

UIT HET VUISTJE

Empirische vuistregels voor ingrepen in de uiterwaarden
van de Maas

Arcadis

6 JANUARI 2020



Titelpagina

PIETER VAN LEEUWEN
Stagiair rivierkunde

Arcadis Nederland B.V.
Postbus 1018
5200 BA 's-
Hertogenbosch
Nederland

P.C.H. van Leeuwen
p.c.h.vanleeuwen@gmail.com
+316 46555922

Opdrachtgever: Arcadis Nederland B.V.

Externe begeleider: Bas van Dongen
Bas.vandongen@arcadis.com

Interne begeleider: Anouk Berendsen-Sloot
Anouk.berendsen@hvhl.nl

Land- en Watermanagement
Toegepaste Hydrologie
Hogeschool van Hall Larenstein



VOORWOORD

Voor u ligt de vaktechnische scriptie over empirische vuistregels voor ingrepen in de uiterwaarden van de Maas. Als vierdejaars student van de studie Land- en Watermanagement, in de richting Toegepaste Hydrologie van Hogeschool Van Hall Larenstein, ben ik de afgelopen 4 maanden bezig geweest met dit onderzoek voor Arcadis Nederland B.V.

Op de eerste plaats wil ik Bas van Dongen bedanken, mijn begeleider van Arcadis. Tijdens de afstudeerstage is hij een uitstekende begeleider geweest. Hij heeft mij precies de juiste hoeveelheid tijd en aandacht gegeven, zodat ik ermee uit de voeten kon en nog zelf richting kon geven aan het onderzoek. Daarnaast heeft hij mij nieuwe programma's geleerd en de nodige feedback gegeven op mijn handelen. Ook wil ik hem graag feliciteren met de geboorte van zijn dochter!

Daarnaast wil ik graag Anouk Berendsen-Sloot bedanken, mijn begeleidster van Hogeschool Van Hall Larenstein. Zij is enorm behulpzaam geweest met feedback en heeft gezorgd voor een prettig en gemakkelijk contact tijdens de stage.

Tot slot wil ik graag mijn opa, Jacques Laarakkers, bedanken. Mijn hele leven is hij al een grote inspiratie geweest en ik ben trots dat ik in zijn voetsporen treedt. In de laatste week van mijn afstudeeronderzoek is hij overleden, wat het schrijven van het rapport in meerdere opzichten lastig heeft gemaakt. Jacques, het ga je goed!

Ten slotte wil ik allen die geholpen hebben tijdens het schrijven van mijn scriptie bedanken voor hun hulp, inzet en steun. Mede dankzij hen is dit rapport tot stand gekomen.

Schrijven is nooit mijn sterkste kant geweest, desondanks dit feit wens ik u veel leesplezier.

Pieter van Leeuwen

Utrecht, januari 2020

SAMENVATTING

Sinds de hoogwateren van de jaren '90 is in Nederland in toenemende mate belangstelling naar de risicobeoordeling van de Rijn en Maas. Deze belangstelling heeft geleid tot een serie aan studies en ingrepen aan en naar het buitendijkse gebied. Het toetsen van een ingreep gebeurt met modellen, en het ontwerpen van hiervan is een iteratief proces. Met voortschrijdend inzicht wordt stapje voor stapje naar de gewenste beoordelingscriteria gewerkt. Dit is een tijdrovend en duur proces. Met het gebruik van vuistregels kunnen stappen worden overgeslagen om sneller tot de beoordelingscriteria te komen. Echter, voor ingrepen aan de Maas bestaan geen vuistregels.

Het doel van het onderzoek is het opstellen van vuistregels voor de Maas, voor drie soorten ingrepen: vergravingen, ophogingen en verruwing vanaf grasland. Deze vuistregels dienen betrouwbaar advies te geven over het maatgevend hoogwaterstandseffect van de ingreep. Hiervoor is de volgende onderzoeksvraag opgesteld: *Welke vuistregels voor het bepalen van waterstandseffecten van ingrepen in het winterbed van de Maas kunnen worden afgeleid?*

De Maas is opgedeeld in zes trajecten, waarvan de vuistregels voor drie trajecten op te stellen zijn: de Plassenmaas, de Zandmaas en de Bedijkte Maas.

Om tot de vuistregels gekomen heeft het onderzoek zich gefocust op verschillende parameters:

- De leidende parameter, de basis van de formule in volume verschil (Mm^3) voor ophogingen en vergravingen, en oppervlakte (ha) voor verruwing.
- De secundaire parameter afvoerdichtheid, de doorstroombaarheid van een kolom water (m^3/s).
- De zijn de mate van verruwing, uitgedrukt in het Chézy verschil ($\text{m}^{1/2}/\text{s}$).
- De oriëntatie van een ingreep ten opzichte van de stroomrichting.

Het onderzoek naar de invloed van de parameters op het maatgevend hoogwatereffect, is opgesteld door een methodische aanpak in de Zandmaas, met WAQUA 2D-modellering. Hierbij is telkens een parameter veranderd om te kijken wat het effect van de parameter op de maatgevend hoogwaterstand was. Hiermee zijn verbanden ontdekt die vervolgens tot een formule en corrigerende factor zijn verwerkt.

Op basis van validatie in de Zandmaas en de Bedijkte maas is de vuistregel voor vergraving als beste getest. De vuistregel voor ophogingen is ook te gebruiken om tot een inschatting van het maatgevend hoogwaterstandseffect te komen. Deze vuistregel wordt wel onnauwkeuriger naarmate het volume verschil en de hoogte van de ingreep toenemen. De vuistregel voor verruwing is alleen in de Zandmaas getest.

Tijdens de validatie van de vuistregel voor verruwing bleek dat de ingrepen op een locatie zijn uitgevoerd die extreme waterstandseffecten tot gevolg hadden. Op basis van deze bevinding is aan de vuistregel een extra corrigerende factor toegevoegd. Met deze factor is de vuistregel beter in staat het maatgevend hoogwaterstandseffect te berekenen op andere, representatievere locaties in de uiterwaarde.

Tijdens het onderzoek is gebleken dat ingrepen sterk afhankelijk zijn van de afstand tot het zomerbed. Op basis van deze bevinding wordt aanbevolen om meer hier een vervolgonderzoek naar te doen.

De vuistregels zijn niet gevalideerd met gecombineerde ingrepen. Hierdoor is het onbekend of de vuistregels met elkaar te gebruiken zijn. Het is aan te bevelen extra validatie uit te voeren of dit het geval is.

INHOUDSOPGAVE

1	INLEIDING	9
1.1	Achtergrond	9
1.2	Aanleiding	10
1.3	Probleemdefinitie	10
1.4	Doelstelling	10
1.5	Onderzoeksvragen	10
1.6	Afbakening	11
1.7	Doelgroep	11
1.8	Aanpak en leeswijzer	11
2	THEORETISCH KADER	12
2.1	Werking van ingrepen	12
2.2	Vuistregels Rijntakken	13
2.2.1	Bevingingen vuistregels Rijntakken	13
2.3	Stromingsweerstand	14
2.4	Systeemanalyse	14
2.4.1	Plassenmaas	14
2.4.2	Zandmaas	15
2.4.3	Bedijkte Maas	15
2.4.4	Gebiedskeuze	15
3	METHODE	16
3.1	Parameters	17
3.1.1	Leidende parameter	17
3.1.2	Chézy verandering	17
3.1.3	Afvoerdichtheid	18
3.1.4	Oriëntatie	19
3.2	Programma's en modellen	19
3.3	Modelberekeningen	19
3.4	Opstellen vuistregels	21
3.5	Validatie	22
4	RESULTATEN	23
4.1	Vergravingen	23
4.1.1	Leidende parameter	23

4.1.2	Afvoerdichtheid	24
4.1.3	Oriëntatie	26
4.2	Ophogingen	26
4.2.1	Leidende parameter	27
4.2.2	Afvoerdichtheid	27
4.2.3	Oriëntatie	28
4.3	Verruwing	28
4.3.1	Leidende parameter	28
4.3.2	Mate van verruwing	30
4.3.3	Afvoerdichtheid	30
4.3.4	Oriëntatie	32
5	VUISTREGELS	33
5.1	Vergravingen	33
5.2	Ophogingen	35
5.3	Verruwing	36
5.3.1	Chézy verschil	36
5.3.2	Afvoerdichtheid	36
6	VALIDATIE	38
6.1	Resultaten tegen vuistregels	38
6.2	Bedijkte Maas	38
6.3	Correctie vuistregel verruwing	39
6.4	Nieuwe ingrepen	40
7	CONCLUSIE	41
8	DISCUSSIE EN AANBEVELING	43
8.1	Discussie	43
8.2	Aanbeveling	43
	BIJLAGE A – VUISTREGELS RIJNTAKKEN	45
	BIJLAGE B – LEGGERKLASSEN	46
	BIJLAGE C - SYSTEEMANALYSE	49
	BIJLAGE D – BASELINE KAARTEN	50
	BIJLAGE E – AFVOERDICHTHEID	53
	BIJLAGE F – CODERING VUISTREGELS	54

BIJLAGE G – LOCATIES INGREPEN	55
BIJLAGE H – RESULTATEN VERGRAVINGEN	56
BIJLAGE I – RESULTATEN OPHOGINGEN	58
BIJLAGE J – RESULTATEN VERRUWING	60
BIJLAGE K – LEIDENDE PARAMETER VERGRAVINGEN EN OPHOGINGEN	63
BIJLAGE L – BEREKENINGEN CORRIGERENDE WAARDES	65
Afvoerdichtheid, vergraving	65
Afvoerdichtheid, ophoging	65
Afvoerdichtheid, verruwing	66
BIJLAGE M – VUISTREGELS VERGRAVING	67
BIJLAGE N – VUISTREGELS OPHOGINGEN	68
BIJLAGE O – VERRUWING	69
BIJLAGE P – LOCATIES INGREPEN BEDIJKTE MAAS	71
BIBLIOGRAFIE	72

LIJST VAN FIGUREN

Figuur 1: Stroomschema overzicht van de scriptie.	11
Figuur 2: Visualisatie van het waterstandseffect door een vergraving (boven) en het waterstandseffect door natuurontwikkeling of ophogingen (Harke, 2006).	12
Figuur 3: Waterstandseffect van een ophoging uitgezet ten opzichte van de referentiewaterstand.	12
Figuur 4: Flowchart voor de methode van het opstellen van de vuistregels	16
Figuur 5: Vegetatieklasse bos (Arcadis, 2015).	18
Figuur 6: Afvoerdichtheid afgebeeld in een doorsnede van een rivier (Hendriks, 2010).	18
Figuur 7: Visualisatie bodemhoogte referentiemodel (links) en ingreep (rechts)	20
Figuur 8: Visualisatie ecotopen ruwheid referentiemodel (links) en ingreep (rechts)	20
Figuur 9: Stroomschema voor het opstellen van de corrigerende factor	21
Figuur 10: Ligging van vergravingen en ophogingen voor de leidende parameter.	23
Figuur 11: Uiteenzetting afgegraven volume tegen de verlaging.	24
Figuur 12: Ligging van vergravingen en ophogingen voor de parameter afvoerdichtheid.	24
Figuur 13: Afvoerdichtheid tegen verlaging bij vergravingen.	25
Figuur 14: Ligging van vergravingen en ophogingen voor de parameter oriëntatie.	26

Figuur 15: Uiteenzetting opgehoogd volume tegen de opstuwing.	27
Figuur 16: Afvoerdichtheid tegen opstuwing bij ophogingen.	27
Figuur 17: Waarden van ingrepen a1, 2 en 3 bij ophogingen oriëntatie.	28
Figuur 18: Ligging van verruwende ingrepen voor de leidende parameter.	28
Figuur 19: Opstuwing van verschillende soorten verruwingsingrepen	29
Figuur 20: Opstuwing van verruwingsingrepen voor de secundaire parameter Chézy verschil.	30
Figuur 21: Trendlijn voor het gemiddelde Chézy verschil.	30
Figuur 22: Ligging van verruwingsingrepen voor de parameter afvoerdichtheid.	31
Figuur 23: Opstuwing van verruwingsingrepen voor de secundaire parameter afvoerdichtheid.	31
Figuur 24: Ligging van verruwingsingrepen voor de parameter oriëntatie.	32
Figuur 25: Stroomschema omvorming verband naar corrigerende factor.	33
Figuur 26: Corrigerende waarden voor de afvoerdichtheid van vergravingen.	34
Figuur 27: Corrigerende waarden voor de afvoerdichtheid van ophogingen.	35
Figuur 28: Corrigerende waarden voor het Chézy verschil bij verruwing.	36
Figuur 29: Corrigerende waarden voor de afvoerdichtheid van verruwing.	37
Figuur 30: Visualisatie van de 'bottleneck' van de verruwingsingrepen.	39
Figuur 31: Referentie variant hoogtemodel.	50
Figuur 32: Referentie variant met bomen, lanen, heggen en hoogwatervrij vlakken	51
Figuur 33: Referentie variant ecotopen ruwheid	51
Figuur 34: Referentie variant afvoerdichtheid	52
Figuur 35: Oppervlakte tegen verlaging bij vergravingen	63
Figuur 36: Diepte tegen verlaging bij vergravingen	63
Figuur 37: Vergraven volume tegen verlaging bij verlagingen	64
Figuur 38: vergraven volume tegen verlaging bij vergravingen	64
Figuur 39: Afgegraven volume tegen de verlaging	64

1 INLEIDING

De inleiding beschrijft de aanleiding tot de studie en introduceert een overzicht van de studie. Eerst wordt de achtergrond behandeld, waarna de aanleiding en de probleemstelling volgen. Vervolgens staat de doelstelling beschreven die geconcretiseerd wordt in de onderzoeksvragen. Na de onderzoeksvragen volgt de afbakening van het onderzoek. Als laatst wordt de indeling en inhoud van het onderzoek geschetst in de leeswijzer.

1.1 Achtergrond

Met klimaatverandering in het vooruitzicht, wordt in het Nationaal Waterplan (NWP) vooruitgeblikt naar 2050 (Rijksoverheid, 2016). In dit plan wordt ingezet op een robuust en toekomstgericht watersysteem, waarin gefocust wordt op waterveiligheid, waterkwaliteit en een gezond ecosysteem.

Ieder jaar wordt het Deltaprogramma gepresenteerd, wat tot doel heeft het klimaatbestendig en waterrobuust maken van de waterveiligheid en ruimtelijke inrichting in 2050 (Deltacommissaris, 2019). Hierin zijn de rivieren, met name de Rijntakken en de Maas, belangrijke onderdelen. Het is van belang dat een rivier als één systeem wordt gezien. In het Deltaprogramma wordt bekeken welke urgente opgaven op de korte termijn spelen en opties gepresenteerd voor de lange termijn.

Met de aangepaste Waterwet van 2017 zijn nieuwe normen voor de waterveiligheid in werking getreden. Een uitwerking van deze wijziging is dat de waterkeringen in de Maasvallei dezelfde status krijgen als alle andere primaire waterkeringen. Dit houdt in dat de uitzonderlijke voorwaarde dat de waterkeringen in de Maasvallei bij extreem hoogwater overstroombaar moeten zijn, vervalt. Dit heeft invloed op het Deltaprogramma. Gevolg hiervan is dat dijken aangepast moeten worden en de Maas een deel van haar waterbergend vermogen verliest. Dit verlies dient op andere plaatsen opgevangen te worden door bijvoorbeeld uiterwaard vergravingen, het verleggen van dijken, het graven van nevengeulen of het anders inrichten van het winterbed (Stuurgroep Deltaprogramma Maas, 2016).

Voor het anders inrichten van het winterbed is de Kaderrichtlijn Water (KRW) van belang. De KRW heeft onder andere tot doel: het beschermen en verbeteren van oppervlaktewateren en de bescherming en verbetering van beschermde gebieden – wat alle buitendijkse gebieden zijn (Rijksoverheid, 2016). Aanpassingen in het winterbed gaan hierdoor vaak gepaard met een veranderde vegetatie. Een nieuwe inrichting zorgt voor een andere weerstand die het water ondervindt, wat de doorstroombaarheid van water beïnvloed. Zo zorgt bijvoorbeeld riet en ruigte voor meer opstuwing dan grasland.

Met al deze programma's en wetten is in 2018 vanuit Rijk en regio het Ruimtelijk Perspectief Maas (RPM) ontwikkeld. Hierin zijn de aanwezige kwaliteiten van de Maas geanalyseerd en zijn de ruimtelijke ambities voor rivierverruimende maatregelen geformuleerd. In opvolging van het RPM wordt gewerkt aan de Adaptieve Uitvoeringsstrategie Maas, waarin de Maaspartners een plan van aanpak voor dijkversterking, rivierverruiming en gebiedsontwikkeling tot 2050 ontwikkelen (Deltacommissaris, 2018). In deze strategie staan plannen en ideeën voor ingrepen in buitendijks gebied. Voor de periode van 2020 tot 2050 staat maar een klein deel van de bedachte en benodigde ingrepen vast of gepland. Veel hiervan moet nog worden ontwikkeld en uitgewerkt. Samengevat, aan de Maas is veel werk in de toekomst.

1.2 Aanleiding

De hoogwaters in de jaren '90 van de vorige eeuw hebben voor veel interesse in risicobeoordeling van de Maas en Rijn gezorgd. Een resultaat hiervan was het IRMA-SPONGE programma, waarin methodieken en gereedschappen zijn gecreëerd voor effectinschattingen van maatregelen en scenario's, om de risico's van overstromingen vast te stellen (Wolters, Platteeuw, & Schoor, 2001). Dit programma heeft onder andere geresulteerd in een aantal vuistregels voor de Rijntakken, waarmee effectinschattingen voor vergravingen en verruwing kunnen worden gedaan.

Een herinrichting van de rivier dient rekening te houden met beoordelingscriteria, zoals een minimum van ontwikkelde natuur en maximale waterstandsveranderingen. In een ontwerp wordt dus al rekening gehouden met deze beoordelingscriteria. Bij het ontwerpen van een ingreep is het nodig om de effecten van een ingreep te kunnen inschatten. Dit gebeurt aan de hand van vuist- en rekenregels (Rijkswaterstaat, 2007).

1.3 Probleemdefinitie

Het ontwerpen van ingrepen is een iteratief proces. Op basis van voortschrijdend inzicht wordt stapje voor stapje naar de gewenste beoordelingscriteria gewerkt. Dit is een tijdrovend en duur proces. Met gebruik van vuistregels kunnen stappen worden overgeslagen, om sneller te kunnen inschatten of een bepaalde ingreep voldoet aan de beoordelingscriteria.

De vuistregels van de Rijntakken zijn geformuleerd op basis van resultaten van de Ruimte voor de Rijntakken projecten en behandelen alleen effectinschattingen voor de Rijntakken. Ze zijn niet geldig voor de Maas. De vuistregels van de Rijn zijn vrij generiek, omdat ze zijn afgeleid van projecten die niet het opstellen van vuistregels tot doel hadden. De vuistregels worden er dus van verdacht niet altijd even betrouwbare resultaten op te leveren.

Voor ingrepen aan de Maas bestaan geen vuistregels, en vanwege de mogelijke onbetrouwbaarheid van de vuistregels voor de Rijntakken dienen vuistregels voor de Maas niet te worden afgeleid uit projecten die daarvoor niet bedoeld waren.

1.4 Doelstelling

Het doel van het onderzoek is om betrouwbare vuistregels voor de Maas op te stellen, waarmee snel en eenvoudig advies gegeven kan worden over de waterstandseffecten van ingrepen. Daarnaast dient de betrouwbaarheid van de nieuw opgestelde vuistregels te worden bepaald.

1.5 Onderzoeksvragen

Volgend uit de probleemstelling en de doelstelling staat de volgende onderzoeksvraag centraal:

Welke vuistregels voor het bepalen van waterstandseffecten van ingrepen in het winterbed van de Maas kunnen worden afgeleid?

Om tot antwoord op de hoofdvraag te komen, is het onderzoek verdeeld in onderdelen, met bijbehorende deelvragen:

1. Welk riviervoorbeeld is op basis van rivierkundige eigenschappen het meest geschikt voor proefsgewijze modellering?
2. Op welke manier zijn de waterstandseffecten per soort ingreep te herleiden tot vuistregels?
3. In welke mate beïnvloeden de parameters van de ingrepen de maatgevend hoogwaterstand?
4. Wat is de betrouwbaarheid van de vuistregels?

1.6 Afbakening

Het rivierengebied is een groot en complex gebied dat gebonden is aan veel wettelijke eisen. Om het onderzoek concreet en op het probleem toegespitst te houden wordt in het onderzoek niet ingegaan op de haalbaarheid van de ingrepen. Vanwege de vele regels die Rijkswaterstaat aan ingrepen in het zomerbed hanteert, is in dit onderzoek gekozen om de ingrepen alleen aan het winterbed uit te voeren. Hierdoor wordt in dit onderzoek gefocust op drie soorten ingrepen.

- Vergravingen;
- Ophogingen;
- Verruwing vanaf grasland.

1.7 Doelgroep

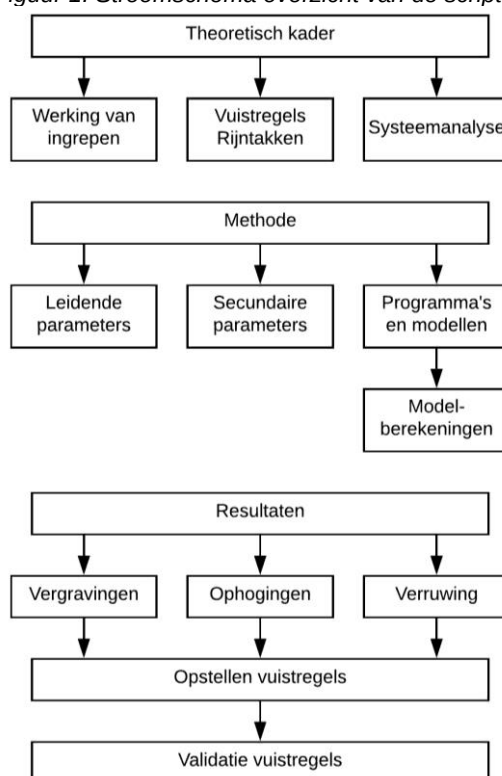
Dit rapport is bedoeld voor de opdrachtgever Arcadis, vertegenwoordigd door Bas van Dongen. Daarnaast is het bedoeld voor overige rivierkundigen van Arcadis die gebruik wensen te maken van de opgestelde vuistregels. Ook is het rapport bedoeld voor de interne begeleider en de beoordelaar vanuit Hogeschool Van Hall Larenstein. Tot slot is het rapport bedoeld voor alle overige geïnteresseerde personen die van de vuistregels gebruik wensen te maken.

1.8 Aanpak en leeswijzer

Uit het onderzoek zijn vuistregels opgesteld. Maar in het rapport wordt vooral het proces tot deze vuistregels behandeld. Omdat hiervoor vele handeling en processen maar kort zijn beschreven is in het figuur hieronder een overzicht weergegeven van de opbouw van de scriptie.

Het rapport bestaat uit acht hoofdstukken. Het eerste hoofdstuk bevat de inleiding, probleemstelling, doelstelling en de onderzoeksvragen. In hoofdstuk twee wordt het theoretisch kader behandeld en de Maas in trajecten ingedeeld. Hoofdstuk drie behandelt de methode die het onderzoek hanteert. Het hoofdstuk Resultaten weergeeft en interpreteert de resultaten van de parameters op het maatgevend hoofwatereffect. In hoofdstuk vijf worden de vuistregels opgesteld en in hoofdstuk zes worden deze gevalideerd. In hoofdstuk zeven komt de conclusie aan bod. Tot slot volgen in hoofdstuk acht de discussie en aanbevelingen.

Figuur 1: Stroomschema overzicht van de scriptie.



2 THEORETISCH KADER

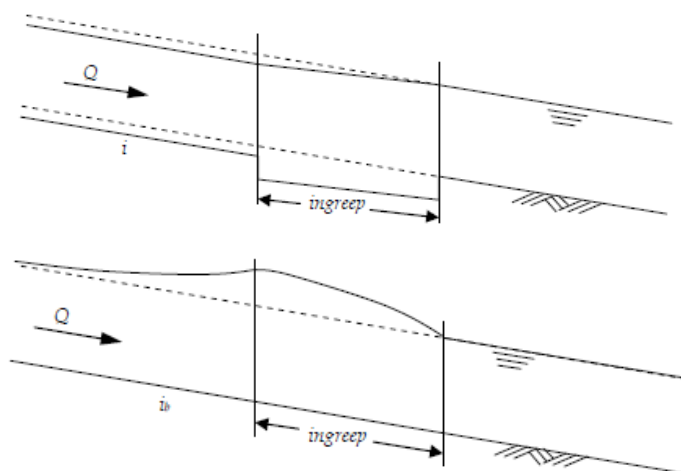
In dit hoofdstuk wordt antwoord gegeven op de deelvraag “Welk riviertraject is op basis van rivierkundige eigenschappen het meest geschikt voor proefsgewijze modellering?”. Allereerst wordt er ingegaan op de werking van ingrepen en hoe resultaten worden geïnterpreteerd. Daarna worden de vuistregels van de Rijntakken beschreven. Hierna volgt een korte introductie over de werking van stromingsweerstand. Als laatste volgt de systeemanalyse waarin de Maas in trajecten wordt verdeeld.

2.1 Werking van ingrepen

Om de veiligheid tegen overstromingen in het riviereengebied te waarborgen is een goede doorstroombaarheid van belang. Maatregelen, zoals het aanleggen van nevengeulen of uiterwaardverlagingsen, kunnen de doorstroomcapaciteit verbeteren. Daar staat tegenover dat bij natuurontwikkeling of ophogingen, de afvoercapaciteit van de rivier afneemt door opstuwing als gevolg van een grotere hydraulische ruwheid (Querner & Makaske, 2012).

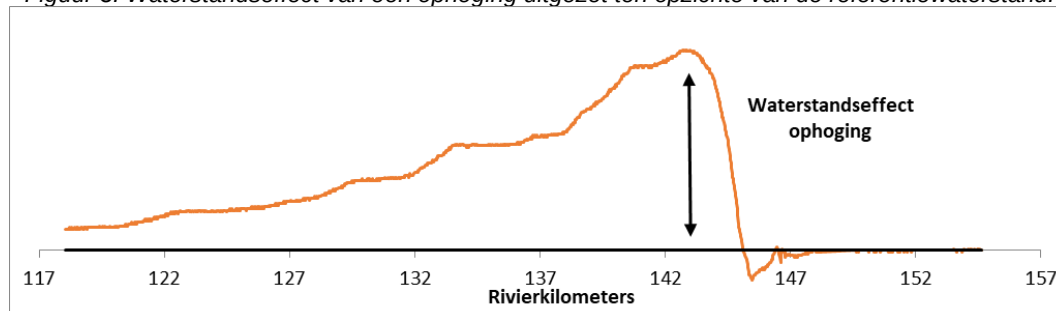
Het aflezen van waterstandseffecten op de as van de rivier is een gebruikelijke en inzichtelijke manier om het effect van een ingreep weer te geven. De effecten worden dan weergegeven als een lange dwarsdoorsnede van bovenstrooms naar benedenstrooms. Bij laaglandrivieren als de Rijn en de Maas zijn effecten van ingrepen in stroomvoerend gebied vrijwel nihil in de benedenstroomse richting, maar wel merkbaar in de bovenstroomse richting (Wolters, Platteeuw, & Schoor, 2001). De effecten van een ingreep zijn ruw geschematiseerd in de onderstaande figuren.

