

Opdrachtgever: **RWS-WVL**

Doorwerking modelonzekerheid waterstanden

Globale inventarisatie van probleemlocaties



Opdrachtgever: **RWS-WVL**

Doorwerking modelonzekerheid waterstanden

Globale inventarisatie van probleemlocaties



Auteur
Chris Geerse

Inhoud

1	Inleiding	1
1.1	Aanleiding	1
1.2	Doel.....	1
1.3	Afbakening	1
2	Effect van onzekerheid op het MHW	3
2.1	Modellering van de onzekerheid in de waterstand	3
2.2	Effect modelonzekerheid waterstand op het MHW	4
2.3	Voorbeelden	9
3	Werkwijze.....	15
3.1	Gegevens Hydra-NL.....	15
3.2	Maatregelen uit Ruimte voor de Rivier.....	16
3.3	De Maas en de Maaswerken	17
3.4	Overige watersystemen.....	19
4	Resultaten	21
4.1	Traject Lobith tot direct na Pannerdense Kop	21
4.2	Lek ontzien en Hondsbroekse Pleij	24
4.3	Veessen-Wapenveld.....	27
4.4	Benedenrivieren	28
4.5	Vecht-IJsseldelta	29
4.6	Maas.....	30
4.7	Opmerkingen	32
5	Bespreking van de resultaten	33
5.1	Discussie van de bevindingen.....	33
5.2	Onzekerheid modelleren met een factor op de overschrijdingsfrequentie	34
6	Conclusies.....	37
7	Referenties	39

Lijst van figuren

Figuur 2-1	Effect onzekerheid waterstand op de frequentielijn voor $h_{dec} = 0.6$ m en $\sigma_{ws} = 0.2$ m.....	4
Figuur 2-2	Effect onzekerheid waterstand op de frequentielijn voor $h_{dec} = 0.2$ m en $\sigma_{ws} = 0.2$ m.....	5
Figuur 2-3	Effect onzekerheid als functie van de decimeringswaarde (effect bij $T = 1000$ jaar).	6
Figuur 2-4	Effect onzekerheid als functie van de standaarddeviatie σ_{ws}	6
Figuur 2-5	Illustratie van de vuistregel voor de berekening van het effect van de onzekerheid (effect bepaald bij $T = 1000$ jaar).	7
Figuur 2-6	Illustratie van de vuistregel voor de berekening van het effect van de onzekerheid (effect bepaald bij $T = 100$ jaar).	8
Figuur 2-7	Illustratie van de vuistregel voor de berekening van het effect van de onzekerheid (effect bepaald bij $T = 10$ jaar).	8
Figuur 2-8	Voorbeeld voor frequentielijn met 'ingezakt traject'.	10
Figuur 2-9	Voorbeeld voor frequentielijn met 'ingezakt traject', met kleinere σ	10
Figuur 2-10	Voorbeeld voor frequentielijn met 'ingezakt traject', met grotere σ	11
Figuur 2-11	Voorbeeld voor frequentielijn met 'naar boven geknikt traject'.	11
Figuur 2-12	Voorbeeld voor frequentielijn met 'naar boven geknikt traject', kleinere σ	12
Figuur 2-13	Voorbeeld voor frequentielijn met 'naar boven geknikt traject', grotere σ	12
Figuur 3-1	Afvoerstatistiek WBI2017 Lobith, inclusief statistische onzekerheid.	16
Figuur 3-2	Afvoerstatistiek WBI2017 Borgharen, inclusief statistische onzekerheid.	16
Figuur 3-3	Overzichtskaart maatregelen Ruimte voor de Rivier.	17
Figuur 3-4	Overzichtskaart maatregelen Maaswerken.	18
Figuur 4-1	Ligging van drie locaties langs Bovenrijn en Pannerdens Kanaal, en één locatie langs de Waal.	21
Figuur 4-2	Resultaten voor BR_1_48-1_dk_00193 (nabij Lobith).	22
Figuur 4-3	Resultaten voor BR_1_48-1_dk_00278.	22
Figuur 4-4	Resultaten voor PK_1_48-1_dk_00331.	23
Figuur 4-5	Resultaten voor WA_1_42-1_dk_00031.	23
Figuur 4-6	Ligging van twee locaties: één langs de Lek en één langs de IJssel (Hondsbroekse Pleij).	24
Figuur 4-7	QH-relatie voor NR_1_43-3_dk_01306.	25
Figuur 4-8	Resultaten voor NR_1_43-3_dk_01306.	25
Figuur 4-9	Resultaten voor NR_1_43-3_dk_01306 na verfijning discretisaties in Hydra-NL.	26
Figuur 4-10	Resultaten voor IJ_1_47-1_dk_00015 (Hondsbroekse Pleij).	26
Figuur 4-11	Ligging van locatie IJ_1_52a-1_dk_00009.	27
Figuur 4-12	Resultaten voor (Veessen-Wapenveld).	27
Figuur 4-13	Ligging van locatie HD_1_215_vk_00048 (Rak Noord) en WT_1_22-2_dk_00154 (Noordwaard).	28
Figuur 4-14	Resultaten voor HD_1_215_vk_00048 (Rak Noord).	29
Figuur 4-15	Resultaten voor WT_1_22-2_dk_00154 (Noordwaard).	29
Figuur 4-16	Ligging van locatie ZM_1_10-2_dk_00054.	30
Figuur 4-17	Resultaten voor ZM_1_10-2_dk_00054.	30
Figuur 4-18	Ligging van MA_1_82-1_dk_00006.	31
Figuur 4-19	Resultaten voor MA_1_82-1_dk_00006.	31
Figuur 5-1	Onzekerheidsmodellering door de overschrijdingsfrequentie te vermenigvuldigen met een factor ($f = 1.8$).	34
Figuur 5-2	Voorbeeld voor de keuze van de factor waarmee de overschrijdingsfrequentie vermenigvuldigd wordt.	35
Figuur 5-3	Onzekerheidsmodellering door de overschrijdingsfrequentie te vermenigvuldigen met een variabele factor als in Figuur 5-2.	35

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Op dit moment worden in Hydra-NL en Hydra-Ring/Riskeer onzekerheden in de waterstand meegenomen. Dat gebeurt door bij de WAQUA-resultaten een normaal verdeelde onzekerheid op te tellen (met gemiddelde 0 en een vaste, maar locatieafhankelijke standaarddeviatie σ).

Recent is gebleken, onder meer voor de hoogwatergeul Veessen-Wapenveld [Geerse et al, 2017], dat deze onzekerheidsmodellering tot onfysische resultaten kan leiden. In het geval van Veessen-Wapenveld wordt de effectiviteit van de hoogwatergeul onterecht te klein voorgesteld: bij een meer fysische aanpak van de onzekerheid in de waterstand blijkt de geul aanzienlijk effectiever te zijn: circa 0.3 tot 0.4 m effectiever dan volgens de huidige onzekerheidsmodellering uit Hydra-NL/Ring.

Door RWS is gevraagd om met een beknopte studie globaal in kaart te brengen waar nog meer in Nederland de huidige onzekerheidsmodellering tot problemen kan leiden.

1.2 Doel

De doelstelling luidt als volgt: voer voor de zoete wateren een globale inventarisatie uit om locaties in beeld te brengen waar de huidige onzekerheidsmodellering van de waterstand tot onjuiste en/of onfysische resultaten kan leiden.

1.3 Afbakening

Gezien de beperkte beschikbare tijd en scope van het project, gelden de volgende randvoorwaarden:

1. De studie kan beperkt blijven tot de zoete wateren, omdat voor de kust geen onzekerheid in de waterstand wordt beschouwd.
2. Alleen primaire waterkeringen voor de volgende watersystemen zijn globaal onderzocht:
 - a. Bovenrivieren Rijn en Maas.
 - b. Benedenrivieren.
 - c. Vecht-IJsseldelta.
 - d. IJsselmeergebied (IJssel- en Markermeer).

2 Effect van onzekerheid op het MHW

Dit hoofdstuk geeft kwantitatieve informatie en voorbeelden over het effect van de modelonzekerheid op de waterstand zoals die door Hydra-NL/Ring wordt berekend. Gemakshalve wordt de door Hydra-NL/Ring berekende waterstand hier vaak aangeduid als het MHW, om verwarring te voorkomen met de term waterstand als onderdeel van de onzekerheidsmodellering. Ook worden voorbeelden gegeven die duidelijk maken hoe de modellering van de onzekerheid doorwerkt op het MHW.

N.B. In het vervolg wordt gesproken over Hydra-NL; soortgelijke opmerkingen gelden echter voor Hydra-Ring.

2.1 Modellering van de onzekerheid in de waterstand

In onder meer de systeemdokumentatie van Hydra-NL [Duits en Kuijper, 2017] wordt beschreven hoe de onzekerheid in de waterstand wordt gemodelleerd. Voor de geïnteresseerde lezer volgen hier voor de bovenrivieren de precieze formules; de formules voor de overige watersystemen zijn gecompliceerder, waarvoor we verwijzen naar de systeemdokumentatie. Desgewenst kunnen onderstaande formules worden overgeslagen, de inhoud van paragraaf 2.2 en 2.3 en de rest van dit rapport kunnen ook worden begrepen zonder deze formules.

De onzekerheidsmodellering komt er op neer dat bij de lokale waterstand X (het MHW zonder onzekerheid) een normaal verdeelde stochast Y wordt opgeteld, die de onzekerheid modelleert. Voor Y wordt een normale verdeling gebruikt met gemiddelde $\mu = 0$ m+NAP en een $\sigma_{ws} > 0$ m.¹ Als de waterstand inclusief onzekerheid wordt aangeduid met V , kan worden geschreven:

$$V = X + Y. \quad (2.1)$$

Deze σ_{ws} hangt in Hydra-NL dus niet af van de beschouwde waarde x .

Als we met $F(V > v)$ de overschrijdingsfrequentie inclusief onzekerheid aangeven van niveau v , en met $f(x) = -dF(X > x)/dx$ de frequentiedichtheid van de waterstand X , volgt voor deze overschrijdingsfrequentie:

$$\begin{aligned} F(V > v) &= F(X + Y > v) \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} dx f(x) P(Y + x > v \mid X = x). \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} dx f(x) P(Y > v - x) \end{aligned} \quad (2.2)$$

waarbij in de laatste stap is gebruikt dat de verdeling van Y niet afhangt van de beschouwde waarde van x . Als met Φ de cumulatieve standaardnormale verdeling wordt aangegeven, kan (2.2) ook worden geschreven als:

¹ In principe kan μ ook ongelijk aan 0 worden gekozen, om voor een eventuele systematische fout in WAQUA te compenseren.

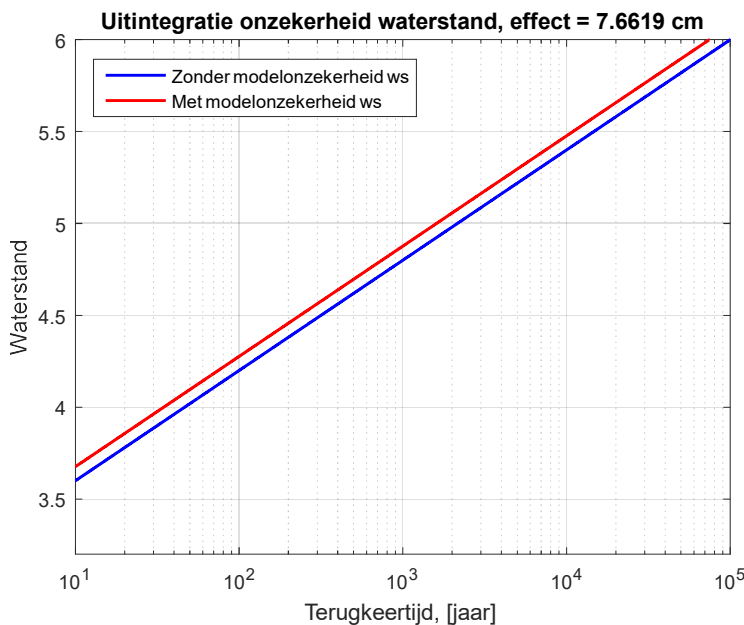
$$\begin{aligned}
 F(V > v) &= \int_{-\infty}^{\infty} dx f(x) P(Y > v - x) \\
 &= \int_{-\infty}^{\infty} dx f(x) \left\{ 1 - \Phi \left(\frac{v - x}{\sigma_{ws}} \right) \right\}
 \end{aligned}
 \tag{2.3}$$

2.2 Effect modelonzekerheid waterstand op het MHW

In deze paragraaf wordt voor locaties in de bovenrivieren een formule gegeven die de verhoging geeft van het MHW als modelonzekerheid wordt meegenomen. Deze formule geldt overigens slechts *in benadering*, en dan alleen als sprake is van een exponentiële verdeling $F(X > x)$ van de waterstand zonder onzekerheid. In dat geval is sprake van een lineair verband tussen de waterstand en de logaritme van de terugkeertijd T . In toepassingen komt het regelmatig voor dat *in benadering* aan deze situatie is voldaan.²

2.2.1 Verband tussen decimeringswaarde en effect onzekerheid na uitintegreren

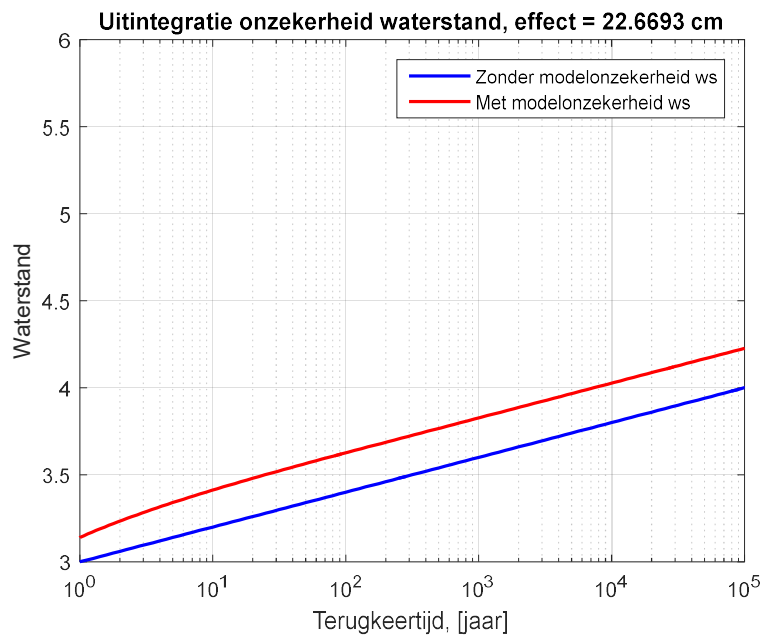
Neem aan dat voor locaties in de bovenrivieren sprake is van een logaritmisch verband tussen de terugkeertijd T en de bijbehorende waterstand. In dat geval is sprake van een goed gedefinieerde *decimeringswaarde* h_{dec} . Als de waterstand toeneemt met h_{dec} , neemt de bijbehorende terugkeertijd T toe met een factor 10; evenzo, als de waterstand afneemt met h_{dec} , neemt de bijbehorende terugkeertijd T af met een factor 10.



