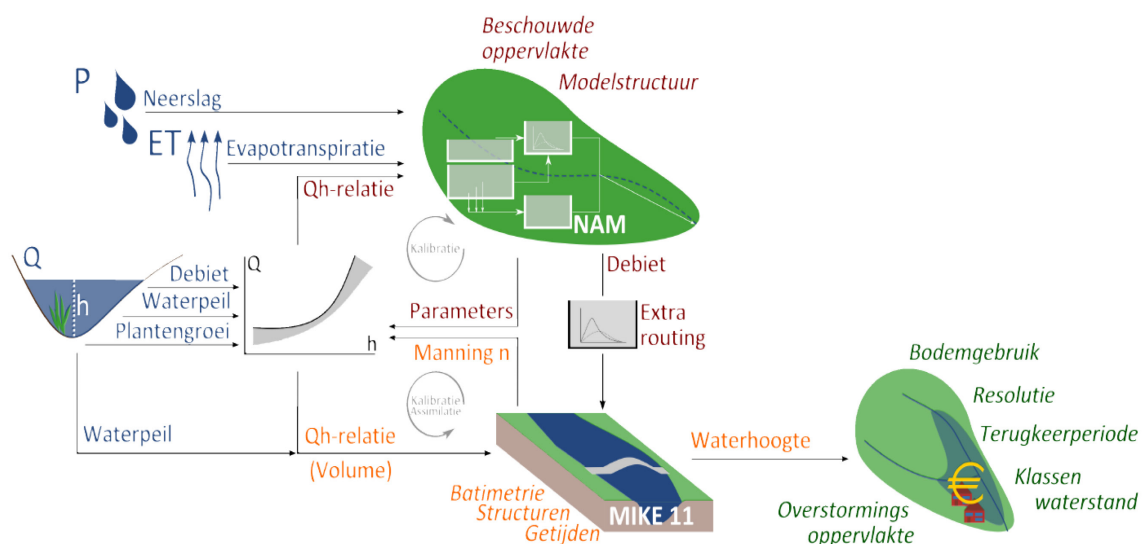
4 Verder onderzoek

4.1 Inleiding

De onzekerheden van de verschillende elementen worden verder geanalyseerd en aangevuld om de totale onzekerheid van de volledige modeltrein te bepalen en te valideren. Figuur 1 geeft een overzicht van de verschillende onderdelen in de volledige modeltrein en hun interne connecties.

Die figuur wordt de basis van de voorstelling van 4 onderzoeklijnen voor de aanvulling van de eerste delen van het project. Die onderzoeklijnen zijn hierbij aangewezen:

1. Aanvulling van de bestudeerde onzekerheden
2. Bepaling van de totale onzekerheid
3. Ontwikkeling en toepassing van een methodologie
4. Ontwikkeling van een operationeel en geautomatiseerd instrumentarium



Figuur 1 – Overzicht van de volledige modeltrein met de verschillende bronnen van onzekerheid aangegeven per deelaspect: input/meetonzekerheden in blauw, hydrologische modellering in rood, hydraulische in oranje en schade/kosten gerelateerde in groen

4.2 Aanvullend onderzoek van onzekerheden

De doelstelling van de eerste lijn is de aanvulling van de bereikte resultaten en van de verschillende onzekerheden, met het onderzoek naar de mogelijke invloed van gegevens en parameters op modellen. Tijdens de uitvoering van het initiële onderzoek, werden verschillende en aanvullende elementen geïdentificeerd als mogelijke bronnen van onzekerheden. Deze aanvullende elementen (i.e. gegevens en parameters) zijn belangrijk voor de onzekerheidsanalyse. Sommige van deze elementen hebben een grote invloed op de onzekerheid van hydrologische en hydraulisch modellen, terwijl andere een lage invloed hebben. Volgens de getoonde structuur van Figuur 1: Overzicht van de volledige modeltrein met de verschillende bronnen van onzekerheid aangegeven per deelaspect: input/meetonzekerheden in blauw, hydrologische modellering in rood, hydraulische in oranje en schade/kosten gerelateerde in groen

vijf elementen werden voorgesteld voor de aanvulling van de begroting van onzekerheden:

- Meetgegevens
- Qh-relatie
- Hydrologisch model
- Hydraulisch model
- Schade-risico model

Om de volledige modeltrein te beschouwen moet de onzekerheid van de connecties tussen deze deelstappen worden gekwantificeerd, zodat ze in de modeltrein kunnen doorgerekend worden. Daarnaast wordt er voorgesteld om een post-verificatie te doen van de onzekerheid (op basis van historische data) en de toegepaste methode te evalueren.

Om een duidelijke strategie te bekomen, dienen we voor elke deelstap volgende aspecten goed te analyseren:

- De variabelen waarvan een onzekere beschrijving moet gedefinieerd worden
- De connecties met andere deelstappen, de vraag hierbij is waar hebben deze variabelen invloed? Door deze vraag gepast te beantwoorden, kan de volgende deelstap rekening houden met de onzekere beschrijving van deze variabele. Zo zullen bijvoorbeeld debieten niet langer als een deterministische tijdsreeks worden doorgegeven, maar als een probabilistisch interval.
- De wijze waarop deze onzekerheid wordt beschreven, zodoende dat deze voor de andere deelstappen bruikbaar is.
- De invloedsfactoren binnen de deelstap die inspelen op de bekomen onzekerheid en al dan niet meegenomen moeten worden in de afleiding van de onzekerheid.

Voor elke deelstap komt het er dus op neer wat er in de deelstap dient meegenomen te worden van voorgaande onzekerheid (i.e. onzekerheid van de voorgaande elementen in de modeltrein).

Om het relatieve belang van een bepaalde onzekerheid in de volledige modeltrein te evalueren dient dus ook steeds rekening gehouden te worden met de toestandsvariabele die wordt doorgegeven in de modeltrein. Bijvoorbeeld, indien we willen weten hoe belangrijk een factor is op de gemodelleerde waterhoogte, dienen we niet enkel te kijken naar het effect op de hoogste gemodelleerde waterstand, maar ook naar de kans dat we in een andere peilklasse vallen op de kritieke momenten (stormweer) voor het berekenen van de kosten/schade. De factoren die hierbij belangrijkst zijn, dienen vervolgens nadrukkelijker bestudeerd te worden om de kans op een verkeerde peilklasse te minimaliseren. Het is bovendien te verwachten dat in de loop van de tijd verschillende factoren belangrijk zijn en een tijdsgebaseerde inschatting van de gevoeligheden kan hierbij nuttige info leveren (Wagener et al., 2003; Van Hoey et al., 2013).