Figuur 2: Visualisatie van het waterstandseffect door een vergraving (boven) en het waterstandseffect door natuurontwikkeling of ophogingen (Harke, 2006).



Ingrepen worden in dit onderzoek getest bij maatgevend hoogwater (MHW), hierbij staat de uiterwaard onder water. Het effect van een ingreep wordt dan vergeleken met de originele situatie, de referentie, die met dezelfde afvoer is berekend. Figuur 3 op de volgende pagina geeft het resultaat van een ingreep, in dit geval van een ophogingen, weer. De zwarte x-as in dit figuur is de referentiewaterstand, de oranje lijn het waterstandseffect van de ophoging (waterstand van de ingreep minus de waterstand van de referentie). Rivierkundigen gaan uit van het maximale waterstandseffect bij een ingreep, de piek in het figuur. Dit is de waarde die een vuistregel dient in te schatten.

Figuur 3: Waterstandseffect van een ophoging uitgezet ten opzichte van de referentiewaterstand.



2.2 Vuistregels Rijntakken

De vuistregels dienen indicatieve, praktisch toepasbare formules te zijn voor het inschatten van het maximale MHW-effect van een ingreep. Om tot regels voor de Maas te komen is het eerst van belang de vuistregels van de Rijntakken te behandelen.

Na de hoge waterstanden in de jaren 90 is door verschillende overheden het project Ruimte voor de Rijntakken gestart. Dit project had het opstellen van adviezen over een duurzame, veilige inrichting van het rivierengebied tot doel. Hiervoor zijn ongeveer 130 fictieve plannen met verschillende varianten doorgerekend. Aan de hand van deze berekeningen zijn kengetallen afgeleid over de effectiviteit van uiterwaardvergravingen. Hierbij is uitgegaan van een lineair verband tussen veranderd volume en het MHW-effect. De volgende waarden zijn tot stand gekomen:

Tabel 1: Benodigde uiterwaardverlaging per 0,10 m MHW-verlaging (Wolters, Platteeuw, & Schoor, 2001).

Riviertak	Ontgraving (miljoen m ³)
Bovenrijn	3,5 – 4,0
Waal	3,5 – 4,0
Pannerdens Kanaal	2,0 – 2,5
Nederrijn/ Lek	2,5 – 3,0
IJssel	1,5 – 2,0

Echter, in de bovengenoemde kengetallen is niet alleen sprake geweest van een verlaging, maar ook van een verandering in vegetatie en dus een toename van de hydraulische ruwheid. Hierdoor zijn de vuistregels niet voor afzonderlijke ingrepen geldig. De kengetallen van Tabel 1 bevatten dus impliciet de extra verruiming die gepleegd moet worden om te compenseren voor de toegenomen ruwheid.

Een tweede manier waarop destijds de vuistregels voor de Rijntakken zijn opgesteld, is door de Rijntakken op te delen in verschillende trajecten, gebaseerd op kenmerkende dwarsprofielen en verhang. Met een SOBEK-model met een stationaire afvoer van 16.000 m³/s zijn in de verschillende trajecten vergravingen en/of veranderingen van de hydraulische weerstand gemodelleerd. Met deze vuistregels is het ook mogelijk om de verruiming in te schatten aan de hand grootte van de ingreep in hectare. In Bijlage A zijn deze resultaten behandeld, met daarbij een voorbeeld hoe deze in de praktijk toegepast kunnen worden.

2.2.1 Bevindingen vuistregels Rijntakken

In het rapport “Richtlijn voor inrichting en beheer van uiterwaarden” (Wolters, Platteeuw, & Schoor, 2001) staan een aantal stellingen over het MHW-effect door ingrepen:

1. Waterstandseffecten zijn enkel de functie van het volume van de vergraving, niet van de diepte of vorm van de ingreep.
2. De vorm van de ingreep heeft geen invloed op de waterstandsval.
3. Ingrenen in bergende delen hebben geen effect op de MHW.

Ook wordt benoemd dat ingrepen alleen in het stroomvoerende deel van de uiterwaard zijn uitgevoerd, en niet in stroomluwe gebieden. Het verschil tussen stroomluw en stroomvoerend is echter niet aangeduid. Het rapport beschrijft wel dat stroomvoering op basis van afvoerdichtheid kan worden bepaald.

Verruiming is niet alleen afhankelijk van de oppervlakte, maar ook van de mate van verruiming. In de uitwerking van de vuistregels in bijlage B is de mate van verruiming aangeduid met de Chézy coëfficiënt. Echter, deze coëfficiënt is diepte afhankelijk. Aangezien de berekeningen van “Richtlijnen voor inrichting en beheer van uiterwaarden” (Wolters, Platteeuw, & Schoor, 2001) met 1D-berekeningen zijn gedaan – waar een groot stuk rivier wordt veralgemeend tot een enkele dwarsdoorsnede - in plaats van 2D-berekeningen is het onduidelijk welke precieze mate van verruiming optreedt. Hierdoor zijn de vuistregels erg globaal.

2.3 Stromingsweerstand

De afvoercapaciteit van een uiterwaard hangt af van de weerstand die het water ondervindt. Deze stromingsweerstand bepaald, samen met enkele andere factoren, het water doorvoerend vermogen. De waterafvoer wordt berekend met behulp van de empirische stromingsformule van Chézy (Querner & Makaske, 2012):

$$v = C * R^{\frac{1}{2}} * S^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

Waarin:

v	=	stroomsnelheid (m*s ⁻¹)
C	=	coëfficiënt van Chézy (in m ^{1/2} *s ⁻¹)
R	=	hydraulische straal (natte oppervlakte A gedeeld door natte omtrek P) (m)
S	=	het verhang (-)

Bij een hogere stroomsnelheid verplaatst meer water zich door een kleiner oppervlak, waardoor de waterstand afneemt. Voor de doorstroombaarheid is een hoge stroomsnelheid dus gewenst. Als gevolg hiervan zijn ingrepen effectiever in stroomvoerende gebieden dan in luwere gebieden (Wolters, Platteeuw, & Schoor, 2001).

2.4 Systeemanalyse

Net als de Rijntakken is de Maas ook in te delen in trajecten. Hierin worden de trajecten ingedeeld op basis van geologie en water- en sedimentbeweging. De indeling van de Maas is al voor vele projecten gedaan en komt altijd op dezelfde zes trajecten uit – met hier en daar een grensverschil van een paar kilometer. De indeling die dit onderzoek gebruikt is de indeling van Smart Rivers (Stichting Smart Rivers, 2012).

Tabel 2: Indeling van de Maas in trajecten (Stichting Smart Rivers, 2012)

Rivierkilometers	Traject
0 – 15	Bovenmaas
15 – 52	Grensmaas
52 – 91	Plassenmaas
91 – 166	Zandmaas
166 – 201	Bedijkte Maas
> 201	Getijdenmaas

De Bovenmaas en de Grensmaas zijn lastige trajecten. Hier stroomt het water in stroomversnellingen, ondieptes, grindbanken en soms over brede overstromingsvlakten. De bodem is hier ook hard en erosiebestendig. In deze trajecten fluctueert de waterdiepte en stroomsnelheid te vaak om er eenduidige vuistregels voor op te stellen (Asselman, Barneveld, Klijn, & van Winden, 2017). Deze gebieden worden dus buitengesloten voor de vuistregels.

Het laatste traject van de Maas is de Getijdenmaas. Dit gebied begint vanaf de stuw van Lith. Vanaf hier fluctueren de waterstanden door de werking van het getij. Omdat deze werking niet in de modellen wordt meegenomen wordt dit gebied uitgesloten voor de werking van de vuistregels (Smart Rivers). Een overzicht van alle trajecten en de locaties van stuwen is weergegeven in bijlage C.

2.4.1 Plassenmaas

Vanaf de Plassenmaas is de helling in de rivier vlakker en stroomt deze in grote meanders. In de uiterwaard zijn door grondwinning in het verleden veel plassen ontstaan. In dit traject voegen een aantal beken zich bij de Maas. Het gebied bevat twee stuwen, een bij Linne en een bij Roermond (Asselman, Barneveld, Klijn, & van Winden, 2017).

2.4.2 Zandmaas

De Zandmaas, ook wel eens de Terassenmaas genoemd, stroomt eerst door een vernauwend dal (Peelhorst) en verbreedt zich weer bij Venlo (Venloslenk). Het begin van het gebied is gekenmerkt door hoger gelegen terrassen, vanaf kilometer 140 vervlakt de uiterwaard zich. In het gebied staan twee stuwen, bij Belfeld en Sambeek.

2.4.3 Bedijkte Maas

De naam zegt het al, de Bedijkte Maas is geheel bedijkt. Vanaf Cuijk, rivierkilometer 162, verandert de rivier in laaggelegen overstromingsvlakten. Aan de weerszijden hoog opgeslibde weerden met daarachter oeverwallen en komgronden. Ook in dit gebied bevinden zich twee stuwen, een bij Grave en een bij Lith. In dit gebied zijn de afgelopen jaren verscheidene Maasmeanders heringericht.

2.4.4 Gebiedskeuze

Het meest geschikte riviertraject wordt gebruikt voor het onderzoek. Omdat in dit traject het gros van de ingrepen worden ingericht en berekend, moet er genoeg ruimte zijn om de parameters te testen op verschillende locaties. Het is dan ook van belang dat het gebied zo veelzijdig mogelijk is. Een logische keus hiervoor is de Zandmaas. Hier zijn drie redenen voor:

2. In Ruimtelijk Perspectief Maas wordt de Zandmaas aangewezen als gebied waar tot 2050 de meeste kansen liggen voor ingrepen (Stuurgroep Deltaprogramma Maas, 2016). Om dit gebied als basis te nemen voor de vuistregels wordt ervoor gezorgd dat de vuistregels het beste toegespitst zijn op dit gebied.
3. De Bedijkte Maas en de Plassenmaas zijn beperkt in de beschikbare oppervlakte in de uiterwaard. De Plassenmaas door de hoeveelheid aanwezig plassen, en de Bedijkte Maas door de beschikbare WAQUA-deelmodellen, meer hierover in het volgende hoofdstuk.
4. De Terassenmaas heeft een breed winterbed, met de meeste diversiteit qua inrichting en hoogteverschillen. Hierdoor is het aantal beschikbare locaties voor het onderzoek het meest divers.

3 METHODE

Een vuistregel geeft de relatie weer tussen de kenmerken van de ingreep en het MHW-effect. De belangrijkste parameter bij ophogingen en vergravingen is het volume van de ingreep. De belangrijkste parameters bij ruwheidsveranderingen zijn de oppervlakte en de mate van verruwing. Dit zijn de leidende parameters die het MHW-effect van de ingreep bepalen. Maar naast deze parameters kunnen ook andere parameters van invloed zijn op het waterstandseffect:

- Of de ingreep in een stroomvoerend of stroomluw gebied ligt;
- De oriëntatie van een ingreep ten opzichte van de stroomrichting;
- De verhouding tussen de diepte en de oppervlakte van een ingreep (bij ophogingen en vergravingen);

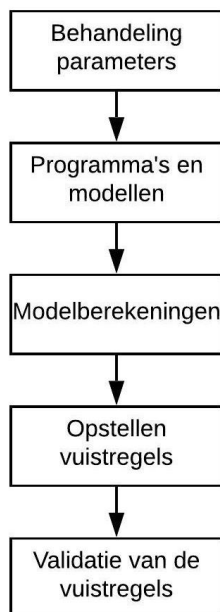
De bovenstaande worden in dit rapport secundaire parameters genoemd. In deze studie wordt onderzocht welke van deze parameters meegenomen moeten worden in de vuistregels om betrouwbare vuistregels af te leiden. Het doel is om een vuistregel op te stellen die er als volgt uit ziet:

$$\text{Vuistregel} = \text{Leidende parameter} \times \text{secundaire parameter (1)} \times \text{secundaire parameter (2) etc.}$$

Het is onduidelijk hoe de parameters het MHW-effect beïnvloeden en in welke mate. Dit wordt in het onderzoek onderzocht in een kwantitatieve, toegepaste wijze. Door antwoord te geven op de deelvraag “*In welke manier zijn de waterstandeffecten per soort ingreep te herleiden tot vuistregels?*” behandelt het hoofdstuk Methode de manier waarop het onderzoek is uitgevoerd.

In Figuur 4 hieronder is een overzicht van de methode weergegeven. Eerst worden de parameters behandeld en de methode waarop ze onderzocht worden. Hierna volgt een behandeling van de programma's en modellen die zijn gebruikt in het onderzoek, en hoe de berekeningen zijn uitgevoerd. Vervolgens wordt beschreven hoe de vuistregels worden opgesteld. Tot slot wordt de validatie van de vuistregels behandeld.

Figuur 4: Flowchart voor de methode van het opstellen van de vuistregels



3.1 Parameters

In de volgende subparagrafen worden de methodes behandeld, waarmee de invloed van de parameters op het MHW-effect worden onderzocht. Bij het Chézy verschil en de afvoerdichtheid wordt de theorie kort toegelicht.

Het doel van de ingrepen is het aantonen van verbanden. Voor de leidende parameters wordt uitgegaan van een lineair verband uit de oorsprong. Bij de secundaire parameters is dit niet het geval, hierbij voldoet elk verband.

3.1.1 Leidende parameter

De leidende parameter vormt de basis van de vuistregel. Bij vergravingen of ophogingen is dit het volume van de ingreep. De diepte van een ingreep is erg belangrijk bij een vergraving of ophoging, maar voor het gebruikersgemak van de vuistregels is het volume verschil een handzamere parameter. De invloed van het volume verschil op het MHW-effect wordt op twee manieren getest:

- Manier 1 is door drie ingrepen te modelleren op dezelfde locatie, van identieke vorm, met dezelfde oriëntatie, hetzelfde talud en dezelfde diepte, maar vergroot met de editor-tool van ArcMap. Hierbij verandert het volume door een groter worden oppervlakte.
- Manier 2 om dit te onderzoeken is door de invloed van diepte op het MHW-effect te onderzoeken. Hiermee wordt in het onderzoek getracht aan te tonen dat het veranderend volume ook nog een geschikte parameter is bij een veranderde diepte.

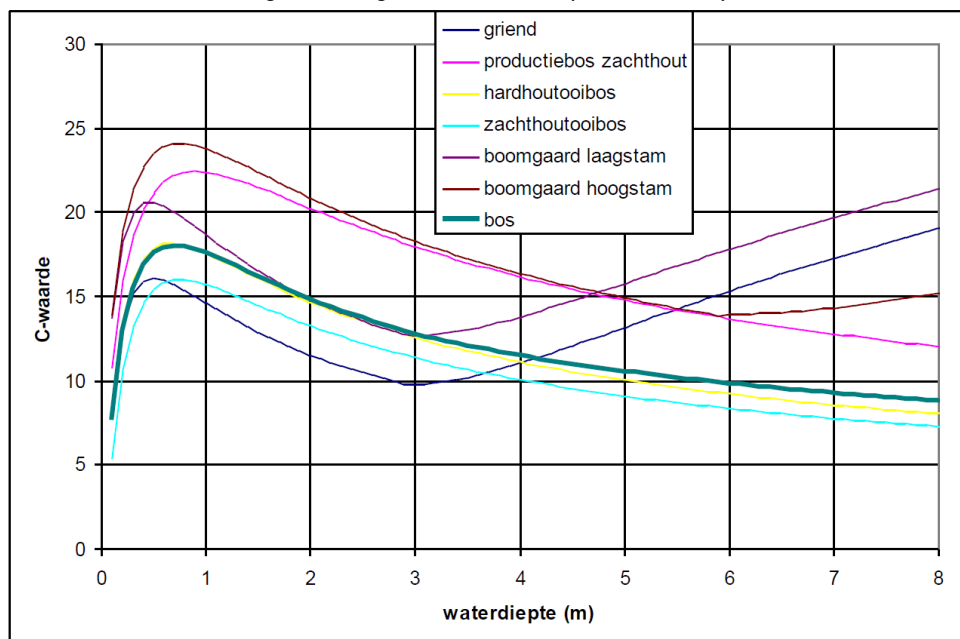
Bij verruwing is de leidende parameter de oppervlakte, uitgedrukt in hectare. Deze wordt getest door drie ingrepen te modelleren op dezelfde locatie, van identieke vorm, met dezelfde oriëntatie, maar vergroot met de editor-tool van ArcMap.

3.1.2 Chézy verandering

De hoeveelheid weerstand die water ondervindt wordt uitgedrukt in Chézy ($m^{1/2}/s$). De weerstand wordt door twee dingen bepaald: de soort vegetatie en de waterdiepte. Omdat in de uiterwaard tientallen soorten vegetatiegroepen bestaan is gebruik wordt in dit onderzoek gebruik gemaakt van de vegetatielegger. Er zijn 4 vegetatieklassen, van elkaar onderscheiden door de mate van ruwheid. Van glad naar ruw gaat het om de volgende klassen (van glad naar ruw): gras en akker, riet en ruigte, bos en struweel (Rijkswaterstaat, 2014).

Hoe de ruwheid afhangt van de diepte is uitgebeeld in onderstaand Figuur 5. In dit figuur wordt de vegetatieklasse bos uitgebeeld, met de vegetaties waaruit deze is opgebouwd. Een hoge Chézy waarde staat voor weinig weerstand. Bij een waterdiepte van 0,7 m ondervindt het water dus het minst weerstand door de vegetatie.

Figuur 5: Vegetatieklasse bos (Arcadis, 2015).



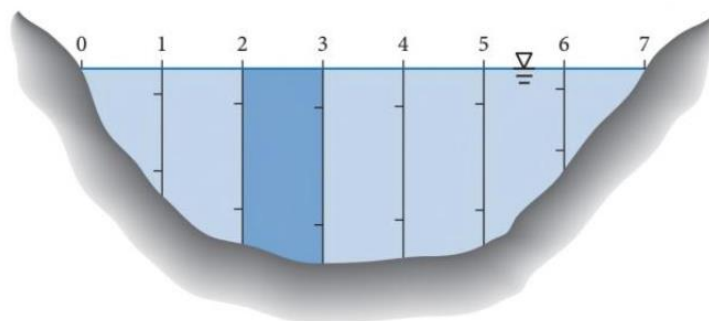
De vegetatieklasse bos en de andere drie vegetatieklassen zijn te vinden in Bijlage B. In deze bijlage is ook het verschil van ruwheid tussen de verschillende klassen, per waterdiepte weergegeven in een tabel.

De mate van verruwing is eigenlijk ook een leidende parameter. Maar door gebruik te maken van het Chézy verschil wordt een eenheid gebruikt die niet diepte of klasse gebonden is. Door op dezelfde locatie (en dus afvoerdichtheid), oriëntatie ten opzichte van de stroomrichting en grootte met een andere vegetatielegger een berekening te draaien, kan het MHW-effect per Chézy verschil worden berekend. Met deze aanpak wordt het Chézy verschil gereduceerd tot een secundaire parameter, in plaats van een leidende.

3.1.3 Afvoerdichtheid

Omdat de snelheid van water hoger is bij de oppervlakte dan bij de bodem – waar het meer weerstand van de vegetatie ondervindt – is het beter om te spreken in afvoerdichtheid. De afvoerdichtheid is de gemiddelde stroomsnelheid maal de diepte. Hiermee wordt de stroomvoering uitgedrukt in m³/s per kolom water, zoals is uitgebeeld in Figuur 6.

Figuur 6: Afvoerdichtheid afgebeeld in een doorsnede van een rivier (Hendriks, 2010).



Met de referentieberekening is de afvoerdichtheid van de Maas inzichtelijk gemaakt, zie Bijlage E. Hiermee worden verschillende locaties gezocht waar de ingrepen worden gemodelleerd. Met de editor-tool van ArcMap kan een shapefile worden verplaatst waardoor de vorm en grootte hetzelfde blijven. Door deze shapefile te schuiven naar locaties met verschillende afvoerdichtheden en de ingrepen met hetzelfde talud, diepte en oriëntatie ten opzichte van de stroomrichting te modelleren is het effect van de afvoerdichtheid op de MHW af te leiden.

3.1.4 Oriëntatie

De aanpak van dit deel van het onderzoek is een ruwe benadering. Echter, omdat dit onderzoek ruwe vuistregels betreft is dat niet van belang. De editor-tool van ArcMap wordt gebruikt om een shapefile te 'draaien'. De ingreep wordt haaks, schuin en parallel op de stromingsrichting gedraaid om het effect van de vorm te ontdekken. Net als bij de grootte dient hierbij wel een verandering van de afvoerdichtheid te worden meegenomen.

3.2 Programma's en modellen

In het onderzoek wordt gebruik gemaakt van de volgende programma's:

- ArcMap 10.5.1, deze versie wordt gebruikt omdat Baseline niet werkt met de nieuwere ArcMap versies.
- Baseline 5.3.3, een ArcGIS-applicatie waarmee ruimtelijke modelschematisaties kunnen worden gemaakt voor bijvoorbeeld WAQUA of SOBEK. Hiermee kunnen ingrepen via ArcMap worden ontworpen en omgezet.
- WAQUA, een onderdeel van het SIMONA 2017 pakket. Hiermee kunnen waterstanden en waterstromingen tweedimensionaal (2D) in open wateren worden berekend.
- GETDATA, een applicatie waarmee SIMONA-waterstanden gelezen kan worden.
- WAQVIEW, een applicatie waarmee SIMONA-resultaten inzichtelijk worden gemaakt.

De modellen waarvan gebruik is gemaakt zijn aangeleverd door Deltares. De Baseline-schematisatie waarvan gebruikt is gemaakt is 'Maas-beno17_5-v1'.

Omdat 2D berekeningen zware berekeningen zijn, wordt gebruik gemaakt van deelmodellen om berekeningen sneller te draaien. Echter, de indeling van deze deeltrajecten is anders dan de indeling van de systeemanalyse in paragraaf 2.4. In de onderstaande tabel is een indeling gemaakt van geschikte deelmodellen voor de trajecten.

Tabel 3: Indeling trajecten in WAQUA-deelmodellen

Traject	Rivierkilometers	WAQUA-deelmodel
Zandmaas	91 – 166	Beno17_5_20m_km118_155-v1
Bedijkte Maas	166 – 201	Beno17_5_20m_km135_188-v1

De studie maakt dus gebruik gemaakt van een WAQUA-deelmodel van rivierkilometers 118 tot 155.

De berekeningen worden gedraaid met een stationaire afvoergolf van 4118 m³/s. Vanwege de aard van het onderzoek (theoretisch) volstaat het om de berekeningen met een stationaire afvoergolf te draaien in plaats van een dynamische afvoer (Rijkswaterstaat, 2017).

3.3 Modelberekeningen

In het hoofdstuk modelberekeningen wordt antwoord gegeven op de deelvraag "Op welke mate beïnvloeden de parameters van de ingrepen de maatgevende hoogwaterstand?". Op basis van de bevinden van "Richtlijnen voor inrichting en beheer van uiterwaarden" (Wolters, Platteeuw, & Schoor, 2001) wordt gezocht naar het verband tussen het MHW-effect en de volgende parameters:

1. Diepte en/of grootte van de ingrepen (diepte bij vergravingen en ophogingen);
2. Chézy verandering (bij verruwing);
3. Afvoerdichtheid;
4. Oriëntatie ten opzichte van de stroomrichting.

Door gerichte ingrepen tracht het onderzoek de relatie tussen de veranderde parameter en het MHW-effect te analyseren. Het ontwerpen van de ingrepen wordt gedaan met Baseline. Baseline hanteert de termen variant en maatregel. Een variant is een model, hiermee worden berekeningen gedraaid. Een maatregel is de Baseline term voor een ingreep.

Baseline werkt met een soort van knip en plak systeem. Binnen de omtrek van een maatregel wordt de data van de variant verwijderd, en de data van de maatregel erin geplakt. Een variant kan dus ook bestaan uit meerdere maatregelen.

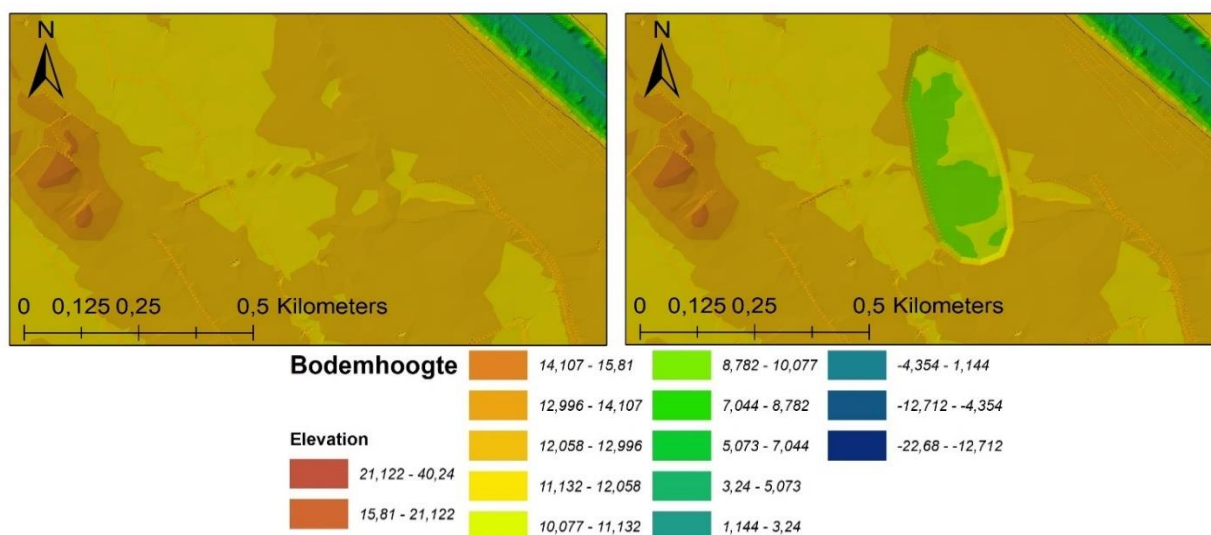
Voor het kiezen van een locatie voor een ingreep zijn een aantal bestanden van belang:

- Het hoogtemodel, met de bodemhoogte in +NAP.
- Ecotopen ruwheid, ecotopentypes in de uiterwaard. Alle verruwing wordt gemodelleerd vanuit grasland (ruwheidscode 1981).
- Afvoerdichtheid, opgesteld met de berekening van de referentievariant.
- Overlaten, scherpe hoogteverschillen.
- Ruwheidselementen lanen, bomen, heggen en hoogwatervrije vlakken.