Figuur 2-1 Effect onzekerheid waterstand op de frequentielijn voor $h_{dec} = 0.6 \text{ m}$ en $\sigma_{ws} = 0.2 \text{ m}$.

² Een andere aanname is dat opeenvolgende 12-uursblokken volledig gecorreleerd zijn; aan die voorwaarde is in de toepassingen gewoonlijk voldaan.

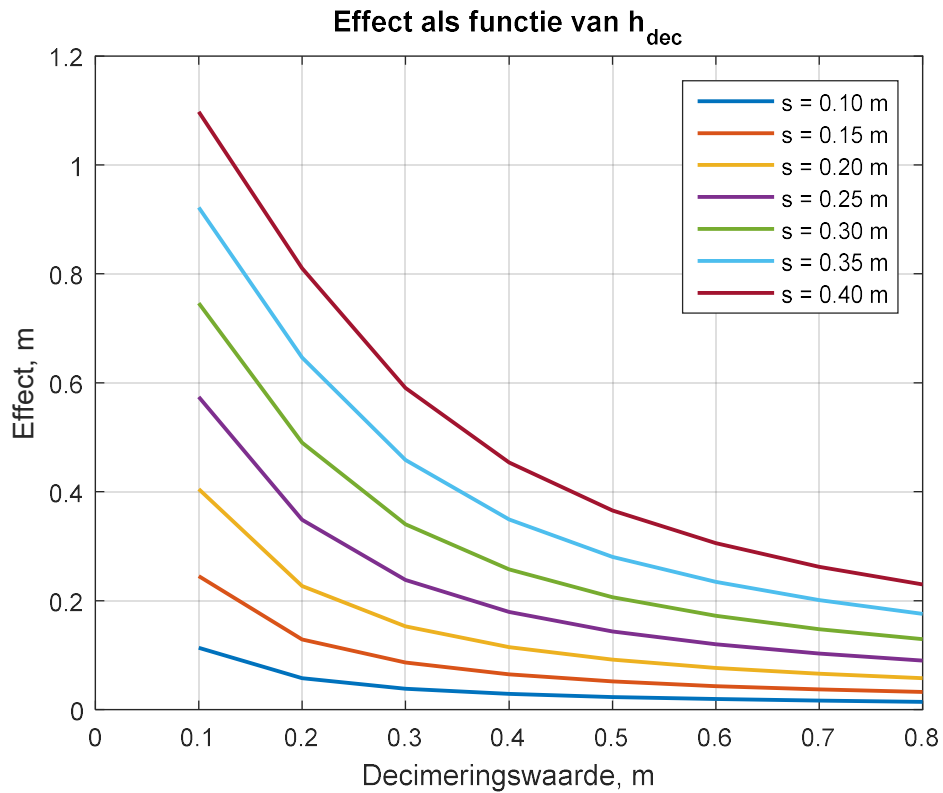
Het blijkt dat de mate waarin de onzekerheid σ_{ws} van de waterstand doorwerkt op het MHW samenhangt met de grootte van de decimeringswaarde: bij een kleinere h_{dec} gaat de onzekerheid van de waterstand sterker doorwerken op het toetspeil. Figuur 2-1 laat een frequentielijn zonder onzekerheid zien met $h_{dec} = 0.6$ m. Tevens toont de figuur de frequentielijn inclusief onzekerheid in de waterstand, voor de situatie $\sigma_{ws} = 0.2$ m. Blijkbaar wordt dan een lijn verkregen die evenwijdig loopt aan degene zonder onzekerheid (in ieder geval zo op het oog bezien). Door het toevoegen van de onzekerheid – het zogenaamde uitintegreren volgens formule (2.3) – komt de frequentielijn 0.077 m hoger te liggen. Bij een kleinere decimeringwaarde van b.v. $h_{dec} = 0.2$ m blijkt dat effect veel groter te zijn, namelijk 0.227 m, zie Figuur 2-2. Merk op dat voor lage terugkeertijden de lijn met onzekerheid niet meer evenwijdig loopt met die zonder onzekerheid; blijkbaar geldt het evenwijdig lopen van beide lijnen slechts in benadering. Het verschil dat hier tussen de lijnen wordt bepaald, is 'afgelezen' bij $T = 1000$ jaar.



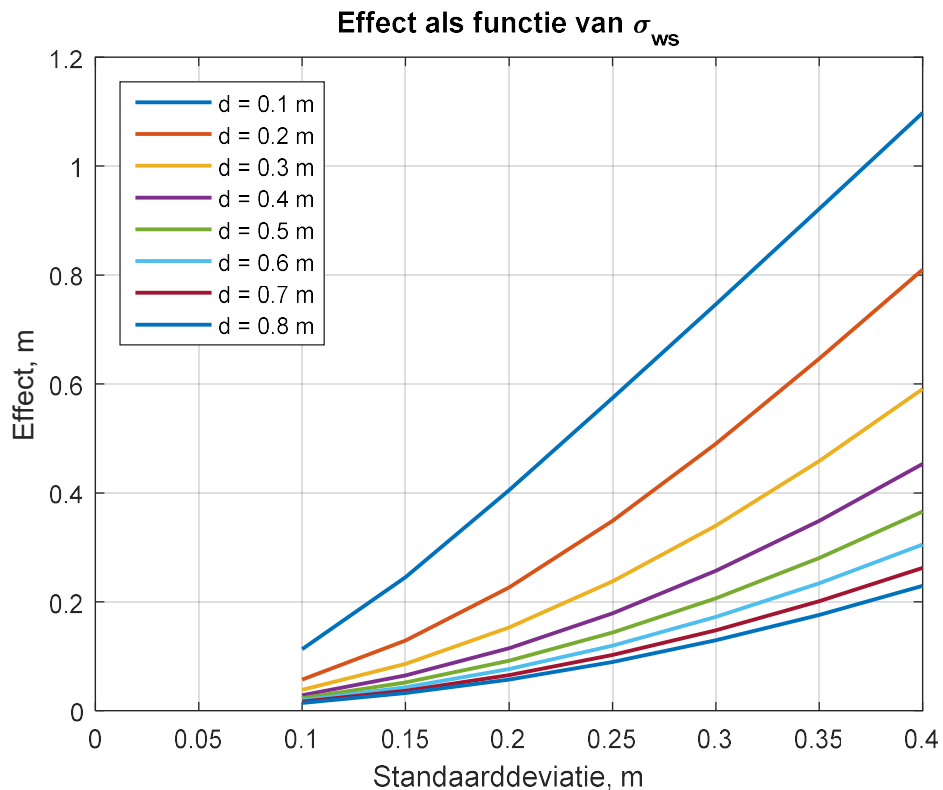
Figuur 2-2 Effect onzekerheid waterstand op de frequentielijn voor $h_{dec} = 0.2$ m en $\sigma_{ws} = 0.2$ m.

In Figuur 2-3 en Figuur 2-4 wordt grafisch in beeld gebracht hoe de decimeringswaarde h_{dec} (d in de figuur), de standaarddeviatie σ_{ws} (s in de figuur) en het effect met elkaar samenhangen. Het is duidelijk dat de decimeringwaarde grote invloed heeft op de grootte van het effect.

Er wordt nog eens benadrukt dat deze resultaten alleen gelden voor rechte frequentielijnen (indien logaritmisch op T uitgezet). Ook bij niet-rechte frequentielijnen zal blijken dat minder steile delen van de frequentielijn samengaan met een groter effect van de onzekerheid van de waterstand (zie de resultaten in paragraaf 2.3 en hoofdstuk 4).



Figuur 2-3 Effect onzekerheid als functie van de decimeringswaarde (effect bij $T = 1000$ jaar).



Figuur 2-4 Effect onzekerheid als functie van de standaarddeviatie σ_{ws} .

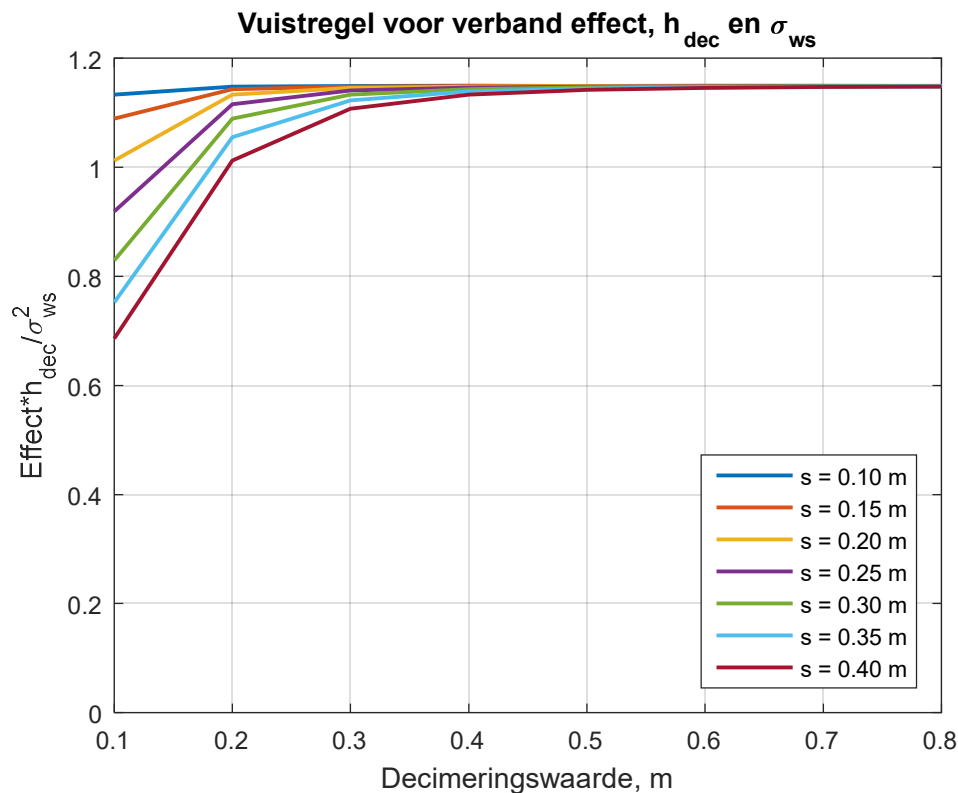
2.2.2 Vuistregel voor bepalen effect onzekerheid bovenrivieren

Het blijkt dat er voor niet te kleine decimeringswaarden een simpele vuistregel is op te stellen voor het bepalen van het effect van de onzekerheid. We geven dat effect aan met Δh (in meters). Dan blijkt in goede benadering te gelden:

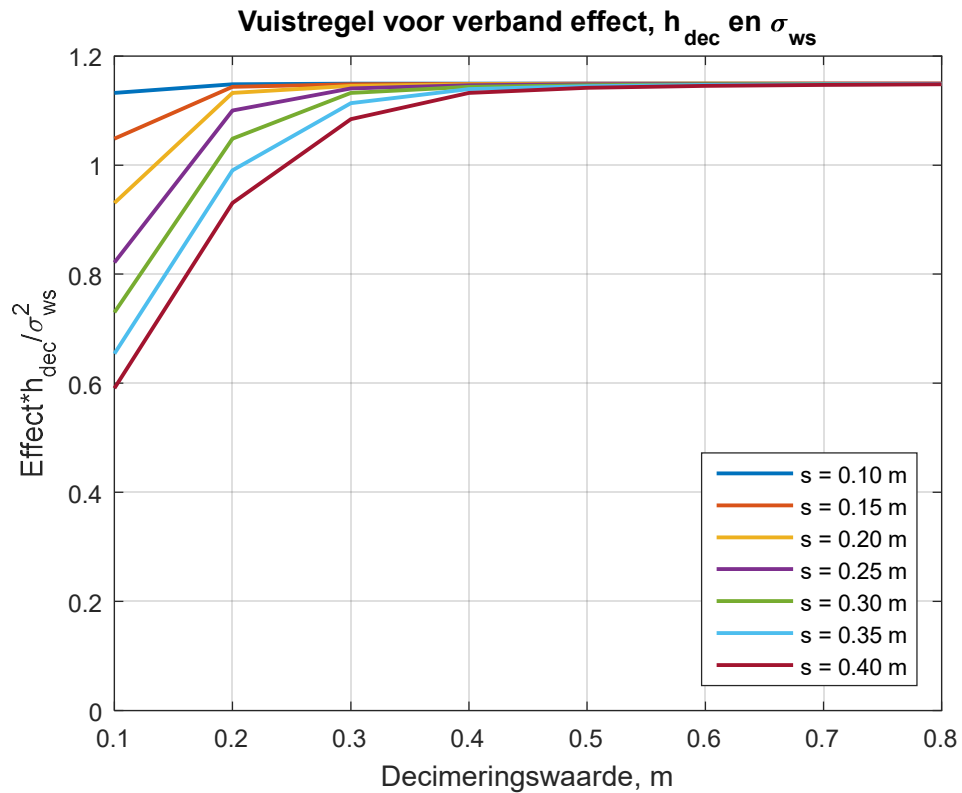
$$\Delta h \approx \frac{1.15}{h_{dec}} \sigma_{ws}^2, \quad \text{voor } h_{dec} \geq 0.3 \text{ m en } \sigma_{ws} \geq 0.1 \text{ m} \quad (2.4)$$

Dat is te zien door de grootte $\Delta h \cdot h_{dec} / \sigma_{ws}^2$ uit te zetten tegen h_{dec} (Figuur 2-5). Dat levert voor $h_{dec} > 0.3$ m een nagenoeg rechte lijn op ter hoogte van 1.15, waaruit de gevonden relatie blijkt. De verschillen zijn hier bepaald bij $T = 1000$ jaar, zodat deze vuistregel in principe geldt voor deze terugkeertijd. Het blijkt echter dat de vuistregel voor grotere T eveneens geldt (de kwaliteit van de benadering neemt zelfs toe bij groter wordende T). Ook blijkt de vuistregel nog goed te werken voor $T = 100$ jaar (Figuur 2-6). Voor $T = 10$ jaar wordt de benadering echter minder goed, zoals te zien is in Figuur 2-7. Resumerend kan worden gesteld dat de benadering (2.4) goed werkt voor $T \geq 100$ jaar. We brengen in herinnering dat deze benadering alleen van toepassing is voor situaties waarbij de frequentielijn in benadering een rechte lijn vormt indien logaritmisch uitgezet als functie van T .