Tabel 3 geeft een overzicht van de variabelen die de verschillende onderdelen verbinden, samen met hun type beschrijving en de connectie waarmee de variabele gemaakt wordt. Extra info over het type data wordt doorgegeven in de info kolom. In de volgende secties worden de verschillende deelaspecten verder besproken, rekening houdend met de type connecties die gedefinieerd zijn. Hierbij is in de tabel en de verdere analyse gefocust op de huidige modelstatus, i.e. de momenteel gebruikte set aan modellen, en de datatypes die hierbij worden gebruikt als inputdata (bv. neerslag, evapotranspiratie) en outputdata (bv. debieten). Een andere modelset (bv. een ander model dan NAM), andere datatypes (bv. ruimtelijke neerslaginput, evapotranspiratie op basis van een alternatieve methode) of nieuwe datatypes (bv. gemeten bodemvocht als assimilatieproduct) zijn niet opgenomen in de tabel.

Tabel 3 – Overzicht van de verschillende onzekere toestandsvariabelen en hun connectie met de volgende deelstap.
 Voor elke deelstap zijn ook de invloedsfactoren opgegeven.

Criteria	Type	Connectie	Extra Info
Deel 1: Meetonzekerheden Output variabelen • Neerslag • Evapotranspiratie • Debietsmeting • Waterpeil • Waterpeil • Waterpeil Invloedsfactoren • Plantengroei • Meetmethode	Forcing forcing afijking afijking afijking assimilatie	hydrologisch model hydrologisch model Qh-curve Qh-curve hydraulisch model hydraulisch model	tijdsreeks, puntmetingen (pulsen) tijdsreeks
Deel 2: Qh-curve Output variabelen • Qh-bekomen debiet • Qh-bekomen volumes • Qh-bekomen debiet Invloedsfactoren • Modelstructuur • Plantengroei • Extrapolaties • Opstuwing • Hysteresis	afijking afijking assimilatie	hydrologisch model hydraulisch model hydraulisch model	tijdsreeks tijdsreeks
Deel 3: Hydrologisch model Output variabelen • Gemodelleerd debiet Invloedsfactoren • Modelparameters • Modelstructuur • Beschouwde oppervlakte • aanwezigheid extra stromingscomponent	randvoorwaarde	hydraulisch model	tijdsreeks

Criteria	Type	Connectie	Extra Info
Deel 4: Hydraulisch model Output variabelen - Gemodelleerde waterpeil - Gemodelleerde oppervlakte - Gemodelleerde stijgsnelheid Invloedsfactoren - Modelparameters (o.a. ruwheid) - Modelstructuur (o.a. schematisatie overstromingsgebieden) - Bathymetrie - Structuren (parameters en sturing) - Getijden/afwaarts waterpeil	forcing forcing forcing	kosten-schade model kosten-schade model slachtoffermodel	klasse
Deel 5: Kosten-schade model Variabelen - Kost - Slachtoffers Invloedsfactoren - Bodemgebruik - Resolutie - Terugkeerperiode - Opdeling klassen waterstand - Schadefunctie - Bevolkingsdichtheid - Slachtofferfunctie	FINAL FINAL		

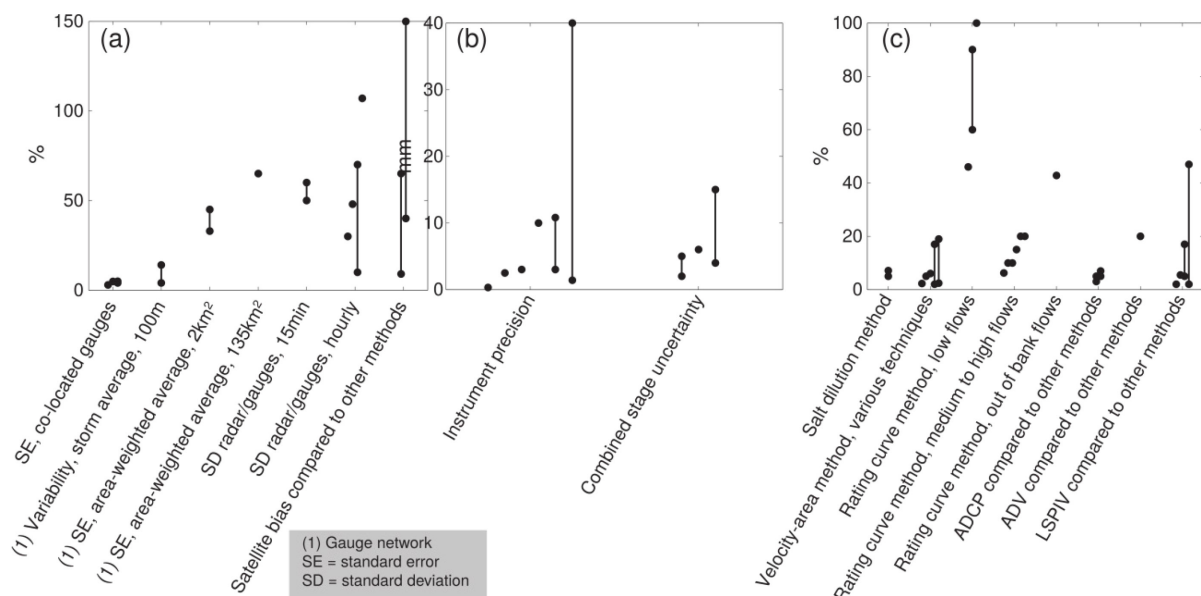
4.2.1 Input/meet onzekerheden karakteriseren

Een eerste luik van de onzekerheidstrein zijn de verschillende onzekere meetgegevens, gebruikt als forcing van de modellen en in de kalibratie van de hydrologische en hydraulische modellen. Het correct karakteriseren van deze onzekerheden is belangrijk, vermits de data als inputvariabele wordt gebruikt in de andere deelaspecten, maar ook als ijkingsvariabele (om modellen te optimaliseren).

Het verschil in de tijdreeks van neerslag ten opzicht van de andere ligt in de aard van de variabele. Debiet, evapotranspiratie en hoogte zijn bijna altijd continue variabelen (behalve wanneer rivieren zouden droogvallen voor debiet), waarbij de onzekerheid kan worden uitgedrukt in een (relatieve) grootte. Neerslag heeft niet enkel een onzekerheid over de grootte van de variabele op een bepaald moment, maar eerder een onzekerheid over de bui-karakteristieken (grootte, startpunt, eindpunt, . . .).