Overlaten en ruwheidselementen zijn storende factoren in de ingrepen. Een enkele boom is niet significant maar overlaten, heggen en hoogwatervrije zones worden vermeden bij het kiezen van de locatie van een ingreep. Een uitgebreide uitleg en visualisatie van de bovenstaande bestanden is gedaan in Bijlage D.

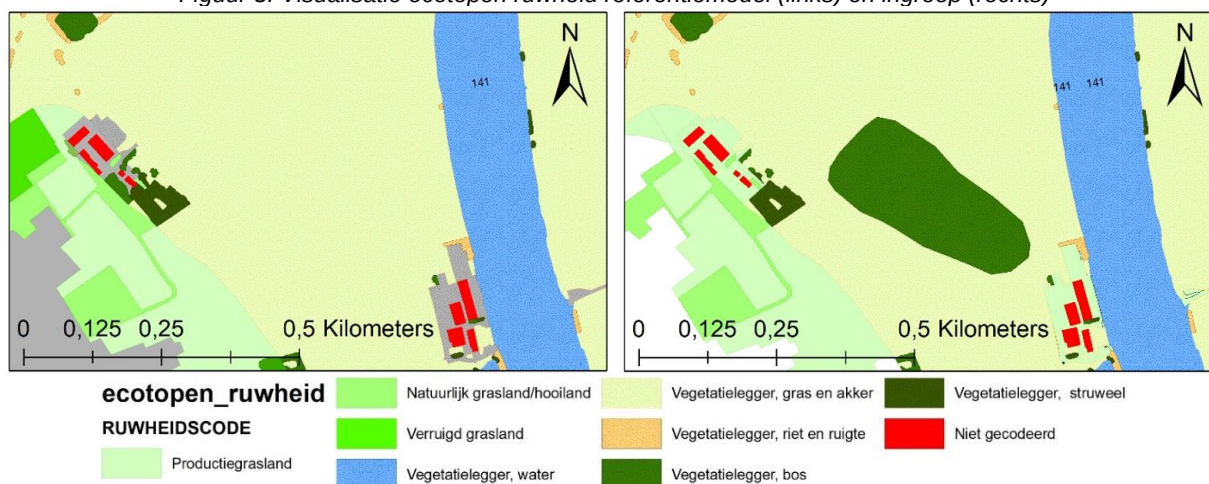
Vergravingen en ophogingen worden ten opzichte van de referentiehoogte gemodelleerd, met een talud van 1:7. Hoe een locatie eruitziet voor en na een ingreep is te zien in de onderstaande figuren. Figuur 7 toont het hoogtemodel van een referentievariant en een vergraving op dezelfde locatie.

Figuur 7: Visualisatie bodemhoogte referentiemodel (links) en ingreep (rechts)



Verruwingen worden enkel gedaan vanuit grasland, niet vanuit andere ecotopen. In Figuur 8 is een verruwing naar bos gevisualiseerd.

Figuur 8: Visualisatie ecotopen ruwheid referentiemodel (links) en ingreep (rechts)



Na de assimilatie van een maatregel in een variant wordt het hoogtemodel opnieuw aangemaakt of de ruwheidseenheden opnieuw opgebouwd met Baseline. Hierna wordt conversie naar WAQUA gestart. Hiermee zijn nieuwe bodem of ruwheidsbestanden gemaakt. In de siminp-bestand (het databestand van de WAQUA-variant) moet naar de nieuwe bodem of ruwheidsbestanden worden verwezen. Hierna kan de WAQUA-variant worden gedraaid.

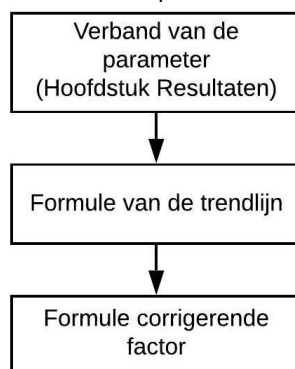
Wanneer de berekening voltooid is wordt de data geanalyseerd met WAQVIEW om te kijken of de berekening naar voldoening is gedraaid en of er geen fouten zijn gemaakt. Met GETDATA worden de resultaten van het WAQUA SDS-bestand (de resultaten van een berekening) omgezet naar 1-dimensionale waterstanden over de as van de rivier en met Excel nabewerkt. Het resultaat hiervan is zoals te zien in Figuur 3 in paragraaf 2.1.

In het hoofdstuk Resultaten worden resultaten van de berekening behandeld en de waterstanden geïnterpreteerd. Ook wordt gezocht naar verbanden. Om het verband tussen de veranderende parameter en het MHW-effect te ontdekken zijn tenminste drie ingrepen nodig. Alle parameters worden dus getest door middel van tenminste drie ingrepen. Het verband wordt getoond door middel van een trendlijn die uit de oorsprong (x en y 0,0) ontstaat. Over deze trendlijn wordt de correlatie tussen het MHW-effect en de variabele verklaard met de R-coëfficiënt. Bij een R-waarde van 0 bestaat er geen verband, bij een waarde van -1 of +1 een perfect verband.

3.4 Opstellen vuistregels

In het hoofdstuk Vuistregels worden de vuistregels opgesteld. De leidende parameters vormen de basis van de uiteindelijke vuistregel. In het hoofdstuk Resultaten zijn verbanden gevonden waarmee trendlijnen zijn opgesteld. Uit de trendlijnen is het mogelijk een formule af te leiden. Met deze formule kan het MHW-effect bij een waarde van de secundaire parameter worden berekend.

Figuur 9: Stroomschema voor het opstellen van de corrigerende factor



Omdat de studie naar de leidende parameter op dezelfde locatie gebeurt, zijn de resultaten van de leidende parameter verkregen bij een onveranderde oriëntatie ten opzichte van de stroomrichting, en een gemiddelde afvoerdichtheid. Op deze methode is het mogelijk om een formule op te stellen om de leidende parameter te corrigeren bij verschillende secundaire parameters. Een fictief voorbeeld hiervan is opgesteld in de onderstaande tabel en uitgewerkt in de daaropvolgende tekst.

Tabel 4: Voorbeeldtabel voor de uitleg van corrigerende parameter (in dit geval afvoerdichtheid)

Afvoerdichtheid	MHW-effect	Corrigerende factor
Gemiddelde afvoerdichtheid van de leidende parameter	50	1
2	60	$60 / 50 = 1,2$
1	30	$30 / 60 = 0,5$

De relatie tussen de leidende parameters en het MHW-effect is opgesteld met (ongeveer) dezelfde, gemiddelde waarde van afvoerdichtheid. Door deze waarde in te vullen in de formule van de trendlijn volgt dat het MHW-effect 50 mm is. Bij een afvoerdichtheid van 2 m³/s is het MHW-effect 60 mm.

Een afvoerdichtheid van 2 m³/s heeft dus een 1,2 keer zo groot MHW-effect. De corrigerende factor die hieruit volgt is 1,2. Door de berekende corrigerende factoren te plotten tegen de afvoerdichtheid valt opnieuw een trendlijn met functie af te leiden. Deze functie kan volgens definitief in de vuistregel worden opgenomen.

Hierbij wordt de leidende parameter de basis van een ingreep, en komen de corrigerende factoren erna, die het MHW-effect corrigeren bij een veranderende secundaire parameter. De vuistregel komt er dus als volgt uit te zien:

Vuistregel = Leidende parameter x Corrigerende parameter (1) x Corrigerende parameter (2) etc.

3.5 Validatie

Na het opstellen van de vuistregels worden deze op drie verschillende manieren getest:

1. Het met de vuistregel berekenen van de eerder gemodelleerde ingrepen. Hiermee kan worden ontdekt in hoeverre de corrigerende parameters werken.
2. De vergelijking van ingrepen in een ander deeltraject van de Maas.
3. Nieuwe ingrepen in het onderzoeksgebied.

4 RESULTATEN

Dit hoofdstuk behandelt de resultaten van de ingrepen in het WAQUA-deelmodel 118-155. Hierin wordt ook antwoord gegeven op de deelvraag 'In welke mate beïnvloeden de parameters van de ingrepen de maatgevend hoogwaterstand??'.

Alle ingrepen hebben een code toegewezen. Deze werkt op de volgende manier:

- De eerste letter staat voor het traject, de Zandmaas.
- De tweede letter staat voor de parameter die getoetst wordt. Dit zijn: Q (afvoerdichtheid), V (oriëntatie), G (grootte) en D (diepte).
- De derde letter staat voor de soort ingreep. Dit zijn: A (vergraving), O (ophoging), RS (verruwing naar bos), RZ (verruwing naar struweel) en RX (verruwing naar riet en ruigte).
- De laatste letters staat voor de versie ingreep.

Een uitgebreide, overzichtelijkere behandeling van de codering is te vinden in Bijlage F. Vergravingen en ophogingen zijn op dezelfde locaties en op dezelfde manier gemodelleerd. Zo is de ingreep P_Q_A_a1 van dezelfde grootte, diepte en locatie als de ingreep P_Q_O_a1. Alleen dan een vergraving, in plaats van een ophoging. Om deze reden is gekozen in dit hoofdstuk de locaties van deze ingrepen maar een keer te tonen. Paragraaf 4.1 toont de locaties van deze ingrepen, paragraaf 4.2 niet.

Voor de leesbaarheid van het hoofdstuk worden alleen de resultaten behandeld, de overige eigenschappen van de ingrepen zijn te vinden in Bijlagen H, I en J. Het hoofdstuk behandelt de verschillende soorten ingrepen per paragraaf. Enkel afwijkende resultaten worden specifiek behandeld, anders wordt er alleen gezocht naar een verband. Deze verbanden worden opgesteld met een trendlijn. Uit deze trendlijn kan een formule worden opgesteld. De verbanden van de secundaire parameters zijn van belang voor het opstellen van de vuistregels, maar wordt in het hoofdstuk Resultaten niet behandeld. Echter, de formules van de verbanden voor de leidende parameters worden wel genoemd, omdat niet hoeven te worden aangepast en op zich al voldoen.

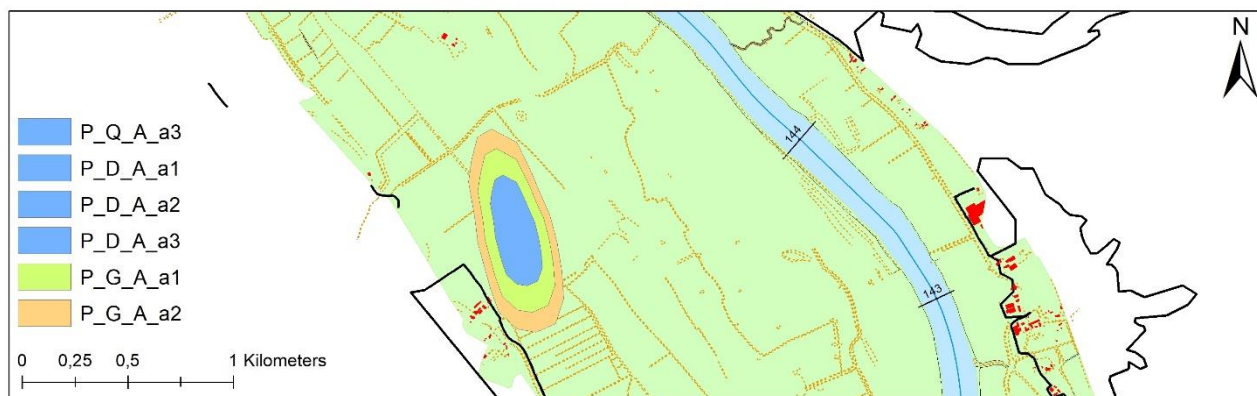
4.1 Vergravingen

De resultaten van de leidende parameter worden eerst gepresenteerd. Hierna volgen de secundaire parameters.

4.1.1 Leidende parameter

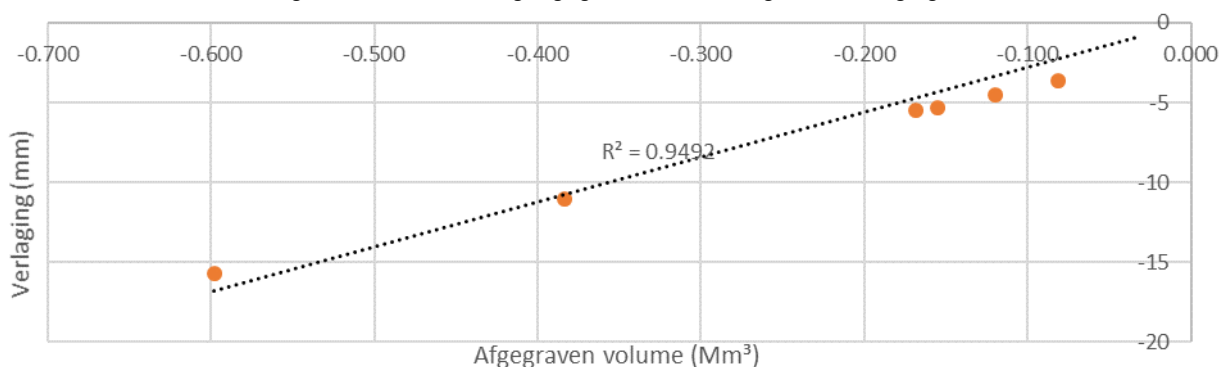
Zoals benoemd in de paragraaf 3.1 wordt in de leidende parameter gezocht naar een lineair verband uit de oorsprong. De leidende parameter voor vergravingen is het vergraven volume in mega kuub (Mm³). Om het verband tussen het afgegraven volume en het MHW-effect te ontdekken zijn zes ingrepen geschikt. Deze zijn te zien in het onderstaande figuur.

Figuur 10: Ligging van vergravingen en ophogingen voor de leidende parameter.



De vier blauw gekleurde ingrepen hebben een gelijk oppervlakte, maar een verschillende diepte, waardoor de ingrepen een verschillend vergraven volume hebben. De gemiddelde afvoerdichtheid van de vier ingrepen is 1,73 m³/s. In Figuur 11 is de verlaging (in mm) tegen het vergraven volume (in Mm³) uitgezet.

Figuur 11: Uiteenzetting afgegraven volume tegen de verlaging.



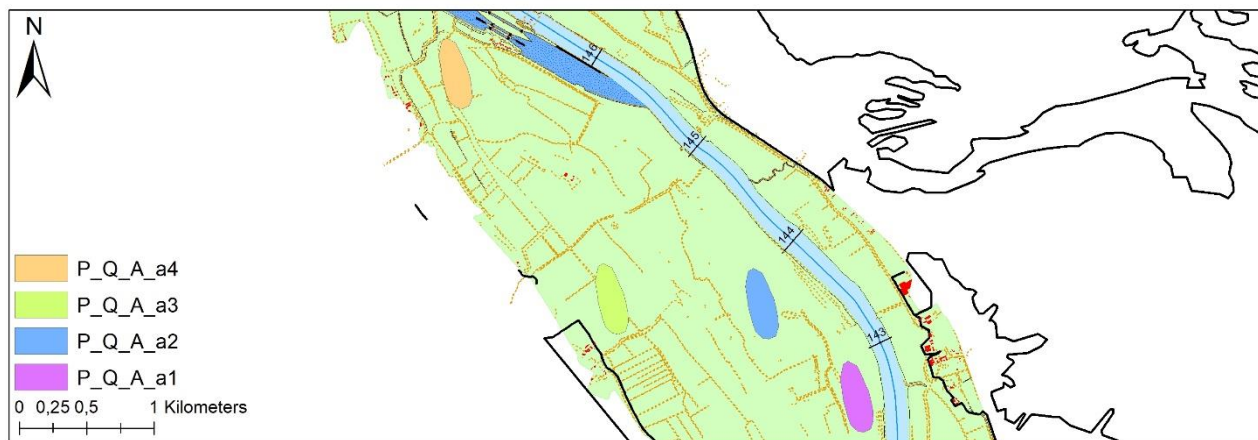
De correlatie tussen het vergraven volume en het MHW-effect is 0,95. Een erg goed verband voor het opstellen van een vuistregel. Met de trendlijn van de grafiek is het MHW-effect van een vergraving in te schatten. Uit deze trendlijn komt de volgende formule voor de leidende parameter voort:

$$\text{Trendlijn leidende parameter} = 27,996 * Mm^3 \quad (2)$$

4.1.2 Afvoerdichtheid

De invloed van afvoerdichtheid op het MHW-effect is berekend door het schuiven van de ingrepen naar andere locaties. Het vergraven volume in al deze ingrepen is 0,169 Mm³. De locaties van de ingrepen zijn hieronder te zien.

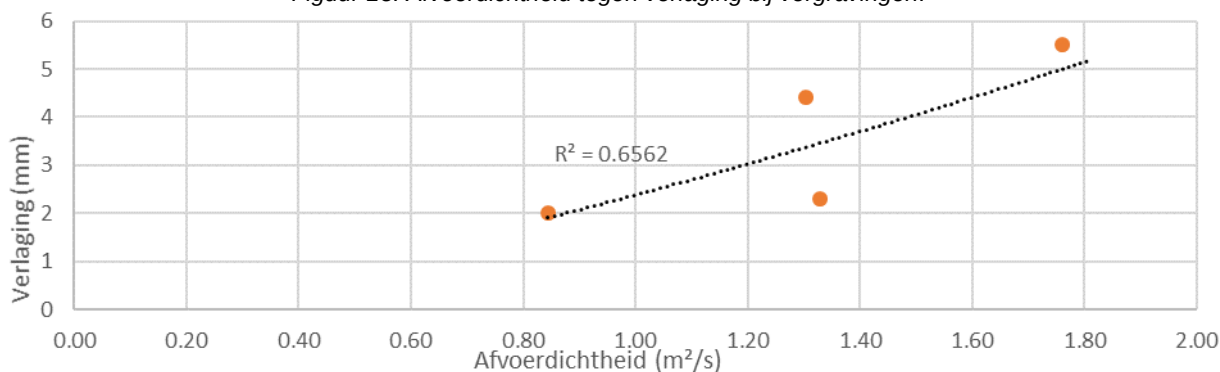
Figuur 12: Ligging van vergravingen en ophogingen voor de parameter afvoerdichtheid.



Een machtstrendlijn lijkt de beste fit om een correlatie met het MHW-effect aan te tonen. Omdat hoge afvoerdichtheden een grotere snelheid en dus voor relatief meer verlaging zorgen, is dit een logisch verband. Omdat met Excel geen machtsverbanden kunnen worden opgesteld met negatieve waarden, zijn deze waarden voor de figuren positief gemaakt door een vermenigvuldiging met -1.

De resultaten van de ingrepen zijn geplot in Figuur 13. Hieruit is af te leiden dat P_Q_A_a1 een aanzienlijker groter verlagend effect heeft dan P_Q_A_a4.

Figuur 13: Afvoerdichtheid tegen verlaging bij vergravingen.



Tabel 5: Waarden van ingrepen a1 en a4 bij vergravingen afvoerdichtheid

Code	q referentie (m³/s)	Diepte (m)	Vershil inhoud (Mm³)	Verlaging (mm)
P_Q_A_a1	1.30	2.2	-0.169	-38.7
P_Q_A_a4	1.33	2.2	-0.169	-27.7

Voor dit verschil zijn een tweetal verklaringen:

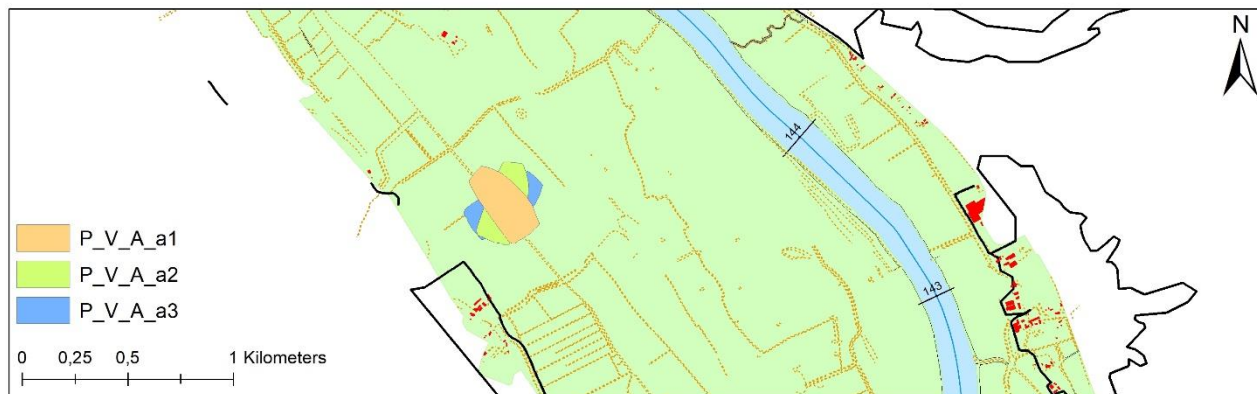
- Met WAQVIEW is te zien dat de bodemhoogte bij a4 initieel al lager is dan bij a1. Hierdoor neemt de waterdiepte bij a1 relatief meer toe dan bij a4. De afvoerdichtheid is in grote mate afhankelijk van de ruwheid die het water ondervindt. De weerstand is diepte afhankelijk, zoals beschreven in paragraaf 3.1.2. Omdat de waterdiepte bij a1 relatief meer toeneemt dan bij a4, ontstaat na de ingreep een kleinere toename in afvoerdichtheid bij a4 dan bij a1. Hierdoor is het effect van de verlaging bij a4 minder.
- De locatie van ingreep a1 is gunstiger dan de locatie van ingreep a4. Beide locaties liggen in een binnenbocht van de rivier, maar a1 ligt aan het begin hiervan en a4 aan het einde. Doordat de ingreep van a1 dichterbij de waterloop ligt wordt een grotere invloed op de waterbeweging uitgeoefend.

Ondanks de afwijking van ingreep P_Q_A_a4 is er een goed verband. En bij een kleine aanpassing waarbij a4 niet wordt meegenomen in de R-berekening wordt de correlatie zelfs 0,9815 – al wordt dit verband niet gebruikt.

4.1.3 Oriëntatie

De invloed van oriëntatie ten opzichte van de stroomrichting wordt onderzocht door het draaien van de ingreep.

Figuur 14: Ligging van vergravingen en ophogingen voor de parameter oriëntatie.



Door het draaien van de ingrepen verschilt de ook de afvoerdichtheid. Afhankelijk van de ligging in het winterbed neemt deze af, een haakse ingreep heeft een lagere afvoerdichtheid dan een parallel gelegen ingreep.

Tabel 6: Waarden van ingrepen a1, 2 en 3 bij vergravingen oriëntatie.

Code	q referentie (m³/s)	Oriëntatie	Verlaging (mm)
P_V_A_a1	1.786	Parallel	-3,6
P_V_A_a2	1.711	Schuin	-2,8
P_V_A_a3	1.696	Haaks	-2,5

Ondanks de afname van afvoerdichtheid is er een duidelijk verschil te observeren in de verlaging. Hieruit valt te concluderen dat een ingreep die ovaal van vorm is, 1,5 keer zo veel verlaging veroorzaakt als deze parallel ligt, dan als deze haaks ligt.

4.2 Ophogingen

Ophogingen hebben ruwweg een 2 tot 4 keer zo groot verhogend effect op de MHW dan vergravingen een verlagend effect hebben. Ter illustratie:

Tabel 7: Het verschil tussen een vergraving en ophoging.

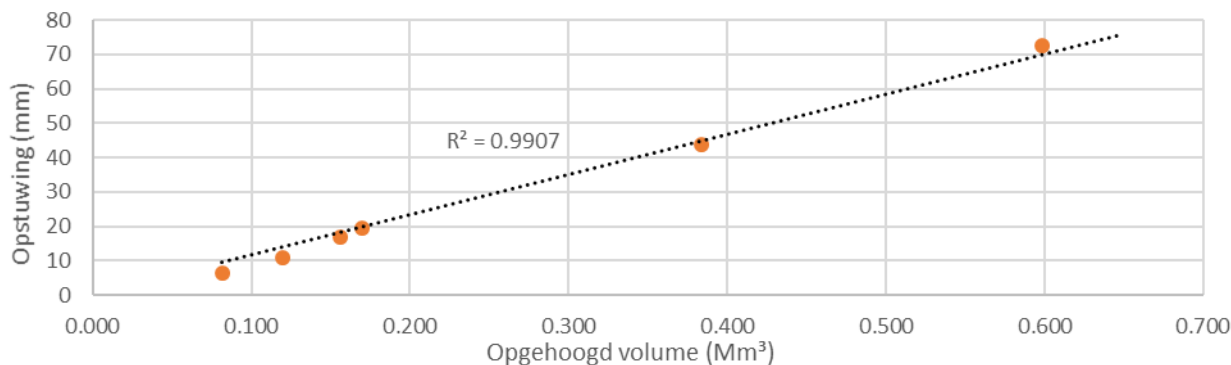
Code	q referentie (m³/s)	Diepte (m)	Verschil inhoud (Mm³)	Verlaging (mm)
P_Q_A_a1	1.30	2.2	-0.169	-38.7
P_Q_O_a1	1.30	2.2	-0.169	-87.9

De locaties van de ophogingen zijn hetzelfde als locaties van de vergravingen, enkel de letter A dient te worden veranderd naar O. Zie figuren 10, 12 en 14 voor de locaties.

4.2.1 Leidende parameter

Net als de vergravingen hebben de eerste vier ophogingen in Figuur 15 een gelijk oppervlakte, maar een verschillende diepte, waardoor de ingrepen een verschillend opgehoogd volume hebben. De gemiddelde afvoerdichtheid van de vier ingrepen is 1,73 m³/s. De correlatie tussen opgehoogd volume en opstuwing is erg sterk. Er zijn geen afwijkende resultaten die dienen te worden behandeld.

Figuur 15: Uiteenzetting opgehoogd volume tegen de opstuwing.