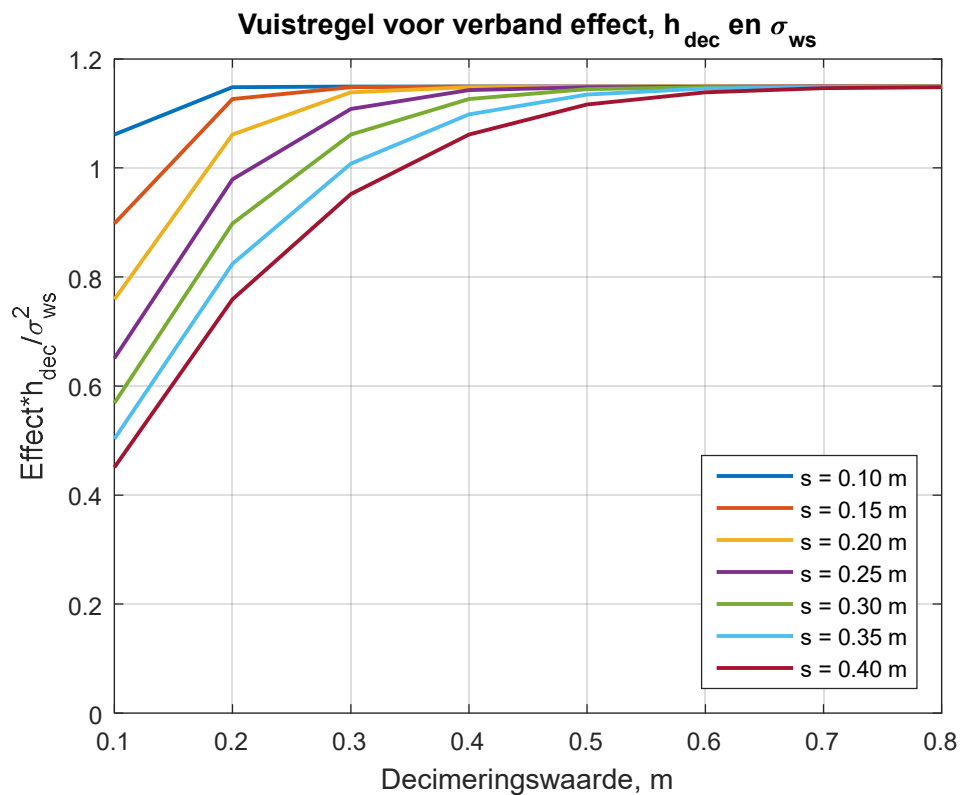
We merken op dat (2.4) ook analytisch kan worden afgeleid, waarbij de factor 1.15 uit de formule gelijk blijkt te zijn aan $\ln(10)/2 = 1.1513$. Die wiskundige afleiding wordt gegeven in [Rongen en Geerse, 2016].



Figuur 2-5 Illustratie van de vuistregel voor de berekening van het effect van de onzekerheid (effect bepaald bij $T = 1000$ jaar).



Figuur 2-6 Illustratie van de vuistregel voor de berekening van het effect van de onzekerheid (effect bepaald bij $T = 100$ jaar).



Figuur 2-7 Illustratie van de vuistregel voor de berekening van het effect van de onzekerheid (effect bepaald bij $T = 10$ jaar).

2.2.3 Wanneer kan de formule voor het bepalen van het effect op de waterstanden worden toegepast?

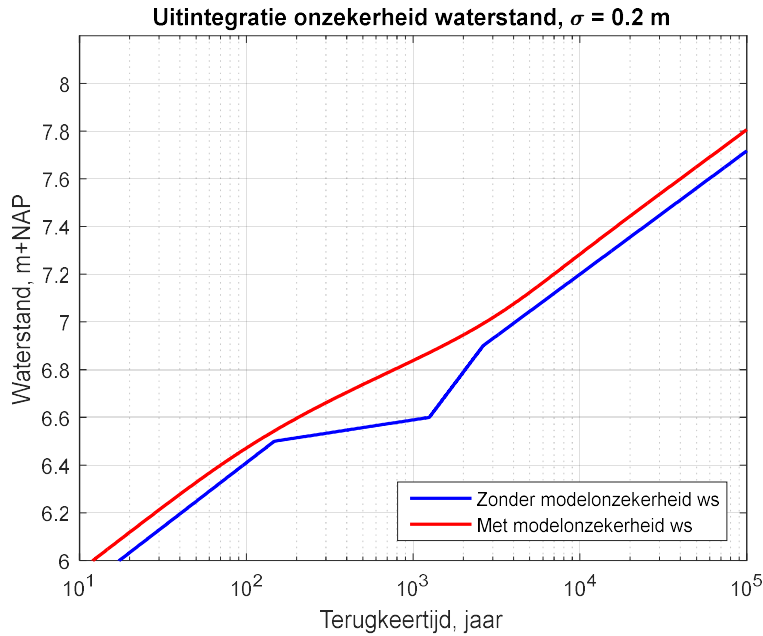
De formule is afgeleid voor exponentiële verdelingen voor locaties in de bovenrivieren, waarbij de waterstand (het MHW) uitsluitend wordt bepaald door de afvoer. Er kan echter worden aangetoond dat de formule ook geldig is – mits $F(X > x)$ ongeveer exponentieel verdeeld is – indien de locatie sterk onder invloed staat van de zee en/of de wind. Dat is o.m. het geval voor winddominante locaties langs de meren, en in de benedenrivieren voor locaties benedenstrooms van Dordrecht (inclusief Dordrecht zelf en inclusief de brede wateren Haringvliet en Hollandsch Diep). Ook geldt dat voor locaties langs de kust en op de Oosterschelde.

2.3 Voorbeelden

Hiervoor is een formule behandeld, die wordt toegepast voor exponentiële verdelingen van de overschrijdingsfrequentie $F(X > x)$. In praktische toepassingen komt het echter veelvuldig voor dat $F(X > x)$ niet exponentieel verdeeld is; de frequentielijn vertoont nogal eens knikken, bijvoorbeeld door de aanwezigheid van hoogwatergeulen, bergingsgebieden, rivierversmallingen of -verbredingen etcetera. Deze paragraaf geeft voorbeelden voor de uitwerking van de onzekerheid in het geval van knikken in de frequentielijn. Daarbij is de onzekerheid 'netjes uitgeïntegreerd' volgens formule (2.3). In de resultaten uit hoofdstuk 3 blijkt dat deze voorbeelden niet puur kunstmatig zijn, maar ook in de praktijk voorkomen (zij het wellicht iets minder extreem als in deze paragraaf).

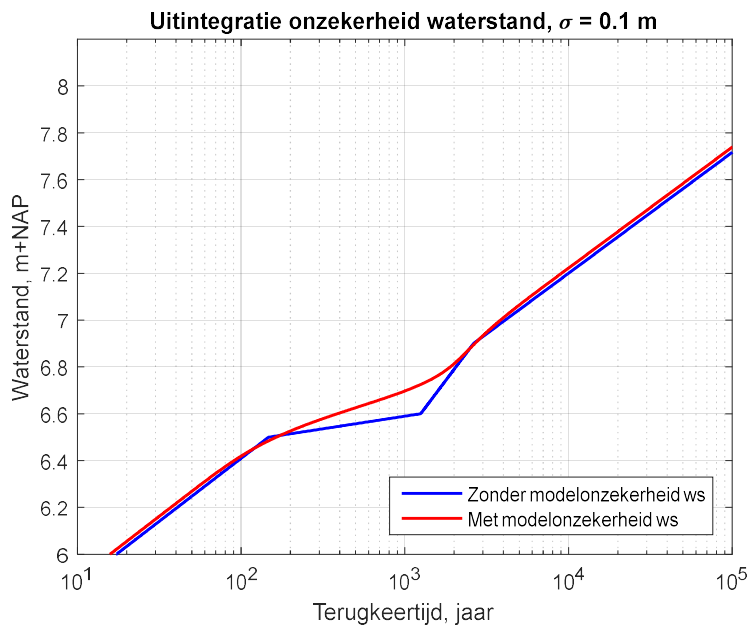
2.3.1 Frequentielijn met 'ingezakt traject'

Het eerste (theoretische) voorbeeld staat in Figuur 2-8, waarbij de frequentielijn zonder onzekerheid een 'ingezakt traject' vertoont. Voor en na de knik is formule (2.4) als benadering van toepassing, die hier een effect levert van $1.15 \cdot (0.20)^2 / (0.50) = 0.092 \text{ m}$; dat effect stemt inderdaad goed overeen met het verschil in de figuur. Ter plaatse van de knik is het effect van de onzekerheid blijkbaar veel groter: bij $T = 1000$ jaar circa 0.25 m . De neerwaartse knik wordt als het ware opgevuld door de onzekerheid. Wiskundig is dat ook te begrijpen: als de waterstand vanaf ongeveer $6.5 \text{ m} + \text{NAP}$ nauwelijks meer toeneemt, kunnen inclusief onzekerheid wel degelijk hogere waterstanden ontstaan: er verhuist als het ware meer kansruimte van de waterstand naar de onzekerheid van de waterstand (normale verdeling).

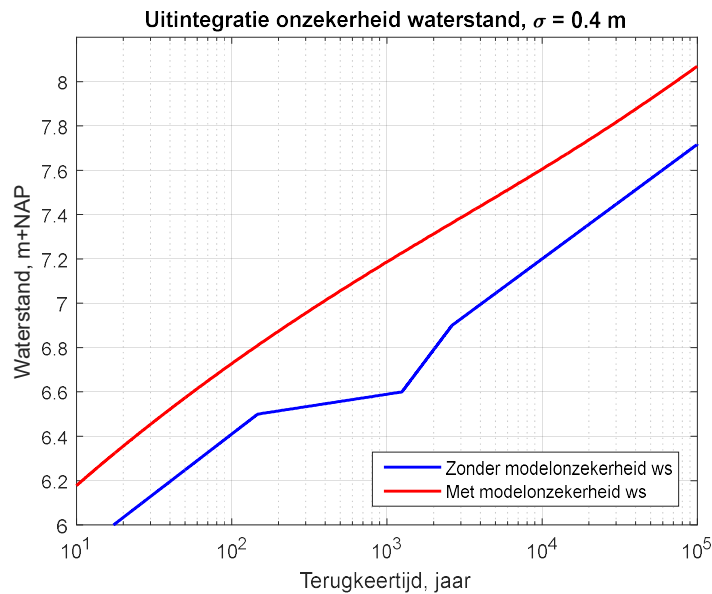


Figuur 2-8 Voorbeeld voor frequentielijn met 'ingezakt traject'.

Ter vergelijking zijn ook een kleinere en grotere waarde voor σ beschouwd, namelijk $\sigma = 0.1$ m en $\sigma = 0.4$ m, zie Figuur 2-9 en Figuur 2-10. Bij de kleinere σ verdwijnt de onzekerheid vrijwel aan de linker- en rechterzijde van de knik, terwijl de knik zelf nog steeds grotendeels wordt 'opgevuld'. Bij de grote waarde van σ is in de lijn met onzekerheid de knik vrijwel niet meer te zien.