De invloedsfactor van plantengroei op de debiets- en hoogte meting is een gekende problematiek. De meetmethode die wordt toegepast heeft rechtstreeks invloed op de onzekere karakteristieken van de variabele. Ook voor neerslag en evapotranspiratie is dat geldig. Uit deelopdracht 2 is gebleken dat het effect van variatie bij de Thiessenfactoren op het bekomen debiet klein is voor homogene stormen. Met andere woorden, het wegvallen van enkele stations of het bijplaatsen van enkele meetstation zal onder die condities geen grote invloed hebben op de onzekerheid. Dit is echter stroomgebied- en bui afhankelijk, vermits de respons op de ruimtelijke variatie van neerslag zeer verschillend is tussen verschillende stroomgebieden (Lobligeois et al., 2014). Bovendien geeft de analyse geen informatie over de potentiële fout veroorzaakt door de (punt)metingen en de Thiessen methode zelf. Zo zal de methodiek steeds minder goed in staat zijn om de variatie van lokale buien te detecteren. Lobligeois et al. (2014) toonde aan dat het belang van ruimtelijke neerslag toeneemt bij grotere stroomgebieden en stormen met grote ruimtelijke variabiliteit. Ook is het modelafhankelijk, vermits het te verwachten is dat een ruimtelijk meer gedetailleerd model dergelijke neerslagvariabiliteit nauwkeuriger zal propageren.

De karakterisatie van onzekerheid voor neerslag, waterpeilen en debieten is afhankelijk van de meetmethoden. Figuur 2 geeft een samenvatting van de onzekerheid van neerslag-, debiets- en peilmetingen bij verschillende tijds- en ruimtelijke schaal voor verschillende technieken. Meer informatie is te vinden in McMillan, Krueger & Freer (2012). In kader van het HarmoniRiB-project (<http://harmonirib.geus.info/index.shtml>) werd een databank opgebouwd met als doel een probabiliteitsmodel op te stellen voor de verschillende onzekere databronnen voor stroomgebieden.



Figuur 2 – Typische banden van onzekerheid voor
 (a) neerslagmetingen, (b) peilmetingen en (c) debietsmetingen bij verschillende methoden (uit McMillan, Krueger & Freer, 2012)

In deze stap dient een zo gedetailleerd mogelijke karakterisatie te worden uitgevoerd van de verschillende beschikbare metingen (en hun methoden met specifieke karakteristieken) en dient nagegaan te worden wat de mogelijke fout op de verschillende metingen is. De mate van detail kan hierbij gekozen worden, locatiespecifiek of eerder per type variabele. Deze afwijkingen dienen dan opgenomen te worden in de methodologie gebruikt voor de afleiding van de Qh-curve en de hydrologische/hydraulische modellering/afijking en zullen in volgende secties worden besproken.

4.2.2 Debietsmetingen

Die stap bevat twee elementen (of methoden) voor de metingen van debieten. Eerste de toepassing van de afleiding van de Qh-relatie, ten tweede, de toepassing van meettoestellen (i.e. ADCP's). De eerste methode is gedetailleerd in de volgende paragrafen. De tweede methode moet onderzocht worden ten opzichte van de definitie van de inherente onzekerheden van die methode en toestellen.

De afleiding van de Qh-relatie gebeurt momenteel volgens een niet-lineaire regressie (power-law), al dan niet stuksgewijs. In de eerste fase werd de onzekerheid geschat op deze regressie. Deze methode sluit rechtstreeks aan op de gebruikte procedure en is daardoor een bruikbare keuze voor operationele werking. De regressie kan ook worden uitgevoerd met een gewogen kleinste kwadraten, waardoor de onzekerheid op de debietsmetingen wordt meegenomen in de regressie.

Echter, wordt de onzekerheid voorgesteld als het betrouwbaarheidsinterval van de regressie en deze is dus constant bij verschillende groottes (bij stuksgewijze is er een variabele onzekerheid in functie van de grootte, puur in functie van aantal gekozen deelcurves). Dit laatste is niet echt realistisch, vermits men grotere onzekerheid verwacht bij zeer lage en zeer hoge debieten en bij extrapolatie van de meetreeks. Bovendien wordt hierbij de veronderstelling gemaakt van perfecte ruis (normale verdeling en homoscedasticiteit), hetgeen aanleiding kan geven tot bias in de schatting van de onzekerheid (Petersen-Ø verleir, 2004).

Alternatieve methoden zijn reeds in de literatuur beschreven, zowel statistisch gebaseerde (Di Baldassarre & Montanari, 2009) als niet-statistische (Pappenberger et al., 2006). Niet-statistische methoden zijn interessant indien de voorwaarden voor de traditionele (statistische methoden) niet voldaan zijn (geen stationariteit in

de residuen). McMillan et al. (2010) fit verschillende Qh-curves aan random geselecteerde subsets van de beschikbare Qh-datapunten, terwijl Pappenberger et al. (2006) en Westerberg et al. (2011) een fuzzy algorithm gebaseerd op Hojati et al. (2005) toepassen om de Qh-curve te fitten, waarbij de relatie tussen de fouten impliciet wordt opgenomen. Deze laatste kunnen ook beter om met de onzekere beschrijvingen van zowel waterpeilen als debiet, vermits deze beide worden opgenomen in de fuzzy procedure. Meetpunten worden niet opgenomen als 'harde' waarden, maar de onzekere range wordt hierbij in acht genomen. Debietsmetingen zijn minder nauwkeurig dan de peilmetingen, vermits ze meestal bepaald worden op basis van een integratie van het snelheidsprofiel over het dwarsprofiel van de rivier.

Di Baldassarre & Montanari (2009) geven een overzicht van verschillende oorzaken die bijdragen aan de onzekerheid van de Qh-curve en geven aan dat extrapolatie van de Qh-curve de andere oorzaken overstijgt. Veranderingen ontstaan door plantengroei kunnen door de meeste methoden niet worden meegenomen en tijd-afhankelijke fits worden meestal voorgesteld.

In deze stap dient er nagegaan te worden voor welke specifieke stations de traditionele (kleinste kwadraten) methode zoals beschreven in DO1 geldig is door de eigenschappen van de fouten te evalueren op heteroscedasticiteit, normaliteit en stationariteit. Voor de stations waarbij deze assumpties niet voldoen, dienen de in voorgaande paragrafen aangehaalde technieken te worden toegepast. De begrootte onzekerheidsrange op de debiets- en peilmetingen dienen hierbij als basis en de gebruikte meettechniek moet worden in acht genomen. Een uitgewerkte methodologie (stappenplan) die de onzekerheid meeneemt laat dan toe om de verschillende instanties en gebruikers op een consistente manier te laten werken voor de verschillende stations. Dergelijke analyse resulteert in onzekerheidsbanden op de debietsreeksen gebruikt voor de afijking van het hydrologische en hydraulische model.

4.2.3 Hydrologische modellering

De onzekerheid op de hydrologische modellering is rechtstreeks verbonden met de optimalisatieprocedure, zoals reeds naar voor kwam in de eerste fase. Onzekere effecten die niet expliciet zijn beschreven worden gedeeltelijk gecompenseerd bij de optimalisatie van de parameters, hetgeen de voorspellende kracht van het model vermindert. Daarom is het belangrijk de verschillende bronnen samen op te nemen, zodat de bekomen onzekerheid van de parameterisatie representatief is.