Uit de trendlijn van het figuur is de volgende formule voor de leidende parameter opgesteld:

$$\text{Trendlijn leidende parameter} = 117,06 * Mm^3 \quad (3)$$

4.2.2 Afvoerdichtheid

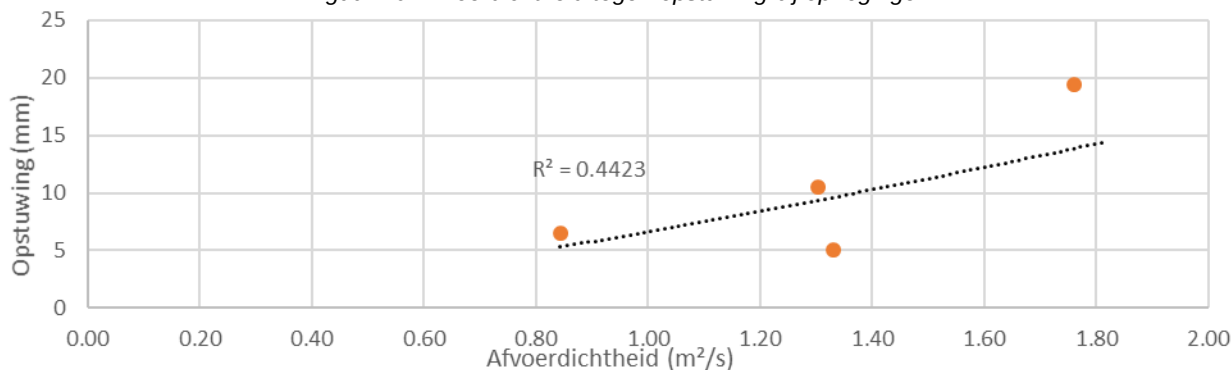
In subparagraaf 4.1.2. was geobserveerd dat de locaties a4 en a1 ondanks soortgelijke waarden tot andere MHW-effecten leidden. Aangezien P_Q_O_a4 en P_Q_O_a1 op dezelfde locatie liggen, geldt hetzelfde voor de ophogingen als de vergravingen.

Tabel 8: Waarden van ingrepen a1, 2 en 3 bij ophogingen afvoerdichtheid.

Code	q referentie (m ³ /s)	Diepte (m)	Verschil inhoud (Mm ³)	Opstuwing (mm)
P_Q_O_a1	1.30	2.2	0.169	10.5
P_Q_O_a4	1.33	2.2	0.169	5.0

Kijkend naar deze resultaten lijkt de tweede verklaring die bij 4.1.2 is gegeven aannemelijker. Bij een ophoging van 2,2 m wordt de maaiveldhoogte bij a4 (die lager ligt dan a1) 13,5 m +NAP. Rondom gelegen gebieden met deze hoogte (13,5 m +NAP) hebben een afvoerdichtheid van < 0,4 m³/s, wat erg stroomluw is. Beide gebieden worden dus stroomluw, waterbergend in plaats van voerend. Toch heeft a1 een groter MHW-effect dan a4. Doordat de ingreep van a1 dicht bij het zomerbed ligt wordt een grotere invloed op de waterbeweging uitgeoefend. Hieruit kan worden geconcludeerd dat de afstand tot de waterloop zorgt voor de demping in opstuwing bij P_Q_O_a4 en de verlaging bij P_Q_A_a4.

Figuur 16: Afvoerdichtheid tegen opstuwing bij ophogingen.



Een R-correlatie van 0,442 is niet een goede correlatie, al wordt deze met uitsluiting van ingreep P_Q_O_a4 0,969. Om deze reden wordt het wel als een verband beschouwd. Daarnaast geeft de trendlijn bij ophoging hetzelfde als bij de vergravingen aan; een verdubbeling van de afvoerdichtheid resulteert in een bijna 3 keer zo sterk MHW-effect.

4.2.3 Oriëntatie

Figuur 17: Waarden van ingrepen a1, 2 en 3 bij ophogingen oriëntatie.

Code	q referentie (m³/s)	Oriëntatie	Verlaging (mm)
P_V_O_a1	1.79	Parallel	-7.7
P_V_O_a2	1.71	Schuin	-11.5
P_V_O_a3	1.70	Haaks	-12.4

De afvoerdichtheid van de drie ingrepen verschilt. Afhankelijk van de ligging in het winterbed neemt deze af. Ondanks deze afname is er een duidelijk verschil te observeren in de verlaging. Hieruit valt te concluderen dat een ingreep die ovaal van vorm is, 1,5 keer zo veel negatief MHW-effect veroorzaakt als deze parallel ligt dan als deze haaks ligt. Hetzelfde effect dat de oriëntatie ten opzichte van de stroomrichting op een vergraving heeft.

4.3 Verruwing

Verruwing heeft naast oriëntatie en afvoerdichtheid, nog een parameter: het Chézy verschil. Omdat vuistregels een veralgemening van de werkelijkheid zijn, wordt de vuistregel per toegevoegde parameter onnauwkeuriger. Er komt namelijk een extra veralgemening overheen. Daarnaast is het Chézy verschil ook nog diepte gebonden. Voor het inschatten van de gemiddelde waterdiepte, komt in de praktijk dus ook nog eens een veralgemening van het Chézy verschil overheen.

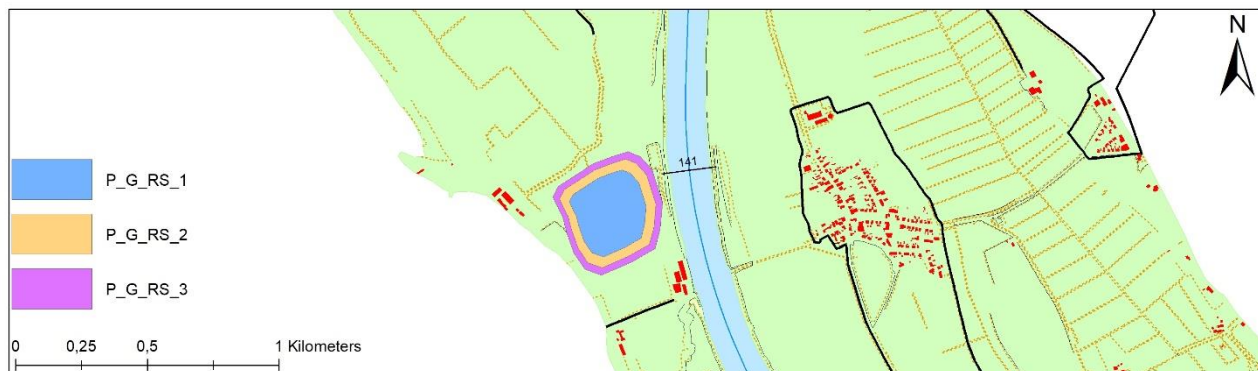
4.3.1 Leidende parameter

Voor verruwing zijn vier ingreeplocaties. Per ingreeplocatie zijn verschillende verruwingen uitgevoerd:

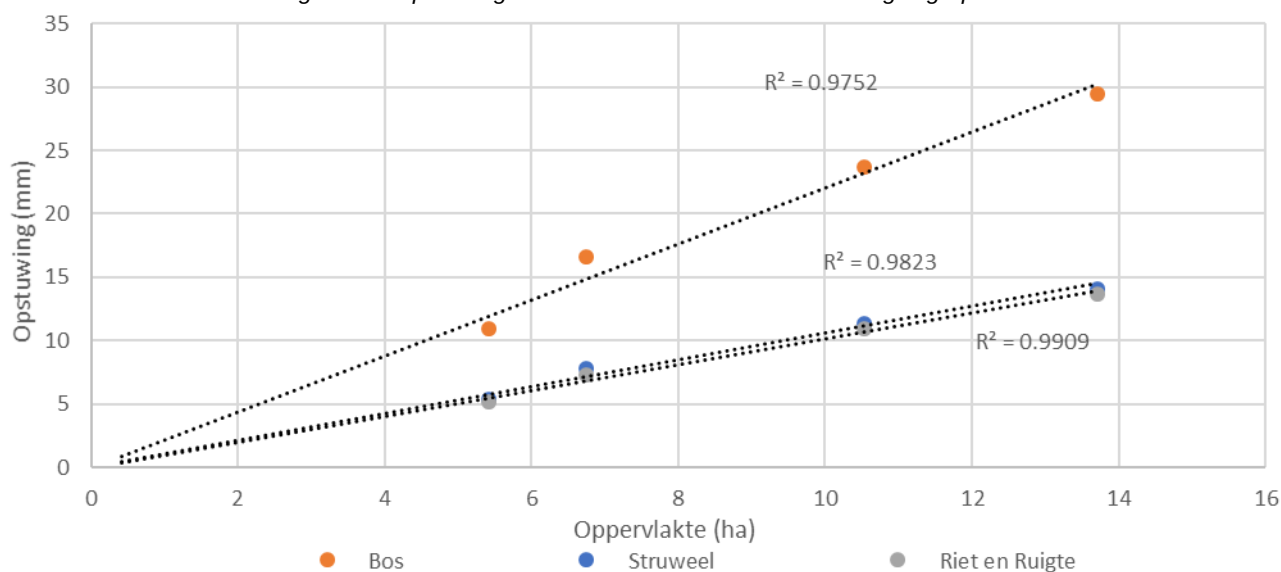
- Van gras naar riet en ruigte;
- Van gras naar bos;
- Van gras naar struweel.

De leidende parameter voor verruwing is de oppervlakte in hectare. Omdat het de leidende parameter is wordt gezocht naar een lineair verband uit de oorsprong. Om hiertoe te komen zijn negen ingrepen uitgevoerd, te zien in onderstaand Figuur 19. De gemiddelde afvoerdichtheid van de ingrepen is 1,25 m³/s.

Figuur 18: Ligging van verruwendende ingrepen voor de leidende parameter.



Figuur 19: Opstuwing van verschillende soorten verzuivingsingrepen



Voor alle drie de soorten verzuiving bestaan vrijwel perfecte verbanden tussen het MHW-effect en de opstuwing. Opvallend is dat verzuiving naar bos en verzuiving naar riet en ruigte soortgelijke resultaten geven. Dit komt omdat de waterstand op deze locatie rond de 2,4 m hoog is. Bij deze waterdiepte is het Chézy verschil tussen de ingrepen namelijk erg klein ($19 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ bij riet en ruigte, $21 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ bij bos), terwijl deze bij struweel $30 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ is, zie bijlage B.

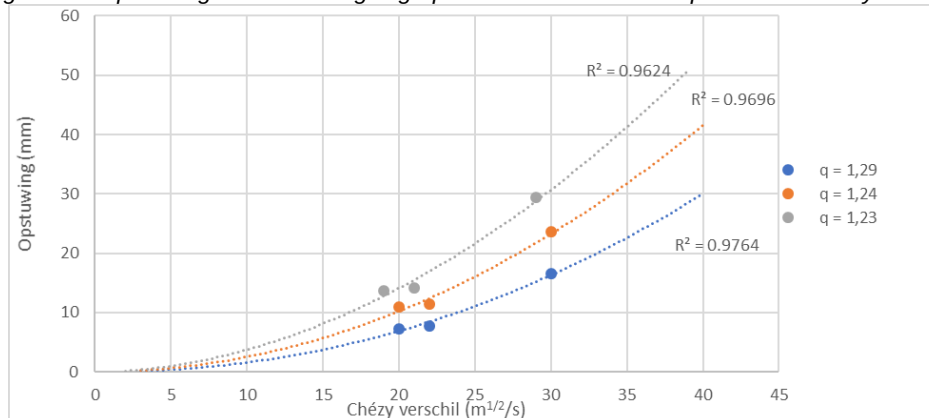
Voor het opstellen van de vuistregel is het van belang maar een van de soorten verzuiving als basis te nemen. Omdat verzuiving naar bos het tussen de andere twee verzuivingen ligt qua Chézy verschil, wordt verzuiving naar bos als uitgangspunt genomen voor het opstellen van de vuistregel. De formule van de trendlijn van verzuiving naar bos is als volgt:

$$\text{Trendlijn leidende parameter} = 1.0574 * \text{oppervlakte (ha)} \quad (4)$$

4.3.2 Mate van verruwing

Met dezelfde locaties in Figuur 18 is de secundaire parameter verruwing te vinden. De negen ingrepen die hier zijn gedaan zijn geplot het figuur hieronder. De lijnen in de grafiek tonen niet de soort verruwing, maar de verruwing op een van de locaties. Bijvoorbeeld: $q = 1,24$ toont drie soorten verruwing op de locatie P_G_RS_2, met het eerste punt voor verruwing naar riet en ruigte, de tweede voor bos en de derde voor struweel.

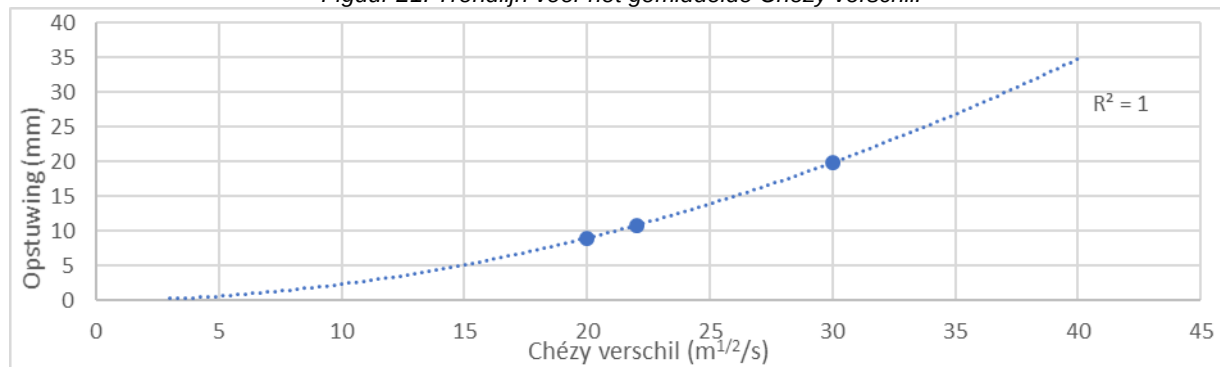
Figuur 20: Opstuwing van verruwingsingrepen voor de secundaire parameter Chézy verschil.



Alle drie de trendlijnen tonen een goed machtsverband tussen het Chézy verschil en de opstuwing. Het verschil tussen de steilte van de lijnen is doordat de lijnen zijn opgesteld bij verschillende oppervlaktes. Een groter oppervlakte geeft hogere MHW-effect waarden en dus wordt de lijn steiler.

Om tot een enkele trendlijn te komen voor verruwing is een gemiddelde opgesteld, deze is hieronder, als trendlijn, te zien.

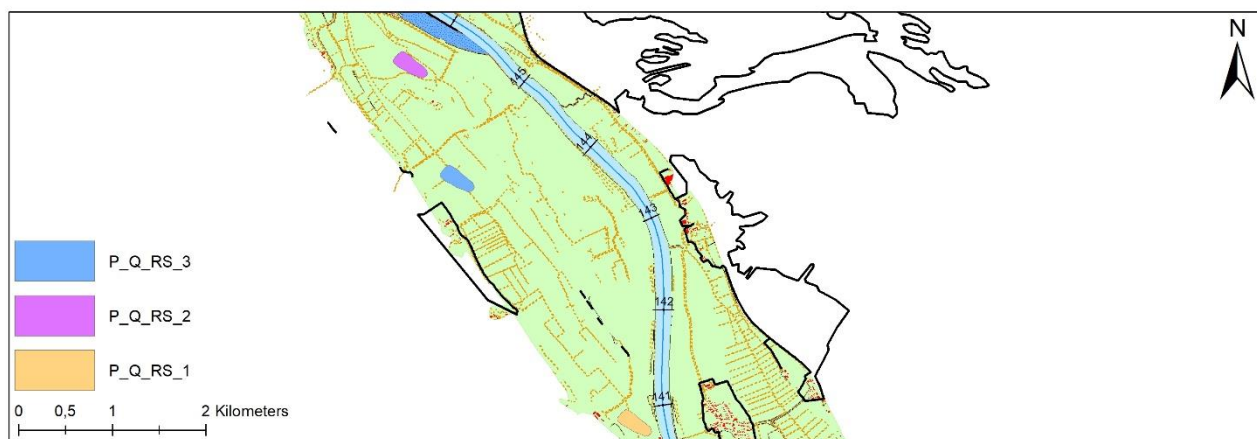
Figuur 21: Trendlijn voor het gemiddelde Chézy verschil.



4.3.3 Afvoerdichtheid

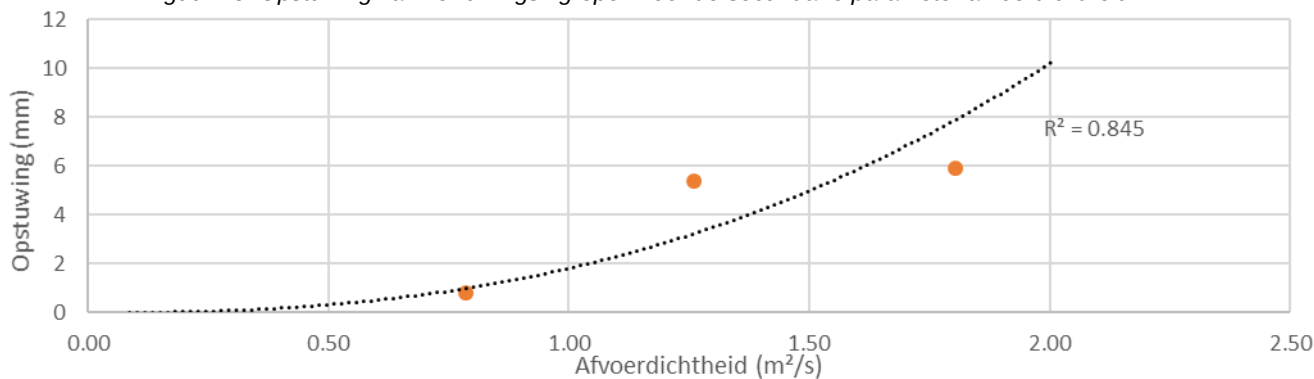
Zoals benoemd in 3.2.1 zijn bij het opstellen van de trendlijn voor afvoerdichtheid, de ingrepen naar bos als uitgangspunt genomen. In totaal zijn drie ingrepen gedaan om het effect van afvoerdichtheid op verruwing te ontdekken. De locatie hiervan zijn te zien in het figuur op de volgende pagina.

Figuur 22: Ligging van verruwingsingrepen voor de parameter afvoerdichtheid.



De oppervlakte, oriëntatie ten opzichte van de stroomrichting en vorm zijn gelijk. Enkel de afvoerdichtheid verschilt. Het MHW-effect en de afvoerdichtheid zijn geplot in het onderstaande figuur.

Figuur 23: Opstuwing van verruwingsingrepen voor de secundaire parameter afvoerdichtheid.



In het figuur is te zien dat twee ingrepen, ondanks een verschillende afvoerdichtheid, soortgelijke MHW-effecten hebben.

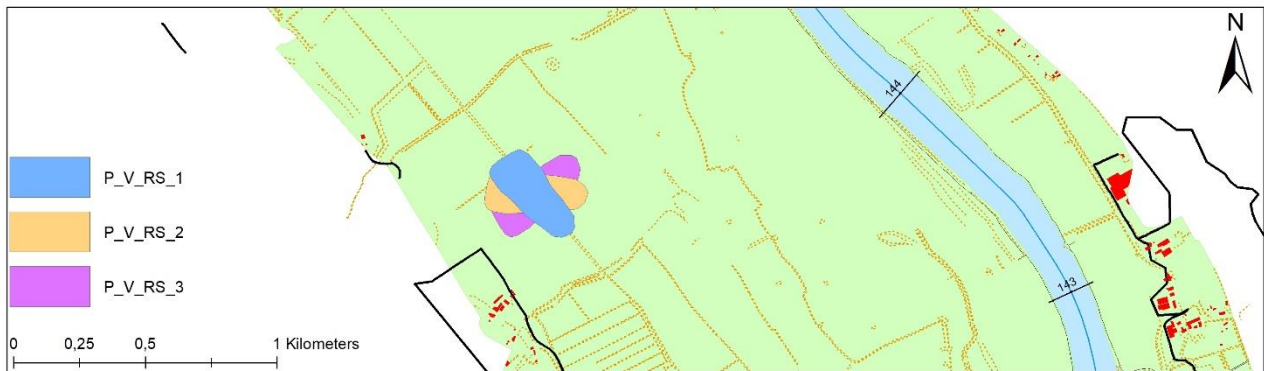
Tabel 9: Waarden van ingrepen 1 en 3 van verruwingsingrepen voor afvoerdichtheid.

Code	q referentie (m³/s)	Chézy verschil (m ^{1/2} /s)	Oppervlakte (ha)	Opstuwing (mm)
P_Q_RS_1	1.26	23	5.42	5.4
P_Q_RS_3	1.80	25	5.42	5.9

Eerder in het hoofdstuk was geconcludeerd dat de afstand tot de rivier een grote rol speelt in het MHW-effect. De ingreep P_Q_RS_1 ligt dicht tegen de rivier aan, bij het begin van een binnenbocht. P_Q_RS_3 ligt helemaal aan het uiteinde van de binnenbocht, en resulteert dus ondanks een hogere afvoerdichtheid in een kleiner MHW-effect. Desondanks de soortelijke opstuwende effecten, is er een goed machtsverband.

4.3.4 Oriëntatie

Figuur 24: Ligging van verruwingsingrepen voor de parameter oriëntatie.



Een ingreep haaks gelegen ten opzichte van de stroomrichting heeft een 1,5 keer zo negatief effect als een ingreep die parallel aan de stroomrichting ligt.

Tabel 10: Waarden van ingrepen a1, 2 en 3 bij verruwing oriëntatie.

Code	q referentie (m ³ /s)	Chézy verschil (m ^{1/2} /s)	Oppervlakte (ha)	Opstuwing (mm)
P_V_RS_1	1.83	25	5.37	5.6
P_V_RS_2	1.73	25	5.42	7.3
P_V_RS_3	1.71	24	5.44	8.4

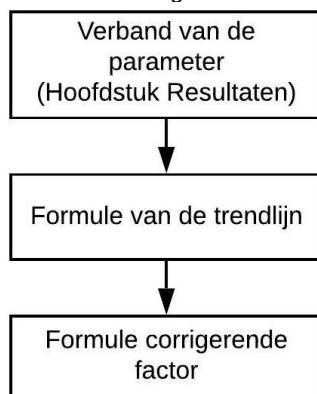
Bij vergravingen en ophogingen zijn dezelfde verbanden gevonden. Een verschil van oriëntatie ten opzichte van de stroomrichting lijkt dus niet ingreep gebonden. Alle ingrepen (vergraving, ophoging, verruwing) zorgen voor hetzelfde effect.

5 VUISTREGELS

In het vorige hoofdstuk zijn verbanden aangetoond tussen de parameters en het MHW-effect. Met deze verbanden, gefigureerd in de vorm van een trendlijn, kunnen formules worden afgeleid. Voor de leidende parameters is dit al gedaan. Deze formules geven namelijk het MHW-effect aan voor de grootte van de ingreep. Wat de bedoeling is voor de leidende parameter.

Echter, de secundaire parameters zijn nog niet herleidt tot een werkbare factor. In dit hoofdstuk worden de secundaire parameters omgevormd tot corrigerende factoren. Aan het einde van elke paragraaf worden de corrigerende factoren toegevoegd aan de vuistregel.

Figuur 25: Stroomschema omvorming verband naar corrigerende factor.



Uit de resultaten van het vorige hoofdstuk is gebleken dat het MHW-effect van een verandering van de oriëntatie ten opzichte van de stroomrichting hetzelfde is, ongeacht de soort ingreep. Hieruit valt te concluderen dat een ingreep die ovaal van vorm is, 1,5 keer zo veel negatief MHW-effect veroorzaakt als deze haaks ligt dan als deze parallel ligt. Dit is beschreven in de volgende twee voorbeelden:

Voorbeeld 1: bij een parallel gelegen opstuwende ingreep (ophoging en verruwing) die 30 mm opstuwing zou veroorzaken, zou deze gedraaid 45 mm opstuwing veroorzaken.

Voorbeeld 2: bij een parallel gelegen verlagende ingreep (vergraving) die 30 mm verlaging zou veroorzaken, zou deze gedraaid 20 mm verlaging veroorzaken.

Omdat deze effecten zo ruw zijn, en niet met een waarde kunnen worden berekend, zijn ze niet toegevoegd aan de vuistregels. Desondanks zijn het wel duidelijke bevindingen die kunnen worden gebruikt bij het inschatten van het MHW-effect van een ingreep.

5.1 Vergravingen

In het vorige hoofdstuk is de volgende formule voor de leidende parameter van vergravingen tot stand gekomen:

$$\text{Leidende parameter} = 27,996 * \text{ontgraven volume (Mm}^3\text{)} \quad (2)$$

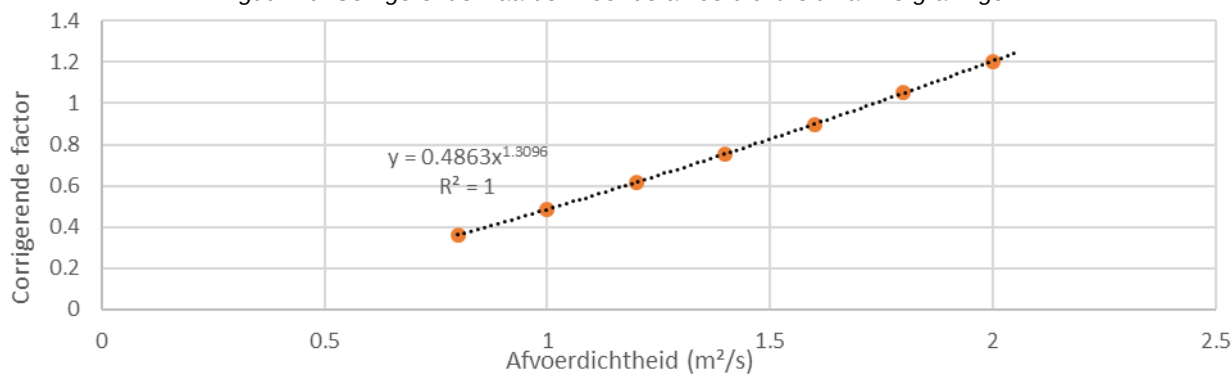
Deze formule is opgesteld bij ingrepen met een afvoerdichtheid van 1,73 m³/s. Hier dient dus nog een corrigerende waarde over te komen voor ingrepen met een andere afvoerdichtheid. Deze corrigerende waarde is op te stellen met de formule van de trendlijn van Figuur 13.

$$\text{Formule trendlijn afvoerdichtheid} = 2,3824 * x^{1,3096} \quad (5)$$

Omdat formule 2 is opgesteld met een gemiddelde afvoerdichtheid van 1,73 m³/s, dient de corrigerende waarde van formule 5 bij deze afvoerdichtheid 1,0 te zijn. Bij een kleinere afvoerdichtheid dan 1,73 m³/s is een corrigerende factor nodig die kleiner is dan 1,0. Het MHW-effect is namelijk minder. Door in formule 3 verschillende afvoerwaarden in te vullen, en deze vervolgens te delen door het resultaat van formule 5 met een afvoerdichtheid van 1,73 m³/s krijg je corrigerende waarden voor andere afvoerdichtheden. Een voorbeeld van hoe dit werkt is weergegeven in paragraaf 3.4.