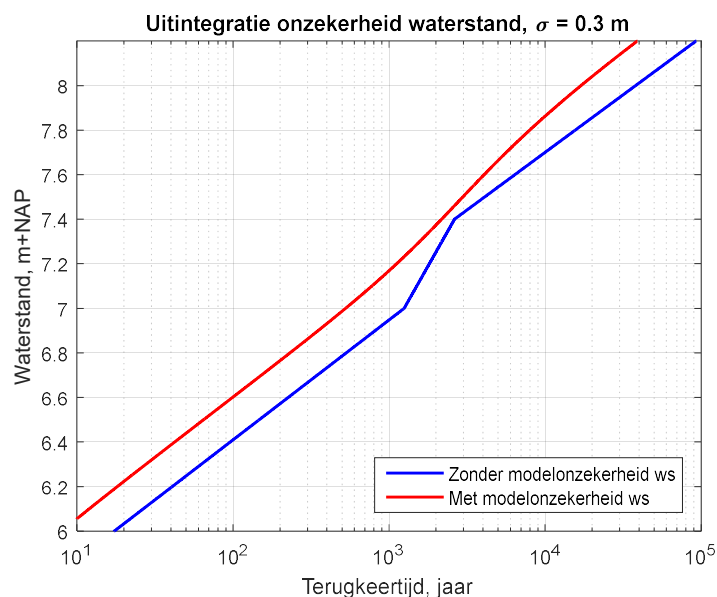
Figuur 2-9 Voorbeeld voor frequentielijn met 'ingezakt traject', met kleinere σ .



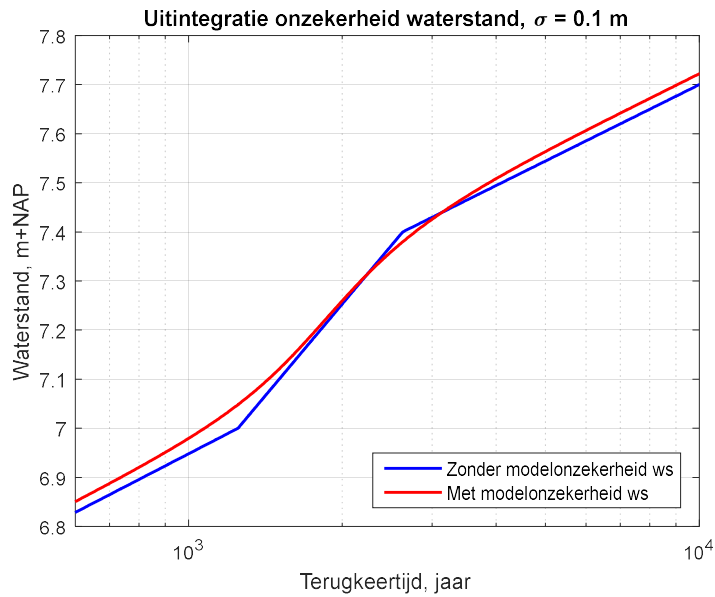
Figuur 2-10 Voorbeeld voor frequentielijn met 'ingezakt traject', met grotere σ .

2.3.2 Frequentielijn met 'naar boven geknikt traject'

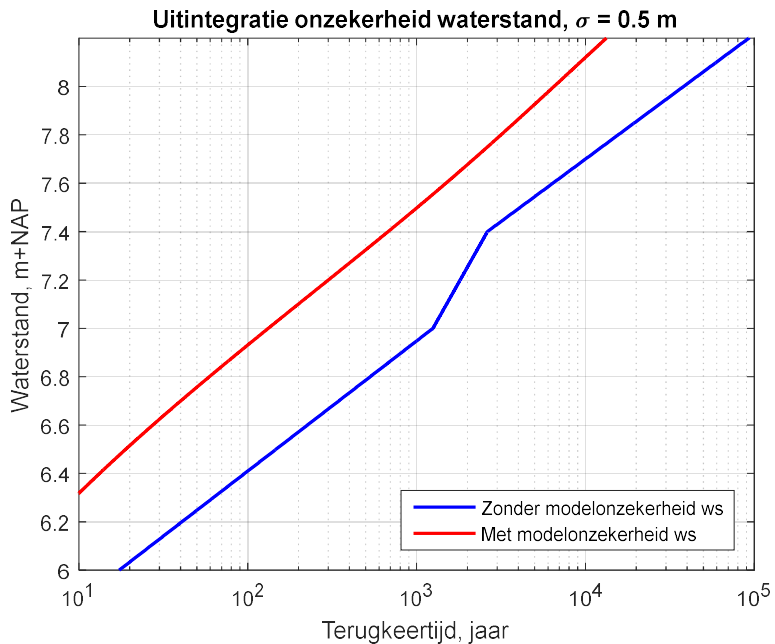
Een tweede voorbeeld staat in Figuur 2-11, waarbij de frequentielijn zonder onzekerheid een 'naar boven geknikt traject' vertoont. Ver genoeg voor en na de knik is formule (2.4) weer als benadering van toepassing. Bij het begin van de knik is het effect hetzelfde als aan de linkerzijde; aan het eind van de knik is het effect van de onzekerheid juist gering. Bij een kleinere waarde van σ blijkt het effect daar ter plaatse zelfs negatief te kunnen worden, zoals te zien in Figuur 2-12 (let op de ingezoomde schaal om meer detail te kunnen zien). Bij een grotere σ is de knik nauwelijks meer te zien in de lijn inclusief onzekerheid (Figuur 2-13).



Figuur 2-11 Voorbeeld voor frequentielijn met 'naar boven geknikt traject'.



Figuur 2-12 Voorbeeld voor frequentielijn met 'naar boven geknikt traject', kleinere σ .



Figuur 2-13 Voorbeeld voor frequentielijn met 'naar boven geknikt traject', grotere σ .

2.3.3 Fysische aspecten versus onzekerheidsmodellering

De voorbeelden uit deze paragraaf zijn kunstmatig, maar in het volgende hoofdstuk blijkt dat in de praktijk soortgelijke zaken zich ook voordoen (wellicht minder extreem dan zojuist beschouwd). Dat roept de vraag op of de onzekerheidsmodellering uit Hydra-NL/Ring wel altijd adequaat is. Onze indruk is in ieder geval dat deze onzekerheidsmodellering ten onrechte voorbij gaat aan fysische aspecten die de frequentielijn zonder onzekerheid bepalen. Als het patroon uit Figuur 2-8 bijvoorbeeld het gevolg is van de inzet van een hoogwatergeul, is het

niet terecht dat de onzekerheid het 'inzak-traject' opvult; dat laatste was in ieder geval de conclusie uit [Geerse et al, 2017]. In het volgende hoofdstuk worden, voor de zoete wateren, locaties opgezocht waarbij de onzekerheidsmodellering uit hoofdstuk 2, zoals nu gebruikt in Hydra-NL/Ring, 'verdacht oogt'. Bij dat laatste moet dan worden gedacht aan locaties waarbij knikken/onregelmatigheden in de frequentielijn een fysische oorzaak hebben, waaraan in de onzekerheidsmodellering uit hoofdstuk 2 voorbij wordt gegaan.

3 Werkwijze

Het voorgaande hoofdstuk illustreert voor kunstmatige situaties het effect van het uitintegreren van onzekerheid in de waterstand. Dit hoofdstuk geeft de werkwijze om praktijksituaties te zoeken waar de onzekerheidsmodellering mogelijk voorbij gaat aan fysische grenzen. Concreet betekent dit dat voor de zoete wateren naar frequentielijnen is gezocht met afbuigingen en/of knikken. N.B. De kust blijft buiten beschouwing, omdat daarvoor geen onzekerheid in de waterstand wordt meegenomen.

Allereerst is gekeken naar maatregelen voor Ruimte voor de Rivier en naar de Maaswerken. Vervolgens is voor overige watersystemen gezocht naar 'verdachte' frequentielijnen. Deze drie categorieën komen in de volgende paragrafen aan de orde. Maar eerst worden de gebruikte invoergegevens uit Hydra-NL besproken.

3.1 Gegevens Hydra-NL

3.1.1 Instellingen

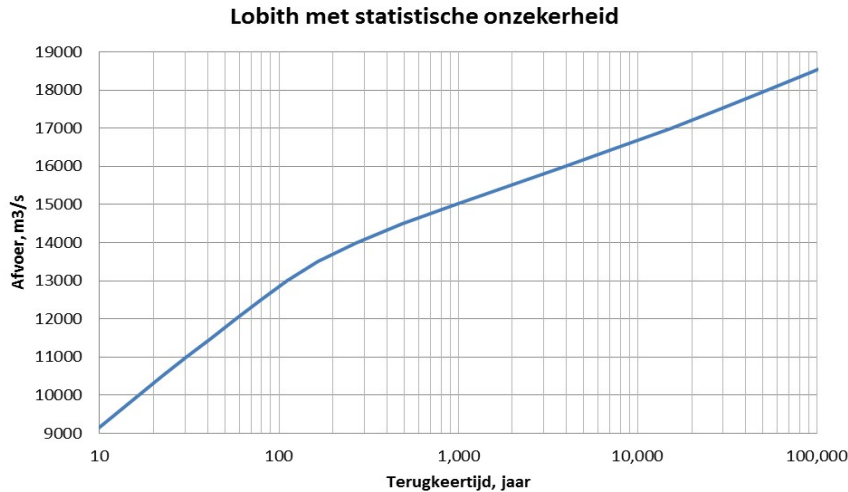
Voor berekeningen met Hydra-NL is versie 2.3.0 gebruikt. Afgezien van de modelonzekerheid in de waterstand zijn daarbij de standaardinstellingen gebruikt, die betrekking hebben op de WBI2017-gegevens. Bij deze standaardinstellingen wordt altijd *inclusief* statistische onzekerheid gerekend. Per onderzochte locatie is vervolgens met en zonder onzekerheid in de waterstand gerekend, waarbij de betreffende σ_{ws} aanwezig is in de database fysica van Hydra-NL.

3.1.2 Databases fysica

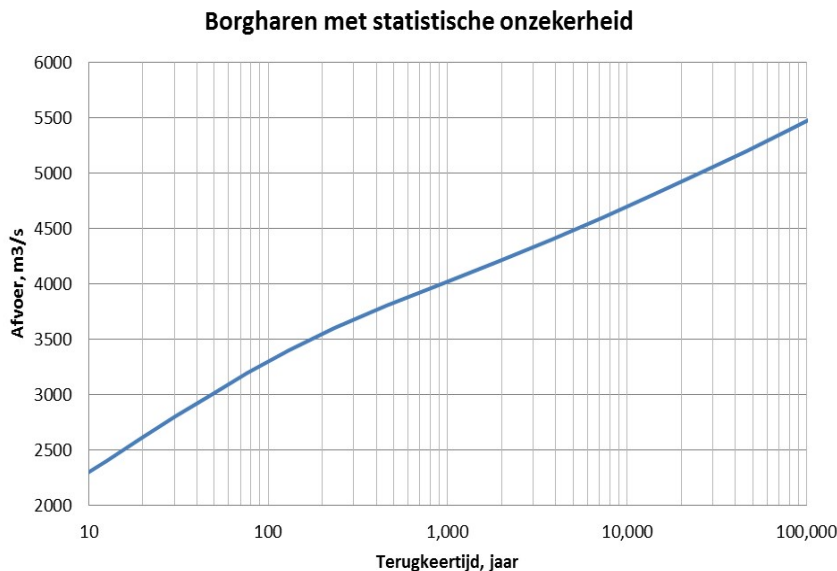
In de berekeningen zijn alleen databases fysica gebruikt die op 16 juli 2017 de status "definitief" hadden. Deze databases zijn ontleend aan de ftp-server van RWS (directory: ftp://wbi2017.nl/WBI2017/Definitief/Hydraulische_databases/Toets (eenvoudig t_m gedetailleerd)).

3.1.3 Afvoerstatistiek Lobith en Borgharen

Een groot deel van de onderzochte locaties staat sterk onder invloed van de afvoer van de Rijn bij Lobith of de Maas bij Borgharen, waarbij dus gerekend is met overschrijdingsfrequenties inclusief statistische onzekerheid. Gezien het doel van deze studie, waarbij onregelmatigheden in waterstandsfrequentielijnen worden onderzocht, is dan nodig te weten of deze afvoerstatistiek onregelmatigheden bevatten. Dat blijkt niet het geval, zoals te zien is in Figuur 3-1 en Figuur 3-2.



Figuur 3-1 Afvoerstatistiek WBI2017 Lobith, inclusief statistische onzekerheid.



Figuur 3-2 Afvoerstatistiek WBI2017 Borgharen, inclusief statistische onzekerheid.

3.2 Maatregelen uit Ruimte voor de Rivier

Op internet zijn de maatregelen opgezocht uit het project Ruimte voor de Rivier (zie voor een overzichtskaart Figuur 3-3). Op basis van de beschrijving van een maatregel, volgens de kaart en de achtergrondinformatie op de betreffende site, is ingeschat of door de maatregel sprake zou kunnen zijn van een substantiële verandering van de frequentielijn *zonder* modelonzekerheid. Als dat het geval is, is de juiste database fysica opgezocht, waarmee eerst een berekening zonder modelonzekerheid is gemaakt. Als dan inderdaad een 'verdachte' frequentielijn wordt gevonden, is daarna een berekening inclusief modelonzekerheid gemaakt. Uit het verschil tussen beide lijnen kan worden gezien wat het effect van de onzekerheid op de originele lijn zonder onzekerheden is.

Het blijkt dat maar bij zeer weinig maatregelen een 'verdachte' frequentielijn werd gevonden. Het komt dus vaak voor dat een maatregel wel een effect heeft, maar niet van zodanige aard dat de frequentielijn sterk vervormt. Overigens betekent dat niet dat de onzekerheidsmodellering uit hoofdstuk 2 een correcte aanpak vormt; het betekent slechts dat het effect van de onzekerheid op het MHW niet dramatisch groot is.