In de eerste fase werd de manuele optimalisatie vergeleken met een automatische optimalisatie, met zeer uiteenlopende resultaten voor beide wanneer toegepast op de bekomen grenzen van de Qh-onzekerheid. Bovendien is de daar voorgestelde procedure onderhevig aan de assumptie dat de minimum/maximumbanden van de Qh-curve ook aanleiding zou geven tot extremen in de onzekere parameters, hetgeen weinig waarschijnlijk is (en zeker dient geverifieerd te worden). Tot slot is er in de optimalisatie geen rekening gehouden met de onzekerheid van de neerslag/evapotranspiratie en van de modelstructuur. Verder onderzoek is dus nodig voor dit onderdeel.

Het opnemen van de onzekerheid in de debietsmetingen bij de parameterisatie afkomstig van de Qh-curve werd reeds toegepast in de literatuur (McMillan et al., 2010; Krueger et al., 2010; Van Hoey et al., 2013). De traditionele frequentistische methode doet dit opnieuw via een gewogen versie van de kleinste kwadraten via de error covariantie-matrix op de metingen, maar de assumpties zijn meestal niet vervuld. Andere methoden maken gebruik van de onzekere grenzen om op basis hiervan zogenaamde limits of acceptability op te stellen (Blazkova & Beven, 2009; Liu et al., 2009) en zo een selectie van behavioural modellen te maken, die worden gebruikt voor de onzekerheidsanalyse. Deze methode is gebaseerd op de Generalised Likelihood Uncertainty Estimation (GLUE) aanpak, initieel beschreven door (Beven & Binley, 1992) en reeds toegepast in de eerste fase.

De opname van de onzekerheid van de forcing variabelen (neerslag en evapotranspiratie) gebeurt meestal buiten de optimalisatie, waarbij een ensemble aanpak wordt toegepast. Deze onzekerheden kunnen echter ook opgenomen worden in de optimalisatieprocedure zoals beschreven in Vrugt et al. (2008) en Kavetski et al. (2006). De onzekerheid op de neerslag wordt hierbij opgenomen in de optimalisatieprocedure in een

Bayesiaanse aanpak, waarbij gebruik gemaakt wordt van een zogenaamde rainfall multiplier, met andere woorden een extra vrijheidsgraad die mee dient gefit te worden.

Onzekerheid in de modelstructuur wordt ook gedeeltelijk gecompenseerd in de optimalisatie. Het NAM model is mogelijks niet het geschikte model voor elk stroomgebied. In een voorgaand rapport (Van Hoey et al., 2012) werd reeds gekeken naar verschillende variaties op eenzelfde modelstructuur en werd duidelijk dat deze onzekerheid groot is. Verschillende modelstructuren, met verschillende onderliggende hypothesen omtrent de dominante processen, gaven gelijkaardige resultaten. Een goeie performantie van een modelstructuur kan dus ook voortkomen uit een overparameterisatie met nefaste gevolgen voor de predictieve performantie. Een controle op de identificeerbaarheid van de parameters zou hier een interessante onderzoekspiste geven.

Algemeen kan gesteld worden dat in verband met parameteronzekerheid er duidelijkheid dient te zijn over de te gebruiken methoden, met hun achterliggende assumpties en mogelijkheden tot toepasbaarheid. De klassieke kleinste kwadraten methode laat toe om onzekerheidsbanden te berekenen, maar neemt strenge aannames in verband met de eigenschappen van de residuen (Cierkens et al., 2012). De GLUE aanpak doet dit niet, maar is gebaseerd op een subjectieve keuze omtrent behavioural simulaties. Andere Bayesiaanse statistieken (Kavetski et al., 2006) laten toe om een likelihood-functie op te nemen in de modevaluatie, maar deze is in vele gevallen moeilijk op te stellen en daardoor opnieuw onderhevig aan assumpties omtrent de foutenkenmerken. Bij Approximate Bayesian Computation (ABC, Nott et al. 2012) wordt aangenomen dat op basis van de beschrijvende kenmerken van de data in combinatie met een foutentolerantie, de onzekere parameterverdeling kan worden benaderd, waardoor geen expliciete beschrijving van de likelihood functie nodig is. Het resultaat is echter een direct resultaat van de gekozen beschrijvende kenmerken en daardoor, net als GLUE, eerder te gebruiken als methode voor modevaluatie.

Het is dus een kwestie van duidelijk aan te geven welke assumpties en keuzes gemaakt zijn en waarom. De onzekerheid wordt meestal samengebracht in een beschrijving van de parameteronzekerheid, waaruit kan gesampled worden om een onzekere debietsreeks te genereren voor de verdere stappen in de modeltrein, eventueel in combinatie met klimatologische ensembles of ensembles uit verschillende modelstructuren.

Verder is het effect van de indeling van de verschillende NAM-modellen en hun ruimtelijke representativiteit niet gekend en zijn de effecten van een extra routing element nog niet onderzocht.

In deze stap dienen zo juist mogelijk de onzekerheden in rekening gebracht te worden bij de optimalisatieprocedure. Er zijn verschillende methoden in de literatuur beschreven, elk met hun eigen assumpties. Verder onderzoek is nodig in de bovenstaand beschreven onderwerpen:

- Opname van de onzekerheid in de debietsmetingen
- Opname van de onzekerheid van de forcing variabelen
- Onzekerheid in de modelstructuur (en identificeerbaarheid van de parameters)
- Gebruikte optimalisatieprocedure en de bekomen parameteronzekerheid

4.2.4 Hydraulische modellering

De discussie bij de begroting van de onzekerheid op de hydraulische modellering is sterk gelijklopend met die van het hydrologische model, vermits opnieuw een optimalisatieprocedure dient uitgevoerd te worden en de discussie omtrent het opnemen van onzekere factoren in de optimalisatie cruciaal is. Echter, algemeen wordt aanvaard dat de onzekerheid op de modelstructuur kleiner is dan bij hydrologische modellen. Bovendien wordt er meestal enkel met de Manning-coëfficiënt gewerkt, waardoor het probleem een veel kleinere dimensie heeft. Daardoor zou het weinig gepast zijn om eenzelfde methodologie voor te stellen voor de hydraulische modellering en dient er dus specifiek gekeken worden naar een meest geschikte methodologie.