Ten behoeve van de leesbaarheid van het hoofdstuk zijn de berekeningen van secundaire parameter naar corrigerende parameter uitgevoerd in Bijlage L. Het resultaat van deze berekeningen is geplot in de grafiek op de volgende pagina.

Figuur 26: Corrigerende waarden voor de afvoerdichtheid van vergravingen.



Met de trendlijn van Figuur 26 is de formule van de corrigerende parameter voor afvoerdichtheid berekend, weergegeven als y. Met deze formule kan de corrigerende waarde voor een veranderende afvoerdichtheid worden berekend. Deze is hieronder uitgeschreven:

$$\text{Corrigerende factor afvoerdichtheid} = 0,4863 * (\text{Gemiddelde afvoerdichtheid})^{1.3096} \quad (6)$$

De complete vuistregel voor een vergraving is als volgt:

$$MHW - \text{effect vergraving} = 27,996 * x * (0,4863 * z^{1.3096}) \quad (7)$$

Waarin:

- x = ontgraven volume (in Mm³)
z = gemiddelde afvoerdichtheid (in m²/s)

5.2 Ophogingen

De formule van de leidende parameter voor ophogingen is als volgt:

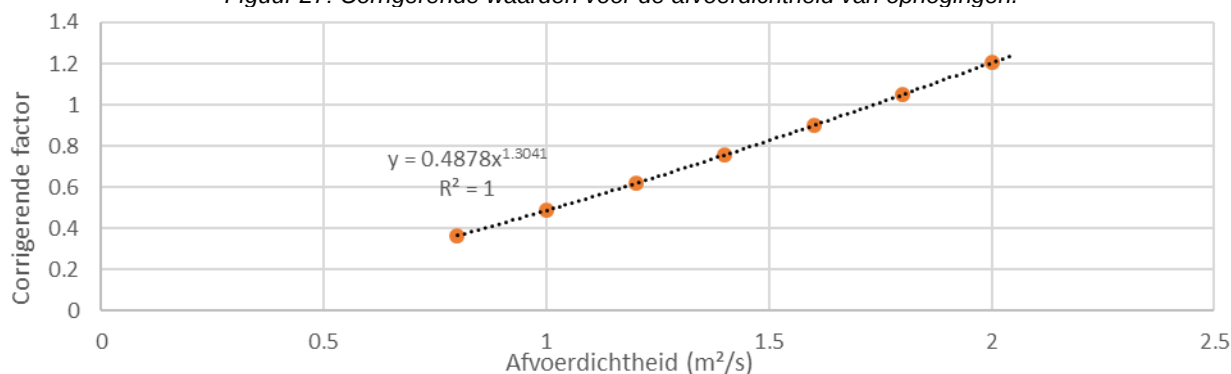
$$\text{Leidende parameter} = 117,06 * \text{opgehoogd volume (Mm}^3\text{)} \quad (3)$$

Net als bij vergravingen is formule 4 opgesteld met een gemiddelde afvoerdichtheid van 1,73 m³/s. Voor andere afvoerdichtheden zijn dus corrigerende waarden benodigd. Dit gebeurt op dezelfde manier als gedaan in de vorige paragraaf.

$$\text{Formule trendlijn afvoerdichtheid} = 6,6246 * x^{1,3041} \quad (8)$$

Met formule van de trendlijn uit Figuur 16 zijn de MHW-effecten bij verschillende afvoerdichtheden berekend. Deze is volgens gedeeld door de gemiddelde afvoerdichtheid (1,73 m³/s). De uitwerking hiervan staat in Bijlage L, en de resultaten hiervan zijn geplot in de onderstaande grafiek.

Figuur 27: Corrigerende waarden voor de afvoerdichtheid van ophogingen.



Uit de trendlijn hiervan volgt de onderstaande formule. Hiermee is de corrigerende waarde voor afvoerdichtheden te berekenen.

$$\text{Corrigerende factor afvoerdichtheid} = 0,4878 * (\text{Gemiddelde afvoerdichtheid})^{1,3041} \quad (9)$$

De vuistregel voor een ophoging is als volgt:

$$\text{MHW} - \text{effect vergraving} = 117,06 * x * (0,4878 * z^{1,3041}) \quad (10)$$

Waarin:

- x = opgehoogd volume (in Mm³)
z = gemiddelde afvoerdichtheid (in m²/s)

5.3 Verruwing

Voor de leidende parameter van verruwing is verruwing naar bos als uitgangspunt genomen. De formule hiervan is hieronder weergegeven:

$$\text{Leidende parameter} = 1,0574 * \text{oppervlakte (ha)} \quad (4)$$

De complete vuistregel voor verruwing heeft twee corrigerende factoren in de formule, het Chézy verschil en de afvoerdichtheid.

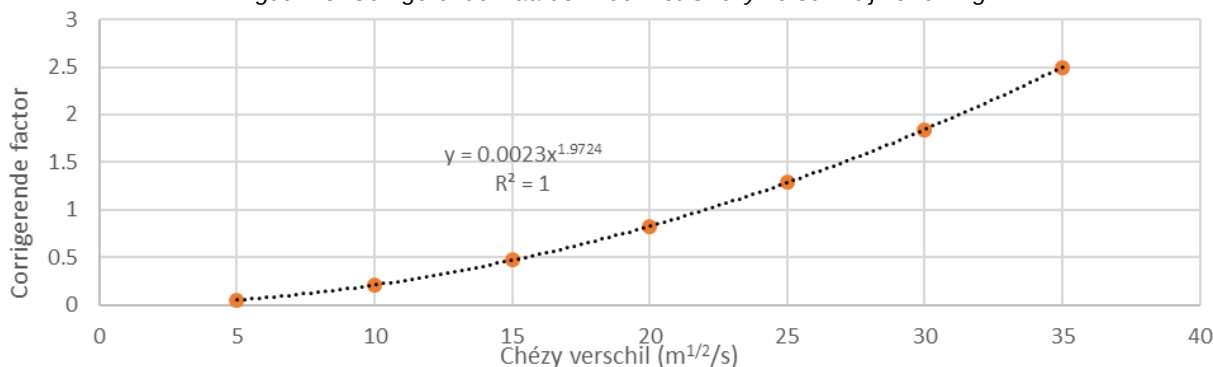
5.3.1 Chézy verschil

Met de gemiddelde verruwing op drie soorten locaties is uit Figuur 21 in het vorige hoofdstuk de volgende formule herleidt:

$$\text{Formule trendlijn Chézy verschil} = 0,0257 * x^{1,9548} \quad (11)$$

De corrigerende factor voor het Chézy verschil is op dezelfde manier opgesteld voor verruwing, als voor afvoerdichtheid in de voorgaande paragrafen. Een ingreep van gras naar bos heeft een verruwing van ongeveer 22 m^{1/2}/s bij de waterdieptes van de ingrepen (+/- 2,4 m). bij een Chézy verschil van 22 m^{1/2}/s dient de corrigerende factor dus 1,0 te zijn. De uitwerking van de MHW-effecten van de secundaire parameter Chézy verschil naar corrigerende parameter is is gedaan in bijlage L.

Figuur 28: Corrigerende waarden voor het Chézy verschil bij verruwing.



Uit deze grafiek komt de onderstaande formule voor de corrigerende factor per Chézy verschil voort:

$$\text{Corrigerende factor Chézy verschil} = 0.0023 * (\text{Chézy verschil})^{1.9724} \quad (12)$$

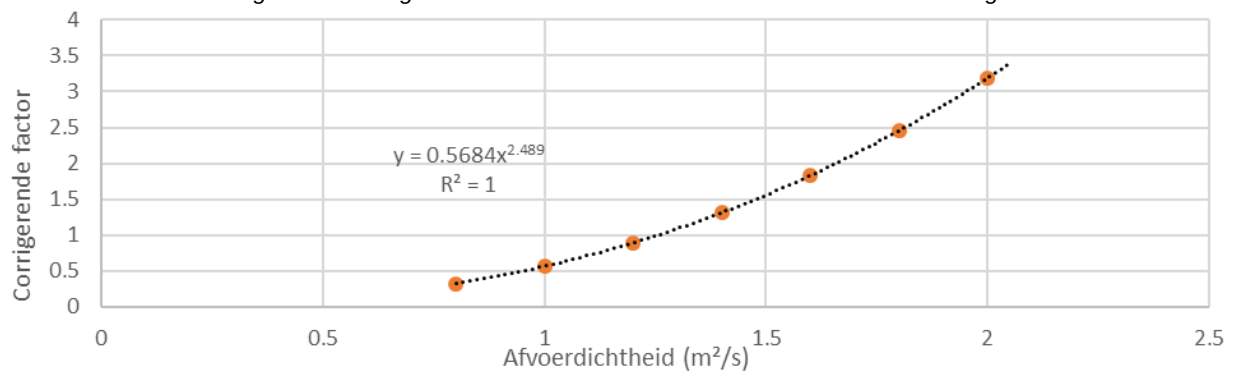
5.3.2 Afvoerdichtheid

De verruwing van grasland naar bos is gedaan in een gebied met een gemiddelde afvoerdichtheid van 1,25 m³/s. Bij een afvoerdichtheid van 1,25 m³/s dient de corrigerende waarde voor formule 4 dus 1,0 te zijn. De formule van de trendlijn van Figuur 23 is hieronder weergegeven:

$$\text{Formule trendlijn afvoerdichtheid} = 1,8192 * x^{2,489} \quad (13)$$

De resultaten van de uitwerking van de corrigerende factor afvoerdichtheid voor verruwing zijn geplott in de grafiek op de volgende pagina.

Figuur 29: Corrigerende waarden voor de afvoerdichtheid van verruwing.



Uit deze grafiek is de onderstaande formule opgesteld voor de corrigerende factor van afvoerdichtheid.

$$\text{Corrigerende factor afvoerdichtheid} = 0,5684 * (\text{Gemiddelde afvoerdichtheid})^{2,489} \quad (14)$$

De complete vuistregel voor een verruwing vanaf grasland is als volgt:

$$MHW - \text{effect verruwing} = 1,0574 * x * (0,5684 * z^{2,489}) * (0,0023 * y^{1,9724}) \quad (15)$$

Waarin:

- x = oppervlakte (in ha)
- z = gemiddelde afvoerdichtheid (in m²/s)
- y = Chézy verschil (m^{1/2}/s)

6 VALIDATIE

Belangrijk om te onthouden is dat vuistregels niet bedoeld zijn om een correcte waarde van het MHW-effect te geven. Het doel van vuistregels is om een rivierkundig inzicht te geven wat ongeveer verwacht kan worden, niet om de exacte waarden te berekenen. Dit hoofdstuk geeft antwoord op de deelvraag: “Wat is de betrouwbaarheid van de vuistregels?”. Verder worden suggesties gedaan wanneer de vuistregels wel te gebruiken zijn en wanneer niet.

Het valideren van de vuistregels wordt eerst gedaan door de ingrepen van het hoofdstuk resultaten. Hiermee wordt getest hoe goed de vuistregels in staat zijn hun eigen waarde te berekenen, ze zijn namelijk aan de hand van deze resultaten opgesteld. Vervolgens worden ingrepen aan een ander traject van de Maas geanalyseerd. Tot slot worden nieuwe ingrepen behandeld en worden de vuistregels aan de hand van deze resultaten getest.

6.1 Resultaten tegen vuistregels

In de bijlagen M, N en O zijn overzichten van alle ingrepen te vinden. In de rechterkolom zijn de waarden weergegeven die zijn berekend door middel van de opgestelde vuistregels. Elke berekende waarde heeft een kleurcode gekregen voor hoe goede deze wordt geacht. Deze code is als volgt:

- Donkergroen voor een goede waarde;
- Lichtgroen voor een prima waarde;
- Oranje voor een matige waarde;
- Rood voor een slecht waarde.

De vuistregel voor vergravingen geeft een goede inschatting van het MHW-effect. Zelfs de ingrepen P_Q_A_a1 en P_Q_A_a4 (waarvan a4 ver van het zomerbed lag en a1 dicht bij) geven handzame waarden.

Het MHW-effect berekend met de vuistregel voor ophogingen tonen ook vrij goede resultaten. Alleen de locatie P_Q_O_a4 wijkt erg af.

De vuistregel voor verruwingen is een ander verhaal. De resultaten van de vuistregel tonen goede waarden bij de P_G ingrepen. Uit de huidige resultaten kan worden geconcludeerd dat de resultaten beter zijn toegespitst op ingrepen in de buurt van het zomerbed. De leidende parameter en de corrigerende parameter voor Chézy verschil zijn gebaseerd op ingrepen die dicht bij het zomerbed liggen. Bij ingrepen die verder verwijderd zijn van het zomerbed, zoals de locaties P_Q_RS_3 en P_Q_RS_2, overschat de vuistregel de het MHW-effect.

Dit effect werkt ook op de P_V ingrepen. Deze geven allen een slechte inschatting van het MHW-effect. De resultaten van de vuistregel wijzen uit dat de vuistregel inadequaet is voor het inschatten van MHW-effecten die verder van het zomerbed verwijderd zijn.

6.2 Bedijkte Maas

Voor de validatie zijn ook ingrepen in de Bedijkte Maas berekend. De Bedijkte Maas kenmerkt zich doordat hij een smaller buitendijks gebied heeft dan de Zandmaas. Hierom is de verwachting dat opstuwende ingrepen een groter effect hebben dan ingrepen in de Zandmaas.

In de bijlagen M, N en O staan de resultaten van deze ingrepen, met als eerste letter in de code een ‘T’. Omdat deze resultaten in een ander traject liggen dan de Zandmaas, zijn deze niet meegenomen in het opstellen van de vuistregel. Maar ze kunnen wel worden gebruikt om te ontdekken of de vuistregels werken in andere trajecten van de Maas. De locaties van de ingrepen in de Bedijkte Maas zijn te vinden in bijlage P.

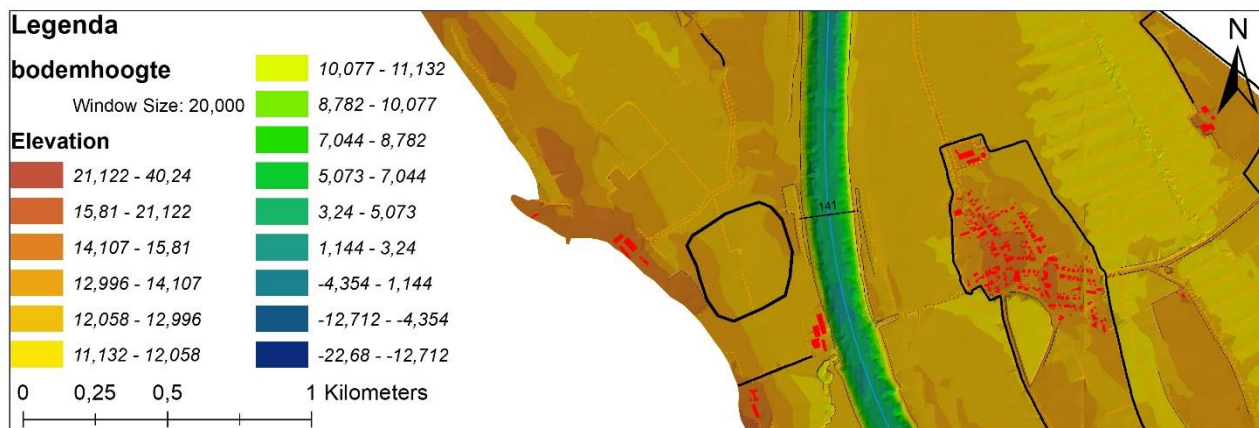
De vuistregel geeft uitstekende resultaten voor vergravende ingrepen in de Bedijkte Maas, hieruit kan geconcludeerd worden dat de vuistregel voor vergravingen ook werkt in dit gebied. Ook voor ophogingen werkt de vuistregel tot zekere hoogte. Enkel de ingreep T_Q_O_a1 toont een afwijkend resultaat. Deze ingreep ligt op dezelfde locatie als T_G_O_a1. De enige verklaring waarom deze zo afwijkt is dat het gebied in een ‘bottleneck’ ligt, een smal gebied van de uiterwaard, en hier de maximaal haalbare opstuwing al is bereikt.

De vuistregel voor verruwing geeft vrije adequate resultaten, zij het een factor twee te groot. De verklaring hiervoor is al gegeven: de vuistregel is opgesteld bij ingrepen die dicht bij het zomerbed liggen, hierdoor overschat deze het MHW-effect bij ingrepen die verder van het zomerbed verwijderd liggen.

6.3 Correctie vuistregel verruwing

De vuistregel voor verruwing werkt goed voor de locatie P_G. Dit is dan ook de locatie waar de leidende parameter en de corrigerende Chézy factor zijn opgesteld. Op vrijwel alle andere locaties overschat de vuistregel het MHW-effect. Deze resultaten wijzen uit dat de vuistregel is gebaseerd op een locatie waar buitengewoon hoge MHW-effecten worden berekend.

Figuur 30: Visualisatie van de 'bottleneck' van de verruwingsingrepen.



De locatie is gelegen in een 'bottleneck'. Aan weerszijden van de ingreep zijn hogere gronden, van ongeveer 0,5 tot 1 meter hoger dan de bodemhoogte bij de ingreep. De verhoging die aan de bovenkant van de ingreep ligt, loopt nog 2 km door. Door de locatie van de ingreep wordt dus een groot gebied erachter beïnvloed. Om deze reden is ervoor gekozen nog een corrigerende factor voor de verruwing in de formule te verwerken. De vuistregel wordt vermenigvuldigd met 0,5. Hoe dit andere gebieden beïnvloed is te zien in de onderstaande tabel. De derde kolom weergeeft de opstuwing bij de gecorrigeerde vuistregel, de vierde kolom het MHW-effect bij de originele vuistregel.

Tabel 11: Resultaten van de verruwingsingrepen met verschillende berekende effecten.

Code	Opstuwing berekend (mm)	Opstuwing met de gecorrigeerde vuistregel (mm)	Opstuwing met de originele vuistregel (mm)
P_Q_RZ_1	11	5.83	11.65
P_Q_RZ_2	1.7	2.03	4.06
P_Q_RZ_3	10.1	15.13	30.26
P_Q_RS_1	5.4	3.23	6.47
P_Q_RS_2	0.8	1.17	2.35
P_Q_RS_3	5.9	9.30	18.59
P_V_RZ_1	9.4	15.50	31.0
P_V_RZ_2	14.8	12.88	25.8
P_V_RZ_3	19.3	12.41	24.8
P_V_RS_1	5.6	9.53	19.1

Code	Opstuwing berekend (mm)	Opstuwing met de gecorrigeerde vuistregel (mm)	Opstuwing met de originele vuistregel (mm)
P_V_RS_3	8.4	7.49	15.0
T_Q_RS_1	2.2	2.05	4.1
T_Q_RS_2	1.2	0.71	1.4
T_Q_RZ_1	3.9	3.88	7.8
T_Q_RZ_2	2.1	1.32	2.6
T_G_RS_1	5.0	4.84	9.7
T_G_RZ_1	9.0	9.14	18.3

Met de nieuwe formule passen de resultaten beter bij de berekende effecten. Ook de P_V-berekeningen sluiten beter aan. In de vuistregel wordt namelijk niet het effect van oriëntatie meegenomen. Het MHW-effect van de ingrepen P_V_3 moet dus nog een factor 1,5 sterker omdat de ingrepen haaks liggen. De factor 0,5 is in de formule in de conclusie verwerkt. In bijlage J zijn de resultaten van beide verruwendende ingrepen te vinden, gemarkeerd met de kleurcode als aangegeven in paragraaf 6.1.

6.4 Nieuwe ingrepen

De vuistregels testen met ingrepen waaruit ze ontworpen zijn, is geen bewijs dat ze werken voor andere ingrepen. Daarom zijn in de Zandmaas enkele nieuwe ingrepen gedaan waarmee de vuistregels getest kunnen worden. De resultaten van de berekeningen voor verruwing bleken helaas verkeerd berekend, waardoor deze niet in de beoordeling van de vuistregels kunnen worden meegenomen. De tijdspanne van het onderzoek liet niet toe deze opnieuw te berekenen.

Tabel 12: Vergelijking van de MHW-effecten bij nieuwe ingrepen.

Code	q referentie (m³/s)	Verschil inhoud (Mm³)	MHW-effect berekening	MHW-effect vuistregel
P_A_L_a1	0.245423	-0.669	-0.2	-1.45
P_A_V_a1	1.675864	-0.940	-25.3	-25.17
P_O_L_a1	0.245423	0.248	0.7	2.26
P_O_V_a1	1.675864	0.901	56.1	105.45

De vuistregel voor vergravingen bewijst weer dat deze goed in staat is het MHW-effect te berekenen. Een opvallend resultaat is de uitschieter van P_O_V_a1, deze overschat het MHW-effect enorm. Een verklaring hiervoor is dat de ingreep erg groot is, bijna twee keer zo groot als de grootste ingrepen gedaan in het hoofdstuk Resultaten. Hieruit kan worden geconcludeerd dat de vuistregel moeite heeft om grootte ingrepen in te schatten.

7 CONCLUSIE

Er zijn drie empirische vuistregels op te stellen voor waterstandseffecten van ingrepen in de uiterwaarden van de Maas. Formules voor vergravingen, ophogingen en verruwing in de uiterwaard. De vuistregels zijn geldig voor de trajecten Bedijkte Maas en de Zandmaas.

Anders dan de Rijntakken, is de Maas een enkele tak, waardoor de breedte van de uiterwaard en het bodemverhang de trajectindeling bepalen. Naar deze trajectindeling is extensief onderzoek gedaan, hieruit zijn 6 trajecten voortgekomen. Vanaf de stuw bij Lith werkt getijfluctuatie in op de waterstand, hier ligt dus de grens voor de op te stellen vuistregels. Bovenstrooms, waar de Maas Nederland binnenkomt is de Maas te dynamisch voor het opstellen van Vuistregels. Er blijven drie trajecten over waarvoor de vuistregels kunnen worden opgesteld: De Plassenmaas, Zandmaas en Bedijkte Maas. Uit deze drie is de Zandmaas het geschiktst voor proef gewijsde modellering. De Plassenmaas is namelijk beperkt in ruimte door de invulling van het uiterwaardegebied, en de Bedijkte Maas is een minder aantrekkelijk gebied voor ingrepen in de toekomst.

Het schuiven van parameters is een goede methode om de werking van een parameter op het MHW-effect te ontdekken. Ophogingen en vergravingen kunnen niet worden gecombineerd tot een vuistregel omdat ophogingen een 2 tot 4 keer zo groot negatief effect hebben dan de vergraving een positief effect heeft. De afvoerdichtheid is een uitstekende waarde om de doorstroombaarheid van het water aan te duiden. Het Chézy verschil is ook een goede term om de weerstand van de vegetatie aan te duiden, omdat deze gewasonafhankelijk is.

Een ingreep in de uiterwaard is sterk afhankelijk van de lokale geometrie en de afstand tot het zomerbed. Een betere methode om de vuistregels te ontwerpen, is om gewapend met de kennis van dit rapport zorgvuldig locaties voor de ingrepen te zoeken. Locaties die niet gelegen zijn in een 'bottleneck', een versmalling van het buitendijks gebied en gebieden die niet te ver van het zomerbed liggen, maar ook niet te ver ervan af.

Vergravingen zijn het sterkst afhankelijk van de afvoerdichtheid van het gebied van de ingreep. Bij ophogingen ligt dit anders, omdat ophogingen het water niet alleen opstuwen maar zich ook tot een ondoordringbare barrière ontwikkeld. Ondanks het gebruik van volume verschil, valt te concluderen dat de hoogte van de ingreep een grote invloed heeft. Bij ophogingen speelt naast de afvoerdichtheid en volume verschil, de lokale geometrie een grote rol. Als het water de kans heeft een andere 'weg' te nemen door de lokale geometrie, heeft een ophoging maar een beperkt negatief effect.

Het MHW-effect van verruwing is het meest afhankelijk van de soort verruwing. De factor die daarna de mate van opstuwing bepaalt is de afstand tot het zomerbed, nabij het zomerbed leidt een verruwing tot een vele male grotere opstuwing dan daarvan verwijderd. Ook de vorm speelt invloed op het MHW-effect. Bij alle geteste ingrepen zijn – ondanks een afnemende afvoerdichtheid – 1,5 keer zo grote MHW-effecten bevonden bij een ingreep die haaks op de stroomrichting lag, dan bij ingrepen die parallel aan de stroomrichting lag. Echter, naast het feit dat de vorm van de ingreep zoals hij in dit onderzoek is gedaan vrij ongewoon is in de praktijk, is het een te ruwe bevinding om hier een corrigerende factor in de formule van te maken.

De vuistregel voor vergravingen werkt uitstekend. Het is nog onduidelijk in hoeverre een toenemende diepte een rol speelt in het MHW-effect, maar voor vergravingen tot een diepte van 2,5 m werkt de vuistregel. De vuistregel voor vergravingen lijkt ook traject ongebonden. Zowel voor de Bedijkte Maas als de Zandmaas werkt hij. Daarnaast lijkt de afstand tot het zomerbed een minder grote rol te spelen dan bij de opstuwende ingrepen.

Zolang een ophoging van een niet te groot volume is, is de vuistregel geschikt om het MHW-effect te bepalen. Dit lijkt ook geen probleem aangezien het zelden voorkomt dat de uiterwaarde verhoogd wordt in plaats van verlaagd. Voor kleine ingrepen in deze dus goed toepasbaar, zowel voor de Zandmaas als de Bedijkte Maas.

Het MHW-effect van een verruwing is lastig te berekenen. Deze is namelijk sterk afhankelijk van de locatie geometrie en inrichting. Daarnaast speelt de afstand tot het zomerbed een erg grote rol in het MHW-effect. De aanvankelijke vuistregel voor verruwing was opgesteld in een gebied dat hier niet ideaal voor was. Met een corrigerende factor van vorig hoofdstuk biedt de vuistregel echter zeer goede inschattingen van het MHW-effect.