Figuur 3-3 Overzichtskaart maatregelen Ruimte voor de Rivier.³

3.3 De Maas en de Maaswerken

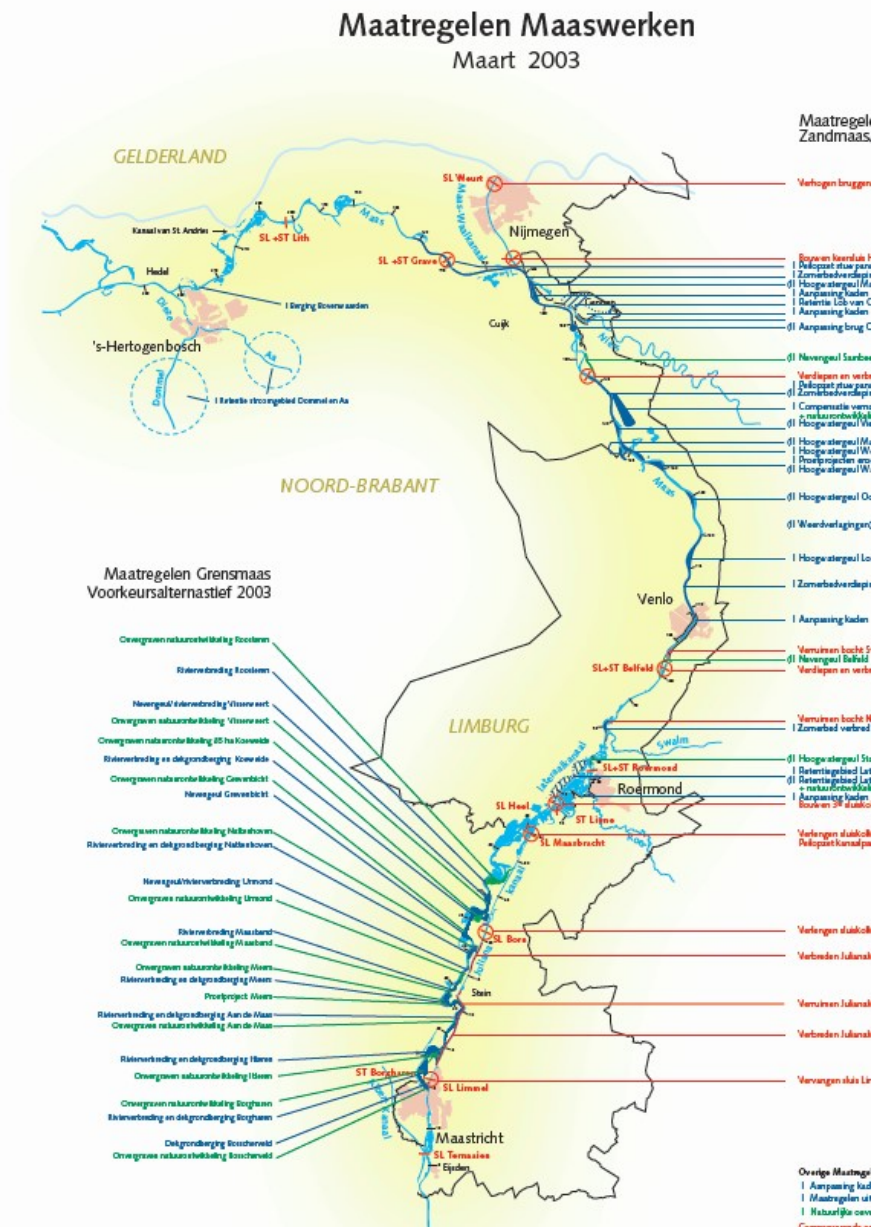
Voor de Maaswerken is een andere aanpak gevolgd. Allereerst is aan Joost Pol (een expert op dit gebied van HKV) gevraagd een inschatting te geven van de belangrijkste maatregelen die ook aanwezig zijn in de WBI2017-databases. Dat leidde tot (slechts) de volgende maatregelen langs de Limburgse Maas:

1. Lob van Gennepe.
Dit retentiegebied ligt bij rivierkilometer 156-157 en zal benedenstrooms daarvan een afvallend effect op de waterstandsfrequentielijn hebben. Het maximale waterstandseffect is orde 18 cm.
2. Lateraalkanaal West.
Dit retentiegebied ligt bij rivierkilometer 69 (tot 84) en zal benedenstrooms daarvan een afvallend effect op de waterstandsfrequentielijn hebben. Het maximale waterstandseffect is orde 8 cm.

³ Bron: <https://www.ruimtevoorderivier.nl>.

Deze locaties zijn onderzocht. Deze gebieden bleken echter geen grote effecten te hebben op de frequentielijnen, wat vooral geldt voor de (geringe) invloed op de frequentielijn benedenstrooms van het Lateraalkanaal West. De Lob van Gennep wordt hierna wel besproken (zie paragraaf 4.6).

Voor de Maas zijn verder steekproefsgewijs locaties doorgerekend. De meest interessante locaties zijn diegenen met een kleine decimeringswaarde (van circa 0.4 m of minder), waarvoor resultaten zijn opgenomen in paragraaf 4.6. Voor de volledigheid geeft Figuur 3-4 een kaart met de maatregelen voor de Maaswerken, maar die kaart is feitelijk niet gebruikt.



Figuur 3-4 Overzichtskaart maatregelen Maaswerken.⁴

⁴ Bron:
http://217.26.101.136/middenlimburg/downloads/documenten/pdf/maatregelenkaart%20nieuw%2031_3_2003.pdf.

3.4 Overige watersystemen

De overige onderzochte zoete watersystemen bestaan uit:

1. Vecht-IJsseldelta.
2. IJsselmeergebied (IJssel- en Markermeer).
3. Benedenrivieren.

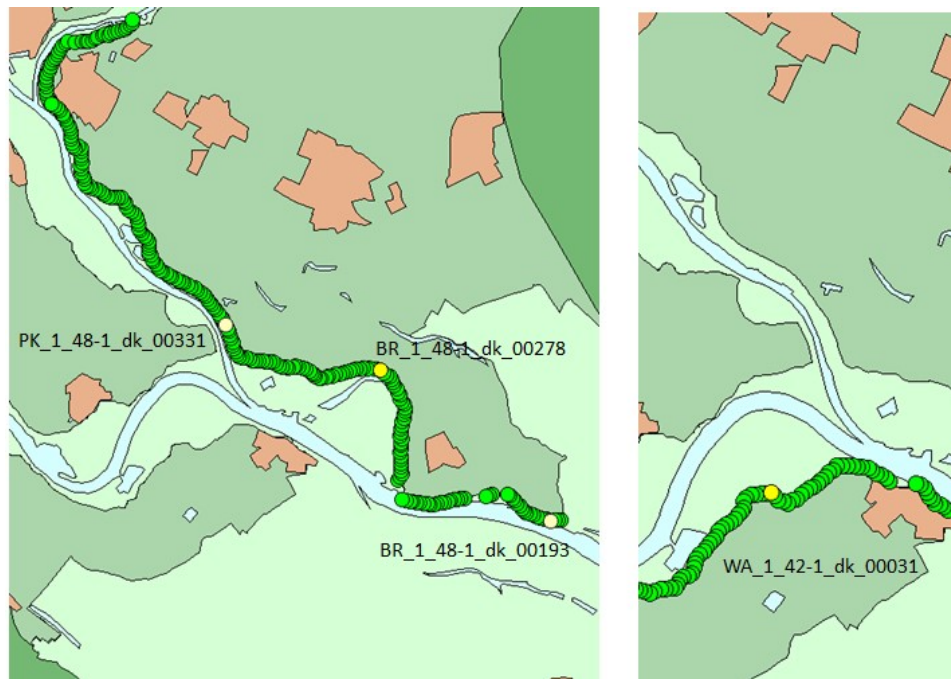
Hiervoor zijn, gezien de beperkte tijd die ter beschikking stond, slechts steekproefsgewijs locaties onderzocht. Dat is gedaan op basis van expert-judgement. N.B. Voor het IJsselmeer-gebied zijn geen merkwaardige frequentielijnen gevonden; resultaten daarvoor ontbreken dus.

4 Resultaten

Dit hoofdstuk geeft de resultaten voor een aantal watersystemen. Met nadruk wordt gesteld dat het een voorlopige inventarisatie betreft, zonder garantie van volledigheid. Verder wordt opgemerkt dat veel meer locaties zijn onderzocht dan hier worden gerapporteerd (circa 5 maal zoveel). Die locaties zijn verder niet gerapporteerd, aangezien ze geen interessante resultaten geven.

4.1 Traject Lobith tot direct na Pannerdense Kop

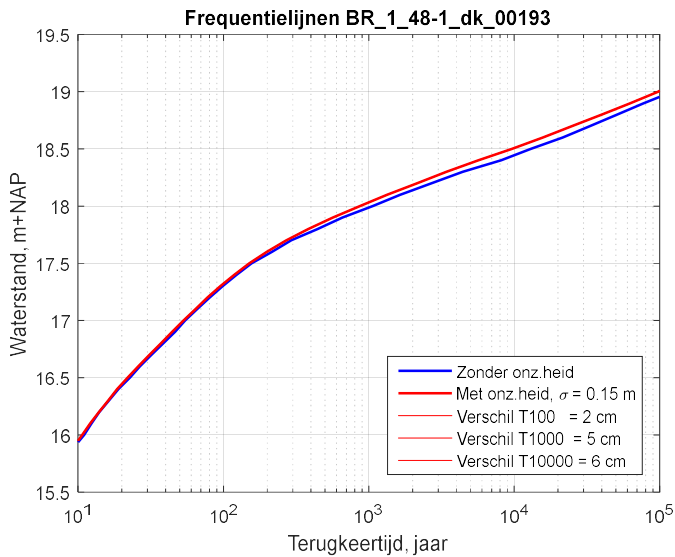
Allereerst is gekeken hoe de frequentielijnen zich gedragen, op het traject van Lobith tot direct na de Pannerdense Kop, waarbij vier locaties zijn onderzocht, weergegeven in Figuur 4-1.



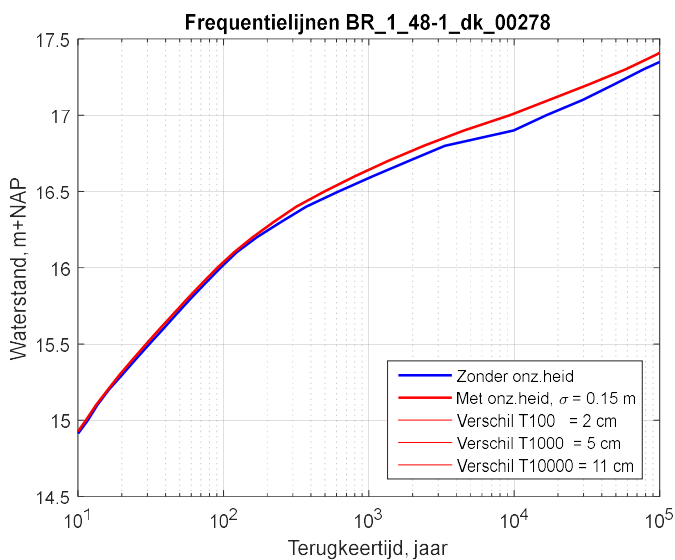
Figuur 4-1 Ligging van drie locaties langs Bovenrijn en Pannerdens Kanaal, en één locatie langs de Waal.

De resultaten van de Hydra-NL berekeningen staan in Figuur 4-2 t/m Figuur 4-5. Daarin is per figuur weergegeven:

1. De locatiennaam in de titel en het onderschrift.
2. De frequentielijn zonder onzekerheid (blauwe lijn).
3. De frequentielijn met onzekerheid (rode lijn), waarbij ook de gebruikte σ voor de onzekerheid in de waterstand is aangegeven.
4. De verschillen tussen beide lijnen, voor de terugkeertijden $T = 100, 1000, 10000$ jaar.



Figuur 4-2 Resultaten voor BR_1_48-1_dk_00193 (nabij Lobith).



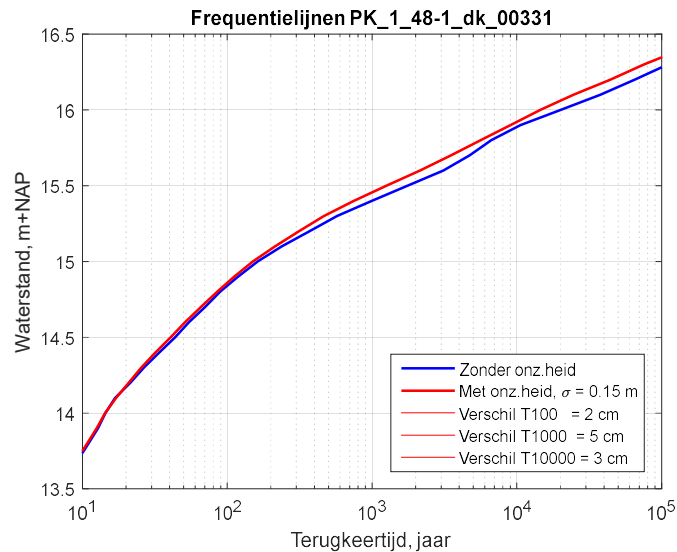
Figuur 4-3 Resultaten voor BR_1_48-1_dk_00278.