De assimilatie van de debieten en waterpeilen is een extra element in de hydraulische modellering en hierbij kan ook rekening gehouden worden met de onzekerheid van zowel model als meting om deze vervolgens met elkaar te combineren in een gepast data-assimilatie algoritme, waarbij ensemble kalman filters reeds beschreven zijn (Matgen et al., 2010) in de literatuur. Integratie met een optimalisatieprocedure werd voorgesteld in Vrugt et al. (2005), waarbij een combinatie gemaakt wordt van een ensemble kalman filter en een Shuffled Complex Evolution Metropolis (SCEM) procedure, hetgeen de in de eerste fase gebruikte SCE optimalisatie is, uitgebreid met een Bayesiaanse update om de onzekerheid op de parameters te begroten. Bij operationele modellering is een assimilatiestap belangrijk om de reeds gepropageerde onzekerheid te kunnen verkleinen.

Het effect van de bathymetrie en aanwezige structuren werd reeds in de eerste fase nagegaan. De bathymetrie draagt slechts minimaal bij tot de onzekerheid, maar voor de structuren is dit wisselend. Verder onderzoek naar gecombineerde effecten van deze structuren (voor verschillende onderzoeksvragen) zal noodzakelijk zijn. Daarnaast is ook het effect van getijden nog niet bestudeerd.

In deze stap dient er een soortgelijke analyse gedaan te worden als bij de hydrologische modellering, maar geen zelfde methodologie zal geschikt zijn, vermits de optimalisatie andere eigenschappen heeft en de assimilatie moet worden opgenomen. Bovendien wordt de waterhoogte in waterpeilklassen doorgegeven. Het effect hiervan dient nagegaan te worden. Verder dient ook het gecombineerde effect van meerdere structuren verder bestudeerd te worden in vergelijking met de parameteronzekerheid.

4.2.5 Schade en risico model

Om de onzekerheden van het LATIS model nauwkeuriger te kunnen bepalen in de toekomst, kunnen deze in twee groepen opgesplitst worden: de modelonzekerheden en de dataonzekerheden. De eerste groep is inherent aan het model en kan nooit volledig weggewerkt worden. Deze onzekerheden hangen namelijk vast aan de gekozen werkwijze om het risico te bepalen. De tweede groep, de dataonzekerheden, zijn afhankelijk van de gebruikte data. Hoe nauwkeuriger en gedetailleerder deze data, hoe kleiner de onzekerheden die hiermee gepaard gaan.

Modelonzekerheden

De voornaamste modelonzekerheden zijn te wijten aan de benadering van de schadefuncties en de maximale schade die in de laatste jaren niet noodzakelijk werden geactualiseerd.

- De gebouwen zijn onderverdeeld in drie types. Aan elk type wordt een waarde toegekend, die niet afgestemd is op de waarde werkelijke waarde. Een herziening van zowel de maximale schade (in functie van nieuwe materialen, afwerkingsgraad en hedendaagse graad van comfort), als van de schadefuncties, die dateren van 2001, zal leiden tot exactere schattingen van de schade.
- De schade aan gebouwen wordt berekend als een percentage van de maximale schade en de desbetreffende schadefunctie. Deze schadefuncties zijn slechts een inschatting van de verhouding tussen de waterhoogte en de schade aan de verschillende elementen, maar zijn wel cruciaal in de LATIS methodiek. Bovendien wordt voor de waterhoogte gewerkt met intervallen van 25 cm. Het toepassen van schadefuncties op basis van kleinere intervallen, zal een verfijning opleveren van het resultaat.
- De bebouwing wordt met de huidige methodologie gespreid over een te groot aantal matrixcellen, wat mogelijks aanleiding geeft tot een overschatting van de schade, bijvoorbeeld in gevallen waarbij enkel de tuinen overstroomd zijn. Aanbevolen wordt om tijdens de verwerking zo lang mogelijk het vectorformaat aan te houden. Tevens kan de informatie verbeterd worden door gebruik te maken van het GRB, dat zowel de polygonen van de gebouwen als van de wegen bevat, al dan niet in combinatie met LIDAR data.

- De waarde toegekend aan industriële gebouwen en industriële infrastructuur geeft aanleiding tot grotere onzekerheden. Deze zouden kunnen verbeterd worden indien de reële (her)verzekeringswaarde gekend zou zijn.
- Zowel industrie als luchthavens worden ondergewaardeerd, omdat enkel schade aan de gebouwen en hun inhoud in rekening worden gebracht. In de praktijk is deze schade vaak ondergeschikt aan de economische gevolgschade door productieverlies en schadeclaims, die kunnen ontstaan door een periode van inactiviteit gedurende de herstellingswerkzaamheden. Het introduceren van omzetcijfers zou in deze een verbetering van het model betekenen.
- Hoewel in het model wel rekening gehouden wordt met het seizoen voor het bepalen van de schade aan akkers, wordt het temporeel aspect niet gebruikt in functie van de mobiliteit van personen en voertuigen. De introductie van dag/ nacht en werkdagen/ weekend cycli zouden een verfijning betekenen voor de berekening van schade aan mensen en voertuigen.

Dataonzekerheden

In LATIS 3.0 wordt nog steeds maar aan de helft van de puntelementen een oppervlakte toegekend. Elementen zonder oppervlakte worden enkel als volledig overstroomd of niet overstroomd gezien. Door de puntelementen om te zetten naar oppervlakte-elementen kan een graad van overstrooming toegekend worden, wat voor een realistischer resultaat zorgt. Het vinden van nuttige datasets is hierbij belangrijk. Veel van deze puntelementen zijn beschikbaar in het GRB.

Grenspixels zijn pixels die zich op de grens tussen bodemgebruiksklassen bevinden, bijvoorbeeld tussen bewoning en weiland. Deze zorgen voor een overschatting van het risico omdat aan grenspixels altijd de hoogste waarde wordt toegekend. De onzekerheid die hiermee gepaard gaat, kan beter ingeschat worden door de schaderesultaten op te splitsen per bodemgebruiksklasse en de schadekaart te controleren met een topografische kaart.

Er gaat een grote onzekerheid gepaard met de keuze van terugkeerperiodes. Berekeningen met verschillende combinaties van terugkeerperiodes geven ook zeer verschillende resultaten. Om deze onzekerheid te verkleinen, kan gewerkt worden met een interpolatie tussen de schade bij hoge en bij lagere terugkeerperiodes. Ook een extrapolatie voor ongekende terugkeerperiodes kan hier een oplossing bieden.

De onzekerheid van de data kan ook verkleind worden door de data binnen de overstroomingsgebieden van de kleinste terugkeerperiodes, 1, 5 en 50 jaar, manueel te verbeteren met behulp van bijvoorbeeld luchtfoto's en topografische kaarten. Hoe gedetailleerder de data, hoe kleiner de onzekerheid.

Zoals ook al blijkt uit het onderdeel "modelonzekerheden" heeft een groot deel van de onzekerheden te maken met de (on)beschikbaarheid van voldoende accurate gegevens. De resolutie van de beschikbare data speelt daarbij een niet onbelangrijke rol, waarbij onmiddellijk ook de stelling van paragraaf 2.3 met betrekking tot de impact van de gebruikte resolutie dient genuanceerd te worden.