In totaal zijn drie empirische vuistregels opgesteld voor waterstandseffecten van ingrepen in de uiterwaard van de Zandmaas en de Bedijkte Maas. Deze zijn als volgt:

De vuistregel voor een vergraving:

$$MHW - effect\ vergraving = 27,996 * x * (0,4863 * z^{1,3096}) \quad (7)$$

Waarin:

x = ontgraven volume (in Mm³)
z = gemiddelde afvoerdichtheid (in m²/s)

De vuistregel voor een ophoging:

$$MHW - effect\ vergraving = 117,06 * x * (0,4878 * z^{1,3041}) \quad (10)$$

Waarin:

x = opgehoogd volume (in Mm³)
z = gemiddelde afvoerdichtheid (in m²/s)

En de vuistregel voor een verruwing:

$$MHW - effect\ verruwing = 0,5287 * x * (0,5684 * z^{2,489}) * (0,0023 * y^{1,9724}) \quad (16)$$

Waarin:

x = oppervlakte (in ha)
z = gemiddelde afvoerdichtheid (in m²/s)
y = Chézy verschil (m^{1/2}/s)

8 DISCUSSIE EN AANBEVELING

In dit hoofdstuk komen verschillende discussiepunten aan bod. Deze punten gaan over de manier van aanpak, de interpretatie van de resultaten, sterktes of zwaktes in het onderzoek en over gedachten of bevindingen die geen plaats hebben gekregen in het onderzoek. Daarnaast worden aanbevelingen gedaan aan de hand van de discussie en de conclusie.

8.1 Discussie

Het aflezen van de resultaten gebeurt nu met maximaal MHW-effect op de as van de rivier. Dit is een werkzame maat voor een rivierkundige, maar zorgt voor moeilijkheden met het opstellen van vuistregels. Een geschiktere manier zou zijn om de vuistregels op te stellen voor het maximale lokale effect.

Een groot nadeel van dit onderzoek is dat de gebruikte programma's en modellen door het onderzoek heen zijn geleerd. Hierdoor was tijdens het modelleren van een ingreep nog niet genoeg inzicht om de effecten ervan in te schatten. Een voorbeeld hiervan is de opgestelde vuistregel voor verruwing. Deze is opgesteld op een zeer ongeschikte locatie. Andere voorbeelden is de locatie van de ingrepen P_Q_RS_1 en P_Q_RZ_1. Deze ingrepen liggen te dicht bij het zomerbed en worden zeer beïnvloed door de afstand tot het zomerbed.

In het onderzoek is vergraven volume gebruikt als leidende parameter voor vergravingen en ophogingen. Maar uit het onderzoek is gebleken dat het gebruik hiervan beperkt is voor ophogingen. De oorzaak hiervan is dat tijdens de pilot niet voldoende dieptes zijn getest.

Het rapport "Richtlijnen voor inrichting en beheer van uiterwaarden" (Wolters, Platteeuw, & Schoor, 2001) benoemt dat ingrepen vorm onafhankelijk is. Omdat in het rapport niet gespecificeerd of gevisualiseerd was hoe dit geïnterpreteerd diende te worden, is uitgaan van de oriëntatie ten opzichte van de stroomrichting. Maar een andere manier om de invloed van vorm te testen zou zijn door een ingreep te modelleren op dezelfde locatie, met hetzelfde oppervlakte, maar van andere vorm in plaats van oriëntatie ten opzichte van de stroomrichting.

De vuistregel voor verruwing werkt na aanpassing vrij goed, maar het zou ook interessant zijn geweest om te zien hoe de ingreep werkt bij een vergladding.

Ondanks dat de vuistregel voor vergravingen de beste resultaten produceert, is niet getest wat een verandering van oppervlakte, maar hetzelfde volumeverschil doet voor het MHW-effect.

De vuistregels van verruwing zijn nu niet opnieuw getest in de Zandmaas. Het kan dus zijn de corrigerende factor van 0,5 die later aan de vuistregel is toegevoegd een foute correctie is.

De Zandmaas en de Bedijkte Maas verschillen vooral van elkaar in het dwarsprofiel, de Zandmaas heeft meer natuur en is breder dan de Bedijkte Maas. Maar het verhang is vrijwel hetzelfde. Uit de resultaten lijkt het erop dat verruimde vuistregels dezelfde effecten tonen, ongeacht het dwarsprofiel. Terwijl opstuwende ingrepen een wel andere MHW-effecten hebben bij een verandering van het dwarsprofiel. Het lijkt er dus op dat verruimende vuistregels niet zo zeer van het dwarsprofiel, maar van het verhang afhankelijk zijn. Juist om dit feit zou het interessant zijn om de ingrepen ook uit te voeren in de Plassenmaas, aangezien deze een ander verhang heeft dan de Bedijkte Maas en de Zandmaas.

8.2 Aanbeveling

Omdat de vuistregels veelal gebruikt worden voor een inschatting om een andere ingreep teniet te doen, is het aan te raden om nog paar varianten te berekenen waarbij twee soorten ingrepen gecombineerd worden. Hieruit kan worden opgemaakt in welke mate de ingrepen elkaar beïnvloeden. Met de huidige vuistregels valt er namelijk niets te zeggen over de combinatie van de ingrepen.

Nog een belangrijke aanbeveling is het uitvoeren van meer berekeningen in de Zandmaas en de Plassenmaas. Deze gebieden zijn namelijk door het Ruimtelijk Perspectief Maas aangewezen als meest interessante gebieden voor ingrepen in de toekomst.

De derde aanbeveling is om de vuistregels te testen met eerder uitgevoerde ingrepen aan de Maas. Hiermee kan getest worden over de ingrepen niet alleen theoretisch werken, maar ook of ze in de praktijk toepasbaar zijn.

De vierde aanbeveling is om meer ingrepen te modelleren voor verruwing. Deze vuistregel is de minst nauwkeurige van de drie, terwijl deze samen met vergraving het belangrijkste is.

De vijfde aanbeveling is om met verschillende ingrepen te testen wat het effect van afstand tot de rivier op het MHW-effect is. Het gebied tussen de locaties 7 en 3 in bijlage G zou een goed gebied zijn om dit te testen. Ingrepen van dezelfde vorm, met soortgelijke afvoerdichtheden en groottes.

Uit de studie is gebleken dat het mogelijk is om werkzame vuistregels op te stellen voor ingrepen aan het buitendijkse gebied. Echter, de ingrepen in dit onderzoek hebben zich beperkt tot de uiterwaard. Het is aan te bevelen een soortgelijk studie uit te voeren met ingrepen als strangen en nevengeulen, die direct verbonden zijn aan het zomerbed.

De laatste aanbeveling is om een soortgelijke studie uit te voeren voor de Rijntakken. De huidige vuistregels van de Rijntakken zijn verouderd en uitgevoerd met 1D-berekeningen. 1D berekeningen zijn op zich al veralgemeningen van de praktijk, om daar dan nog eens veralgemeningen zoals vuistregels mee op te stellen is mogelijk een stap te veel. Daarnaast worden ingrepen aan de rivieren ondertussen niet meer berekend met 1D berekeningen, maar met 2D berekeningen. De vuistregels van de Rijntakken zijn dus toe aan vervanging.

BIJLAGE A – VUISTREGELS RIJNTAKKEN

Riviertak	Traject	Effect ontgraving (mm / Mm ³)	Effect ruwheid mm / (km ² · m ^{1/2} /s)
Bovenrijn	Lobith – Pannerdense Kop	-48	+3
Waal	Pannerdense Kop – Nijmegen	-45	+3
Waal	Nijmegen – Tiel	-39	+3
Waal	Tiel – Zaltbommel	-47	+4
Waal	Zaltbommel – Gorinchem	-66	+5
Pannerdens Kanaal	Pannerdense Kop – IJsselkop	-91	+6
Nederrijn	IJsselkop – Driel	-168	+9
Nederrijn	Driel – Amerongen	-91	+6
Nederrijn	Amerongen – Hagestein	-75	+4
Lek	Hagestein – Schoonhoven	-78	+5
Lek	Schoonhoven – Krimpen	-89	+3
IJssel	IJsselkop – Dieren	-158	+7
IJssel	Dieren – Deventer	-84	+4
IJssel	Deventer – Wijhe	-77	+4
IJssel	Wijhe – Zwolle	-95	+5

Als indruk over hoe de vuistregels gebruikt worden, een voorbeeld:

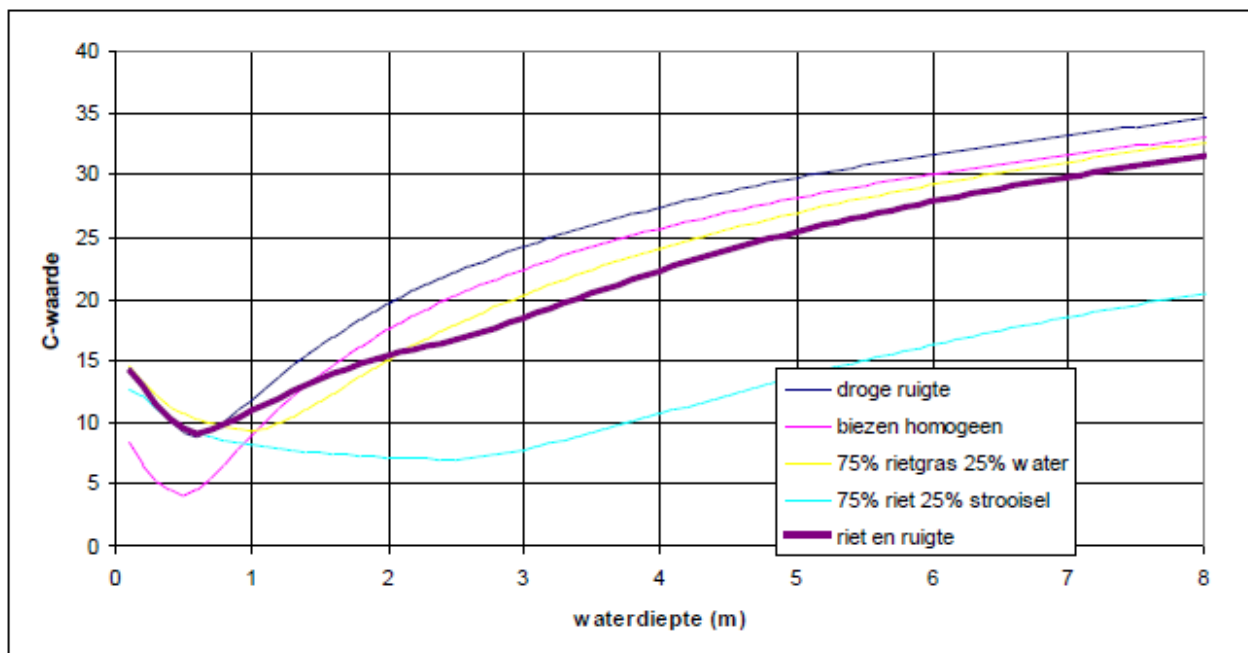
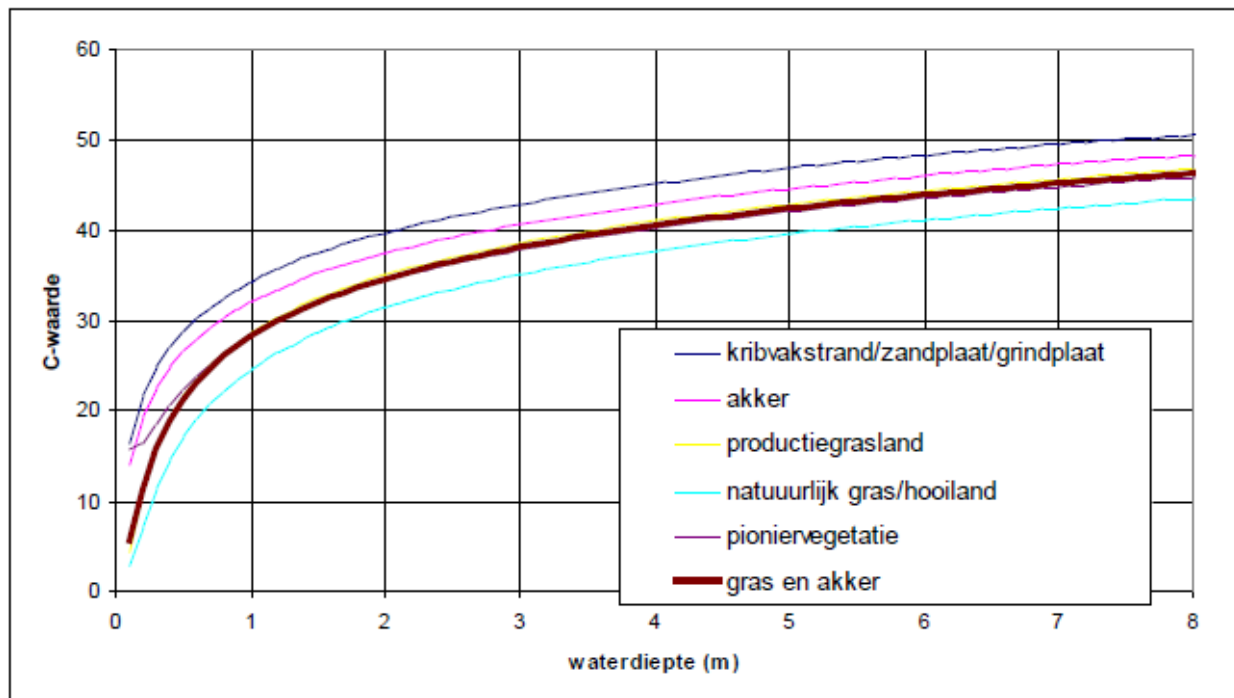
Neem een traject, in dit geval Zaltbommel – Gorinchem. Stel dat in dit traject een uiterwaard 2 meter verlaagd wordt over een lengte van 100 ha. Ook de vegetatie verandert van grasland (40 m^{1/2}/s) naar ruigte (25 m^{1/2}/s). De maximale verandering in MHW-stand is dan:

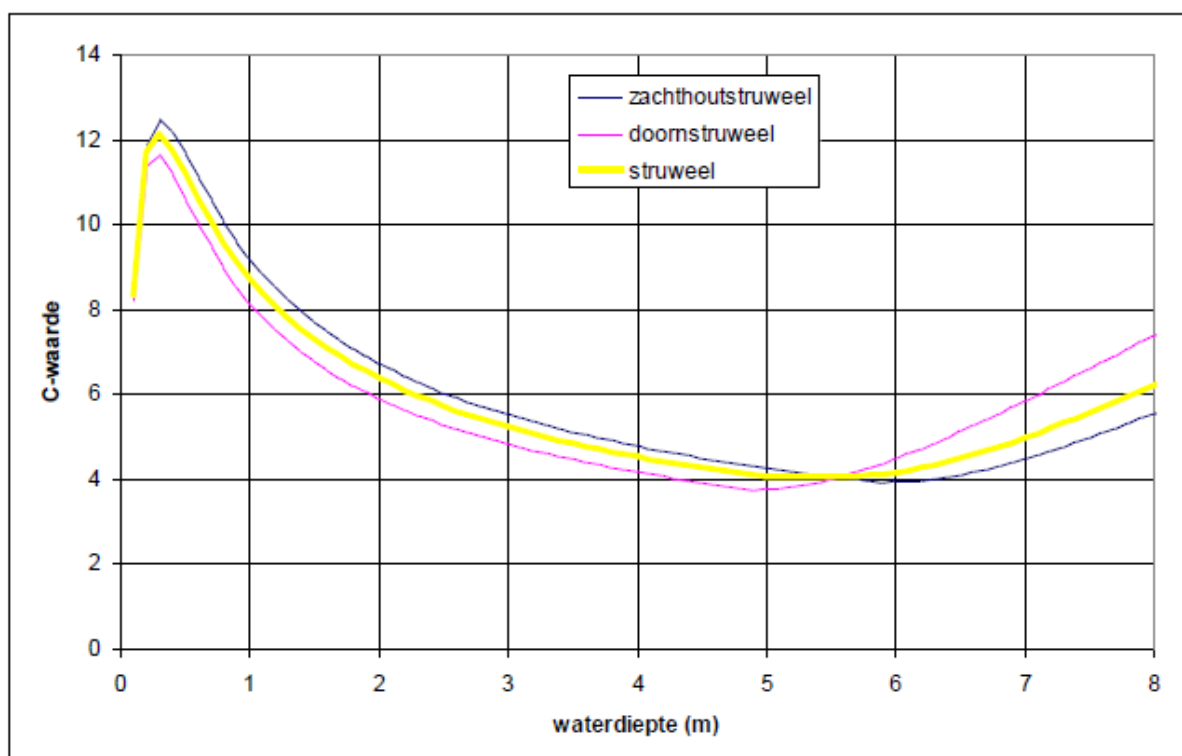
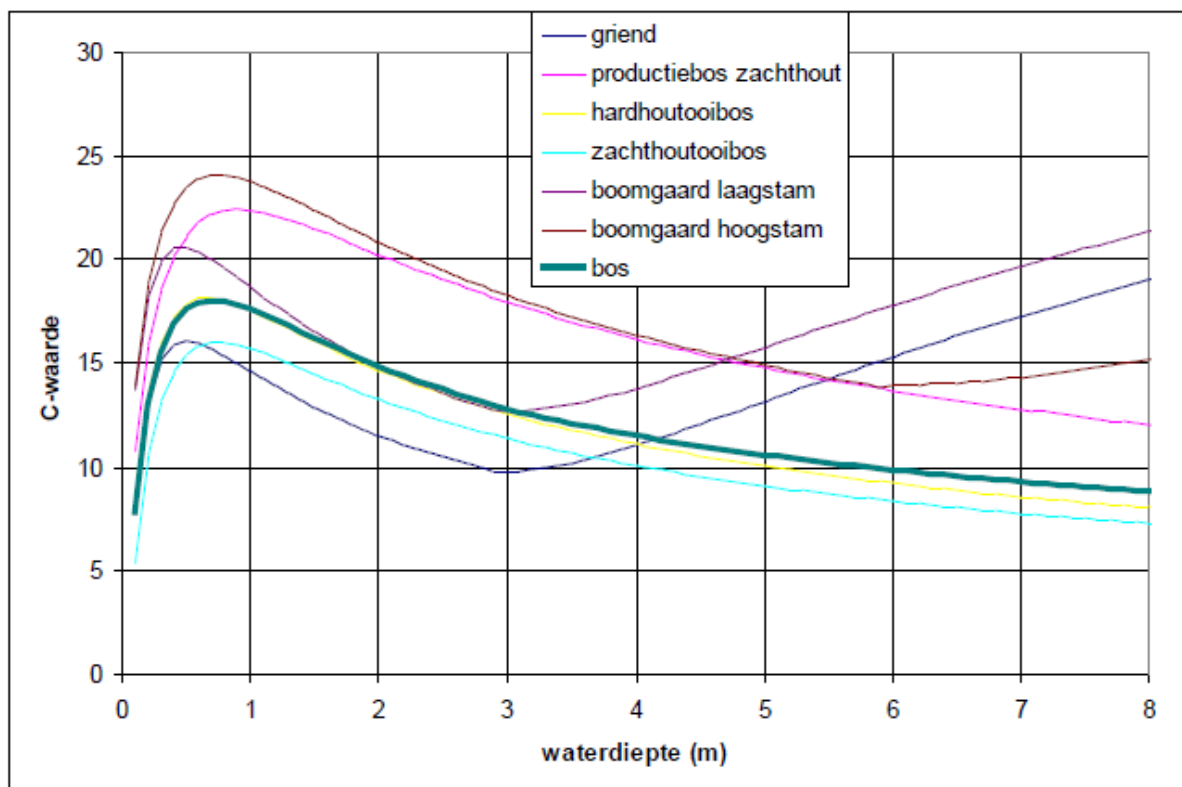
$$\text{Door ontgraving} = \frac{100 \text{ (ha)} \times 10.000 \left(\frac{\text{m}^2}{\text{ha}} \right) \times 2 \text{ (m)}}{1.000.000} \times -66 \text{ (mm)} = -132 \text{ mm}$$

$$\text{Door verruwing} = 100 \text{ (ha)} \times 0,01 \left(\frac{\text{km}^2}{\text{ha}} \right) \times (40 - 25) \times 5 = +75 \text{ mm}$$

Het netto-effect van de ingreep levert een verlaging van de MHW-stand van 57 mm op.

BIJLAGE B – LEGGERKLASSEN

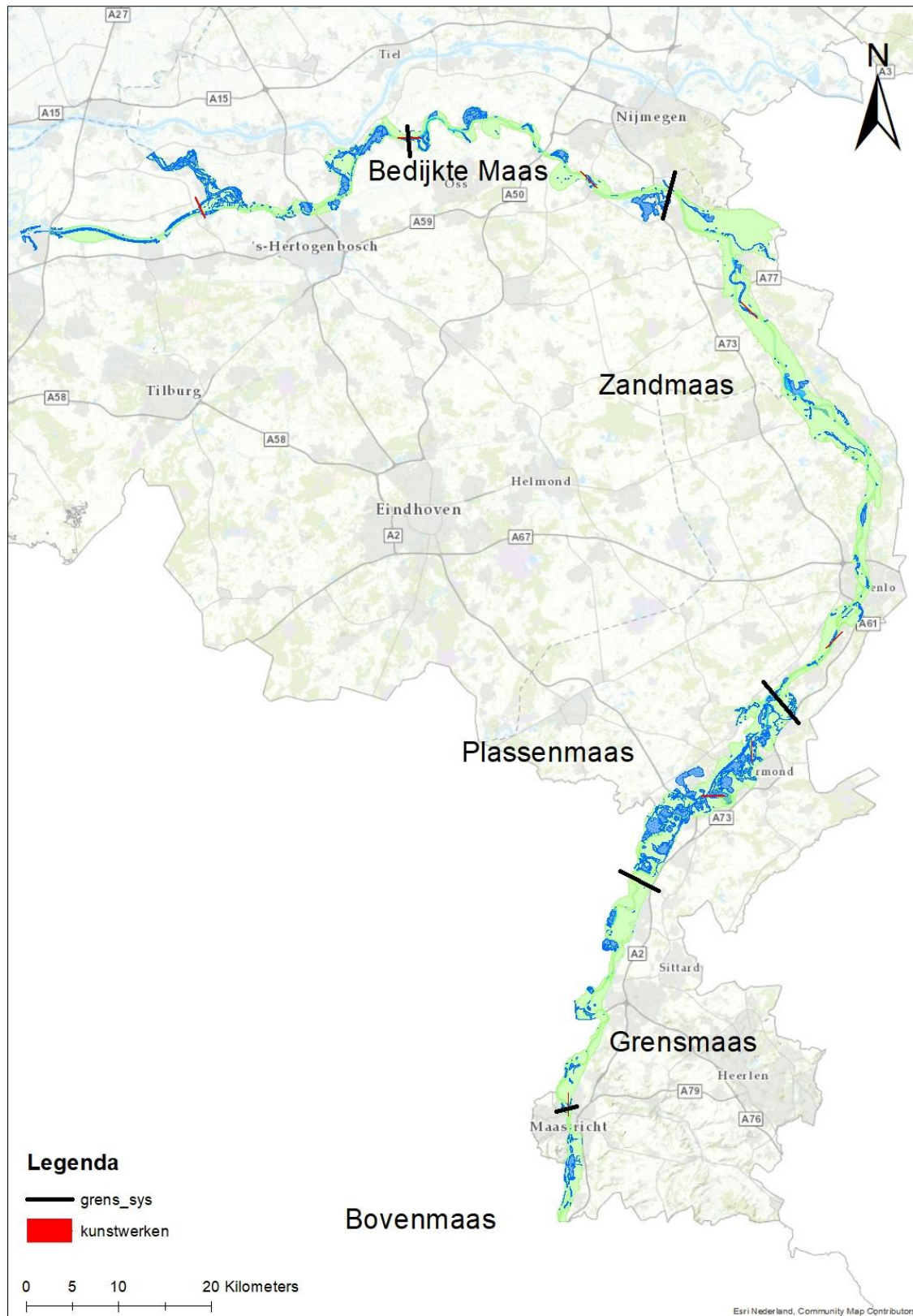




Tabel 13: Chézy verschillen tussen de vegetatieleggers

Waterdiepte (m)	Chézy verschil Gras naar riet en ruigte	Chézy verschil Gras naar bos	Chézy verschil Gras naar struweel
2,3	19	21	29
2,4	19	21	29
2,5	19	22	30
2,6	20	23	31
2,7	20	24	31
2,8	20	25	32
2,9	20	25	33

BIJLAGE C - SYSTEEMANALYSE



BIJLAGE D – BASELINE KAARTEN

In bijlage C is een kaart te zien van het uiterwaardgebied van de Maas in Nederland. Hierin zijn ook de grenslijnen van trajectverdeling en de locaties van stuwen aangegeven. Rondom de kunstwerken dienen ingrepen te worden vermeden omdat deze een versterkend effect op ingrepen kunnen hebben.

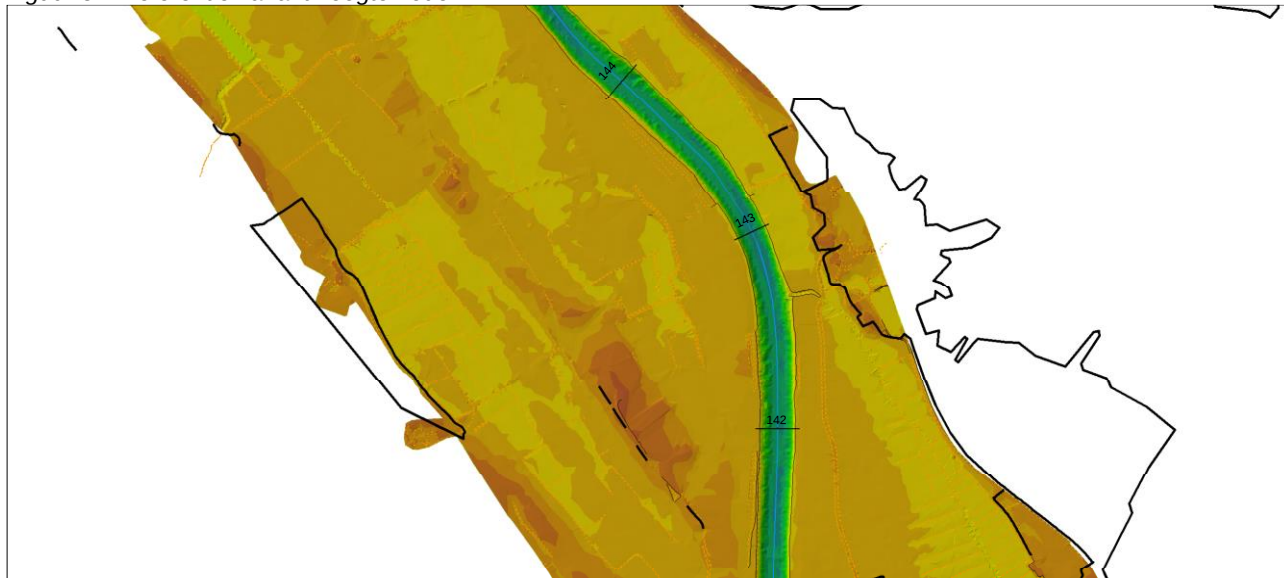
Naast kunstwerken zijn er andere factoren die een versterkend of verzwakkend effect op de MHW-effecten kunnen hebben. Aan de hand van de volgende figuren in dit hoofdstuk wordt gevisualiseerd wat de basis vormt het referentiemodel, het model waarbij geen ingreep is gemodelleerd. De figuren tonen het rivierengebied van de Plassenmaas tussen rivierkilometers 141 en 145 tussen Venray en Boxmeer. De figuren gelden enkel ter visualisering.