Hier volgen enkele conclusies voor de grafieken:

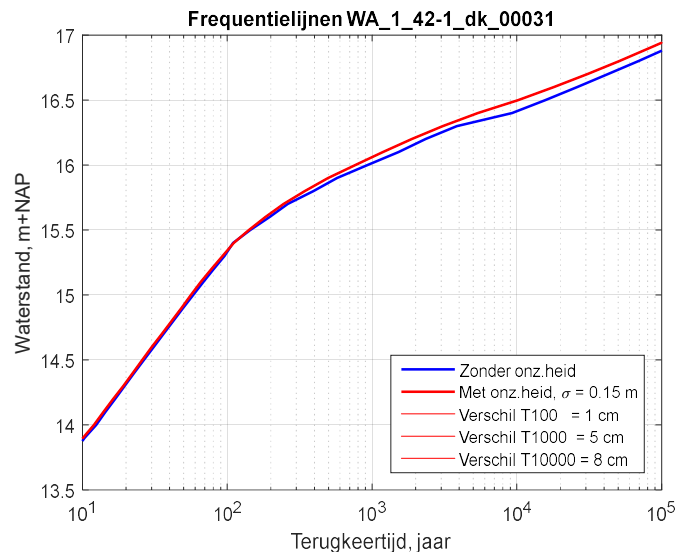
1. De meest oostelijke locatie (vlakbij Lobith, Figuur 4-2) vertoont een nette 'gladde' lijn, die echter wel voor de extremere terugkeertijden T minder steil gaat lopen. In overeenstemming met formule (2.4) neemt het effect van (het uitintegreren van) de onzekerheid dan ook toe met toenemende T . Maar ook voor $T = 10000$ jaar blijft dat beperkt tot 'slechts' 6 cm.
2. Voor de eerstvolgende locatie benedenstrooms van Lobith (Figuur 4-3) vertoont de lijn zonder onzekerheid van $T = 3000$ tot $T = 10000$ jaar een minder steil gedeelte. Figuur 4-1 laat zien dat hier berging optreedt vanwege de breder wordende rivier: dat betreft dus een fysisch effect door een afvlakkende QH-relatie. In de (frequentie)lijn met onzekerheid is dat

fysische effect echter niet meer terug te vinden. Het effect voor $T = 10000$ jaar is nu 11 cm, terwijl dat bij de voorgaande locatie slechts 6 cm is.

3. Voor de locatie op het Pannerdens Kanaal (Figuur 4-4) vinden we van $T = 4000$ tot 10000 jaar juist een knik naar *boven*. Blijkbaar wordt de 'dip naar beneden' uit de voorgaande locatie meer dan gecompenseerd: er gaat relatief veel water richting het Pannerdens Kanaal. In de lijn met onzekerheid is dat fysisch reële effect niet meer te zien.
4. De locatie langs de Waal (Figuur 4-5) vertoont een soortgelijk gedrag als die uit Figuur 4-3, wat te verwachten valt, omdat het grootste deel van het water richting de Waal gaat. Ook dit fysische aspect valt weg in de frequentielijn inclusief onzekerheid.



Figuur 4-4 Resultaten voor PK_1_48-1_dk_00331.



Figuur 4-5 Resultaten voor WA_1_42-1_dk_00031.

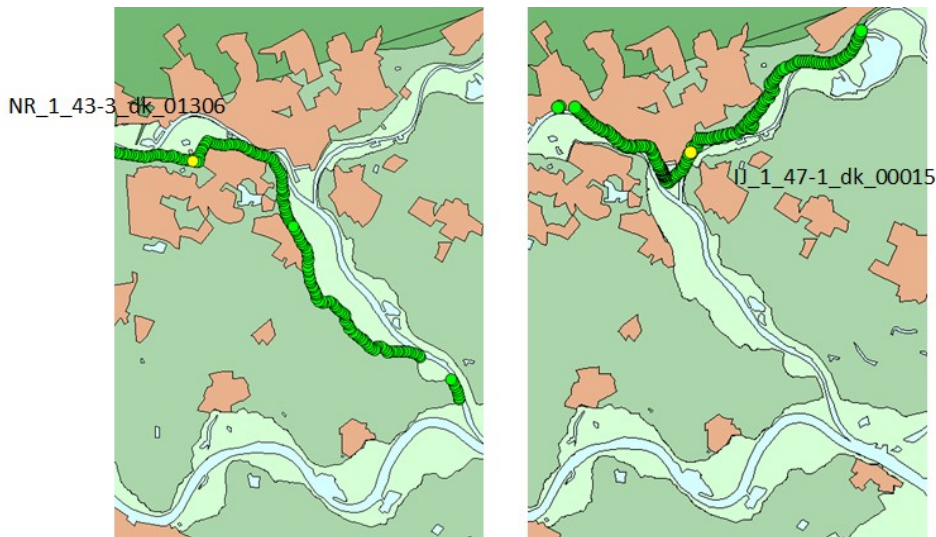
De conclusie uit bovenstaande is dat het meenemen van onzekerheid fysische verschijnselen kan verdoezelen; als de aannames achter de gebruikte onzekerheidsmodellering correct zijn, is die verdoezeling ook terecht. Maar naar onze mening is de aanname van een *constante* σ in de

normale verdeling voor de waterstand echter niet correct: het is veel plausibeler dat de mate van onzekerheid in de waterstand samenhangt met de decimeringswaarde: als bijvoorbeeld een bergingsgebied gaat meestromen – met een afvlakkende frequentielijn tot gevolg – verwachten we dat hier sprake is van een kleinere σ . Deze kleinere σ leidt dan tot een minder groot effect van het uitintegreren.

Een manier om zicht op dit probleem te krijgen, is de onzekerheid op een meer fysische manier te modelleren, door bijvoorbeeld de ruwheid van het rivierbed als onzekere parameter te gebruiken. Zie verder hierover paragraaf 5.1.1.

4.2 Lek ontzien en Hondsbroekse Pleij

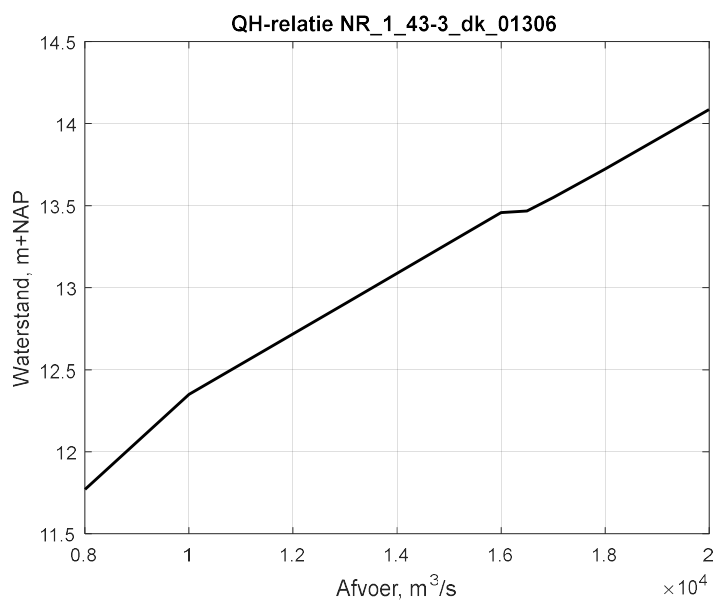
In deze studie is ook onderzocht hoe de onzekerheid uitwerkt voor de maatregel 'Lek ontzien', waarbij voor afvoeren 16000 m³/s tot 16500 m³/s de waterstand 'blijft hangen op degene die hoort bij 16000 m³/s', waarbij de waterstand weer doorstijgt vanaf 16500 m³/s. Daarnaast is een locatie op de IJssel onderzocht die representatief voor de Hondsbroekse Pleij. Beide locaties liggen iets na de IJsselkop (Figuur 4-6). Voor de locatie op de Lek geeft Figuur 4-7 de QH-relatie: duidelijk is het horizontale traject te zien voor afvoeren tussen 16000 en 16500 m³/s.⁵



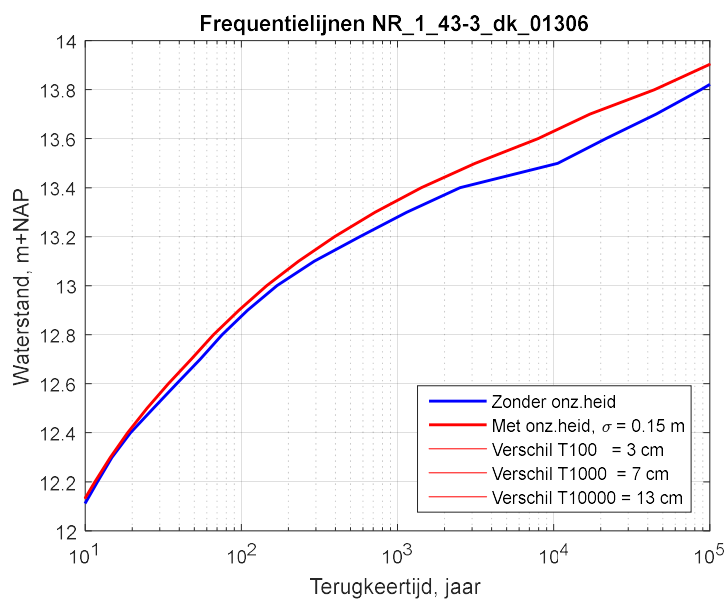
Figuur 4-6 Ligging van twee locaties: één langs de Lek en één langs de IJssel (Hondsbroekse Pleij).

In Figuur 4-8 worden voor deze locatie de Hydra-NL berekeningen weergegeven. Dan blijkt dat – ook zonder onzekerheden – het horizontale traject enigszins wordt vertroebeld. Reden daarvan is dat de scherpe overgangen uit de maatregel alleen netjes door Hydra-NL worden weergegeven als de discretisatie van de waterstand en van de afvoer veel fijner wordt gemaakt; daarvoor dient dus te worden afgeweken van de standaardwaarden. Het resultaat voor een fijnere discretisatie staat in Figuur 4-9: inderdaad is nu een scherpe knik zichtbaar. Dergelijke berekeningen zijn echter tijdsintensief; gezien de beperkte scope van deze studie worden in de rest van de rapportage gewoonlijk standaardinstellingen gebruikt.

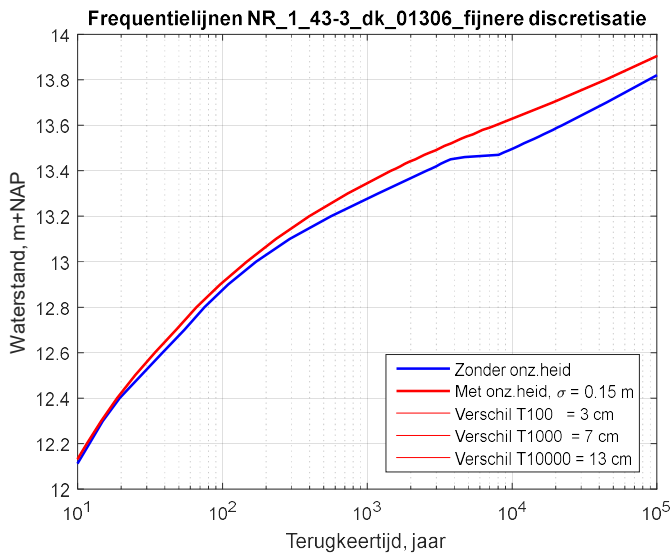
⁵ Deze vorm van de QH-relatie wordt gerealiseerd door een regelwerk bij de Hondsbroekse Pleij.



Figuur 4-7 QH-relatie voor NR_1_43-3_dk_01306.



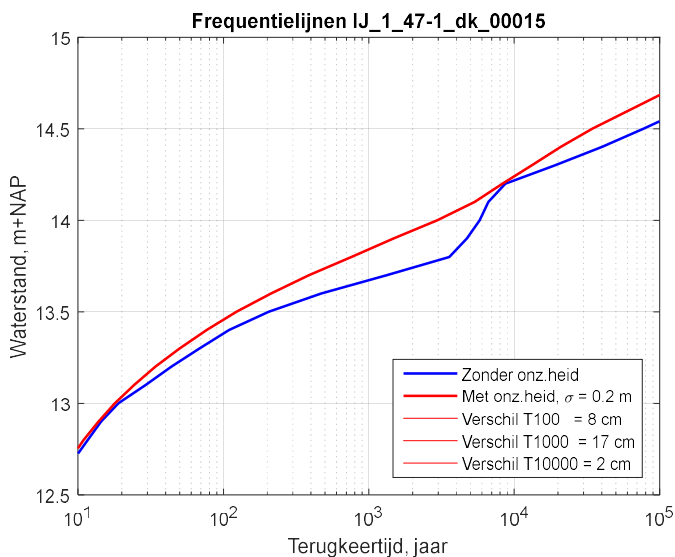
Figuur 4-8 Resultaten voor NR_1_43-3_dk_01306.



Figuur 4-9 Resultaten voor NR_1_43-3_dk_01306 na verfijning discretisaties in Hydra-NL.⁶

De figuren maken duidelijk dat het meenemen van onzekerheid de maatregel 'Lek ontzien' grotendeels teniet doet. Net als in de voorgaande paragraaf wordt een fysisch reëel effect vertroebeld door het meenemen van onzekerheid.

Voor de locatie langs de IJssel staan de resultaten in Figuur 4-10. Blijkbaar vertoont de lijn zonder onzekerheid een flinke hobbels; dat heeft mede te maken met de maatregel Lek ontzien, waardoor hier water naar de IJssel gaat i.p.v. naar de Lek. Vermoedelijk is dit dus weer fysisch correct, terwijl inclusief onzekerheid de fysica wordt vertroebeld. Voor niet al te hoge terugkeertijden levert het meenemen van onzekerheid vermoedelijk een flinke overschatting, terwijl ter plaatse van de hobbels meenemen van onzekerheid vrijwel geen effect heeft.



Figuur 4-10 Resultaten voor IJ_1_47-1_dk_00015 (Hondsbroekse Pleij).