- Bij gebruik van grovere resoluties moet voldoende aandacht worden besteed aan de selectie of middelingmethode. Het is zeer belangrijk om de resolutie af te stemmen om de grootte van het beschouwde gebied. Hoe groter het studiegebied, hoe grover de resolutie mag zijn.
- De impact van de verrastering van lineaire vector objecten in een grid met grove resolutie zal te groot worden in verhouding tot de totale oppervlakte bij het bestuderen van een klein gebied. Bijvoorbeeld: met een raster van 50 m op 50 m worden alle wegen 50 m breed, waardoor in stedelijk gebied nog quasi enkel wegen over blijven.

Tegenwoordig is veel data beschikbaar met hoge resolutie of in vectorformaat. Bovendien beschikt de huidige generatie computers over voldoende rekencapaciteit om grote bestanden binnen een aanvaardbare tijd te verwerken, zodat weinig argumenten overblijven om de resolutie van de beschikbare data te downgraden.

Algemeen

De onzekerheid voor veel klassen kan verbeterd worden indien de (her)verzekeringswaarde beschikbaar is. Dit is echter een strategische keuze. Voor de gebouwen kan bij gebrek aan deze waarden eventueel geïntegreerd gebruik gemaakt worden van de gemiddelde verkoopprijzen van woonhuizen, villa's en appartementen die beschikbaar zijn via de site van StatBel.

Recent kwam gebiedsdekkend voor Vlaanderen het GRB ter beschikking. Het GRB bevat vectorinformatie over infrastructuur, gebouwen en percelen op cm-niveau, wat heel nauwkeurige berekeningen toelaat. Integratie van het GRB en het omvormen van het rastermodel naar een vectormodel kan een denkpiste zijn voor een verdere optimalisatie van LATIS.

4.3 Bepaling en verificatie van de totale predictieve onzekerheid

Het doel van de tweede lijn is om de totale onzekerheid op de gesimuleerde output (waterhoogtes met hun bijhorende klassen en daaruitvolgende schade) in een model te bepalen op basis van de bijdragen van de verschillende model componenten (e.g. meetgegevens, hydrologisch model, parameters, enz.).

De te verwachten outcome van de in sectie 4.2 beschreven analyses zijn enerzijds (1) het in kaart brengen van de 'onzekere' connecties tussen de verschillende deelmodellen en anderzijds (2) een voor elke deelstap meest geschikte techniek/algorithm/methodologie om de bronnen van de onzekerheden te kwantificeren in functie van de volgende deelstap. In dit deel wordt de outcome van de verschillende gekwantificeerde onzekerheidsbronnen gecombineerd. De onzekere bronnen dienen dus gecombineerd te worden vertaald in een predictieve onzekerheid van de uiteindelijke output en dit dient op een zo (computationeel) efficient mogelijke manier te gebeuren.

Beschouw parameteronzekerheid als voorbeeld: In deel 4.2 wordt deze gekwantificeerd en uiteindelijk een posterior distributie bekomen die de onzekerheid van de parameters beschrijft. In dit deel wordt deze onzekerheid, samen met de andere bronnen, vertaald in een onzekerheid van het te voorspellen debiet bij een predictie. Beide zijn verbonden, zo zal de predictieve onzekerheid van het debiet in het hydrologisch model moeten beschreven zijn om als onzekere input gebruikt te worden in het hydraulisch model.

Daarnaast is het noodzakelijk de focus te behouden op de meest belangrijke onzekerheidsbronnen in de gehele modeltrein wanneer deze geschakeld is. Gevoeligheidsanalyse kan worden gebruikt voor prioritisatie en het inschatten van relatieve effecten van de factoren op bepaalde outputs.

4.3.1 Bepaling van de totale predictieve onzekerheid

De bepaling van de totale onzekerheid in een volledig model dat bestaat uit verschillende submodellen is niet eenvoudig. De onzekerheid die in een submodel propageert aan volgende submodellen, is afhankelijk van de modelstructuur en de onzekerheid van de verschillende deelprocessen (metingen, variabelen uit voorgaande deelstap, parameters,...). Door in deel 4.2 bij elke deelstap rekening te houden met de conditionering uit de voorgaande stap, wordt hier rekening mee gehouden.

In principe is het mogelijk om de verschillende onzekerheden stochastisch te propageren tot een predictieve onzekerheid wanneer de probabiliteiten van input data, model parameters en modelstructuur volledig beschreven zouden zijn (Montanari, & D. Koutsoyiannis, 2012). Dit is echter niet vanzelfsprekend, zo zal bijvoorbeeld het afleiden van de parameteronzekerheden steeds afhankelijk zijn (geconditioneerd door) van de onzekere data zelf. Daarom is het noodzakelijk om de methodieken uit deel 4.2 gepast te combineren om de totale onzekerheid te bepalen.

Daarnaast dient ook rekening gehouden te worden met de computationele kost. Monte Carlo technieken zijn zeer populair door hun eenvoudige en generieke toepasbaarheid, maar vragen een grote computationele

kracht. Hierbij kan het noodzakelijk blijken om de computationele kost te verlagen door de bekomen onzekere distributies alternatief te propageren (gaussiaanse processen,...).

Daarna moet de geïdentificeerde techniek toegepast worden op het reeds geanalyseerde bekken (i.e. Demer-Dijle). De volgende stappen worden gesuggereerd:

- Literatuur onderzoek naar toepasbare technieken voor de propagatie van de gekwantificeerde onzekerheidsbronnen in een predictieve onzekerheid. Het resultaat van deze deeltaak is de ontwikkeling van de theoretische basis voor de propagatie van de onzekere bronnen en de verschillende mogelijkheden om dit computationeel zo efficiënt mogelijk te doen, teneinde het operationeel karakter te garanderen. Selectie van de meest relevante methoden gebaseerd op theoretische kennis en eerdere ervaring met simulaties in andere stroomgebieden. Hierbij dient nagegaan te worden hoe de individuele methoden uit deel 4.2 kunnen gecombineerd worden in een algemeen framework dat zowel de onzekere bronnen kan kwantificeren als de daarbij horende predictieve onzekerheid kan bepalen. Exhaustieve toepassing en testing van deze methoden op verschillende bekkens, beginnend bij het Demer-Dijle stroomgebied.
- Evaluatie van de haalbaarheid van deze technieken in een operationeel kader.
- Automatisering van die procedure door het gebruik van software en numerieke modellen (zie §4.5)

4.3.2 Verificatie van de bekomen procedure

Naast de ontwikkeling van de bovenstaande methodes die met elkaar kunnen geschakeld worden, is het ook belangrijk de bekomen resultaten te evalueren. Met andere woorden, nagaan of de bekomen onzekerheidsgrenzen op de modelresultaten in de verschillende stappen ook effectief overeenstemmen met de variatie in gemeten waarden (vb. gesimuleerde waterpeilen en debieten tijdens een periode die niet gebruikt werd voor de inferentie van de onzekere parameterwaarden). Door de connectie tussen de verschillende deelstappen, is de onzekerheid van later deelprocessen geconditioneerd door de onzekerheid van de eerdere deelstappen. Zo zal de onzekerheid van de parameters in het hydrologisch model afhankelijk zijn van de onzekerheid in de rating curve. Aldus zal bij vernieuwde kennis van de onzekerheid van de rating curve, het effect op de parameteronzekerheid opnieuw moeten worden nagegaan.