De basis van een model is de hoogtekaart. In Figuur 31 is het referentiehoogte model getoond. De basis hiervan is opgebouwd uit een aantal verschillende bestanden:

- Breuklijnen, dit zijn doorlopende routes met een harde kruinhoogte.
- Zomerbedhoogtes, puntenbestanden die hoogte van de waterloop opbouwen.
- Winterbedhoogtes, die zijn de hoogtepunten in de uiterwaard.
- Overlaten, harde hoogtegrenzen zoals kades of kribben. Deze vormen vaak de rand voor hoogwatervrij zones.

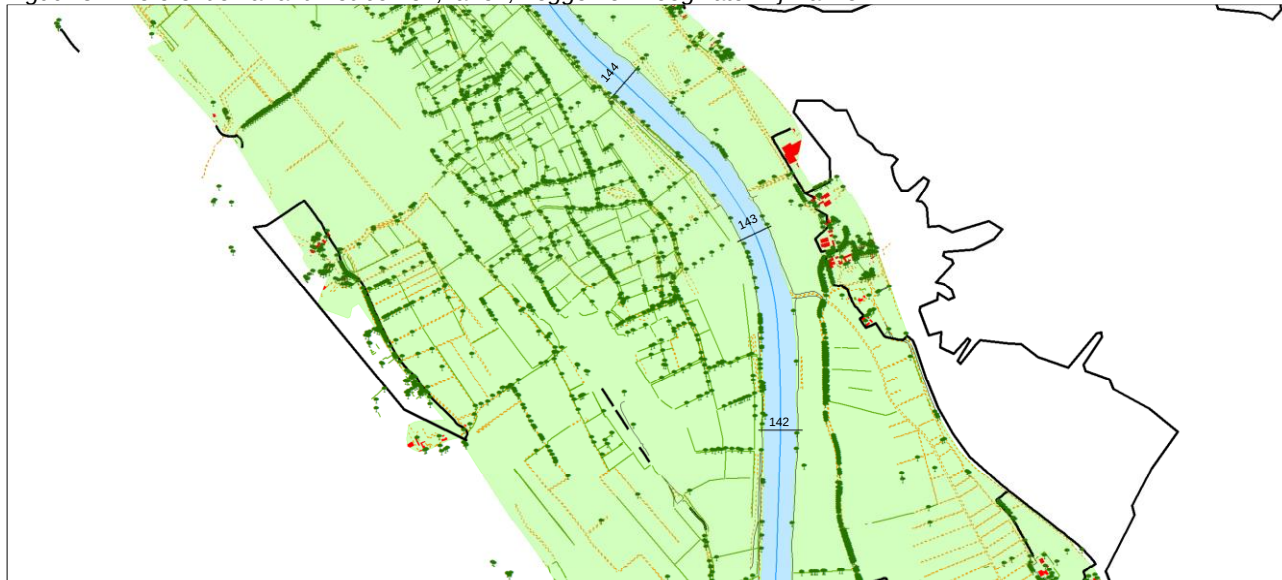
Omdat het onderzoek gaat over vergravingen in de uiterwaard wordt er niet gesleuteld aan de zomerbedhoogtes. Daarnaast zijn er vanuit Rijkswaterstaat allerlei restricties over ingrepen aan het zomerbed. Overlaten worden ook vermeden omdat deze harde hoogteverschillen aangeven.

Figuur 31: Referentie variant hoogtemodel.



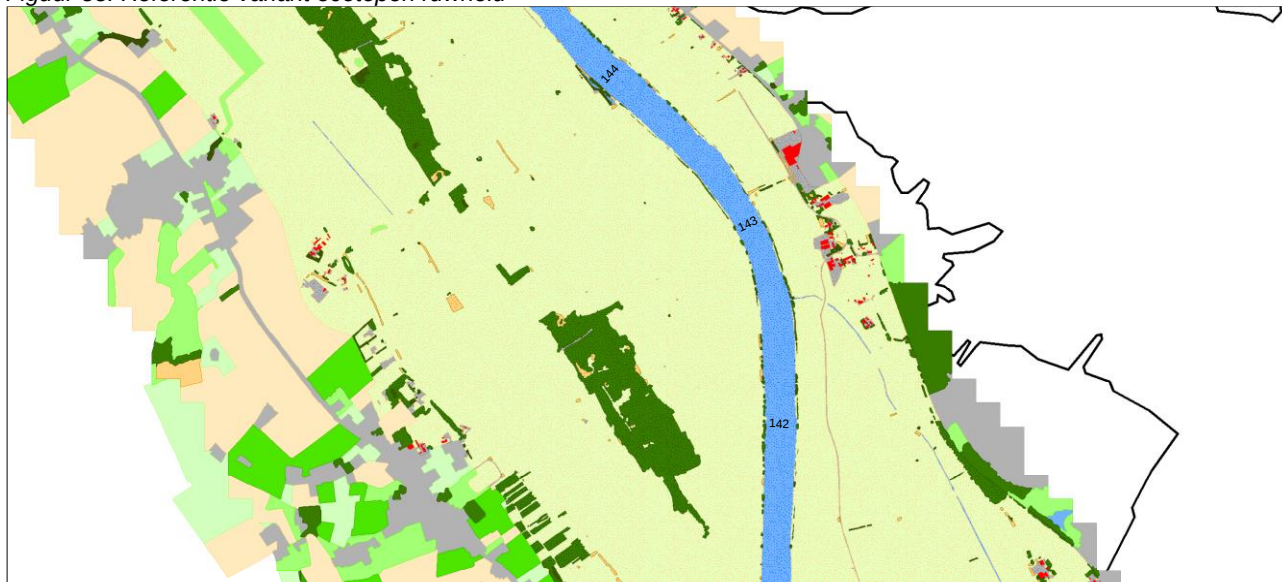
Samen met de ecotopen in Figuur 33 is bouwen de bomen, lanen, heggen en hoogwatervrij vlakken de ruwheid op. Het gros van deze onderdelen liggen in graslanden. Dit sluit dus een hoop gebieden uit voor de verandering van de ruwheid. Deze beïnvloeden namelijk de opstuwing waardoor niet meer te concluderen is of de opstuwing door een verandering van inrichting is, of dat heggen hier nog van invloed op zijn geweest. De hoogwatervrij zones zijn zones die niet overstromen bij hoogwater en zijn uitgesloten voor ingrepen.

Figuur 32: Referentie variant met bomen, lanen, heggen en hoogwatervrij vlakken



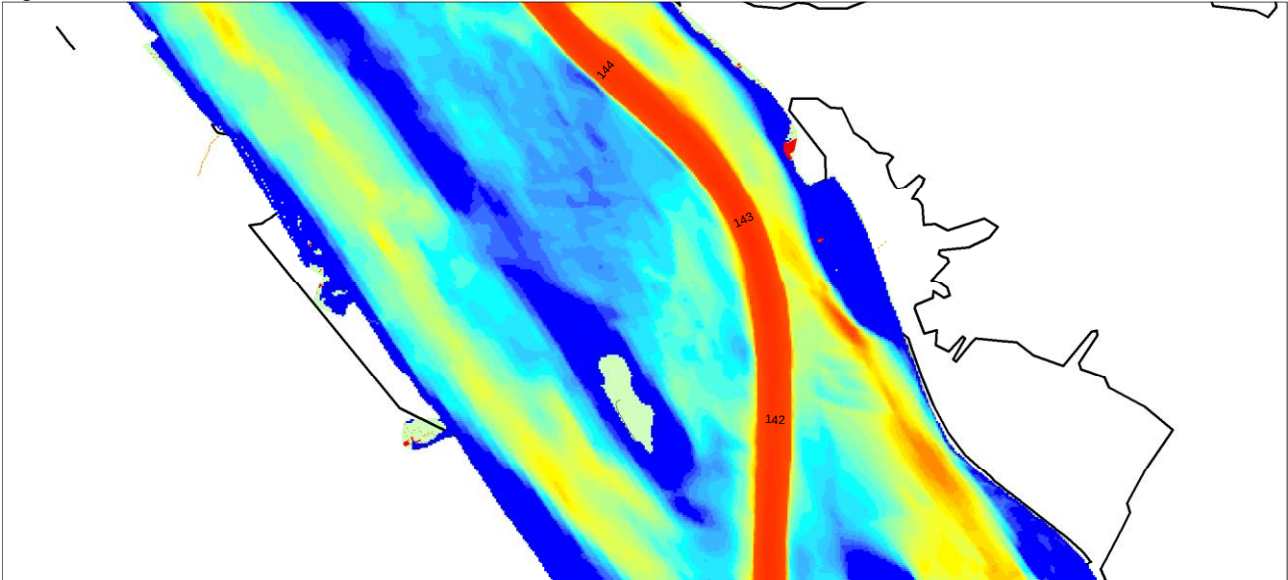
Bij ingrepen aan het uiterwaardgebied komt het vrijwel niet voor dat bos wordt omgevormd naar grasland. Vandaar dat ingrepen het onderzoek zich richt op verruwing. Dit houdt wel in dat reeds ruwe gebieden zijn uitgesloten. Figuur 33 toont de ecotopen kaart van het referentiegebied.

Figuur 33: Referentie variant ecotopen ruwheid

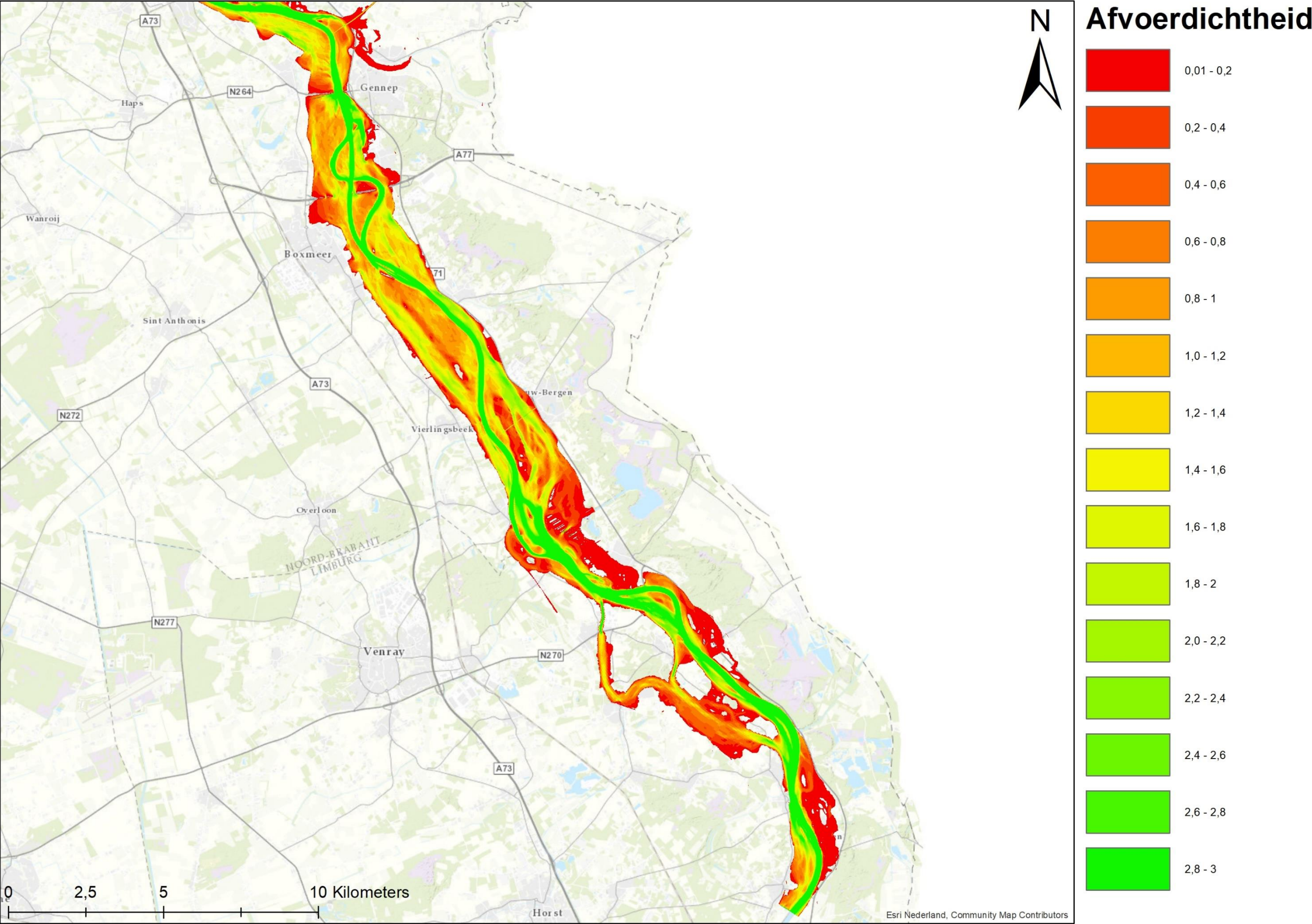


Op basis van de inrichtingen in de uiterwaard wordt kan een afvoerdichtheid kaart worden gemaakt, met blauw als stroomluw en rood als stroomvoierend. Zoals te zien aan de overeenkomende indeling is de afvoerdichtheid nauw verweven met de Figuren 7, 8 en 9.

Figuur 34: Referentie variant afvoerdichtheid



BIJLAGE E – AFVOERDICHTHEID



BIJLAGE F – CODERING VUISTREGELS

Er zijn 4 soorten ingrepen die worden getoetst. Verlaging, ophoging en twee vormen van ruwheidsverandering. Hiervoor is een codesysteem opgesteld, deze werkt als volgt. Elke eigenschap van een ingreep krijgt een letter, deze letters worden aan elkaar verbonden door '_', waarna aan de hand van de code te zien is welke ingreep het betreft. Aan het begin van de code staat de letter die het traject aangeeft. 'P' voor de Zandmaas en 'T' voor de Bedijkte Maas. De soorten ingrepen krijgen hierna de volgende code:

1. A, vergraving;
2. O, ophoging;
3. RS, ruwheidsverandering van grasland naar bos;
4. RZ, ruwheidsverandering van grasland naar struweel;
5. RX, ruwheidsverandering van grasland naar riet en ruigte.

Voor elke van deze vier wordt getoetst in welke mate verschillende parameters invloed hebben op het MHW-effect. De parameters die worden getoetst zijn:

1. V, de oriëntatie. De ligging van een ingreep ten opzichte van de stroming;
2. Q, de afvoerdichtheid. Hoeveel water door een kolom water passeert;
3. D, de diepte van een vergraving of ophoging;
4. G, de grootte. In het geval van ophogingen en vergravingen is dit in volume (Mm^3) en bij de ruwheidsveranderingen in de vorm van oppervlak (m^2).

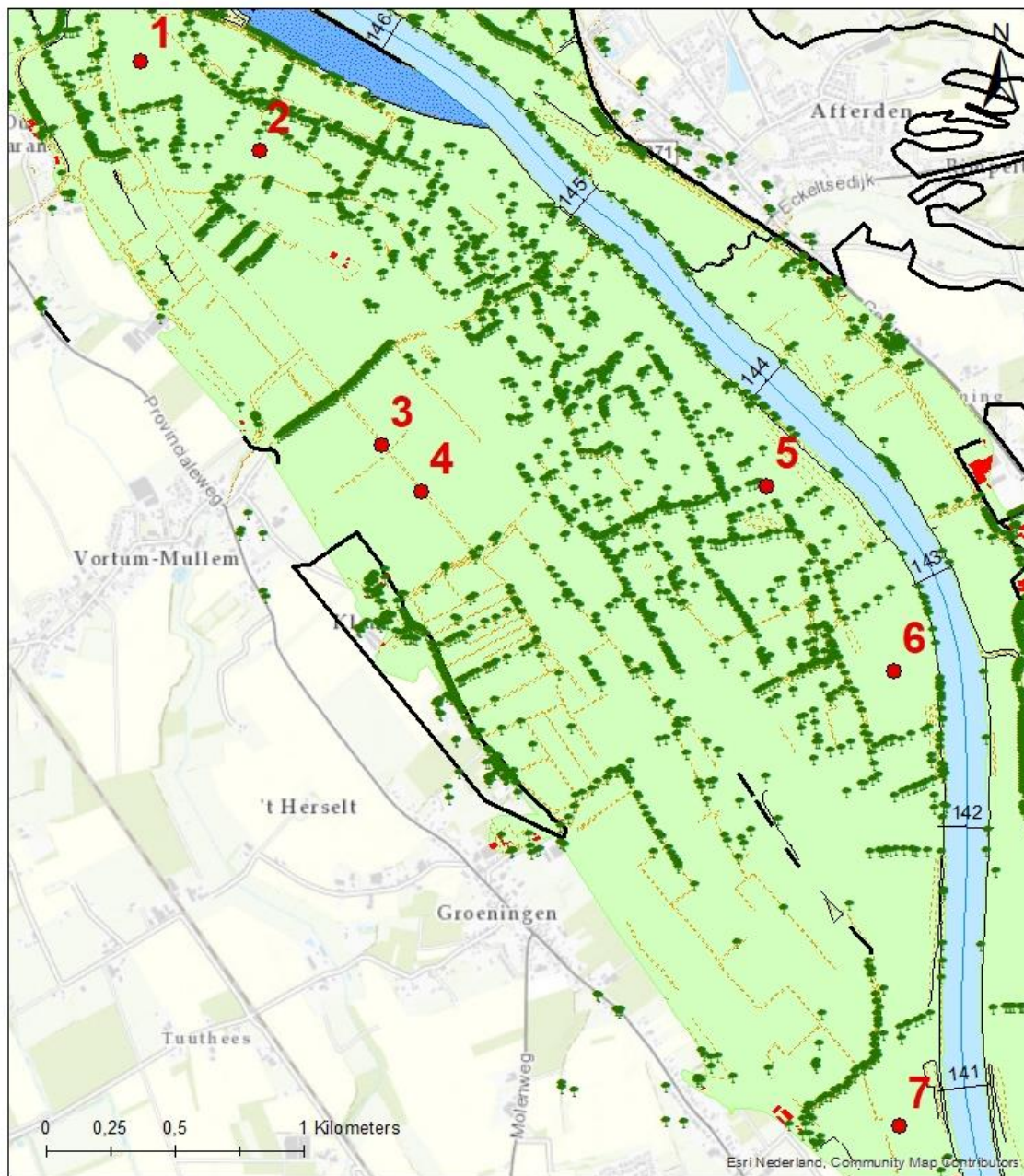
De code P_Q_A_a1 bestaat uit 4 onderdelen.

- De eerste letter staat voor het traject. In dit geval dit geval WAQUA-deelmodel 118-155.
- De tweede letter staat voor de parameter die getoetst wordt. In dit geval staat Q voor de afvoerdichtheid.
- De derde letter staat voor de soort ingreep. A staat voor een vergraving.
- De laatste letters staat voor de versie ingreep. De letters a1 staan voor de eerste ingreep voor deze toetsing. Aan de hand van een enkele ingreep kan je natuurlijk niets zeggen over het belang van de parameter. Zo kan het ook a2, a3 of a4 zijn.

Een kleine opmerkingen. Een aantal programma's zijn gebonden aan een cijferlimiet van 13 cijfers. Hierdoor is de letter a bij de ingrepen aan ruwheid weggelaten, zoals bij de code P_Q_RS_1.

Voor het traject 118-155 zijn in totaal 51 ingrepen berekend.

BIJLAGE G – LOCATIES INGREPEN



Locatie 1: P_Q_A_a4 - P_Q_O_a4	Locatie 3: P_Q_RS_3 - P_Q_RZ_3	Locatie 4: P_D_A_a1 - P_D_O_a1 P_D_A_a2 - P_D_O_a2 P_D_A_a3 - P_D_O_a3	Locatie 6: P_Q_A_a1 - P_Q_O_a1
Locatie 2: P_Q_RS_2 - P_Q_RZ_2	P_V_RS_1 - P_V_RZ_1 P_V_RS_2 - P_V_RZ_2 P_V_RS_3 - P_V_RZ_3	P_G_A_a1 - P_G_O_a1 P_G_A_a2 - P_G_O_a2	Locatie 7: P_Q_RS_1 - P_Q_RZ_1
	P_V_A_a1 - P_V_O_a1 P_V_A_a2 - P_V_O_a2 P_V_A_a3 - P_V_O_a3	P_Q_A_a3 - P_Q_O_a3	P_G_RS_1 - P_G_RZ_1 P_G_RS_2 - P_G_RZ_2 P_G_RS_3 - P_G_RZ_3
		Locatie 5: P_Q_A_a2 - P_Q_O_a2	

BIJLAGE H – RESULTATEN VERGRAVINGEN

Roodgedrukt staat er dubbel in.

Code	Afvoerdichtheid q gemiddeld referentie	Vorm	Diepte (m)	Oppervlakte (ha)	Verschil inhoud (Mm³)	Verlaging of opstuwing (m²)	Maximale effect (mm)		Berekend met vuistregel
P_Q_A_a2	0.84		2.2	8.6	-0.169	21.4	2		-1.83920422
P_Q_A_a1	1.30		2.2	8.62	-0.169	38.7	4.4		-3.25432159
P_Q_A_a4	1.33		2.2	9	-0.169	27.7	2.3		-3.33820171
P_Q_A_a3	1.76		2.2	8.57	-0.169	66.6	5.5		-4.82212543
P_D_A_a3	1.76		1	8.57	-0.082	-44.3	3.6		-2.3341406
P_D_A_a2	1.76		1.5	8.57	-0.120	-53.1	4.5		-3.41835804
P_D_A_a1	1.76		2	9	-0.155	-67.6	5.3		-4.4368107
P_Q_A_a3	1.76		2.2	8.57	-0.169	-66.6	5.5		-4.82212543
P_G_A_a1	1.71		2.2	18.82	-0.383	-139.0	11		-10.5386095
P_G_A_a2	1.65		2.2	28.93	-0.598	-197.7	15.7		-15.690865
P_V_A_a1	1.79	Parallel	1.5	6.57	-0.090	-44.8	-3.6		-2.63333795
P_V_A_a2	1.71	Schuin	1.5	6.58	-0.091	-34.4	-2.8		-2.49276417
P_V_A_a3	1.70	Haaks	1.5	6.575	-0.091	-29.8	-2.5		-2.46211744

T_Q_A_a1	1.98	2.2	7.48	-0.145	-69.9	-4.6	-4.81702631
T_Q_A_a2	1.02	2.2	7.48	-0.145	-31.8	-2.4	-2.03286432
T_G_A_a1	1.91	2.2	12.09	-0.242	-112.5	-7.3	-7.68593141

BIJLAGE I – RESULTATEN OPHOGINGEN

Roodgedrukt staat er dubbel in.

Code	Afvoerdichtheid q gemiddeld referentie	Vorm	Diepte (m)	Oppervlakte (m ²)	Verschil inhoud (Mm ³)	Verlaging of opstuwing (m ²)	Maximale effect (mm)		Berekend met vuistregel
P_Q_O_a2	0.84		2.2	8.6	0.169	60.6	6.5		7.714812807
P_Q_O_a1	1.30		2.2	8.62	0.169	87.9	10.5		13.63326248
P_Q_O_a4	1.33		2.2	9	0.169	58.8	5		13.98223978
P_Q_O_a3	1.76		2.2	8.57	0.170	243.5	19.4		20.28730504
P_D_O_a3	1.76		1	8.57	0.082	75.3	6.4		9.759450577
P_D_O_a2	1.76		1.5	8.57	0.120	133.6	10.8		14.29275354
P_D_O_a1	1.76		2	9	0.156	211.0	16.9		18.59467067
P_Q_O_a3	1.76		2.2	8.57	0.170	243.5	19.4		20.28730504
P_G_O_a1	1.71		2.2	18.82	0.383	550.0	43.6		44.0709268
P_G_O_a2	1.65		2.2	28.93	0.598	918.2	72.4		65.62972062
P_V_O_a1	1.79	Parallel	1.5	6.57	0.090	93.6	7.7		10.98717703
P_V_O_a2	1.71	Schuin	1.5	6.57	0.090	141.2	11.5		10.38595985
P_V_O_a3	1.70	Haaks	1.5	6.52	0.090	151.9	12.4		10.24781997

T_Q_O_a1	1.98	2.2	7.47	0.145	462.1	30.2	20.12808237
T_Q_O_a2	1.02	2.2	7.47	0.145	92.7	9.2	8.525214237
T_G_O_a1	1.91	2.2	7.47	0.242	463.3	30.2	32.12191116

BIJLAGE J – RESULTATEN VERRUWING

Roodgedrukt staat er dubbel in.