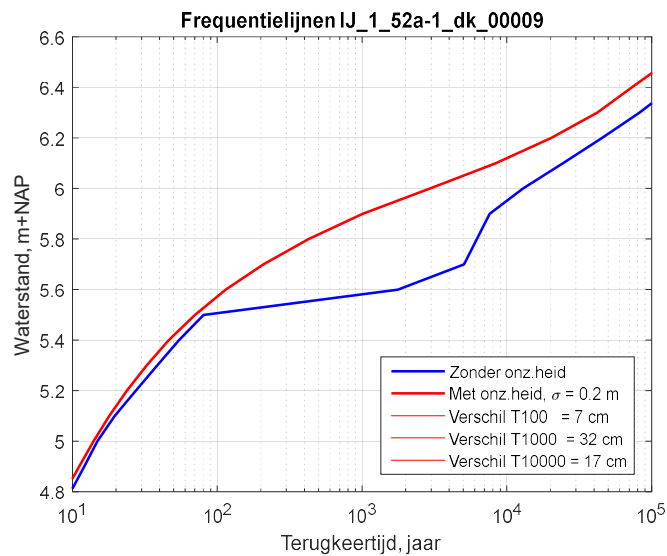
⁶ Stapgrootte in hulpdijkhoogtes 0.01 m en in de afvoer 5 m³/s.

4.3 Veessen-Wapenveld

De situatie voor Veessen-Wapenveld is uitgebreid behandeld in [Geerse et al, 2017]. Hier geven we zonder veel commentaar de Hydra-NL resultaten, zie voor de ligging Figuur 4-11 en voor de frequentielijnen Figuur 4-12.⁷ Net als hiervoor doet het meenemen van onzekerheid de fysica geweld aan, omdat volgens de genoemde referentie de onzekerheid op een meer fysische manier moet worden meegenomen.



Figuur 4-11 Ligging van locatie IJ_1_52a-1_dk_00009.



Figuur 4-12 Resultaten voor (Veessen-Wapenveld).

⁷ De lijn inclusief onzekerheid is berekend met 30 stappen in de discretisatie van de normale verdeling; de standaardwaarde van 7 stappen geeft een te schokkerig verloop.

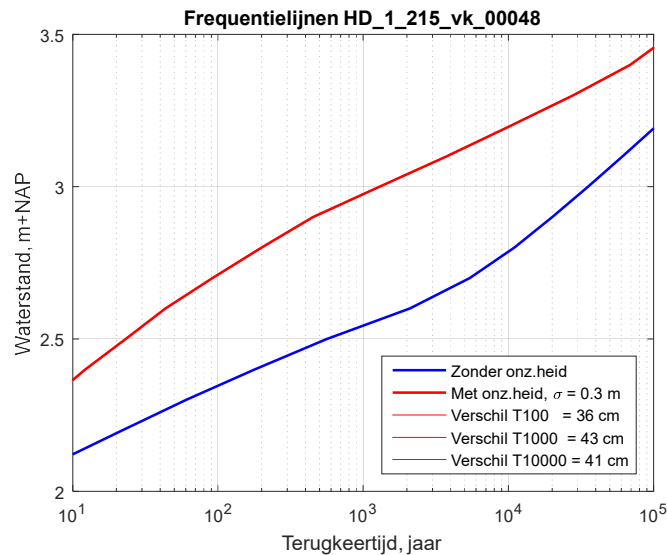
4.4 Benedenrivieren

Voor dit watersysteem wordt als eerste Rak Noord beschouwd; deze locatie is redelijk representatief voor het Haringvliet en Hollandsch Diep; vervolgens wordt een locatie onderzocht die beïnvloed wordt door de maatregel Noordwaard. Zie Figuur 4-13 voor de ligging van beide locaties.

De resultaten voor Rak Noord staan in Figuur 4-14. De decimeringswaarde is hier erg klein t.o.v. de gebruikte σ , waardoor het effect van onzekerheid groot is, namelijk ruim 0.40 m bij $T = 1000$ en 10000 jaar. Deze kleine decimeringswaarde is het gevolg van de aanwezigheid van de Maeslantkering, die een afvlakkende frequentielijn tot gevolg heeft (die afvlakking verdwijnt voor de zeer extreme terugkeertijden, aangezien dan falen van de kering steeds belangrijker wordt). Overigens is in dit geval niet helemaal duidelijk of hier sprake is van een onjuistheid in de onzekerheidsmodellering. Als immers voor alle waterstandniveaus $\sigma = 0.30$ m inderdaad een goede waarde vormt, klopt het effect van ruim 0.40 m. Maar naar onze mening is een dergelijk effect toch wel erg groot.

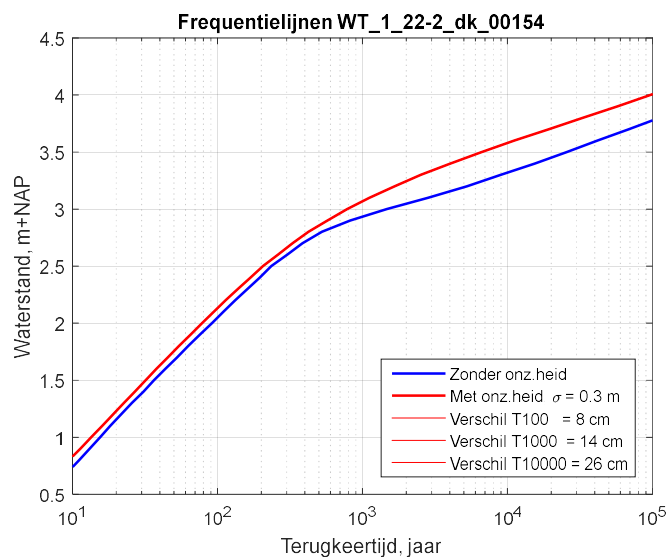


Figuur 4-13 Ligging van locatie HD_1_215_vk_00048 (Rak Noord) en WT_1_22-2_dk_00154 (Noordwaard).



Figuur 4-14 Resultaten voor HD_1_215_vk_00048 (Rak Noord).

Voor de locatie die wordt beïnvloed door de maatregel Noordwaard staan de resultaten in Figuur 4-15. De resultaten spreken tamelijk voor zich: de maatregel doet de lijn afvlakken, wat door de resulterende kleine decimeringswaarde een groot effect tot gevolg heeft (circa 0.25 m bij $T = 10000$ jaar).

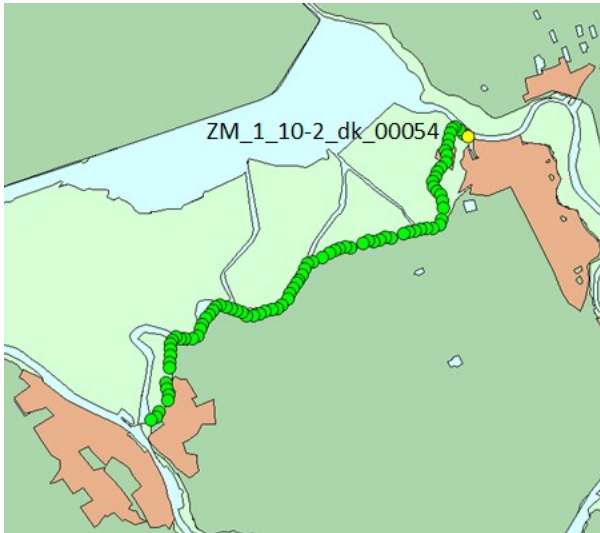


Figuur 4-15 Resultaten voor WT_1_22-2_dk_00154 (Noordwaard).

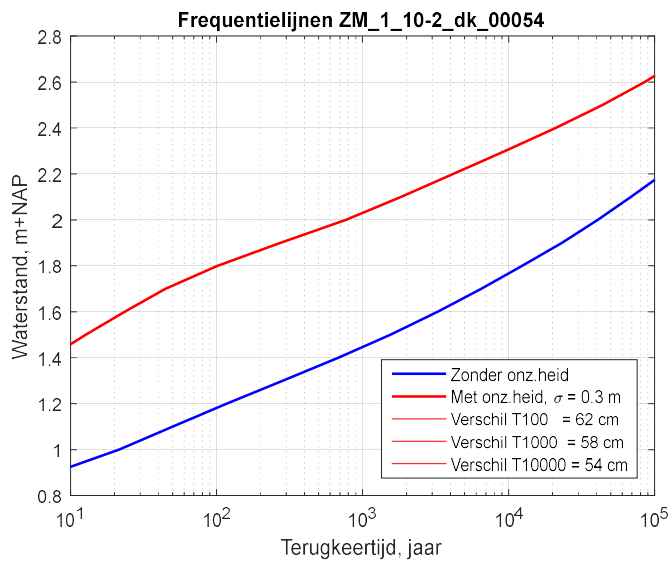
4.5 Vecht-IJsseldelta

Voor de Vecht-IJsseldelta is één locatie geselecteerd, waar sprake is van een nogal grote waarde voor σ , namelijk $\sigma = 0.4$ m. Deze locatie ligt in de monding van het Zwarte Water (Figuur 4-16). Hier geldt iets soortgelijks als voor Rak Noord: een grote σ t.o.v. de decimeringswaarde. Volgens Figuur 4-17 levert het meenemen van onzekerheid in de

waterstand hier een verhoging van de oorspronkelijke waterstand van 0.5 tot 0.6 m. Dat lijkt erg veel.⁸



Figuur 4-16 Ligging van locatie ZM_1_10-2_dk_00054.

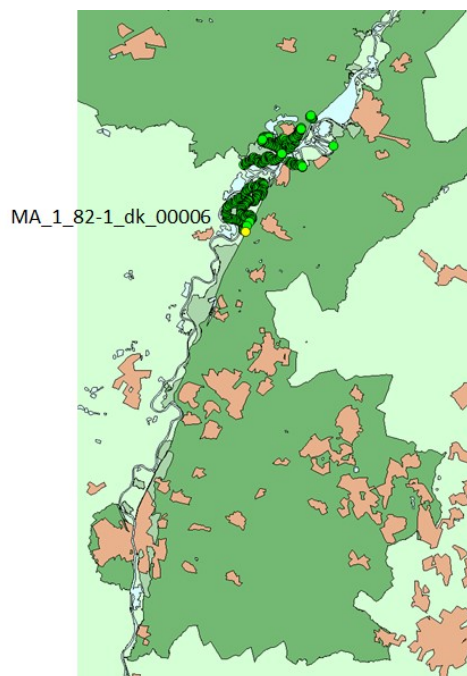


Figuur 4-17 Resultaten voor ZM_1_10-2_dk_00054.

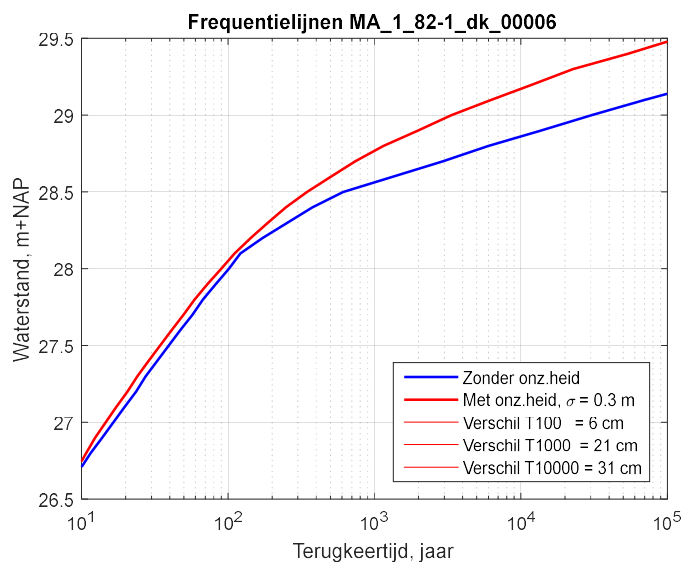
4.6 Maas

Langs de Maas blijkt het regelmatig voor te komen dat de decimeringswaarde nogal klein is, terwijl σ vrij groot is (bijvoorbeeld $\sigma = 30$ cm). Als voorbeeld bekijken we een locatie bij Maasbracht (Figuur 4-18). De frequentielijnen staan in Figuur 4-19. De afvlakkende lijn zonder onzekerheid zorgt in combinatie met $\sigma = 0.3$ m voor een effect van ongeveer 0.3 m bij $T=10000$ jaar. Dit lijkt op basis van expert-judgement aan de grote kant.

⁸ Aan de zuidzijde van het Kampereiland blijken veel merkwaardige locaties voor te komen, waarbij in de database sprake is van droogval. Deze locaties leveren vreemde frequentielijnen, waarbij de onzekerheid ook zeer vreemd doorwerkt. Dergelijke locaties laten we hier achterwege.



Figuur 4-18 Ligging van MA_1_82-1_dk_00006.



Figuur 4-19 Resultaten voor MA_1_82-1_dk_00006.

Overigens is ook gekeken naar een locatie die onder invloed staat van de Lob van Gennep. Globaal is het beeld daar hetzelfde als voor de locatie uit Figuur 4-19, maar het effect van het meenemen van onzekerheid blijkt daar wel kleiner te zijn (voor $T = 10000$ slechts 0.17 m in plaats van 0.31 m).

4.7 Opmerkingen

Hier volgen kort nog twee opmerkingen:

- Nevengeul Lent.
Een bekende maatregel is de aanleg van een nevengeul bij Lent. Het blijkt dat de onzekerheid hier niet heel sterk doorwerkt, omdat de geul al vanaf relatief lage afvoeren gaat meestromen.
- Maatregel Varik-Heeselt.
Deze maatregel kan niet worden onderzocht op basis van de nu beschikbare databases uit de WBI2017, omdat de maatregel daarin niet is verwerkt.

5 Bespreking van de resultaten

5.1 Discussie van de bevindingen

Hiervoor is menigmaal gesteld dat de huidige modellering van de onzekerheid geen recht doet aan fysisch reële verschijnselen. Het effect van maatregelen als Lek ontzien, retentiegebieden, hoogwatergeulen etcetera sneeuwt bijna volledig onder door de gebruikte onzekerheidsmodellering voor de waterstand.

Een vraag die opkomt is dan hoe die onzekerheidsmodellering beter kan worden aangepakt. Een volledig antwoord is moeilijk te geven en behoort zeker niet tot de scope van deze beknopte studie. Hieronder worden wat mogelijkheden aangestipt.