Gevoeligheidsanalyse kan worden gebruikt voor prioritisatie en het inschatten van relatieve effecten van de factoren op bepaalde output. Op die manier kan de focus behouden blijven op de meest belangrijke onzekerheidsbronnen in de gehele modeltrein wanneer deze geschakeld is. Zo kan bijvoorbeeld het relatief effect van de parameteronzekerheid in het hydrologisch en het hydraulisch model worden vergeleken.

In de eerste fase werden reeds gevoeligheidsmethoden toegepast, maar er kan nagegaan worden of andere beschikbare methoden meer geschikt zijn om snel de gevoelige onzekere factoren te identificeren. Variantiegebaseerde technieken (Saltelli et al., 2010), Morris screening aanpak (Campolongo et al., 2007) of de globale (LH gesampled) versie van een lokale gevoeligheidsanalyse (van Griensven et al., 2006) zijn enkele van de mogelijkheden. Ook Monte Carlo filtering (cfr. GLUE aanpak) laat toe de gevoeligheden te begroten. Naast de verwachte informatie die de methoden leveren, kan er ook rekening worden gehouden met de beschikbare rekenkracht om de gepaste methode te selecteren. Daarnaast dient er nagegaan te worden welke bijkomende, voor het projectdoel informatieve outputkarakteristieken geselecteerd worden, in plaats van enkel de Q_{max} te gebruiken (bv. percentielwaarden, Flow Duration Curve waarden,...). Dit om verzamelde informatie (op basis van de simulaties) optimaal te analyseren en geen potentiële kennis weg te gooien.

4.4 Validatie van de methodologie

De derde lijn is gericht op de validatie van de opgebouwde methodologie ter bepaling van de bijdragende onzekerheden en de totale predictieve onzekerheid. De methode moet gevalideerd worden door de berekening van de onzekerheid in een volledig modeltrein. De operationaliteit moet hierbij ook worden geverificeerd. Daarom wordt het gebruik van andere stroomgebieden gesuggereerd (of verplicht). Volgende stappen zijn gesuggereerd voor de verdere validatie procedure:

- Definitie van een study case
- Sequentiele bepaling van de onzekerheden van de verschillende deelstappen (i.e. van DO1 tem DO4)
- Propagatie van de gekwantificeerde onzekerheidsbronnen ter bepaling van de totale predictieve onzekerheid

Ten slotte is een tweede validatie wenselijk, vooral voor vergelijkingen en eventuele aanpassingen of verbeteringen aan de methodologie. De gepaste methodologie zal niet statisch zijn, maar omvat een voortdurende toepassing en aanpassing.

4.5 Ontwikkeling van een operationele tool

De vierde lijn is gericht op de ontwikkeling van een operationele en geautomatiseerde tool, gezien het uitvoeren van onzekerheidsanalyses een tijdrovend proces is.

Het is dan ook de bedoeling enkele routines en repetitieve zaken te automatiseren, zodat ze in de toekomst, wanneer deze onzekerheidsanalyses op nieuwe modellen worden uitgevoerd, niet te veel tijd in beslag nemen en gemakkelijk uitvoerbaar zijn voor de modelleur. Bijgevolg wordt de ontwikkeling van een nieuwe tool gesuggereerd om de onzekerheidsanalyse te automatiseren. Dit omvat de identificatie of ontwikkeling van software die naast de hydrologische en hydraulische modellen draait en de onzekerheidsanalyse zo zelfstandig mogelijk kan verrichten. Dit betreft zowel de methodes om de onzekerheidsbronnen te identificeren als de propagatie tot de totale predictieve onzekerheid. Zo moet het mogelijk zijn dat bij een herkalibratie de parameteronzekerheid geupdate wordt. Er zijn een aantal software codes beschikbaar voor verschillende methoden voor onzekerheidsanalyse. Hieronder wordt een niet-exhaustieve lijst gepresenteerd, een meer exhaustieve lijst is beschikbaar in Matott et al. (2009):

Tabel 4 – Lijst van gesuggereerde codes

Methode	Beschrijving
BATEA	Bayesian total error analysis
GLUE	Generalised likelihood uncertainty estimation
META-Gaussian	Meta Gaussian model
MOGSA	Multi objective generalised sensitivity analysis
PEST	Model independent parameter estimation
SCEM-UA	Shuffled complex evolution metropolis
SODA	Simultaneous optimisation and data assimilation

Die methoden (codes) zijn georiënteerd voor computationele toepassingen (software). Bijgevolg is de combinatie van beschikbare software voor onzekerheidsanalyse met numerieke modellen (e.g. hydrologisch en hydraulisch) mogelijk en eventueel wenselijk. De nieuwe voorgestelde taak is met andere woorden gericht op de automatisering van onzekerheidsanalyse door de combinatie van software (i.e. onzekerheidsanalyse software) met computationele modellen (i.e. hydrologisch en hydraulisch). Volgende stappen worden gesuggereerd voor de uitvoering van deze deeltaak:

- Onderzoek naar de verschillende methoden en software (code, documentatie, enz.)
- Selectie van de meest optimale en bruikbare software
- Ontwerp van de geautomatiseerde procedure
- Ontwikkeling van de procedure (e.g. software + MIKE11 + NAM)
- Testing en validatie proeven (gedefinieerde bekken)
- Ontwikkeling van documentatie en handleiding
- Toepassing op ander bekken