Code	Afvoerdichtheid q gemiddeld referentie	Vorm	Chézy verschil	Oppervlakte (ha)	Verlaging of opstuwing (m²)	Maximale effect (mm)		Berekend met de eerste vuistregel	Berekend met de correcte vuistregel
P_G_RZ_1	1.23		29	13.71	271.84	29.4		24.29226061	12.15
P_G_RZ_2	1.24		30	10.54	217.12	23.7		20.50611297	10.25
P_G_RZ_3	1.29		30	6.74	148.53	16.6		14.28225863	7.14
P_Q_RZ_1	1.26		31	5.42	97.20	11		11.65452516	5.83
P_G_RS_1	1.23		21	13.71	124.00	14.1		12.85225866	6.43
P_G_RS_2	1.24		22	10.54	97.71	11.4		11.12253749	5.56
P_G_RS_3	1.29		22	6.74	65.34	7.8		7.746712279	3.87
P_Q_RS_1	1.26		23	5.42	45.18	5.4		6.468517577	3.23
P_G_RX_1	1.23		19	13.71	119.73	13.7		10.54988494	5.27
P_G_RX_2	1.24		20	10.54	93.70	10.9		9.216392168	4.61
P_G_RX_3	1.29		20	6.74	64.36	7.3		6.41910521	3.21
P_Q_RX_1	1.26		20	5.42	43.34	5.2		4.910032223	2.46

P_Q_RZ_1	1.26		31	5.42	97.20	11	11.65452516	5.83
P_Q_RZ_2	0.79		33	5.42	19.89	1.7	4.061474521	2.03
P_Q_RZ_3	1.80		32	5.42	123.39	10.1	30.2553095	15.13
P_Q_RS_1	1.26		23	5.42	45.18	5.4	6.468517577	3.23
P_Q_RS_2	0.79		25	5.42	6.52	0.8	2.348895583	1.17
P_Q_RS_3	1.80		25	5.42	70.57	5.9	18.59262268	9.30
P_V_RZ_1	1.83	Parallel	32	5.37	115.23	9.4	31.0	15.5
P_V_RZ_2	1.73	Schuin	31	5.42	187.47	14.8	25.8	12.9
P_V_RZ_3	1.71	Haaks	31	5.44	241.63	19.3	24.8	12.4
P_V_RS_1	1.83	Parallel	25	5.37	67.26	5.6	19.1	9.5
P_V_RS_2	1.73	Schuin	25	5.42	88.60	7.3	16.8	8.4
P_V_RS_3	1.71	Haaks	24	5.44	102.04	8.4	15.0	7.5
T_Q_RS_1	1.28		21	4	29.77	2.2	4.1	2.1
T_Q_RS_2	0.80		22	4.04	16.46	1.2	1.4	0.7
T_Q_RZ_1	1.28		29	4	53.29	3.9	7.8	3.9

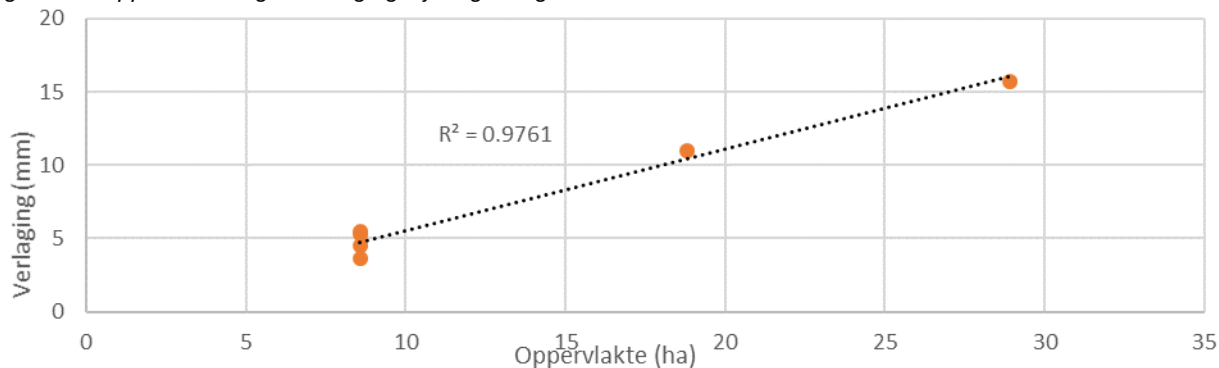
T_Q_RZ_2	0.80	30	4.04	28.91	2.1	2.6	1.3
T_G_RS_1	1.32	21	8.64	67.98	5.0	9.7	4.8
T_G_RZ_1	1.32	29	8.64	122.16	9.0	18.3	9.1

BIJLAGE K – LEIDENDE PARAMETER VERGRAVINGEN EN OPHOGINGEN

Deze bijlage ligt de keuze van leidende parameter bij vergravingen en ophoging uit door middel van grafiek en tabelmateriaal. Ophogingen hebben hetzelfde effect als vergravingen, zij het in een sterker negatief effect. Vandaar dat in deze bijlage de keuze vanuit vergravingen worden uitgelegd.

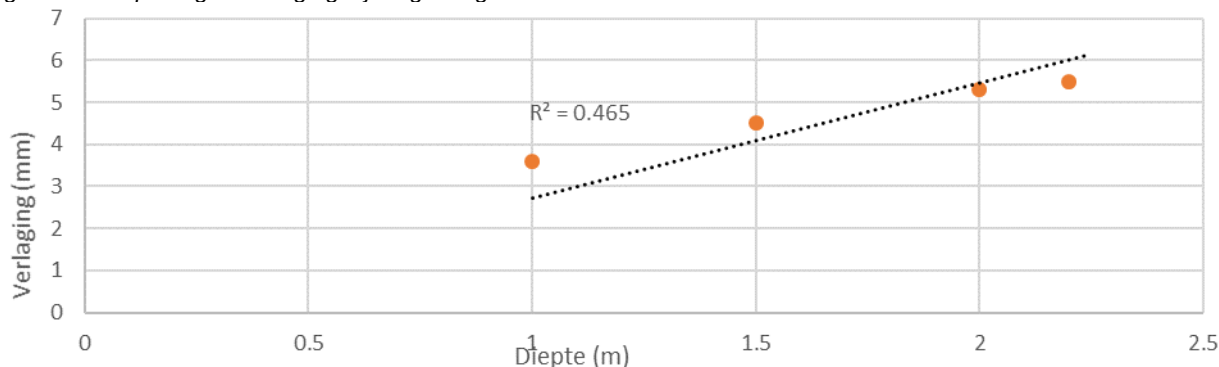
Code	Afvoerdichtheid q gemiddeld referentie	Diepte (m)	Oppervlakte (ha)	Verschil inhoud (Mm ³)	Verlaging of opstuwing (m ²)	Maximale effect (mm)
P_D_A_a3	1.76	1	8.57	-0.082	-44.3	3.6
P_D_A_a2	1.76	1.5	8.57	-0.120	-53.1	4.5
P_D_A_a1	1.76	2	9	-0.155	-67.6	5.3
P_Q_A_a3	1.76	2.2	8.57	-0.169	-66.6	5.5
P_G_A_a1	1.71	2.2	18.82	-0.383	-139.0	11
P_G_A_a2	1.65	2.2	28.93	-0.598	-197.7	15.7

Figuur 35: Oppervlakte tegen verlaging bij vergravingen



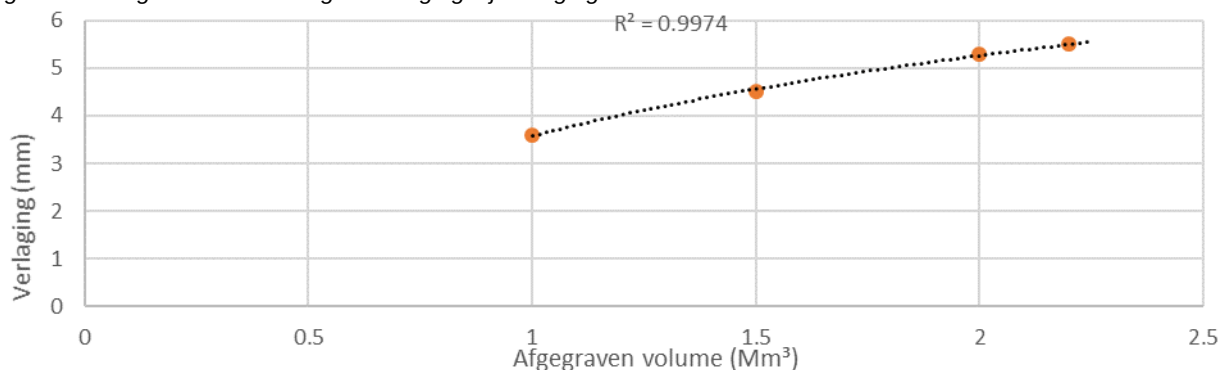
Er bestaat een goed verband tussen de oppervlakte en de verlaging. De vier vergravingen die boven elkaar liggen zijn de drie diepte en de afvoerdichtheid ingrepen (bovenste vier in de tabel).

Figuur 36: Diepte tegen verlaging bij vergravingen



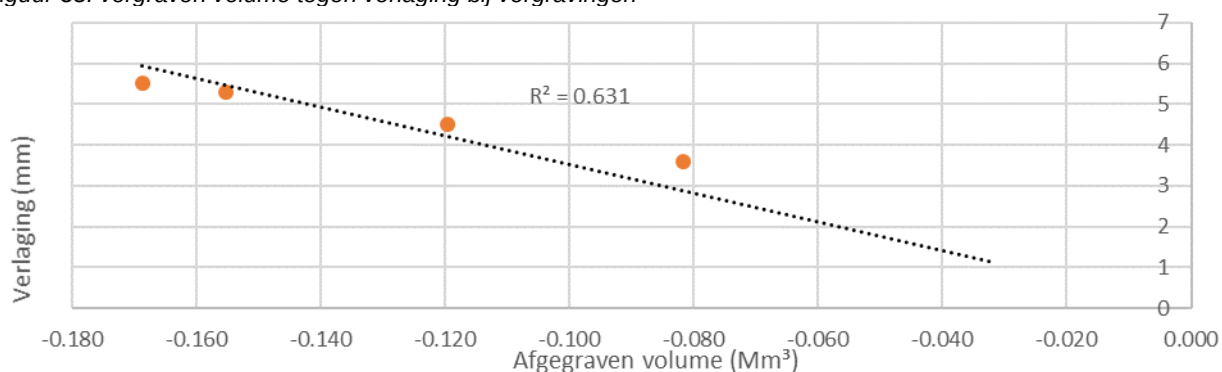
Wanneer de diepte tegen de verlaging wordt uitgezet en wordt gezocht naar een lineair verband is er geen goede.

Figuur 37: Vergraven volume tegen verlaging bij verlagingen



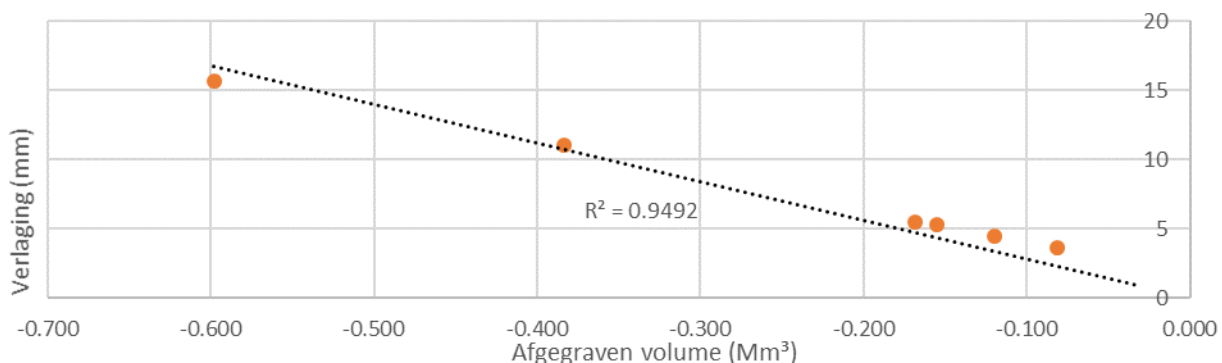
Echter, bij een logaritmisch verband, een die afzwakt bij een toenemende diepte is er een erg goed verband.

Figuur 38: vergraven volume tegen verlaging bij vergravingen



Bij het uitzetten van het vergraven volume tegen de verlaging ontstaat de bovenstaande grafiek. Deze geeft nog steeds een sterk verband. Een lage ontgraven geeft relatief meer MHW-effect dan een diepere, in lijn met de trendlijn van Figuur 37. De conclusie luidt dat oppervlakte als leidende parameter, met diepte als corrigerende parameter de beste manier zou zijn voor het opstellen van de meest correcte vuistregel.

Figuur 39: Afgegraven volume tegen de verlaging



Toch is de diepte, kijkend naar bovenstaand figuur maar een kleine corrigerende factor. Daarnaast zijn de bevindingen van diepte van de vergraving maar tot 2,2 m. Om hier meer over te zeggen zijn diepere ontgravingen nodig. Hiervoor was echter een tijdgebrek in het onderzoek.

Daarnaast biedt het afgegraven volume tegen de verlaging nog steeds een erg geschikte basis voor de vuistregel, al is het niet de meest correcte. De vuistregels dienen een goede inschatting te geven voor het effect. Deze wordt gegeven met afgegraven volume. De hypothese is dat de trendlijn afzwakt bij grotere ontgravingdieptes maar hier kan met de resultaten van dit onderzoek niets over worden gezegd.

BIJLAGE L – BEREKENINGEN CORRIGERENDE WAARDES

Afvoerdichtheid, vergraving

De formule van de trendlijn ingevuld met 1,73 m³/s geeft een waarde van 4,90 mm. In de middelste kolom van de onderstaande tabel is het MHW-effect bij verschillende afvoerdichtheden berekenend met de formule van de trendlijn. De rechterkolom zijn de waarden van de middelste kolom, gedeeld door het MHW-effect van de afvoerdichtheid 1,73 m³/s.

q-waarde	Waarde	corrigerende factor
2	5.91	1.21
1.8	5.14	1.05
1.6	4.41	0.90
1.4	3.70	0.76
1.2	3.02	0.62
1	2.38	0.49
0.8	1.78	0.36
Gemid	1.73	4.8986

Afvoerdichtheid, ophoging

De formule van de trendlijn ingevuld met 1,73 m³/s geeft een MHW-effect van 13,58 mm. De berekening van de waarden gebeurt op dezelfde methode als bij de bovenstaande paragraaf.

q-waarde	MHW-effect	Corrigerende factor
2	16.36	1.20
1.8	14.26	1.05
1.6	12.23	0.90
1.4	10.27	0.76
1.2	8.40	0.62
1	6.62	0.49
0.8	4.95	0.36

Afvoerdichtheid, verruwing

De formule van de trendlijn ingevuld met een waarde van 1,25 m³/s geeft een MHW-effect van 3,20 mm. Door andere afvoerdichtheden in te vullen in dezelfde formule komt de middelste kolom tot stand. De rechterkolom komt tot stand door het delen van de middelste kolom door 3,20 mm.

q-waarde	MHW-effect	Corrigerende factor
2	10.21	3.19
1.8	7.86	2.45
1.6	5.86	1.83
1.4	4.20	1.31
1.2	2.86	0.89
1	1.82	0.57
0.8	1.04	0.33

BIJLAGE M – VUISTREGELS VERGRAVING

Code	Afvoerdichtheid q gemiddeld referentie	Verschil inhoud (Mm³)	Berekend (mm)	Berekend met vuistregel
P_Q_A_a2	0.84	-0.169	-2	-1.8392
P_Q_A_a1	1.30	-0.169	-4.4	-3.25432
P_Q_A_a4	1.33	-0.169	-2.3	-3.3382
P_Q_A_a3	1.76	-0.169	-5.5	-4.82213
P_D_A_a3	1.76	-0.082	-3.6	-2.33414
P_D_A_a2	1.76	-0.120	-4.5	-3.41836
P_D_A_a1	1.76	-0.155	-5.3	-4.43681
P_G_A_a1	1.71	-0.383	-11	-10.5386
P_G_A_a2	1.65	-0.598	-15.7	-15.6909
P_V_A_a1	1.79	-0.090	-3.6	-2.63334
P_V_A_a2	1.71	-0.091	-2.8	-2.49276
P_V_A_a3	1.70	-0.091	-2.5	-2.46212
T_Q_A_a1	1.98	-0.145	-4.6	-4.81703
T_Q_A_a2	1.02	-0.145	-2.4	-2.03286
T_G_A_a1	1.91	-0.242	-7.3	-7.68593

BIJLAGE N – VUISTREGELS OPHOGINGEN

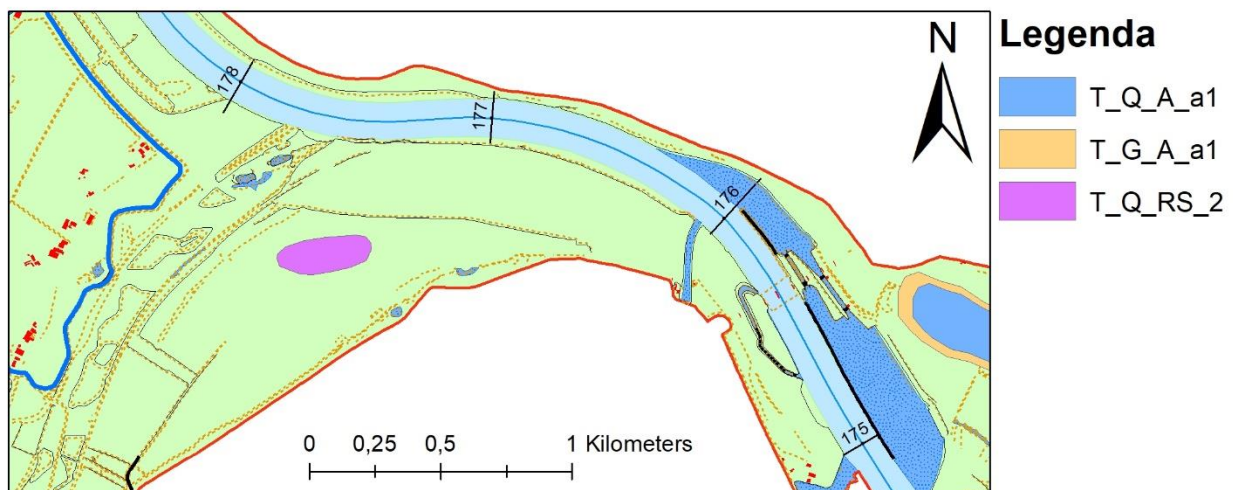
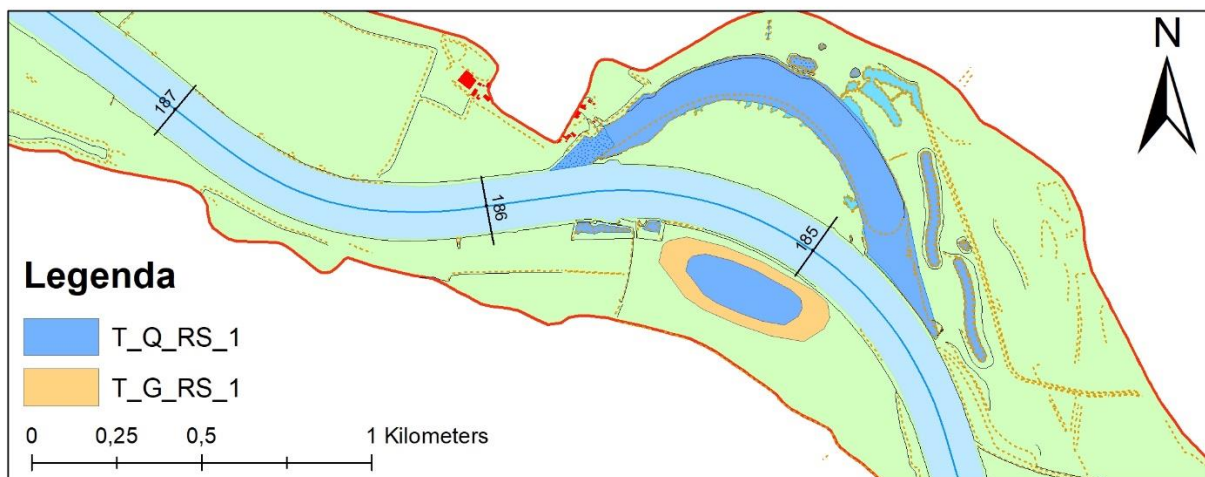
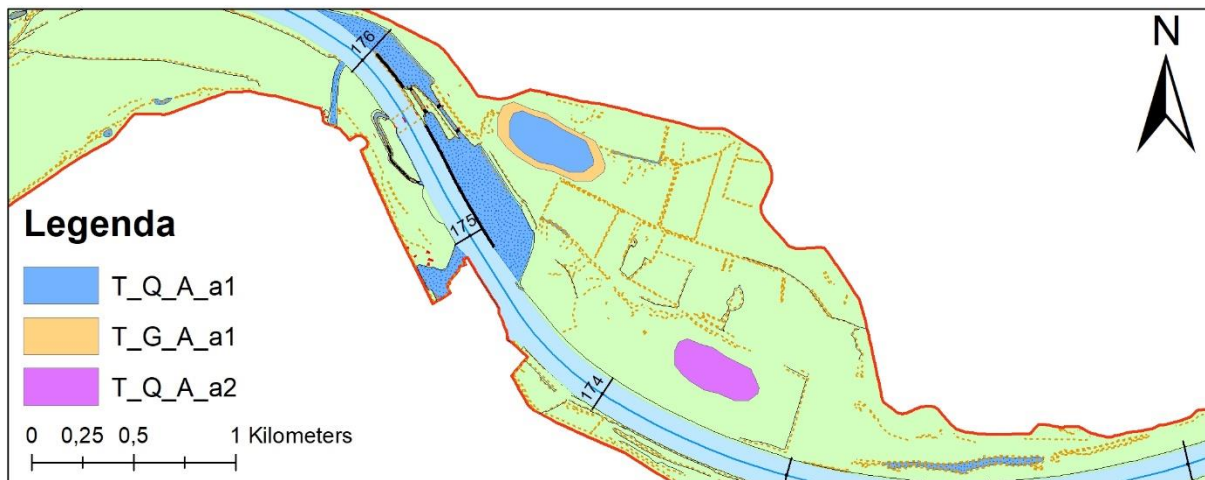
Code	Afvoerdichtheid q gemiddeld referentie	Verschil inhoud (Mm³)	Maximale effect (mm)	Berekend met vuistregel
P_Q_O_a2	0.84	0.169	6.5	7.714813
P_Q_O_a1	1.30	0.169	10.5	13.63326
P_Q_O_a4	1.33	0.169	5	13.98224
P_Q_O_a3	1.76	0.170	19.4	20.28731
P_D_O_a3	1.76	0.082	6.4	9.759451
P_D_O_a2	1.76	0.120	10.8	14.29275
P_D_O_a1	1.76	0.156	16.9	18.59467
P_G_O_a1	1.71	0.383	43.6	44.07093
P_G_O_a2	1.65	0.598	72.4	65.62972
P_V_O_a1	1.79	0.090	7.7	10.98718
P_V_O_a2	1.71	0.090	11.5	10.38596
P_V_O_a3	1.70	0.090	12.4	10.24782
T_Q_O_a1	1.98	0.145	30.2	20.12808
T_Q_O_a2	1.02	0.145	9.2	8.525214
T_G_O_a1	1.91	0.242	30.2	32.12191

BIJLAGE O – VERRUWING

Code	Afvoerdichtheid q gemiddeld referentie	Chézy verschil	Oppervlakte (ha)	Maximale effect (mm)	Berekend met oude vuistregel	Berekend met correcte vuistregel
P_G_RZ_1	1.23	29	13.71	29.4	24.29	12.15
P_G_RZ_2	1.24	30	10.54	23.7	20.51	10.25
P_G_RZ_3	1.29	30	6.74	16.6	14.28	7.14
P_G_RS_1	1.23	21	13.71	14.1	12.85	6.43
P_G_RS_2	1.24	22	10.54	11.4	11.12	5.56
P_G_RS_3	1.29	22	6.74	7.8	7.75	3.87
P_G_RX_1	1.23	19	13.71	13.7	10.55	5.27
P_G_RX_2	1.24	20	10.54	10.9	9.22	4.61
P_G_RX_3	1.29	20	6.74	7.3	6.42	3.21
P_Q_RZ_1	1.26	31	5.42	11	11.65	5.83
P_Q_RZ_2	0.79	33	5.42	1.7	4.06	2.03
P_Q_RZ_3	1.80	32	5.42	10.1	30.26	15.13
P_Q_RS_1	1.26	23	5.42	5.4	6.47	3.23
P_Q_RS_2	0.79	25	5.42	0.8	2.35	1.17
P_Q_RS_3	1.80	25	5.42	5.9	18.59	9.30
P_V_RZ_1	1.83	32	5.37	9.4	31.0	15.5
P_V_RZ_2	1.73	31	5.42	14.8	25.8	12.9
P_V_RZ_3	1.71	31	5.44	19.3	24.8	12.4
P_V_RS_1	1.83	25	5.37	5.6	19.1	9.5
P_V_RS_2	1.73	25	5.42	7.3	16.8	8.4
P_V_RS_3	1.71	24	5.44	8.4	15.0	7.5
T_Q_RS_1	1.28	21	4	2.2	4.1	2.1

T_Q_RS_2	0.80	22	4.04	1.2	1.4	0.7
T_Q_RZ_1	1.28	29	4	3.9	7.8	3.9
T_Q_RZ_2	0.80	30	4.04	2.1	2.6	1.3
T_G_RS_1	1.32	21	8.64	5.0	9.7	4.8
T_G_RZ_1	1.32	29	8.64	9.0	18.3	9.1

BIJLAGE P – LOCATIES INGREPEN BEDIJKTE MAAS



BIBLIOGRAFIE

- Arcadis. (2015). *Gevoeligheidsanalyse vegetatielegger in Waqua*.
- Asselman, N., Barneveld, H., Klijn, F., & van Winden, A. (2017). *Het Verhaal van de Maas*.
- Deltacommissaris. (2018). *Ruimtelijk Perspectief Maas*.
- Deltacommissaris. (2019). *Deltaprogramma 2019*.
- Harke, J. (2006). *Bouwen op palen in uiterwaarden*.
- Hendriks, M. R. (2010). *Introduction to Physical Hydrology*.
- Hooijer, A., Barneveld, H., Bos, M., Hoffmans, G., Schropp, M., & Struijk, R. (2007). *Leidraad Rivieren*.
- Peters, B., Kater, E., & Geerling, G. (2006). *Cyclisch beheer in uiterwaarden*. Staatsbosbeheer, ARK, Rijkswaterstaat en de Radboud Universiteit Nijmegen.
- Querner, E. P., & Makaske, A. (2012). *Verkenning van stromingsweerstand*. Wageningen: Alterra Wageningen UR.
- Rijksoverheid. (2016). *Nationaal Waterplan 2016-2021*.
- Rijkswaterstaat. (2007). *Leidraad Rivieren*.
- Rijkswaterstaat. (2014). *Toelichting op het onderdeel Vegetatielegger*.
- Rijkswaterstaat. (2017). *Gebruikshandleiding WAQVIEW*.
- Rijkswaterstaat. (2017). *Rivierkundig Beoordelingskader voor ingrepen in de Grote Rivieren*.
- RIZA. (2003). *Stromingsweerstand vegetatie in uiterwaarden*.
- Smart Rivers. (sd). *De Getijdenmaas*.
- Stichting Smart Rivers. (2012). *Smart Rivers*. Opgehaald van Over Smart Rivers: <http://www.smartivers.nl/over-smart-rivers/>
- Stuurgroep Deltaprogramma Maas. (2016). *Regionaal voorstel Maas 2016*.
- Wolters, H., Platteeuw, M., & Schoor, M. (2001). *Richtlijnen voor inrichting en beheer van uiterwaarden*.

COLOFON

UIT HET VUISTJE

EMPIRISCHE VUISTREGELS VOOR INGREPEN IN DE UITERWAARDEN VAN DE MAAS

KLANT

Arcadis

AUTEUR

Pieter van Leeuwen

ONZE REFERENTIE

DATUM

6 januari 2020

STATUS

Definitief

GECONTROLEERD DOOR

VRIJGEGEVEN DOOR

Bas van Dongen
Rivierkundig adviseur

Pieter van Leeuwen
Stagiair

Arcadis Nederland B.V.

Postbus 1018
5200 BA 's-Hertogenbosch
Nederland
+31 (0)88 4261 261

www.arcadis.com