5.1.1 Bovenrivieren

Voor de bovenrivieren, waar de afvoer verreweg de belangrijkste stochast is, is het logisch om de onzekerheid in de waterstand te modelleren door de *ruwheid* van het rivierbed als onzeker te beschouwen. Verschillende ruwheden leveren verschillende waterstanden; een aangenomen kansverdeling voor de ruwheid levert dan na uitintegreren de waterstand inclusief onzekerheid. Deze aanpak is gevolgd voor de hoogwatergeul Veessen-Wapenveld in [Geerse et al, 2017], met als resultaat dat de geul veel effectiever blijkt te zijn dan op grond van de huidige onzekerheidsmodellering wordt verwacht.⁹ Overigens kan behalve de ruwheid ook nog onzekerheid in de morfologie worden beschouwd en/of in de bodemligging.

Een dergelijke fysische aanpak vereist natuurlijk wel meer inspanning dan de huidige modellering van de onzekerheid. Een meer fysische aanpak van de onzekerheidsmodellering wordt daarnaast extra gecompliceerd als ook andere stochasten dan de afvoer belangrijk zijn, wat zoals bijvoorbeeld het geval is voor de benedenrivieren en de Vecht-IJsseldelta. Maar voor de bovenrivieren zou op termijn de onzekerheidsmodellering kunnen worden aangepast, door de ruwheid en eventueel de morfologie als onzekere parameters te beschouwen.

5.1.2 Huidige modellering, maar met σ afhankelijk van de basisstochasten

Een voor de hand liggende aanpak lijkt de volgende: maak in de huidige onzekerheidsmodellering de grootte van σ afhankelijk van (de realisaties van) de basisstochasten. Kies bijvoorbeeld voor relatief lage zeewaterstanden, afvoeren en windsnelheden een kleinere waarde voor σ dan voor meer extreme waarden van deze grootheden. Voor bijvoorbeeld Veessen-Wapenveld moet σ dan heel klein worden gekozen voor het bereik van afvoeren waarbij de geul meestroomt.

Een nadeel van deze aanpak is dat het niet eenvoudig lijkt redelijke waarden voor σ te kiezen, als functie van de realisaties van de basisstochasten. Een veel groter nadeel is dat de formules voor het uitintegreren enorm ingewikkeld zullen worden, wat tot enorm gecompliceerde numerieke berekeningen leidt. Feitelijk lijkt deze aanpak praktisch onmogelijk.

⁹ De aanpak uit deze referentie betrof een voorlopige studie, waarbij de gemaakte WAQUA-berekeningen nog niet optimaal zijn uitgevoerd.

5.1.3 Geen onzekerheid in de waterstand meenemen

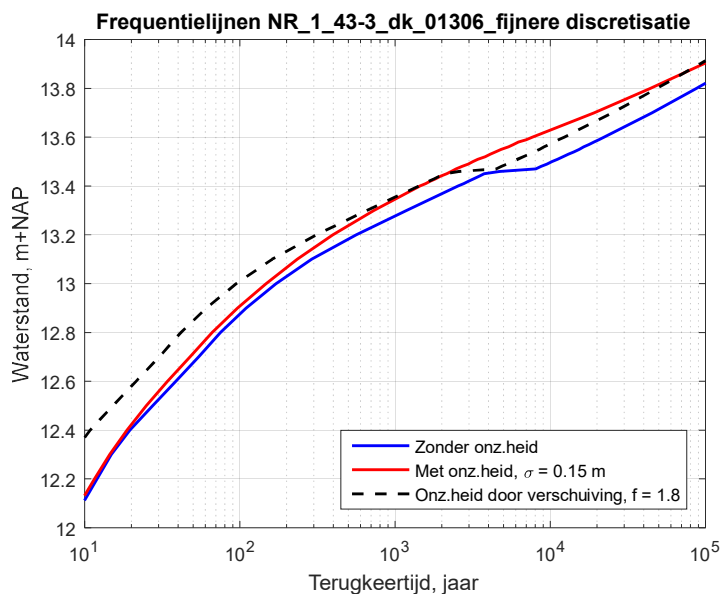
Een andere mogelijkheid is om simpelweg de onzekerheid in de waterstand ten allen tijde weg te laten, zoals in het verleden ook gebeurde. Gezien de bevindingen uit het voorgaande hoofdstuk valt daar veel voor te zeggen, zo blijft in ieder geval de link met de fysica volledig in stand en blijven resultaten eenduidig te interpreteren. N.B. De onzekerheid in de golven kan wél worden meegenomen op de huidige manier. Indien gewenst kan ook met een deterministische toeslag op de waterstand worden gewerkt.

5.1.4 Factor op de overschrijdingsfrequentie

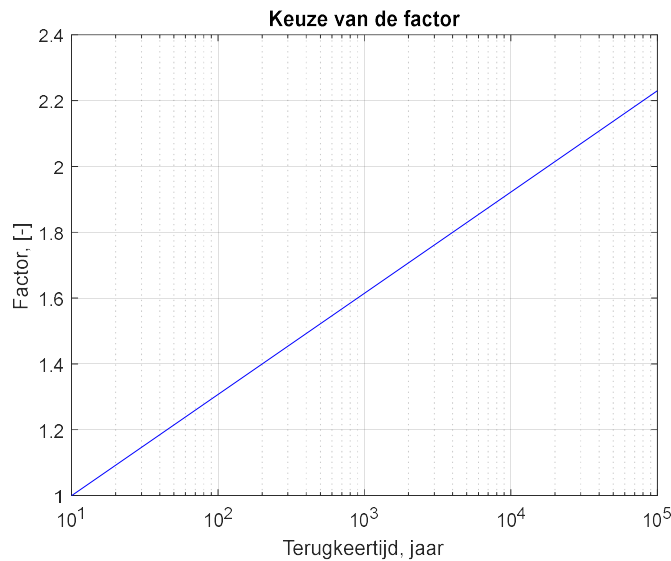
In de resultaten uit hoofdstuk 4 is veelvuldig naar voren gekomen dat de huidige onzekerheidsmodellering voorbij gaat aan fysisch reële verschijnselen. Dat probleem wordt grotendeels ondervangen als wordt gewerkt met een factor op de overschrijdingsfrequentie. Meetkundig houdt dat in dat een frequentielijn in horizontale richting wordt verschoven. Daarbij blijven de knikken/hobbels e.d. uit de frequentielijn (grotendeels) in stand, alleen de kansen waarmee ze voorkomen veranderen. De volgende paragraaf gaat nader in op deze mogelijke aanpak van de onzekerheid.

5.2 Onzekerheid modelleren met een factor op de overschrijdingsfrequentie

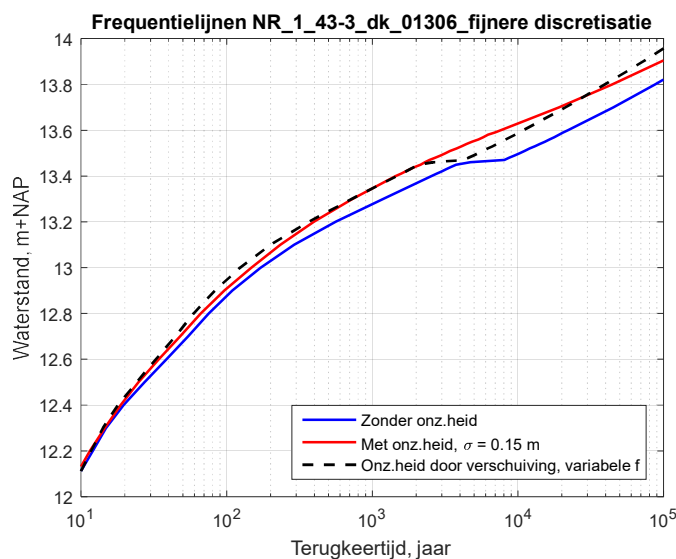
Als voorbeeld nemen we hier de maatregel 'Lek ontzien' uit Figuur 4-9. Als de frequenties zonder onzekerheid worden vermenigvuldigd met de factor $f = 1.8$, ontstaat de situatie uit Figuur 5-1. Deze factor is hier zo gekozen dat bij het beginniveau waarop de Lek wordt ontzien (13.46 m+NAP), de verschoven lijn precies samenvalt met de rode lijn.



Figuur 5-1 Onzekerheidsmodellering door de overschrijdingsfrequentie te vermenigvuldigen met een factor ($f = 1.8$).



Figuur 5-2 Voorbeeld voor de keuze van de factor waarmee de overschrijdingsfrequentie vermenigvuldigd wordt.



Figuur 5-3 Onzekerheidsmodellering door de overschrijdingsfrequentie te vermenigvuldigen met een variabele factor als in Figuur 5-2.

Een nadeel van een dergelijke 'overall factor', is dat de onzekerheid in het lage bereik ook vergroot wordt, waarbij deze in centimeters gemeten groter wordt vanwege de aldaar grotere decimeringswaarde. Een remedie daartegen is de factor afhankelijk te maken van de frequentie: kies de factor kleiner bij grotere frequenties (lagere T), bijvoorbeeld als in Figuur 5-2. Dat levert de resultaten als in Figuur 5-3.

Natuurlijk kan de factor ook zo gekozen worden dat de gestreepte zwarte lijn beneden de knik op de 'oude' rode lijn valt. Zo zijn er allerlei varianten te bedenken.

De hier gevolgde aanpak is simpel en robuust en houdt aanzienlijk beter rekening met fysische aspecten dan de op dit moment gebruikte onzekerheidsmodellering. Dat betekent echter niet

dat we enthousiast zijn over deze modellering. Een probleem is dat deze manier lastig is te combineren met de onzekerheden in de golven. Het gebruik van een factor betekent dat alleen het *eind*antwoord van een waterstandsberekening wordt aangepast; maar hoe dan met de (onzekere) waterstanden in een berekening van het Hydraulisch Belastingniveau (HBN) moet worden omgegaan is onduidelijk.

Het meest helder en robuust is eigenlijk het simpelweg weglaten van onzekerheid in de waterstand uit paragraaf 5.1.3. Maar wellicht zijn er nog andere modelleringen denkbaar.

6 Conclusies

In deze beknopte studie is globaal geïnventariseerd waar de huidige modellering van de onzekerheid in de waterstand tot problemen kan leiden. Enkele belangrijke conclusies zijn:

1. De huidige onzekerheidsmodellering van de waterstand houdt ten onrechte te weinig rekening met fysische eigenschappen van het watersysteem. De effectiviteit van bergingsgebieden, hoogwatergeulen e.d. kan daardoor te gering worden voorgesteld.
2. Bij kleine decimeringswaarden van de waterstand (frequentielijn met een vlakke helling als functie van T) kan het effect van uitintegreren verrassend groot zijn. Dat gebeurt bijvoorbeeld op het Zwarte Water in de Vechtdelta, en ook op het Haringvliet en Hollandsch Diep waar door de Maeslantkering de decimeringswaarde relatief klein is.
3. Een remedie voor de problemen is voor sommige gebieden wellicht de onzekerheid meer vanuit de fysica te benaderen. Voor de bovenrivieren kan bijvoorbeeld op termijn de ruwheid (en eventueel de morfologie) als onzekere parameter worden beschouwd. Maar een oplossing die voor alle zoete wateren bevredigend werkt lijkt vooralsnog niet voorhanden.

Gezien de problemen die in deze studieesignaleerd worden is een remedie wellicht helemaal geen onzekerheid in de waterstand mee te nemen (eventueel met uitzondering van de bovenrivieren waar de aanpak uit punt 3 kan worden genomen). Die aanpak stemt uiteraard overeen met die uit het verleden, waarin een dergelijke onzekerheid in de waterstand eveneens niet werd meegenomen. Onzekerheid in de golven kan wel op de huidige manier worden meegenomen, of met een kleine aanpassing daarvan.¹⁰

Maar misschien zijn andere modelleringen van de onzekerheid in de waterstand denkbaar (een volledig onderzoek naar alternatieve modelleringen behoorde niet tot de scope van dit onderzoek). Daarnaast moet bedacht worden dat voor een groot deel van de locaties de huidige onzekerheidsmodellering wel redelijk uit pakt.

¹⁰ Deze modellering moet wel worden aangepast om golfsteilheden fysisch correct te behandelen.

7 Referenties

[Duits en Kuijper, 2017]

Hydra-NL. Systeemdokumentatie – Versie 2.3. *[HKV-rapport PR3506]*. M.T. Duits en B. Kuijper. HKV Lijn in Water, april 2017.

[Geerse, 2016]

Werkwijze uitintegreren onzekerheden basisstochasten voor Hydra-NL . Afvoeren, meerpeilen, zeewaterstanden en windsnelheden – Update februari 2016. C.P.M. Geerse. *[HKV-rapport PR3216.10]*. HKV Lijn in Water, februari 2016. In opdracht van RWS - WVL.

[Geerse et al, 2017]

Modelonzekerheid Veessen-Wapenveld. Invloed hoogwatergeul op de grootte van de modelonzekerheid. Chris Geerse, Guus Rongen en Sonja Ouwerkerk. *[HKV-rapport PR3479.10]*. HKV Lijn in Water, maart 2017. In opdracht van RWS - WVL.

[Rongen en Geerse, 2016]

Invloed onzekerheid op bepalen van waterstandsverlopen. Verandering percentielen van afvoer en meerpeil bij meenemen statistische en modelonzekerheid waterstand. Guus Rongen en Chris Geerse. *[PR3280.20]*. HKV Lijn in Water, oktober 2016.



HKV lijn in water BV

Postbus 2120
8203 AC Lelystad

Botter 11-29
8232 JN Lelystad

0320 29 42 42
info@hkv.nl
www.hkv.nl