5 Referenties

- K. Beven & A. M. Binley** (1992). The Future of Distributed Models: Model Calibration and Uncertainty Prediction. *Hydrological Processes*, 6(3), 279–298.
- S. Blazkova & K. Beven** (2009). A limits of acceptability approach to model evaluation and uncertainty estimation in flood frequency estimation by continuous simulation: Skalka catchment, Czech Republic. *Water Resources Research*, 45(12):W00B16.
- F. Campolongo, J. Cariboni & A. Saltelli** (2007). An effective screening design for sensitivity analysis of large models. *Environmental Modelling & Software*, 22(10):1509–1518.
- K. Cierkens, S. Van Hoey, B. De Baets, P. Seuntjens & I. Nopens** (2012). Influence of uncertainty analysis methods and subjective choices on prediction uncertainty for a respirometric case. In R. Seppelt, A. Voinov, S. Lange & D. Bankamp, editors, *International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs) 2012 International Congress on Environmental Modelling and Software. Managing Resources of a Limited Planet: Pathways and Visions under Uncertainty, Sixth Biennial Meeting*. Leipzig.
- G. Di Baldassarre & A. Montanari** (2009). Uncertainty in river discharge observations: a quantitative analysis. *Hydrology and Earth System Sciences*, 6(1):39–61. ISSN 1812-2116.
- M. Hojati, C. Bector & K. Smimou** (2005). A simple method for computation of fuzzy linear regression. *European Journal of Operational Research*, 166(1):172–184.
- D. Kavetski, G. Kuczera & S. W. Franks** (2006). Bayesian analysis of input uncertainty in hydrological modeling: 1. Theory. *Water Resources Research*, 42(3):1–9. ISSN 0043-1397.
- T. Krueger, J. Freer, J. N. Quinton, C. J. A. Macleod, G. S. Bilotta, R. E. Brazier, P. Butler & P. M. H.** (2010). Ensemble evaluation of hydrological model hypotheses. *Water Resources Research*, 46(7):1–17.
- Y. Liu, J. Freer, K. Beven & P. Matgen** (2009). Towards a limits of acceptability approach to the calibration of hydrological models: Extending observation error. *Journal of Hydrology*, 367(1-2):93–103. ISSN 00221694.
- F. Lobligois, V. Andréassia, C. Perrin, P. Tabary & C. Loumagne** (2014). When does higher spatial resolution rainfall information improve streamflow simulation? An evaluation using 3620 flood events. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(2), 575–594. doi:10.5194/hess-18-575-2014
- P. Matgen, M. Montanari, R. Hostache, L. Pfister, L. Hoffmann, D. Plaza, V. R. N. Pauwels, G. J. M. De Lannoy, R. De Keyser & H. H. G. Savenije** (2010). Towards the sequential assimilation of SAR-derived water stages into hydraulic models using the Particle Filter: proof of concept. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(9):1773–1785.
- L. S. Matott, J. E. Babendreier, & S. T. Purucker** (2009). Evaluating uncertainty in integrated environmental models: A review of concepts and tools. *Water Resources Research*, 45(6), 1–14. doi: 10.1029/2008WR007301
- H. McMillan, J. Freer, F. Pappenberger, T. Krueger & M. P. Clark** (2010). Impacts of uncertain river flow data on rainfall-runoff model calibration and discharge predictions. *Hydrological Processes*, 24(10).
- T. McMillan, H. and Krueger & J. Freer** (2012). Benchmarking observational uncertainties for hydrology: rainfall, river discharge and water quality. *Hydrological Processes*, 26(26):4078–4111.

- A. Montanari, & D. Koutsoyiannis** (2012). A blueprint for process-based modeling of uncertain hydrological systems. *Water Resources Research*. doi:10.1029/2011WR011412
- D.J. Nott, L. Marshall, & J. Brown** (2012). Generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE) and approximate Bayesian computation: What's the connection? *Water Resources Research*, 48(12), n/a–n/a. doi:10.1029/2011WR011128
- F. Pappenberger, P. Matgen, K. J. Beven, J. Henry, L. Pfister & P. De Fraipont** (2006). Influence of uncertain boundary conditions and model structure on flood inundation predictions. *Advances in Water Resources*, 29:1430–1449.
- A. Petersen-Øverleir** (2004). Accounting for heteroscedasticity in rating curve estimates. *Journal of Hydrology*, 292(1-4):173–181.
- A. Saltelli, P. Annoni, I. Azzini, F. Campolongo, M. Ratto & S. Tarantola** (2010). Variance based sensitivity analysis of model output. Design and estimator for the total sensitivity index. *Computer Physics Communications*, 181(2):259–270.
- W. Vanneuville, P. Deckers, K. Van Eerdenbrugh, F. Mostaert** (2008). Flood risk scenario calculations as a decision support and evaluation tool in water management plans. *International Conference Studying, Modeling and Sense Making of Planet Earth*, 1-6 June 2008, Mytilene, Lesvos, Greece: abstracts. pp. 54-55
- A. van Griensven, T. Meixner, S. Grunwald, T. Bishop, M. Diluzio & R. Srinivasan** (2006). A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. *Journal of Hydrology* 324, 324:10–23.
- S. Van Hoey, P. Seuntjens, J. van der Kwast & I. Nopens** (2013). Incorporation of rating curve uncertainty in dynamic identifiability analysis and model structure evaluation. *Journal of Hydrologic Engineering*, p. in review.
- S. Van Hoey, T. Vansteenkiste, F. Pereira, I. Nopens, P. Seuntjens, P. Willems & F. Mostaert** (2012). Effect of climate change on the hydrological regime of navigable water courses in Belgium: Subreport 4, Flexible model structures and ensemble evaluation. Technical report, Waterbouwkundig Laboratorium & Universiteit Gent, Antwerpen, België.
- J. A. Vrugt, C. G. H. Diks, H. V. Gupta, W. Bouten & J. M. Verstraten** (2005). Improved treatment of uncertainty in hydrologic modeling: Combining the strengths of global optimization and data assimilation. *Water Resources Research*, 41(1).
- J. A. Vrugt, C. J. F. ter Braak, M. P. Clark, J. M. Hyman & B. A. Robinson** (2008). Treatment of input uncertainty in hydrologic modeling: Doing hydrology backward with Markov chain Monte Carlo simulation. *Water Resources Research*, 44:W00B09.
- T. Wagener, N. McIntyre, M. J. Lees, H. S. Wheater & H. V. Gupta** (2003). Towards reduced uncertainty in conceptual rainfall-runoff modelling: dynamic identifiability analysis. *Hydrological Processes*, 17(2):455–476.
- I. Westerberg, J. Guerrero, J. Seibert, K. Beven & S. Halldin** (2011). Stage-discharge uncertainty derived with a non-stationary rating curve in the Choluteca River, Honduras. *Hydrological Processes*, 613(25):603–613.
- P. Willems** (2007). Waterloopmodellering: Aangepaste versie van de 'Algemene methodologie voor de Administratie Waterwegen en Zeewezen - Afdeling Waterbouwkundig Laboratorium en Hydrologisch Onderzoek', Laboratorium voor Hydraulica, Katholieke Universiteit Leuven.

DEPARTEMENT **MOBILITEIT & OPENBARE WERKEN**
Waterbouwkundig Laboratorium

Berchemlei 115, 2140 Antwerpen

T +32 (0)3 224 60 35

F +32 (0)3 224 60 36

waterbouwkundiglabo@vlaanderen.be

www.waterbouwkundiglaboratorium.be