

BOI Standaard instellingen

Kalibratie van de XBeach model parameters



BOI Standaard instellingen

Kalibratie van de XBeach model parameters

Auteur(s)

Robert McCall
Anouk de Bakker
Ellen Quataert
Roel de Goede
Lodewijk de Vet
Menno de Ridder
Marlies van der Lugt
Dano Roelvink

Project context (NL/EN)

Dit rapport is onderdeel van het project Plan Zandige Waterkeringen. Plan Zandige Waterkeringen wordt gefinancierd door het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, Rijkswaterstaat, STOWA, Waterschap Scheldestromen, Waterschap Hollandse Delta, Hoogheemraadschap van Delfland, Hoogheemraadschap van Rijnland, Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier en het Wetterskip Fryslân. Dit project richt zich op de vernieuwing van het instrumentarium ten behoeve van het beheren, beoordelen en ontwerpen van zandige waterkeringen. Het project Plan Zandige Waterkeringen maakt deel uit van het programma BOI (Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium).

This report is part of the project “Plan Zandige Waterkeringen” (Plan for Sandy Coastal Defences), which is financed by the Ministry of Infrastructure and Water Management of the Netherlands, Rijkswaterstaat, STOWA, Waterschap Scheldestromen, Waterschap Hollandse Delta, Hoogheemraadschap van Delfland, Hoogheemraadschap van Rijnland, Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier and Wetterskip Fryslân. The “Plan Zandige Waterkeringen” project aims to develop a new instrument to manage, assess and design sandy coastal defences. The project is part of the BOI-program.

BOI Standaard instellingen

Kalibratie van de XBeach model parameters

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	de heer S. Pluis; de heer R. Wilmink
Klant review	R. Wilmink, M. Bottema, N. van Kuik, M. Klein, S. Pluis, J. van de Graaff
Referenties	-
Trefwoorden	BOI, XBeach model, Duinerosie, standaard instellingen

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	22-03-2022
Projectnummer	11206818-018
Document ID	11206818-018-GEO-0006
Pagina's	125
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Robert McCall Anouk de Bakker Ellen Quataert Roel de Goede Lodewijk de Vet Menno de Ridder Marlies van der Lugt Dano Roelvink Robbin van Santen (Arcadis) Henk Steetzel (Arcadis) Laura Coumou (Arcadis)	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
1.0	Robert McCall Anouk de Bakker Ellen Quataert Roel de Goede Lodewijk de Vet Menno de Ridder Marlies van der Lugt Dano Roelvink Robbin van Santen (Arcadis) Henk Steetzel (Arcadis)	Joost den Bieman	Jan Aart van Twillert	

	Laura (Arcadis)	Coumou		
--	--------------------	--------	--	--

Samenvatting

Binnen het BOI-project ("Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium") ontwikkelen Deltares en Arcadis een aanpak om de waterveiligheid van het Nederlandse duinsysteem te beoordelen. Hierin wordt het proces-gebaseerde model XBeach verder ontwikkeld, gekalibreerd en gevalideerd. Door een veelvoud aan ontwikkelingen aan het XBeach model tijdens het BOI-project, alsmede gedurende de voorgaande jaren, is een hernieuwde, systematische afleiding van de modelparameters nodig. Daarnaast moet een correcte en betrouwbare toepassing van het XBeach model, met de daarbij behorende condities, worden gewaarborgd voor wettelijke beoordeling van het Nederlandse duinsysteem. Het huidige rapport beschrijft de resultaten van de vernieuwde XBeach model kalibratie.

Proces

De kalibratie van de modelparameters is in twee delen uitgevoerd. Deel 1 van dit rapport beschrijft het afleiden van de concept BOI-standaardinstellingen op basis van data uit laboratorium experimenten. Deel 2 van dit rapport beschrijft het kalibreren van drie morfologische modelparameters van de concept BOI-standaardinstellingen op basis van velddata, om de nauwkeurigheid van het XBeach model met betrekking tot duinafslag in veldsituaties te vergroten. Deze modelparameters hebben betrekking op ondiep water sedimenttransport (*facAs* en *wets/p*) en korrelgrootteafhankelijkheid in het afslagproces (α_{D50}). De optimale standaardinstellingen die uit Deel 2 volgen, zijn de 'definitieve BOI-standaardinstellingen' voor toepassingen binnen het programma BOI.

De werkzaamheden die in dit rapport beschreven worden, zijn in Projectfase 0 (Deel 1 van dit rapport) en Projectfase 1 (Deel 2 van dit rapport) van het project BOI Zandige Waterkeringen uitgevoerd.

Definitieve BOI standaard instellingen

Voor verdere toepassing van het XBeach model binnen het project BOI Zandige Waterkeringen, inclusief het kalibreren van het semi-probabilistisch model en het implementeren in MorphAn in Fase 2 van het project, wordt aanbevolen om de definitieve BOI-standaardinstellingen te gebruiken. Een overzicht van de definitieve instellingen zoals bepaald in dit rapport is weergegeven in Samenvatting Tabel 1. De BOI standaard instellingen voor modelparameters zoals afgeleid in andere rapporten zijn opgenomen in Samenvatting Tabel 2.

Samenvatting Tabel 1 – Overzicht van definitieve BOI standaardinstellingen voor de rekenkernel XBeach die in dit rapport behandeld worden.

Modelparameter	Beschrijving	Waarde / instelling	Afleiding
Bedfriction	Formulering van de bodemwrijving voor stroming	<i>Manning</i>	Deel 1 van dit rapport; op basis van laboratoriumdata.
Bedfriccoef	Waarde van de bodemwrijvingscoëfficiënt	<i>0,02 [-]</i>	Deel 1 van dit rapport; op basis van laboratoriumdata.
Break	Formulering van korte golfbreking	<i>Roelvink_Daly¹</i>	Deel 1 van dit rapport; op basis van laboratoriumdata.
Gamma	Brekingscoëfficiënt in golfbrekingsformulering	<i>0,46 [-]</i>	Deel 1 van dit rapport; op basis van laboratoriumdata.
gamma2	Coëfficiënt einde golfbreking in <i>Roelvink_Daly</i> golfbrekingsformulering	<i>0,34 [-]</i>	Deel 1 van dit rapport; op basis van laboratoriumdata.
Alpha	Intensiteit van golfbreking in golfbrekingsformulering	<i>1,38 [-]</i>	Deel 1 van dit rapport; op basis van laboratoriumdata.
Beta	Coëfficiënt voor rollerdissipatie	<i>0,08 [-]</i>	Deel 1 van dit rapport; op basis van laboratoriumdata.
Form	Formulering van sedimenttransport	<i>VanThiel_VanRijn²</i>	Deel 1 van dit rapport; op basis van laboratoriumdata.
Waveform	Formulering van golf-nietlineariteit	<i>VanThiel²</i>	Deel 1 van dit rapport; op basis van laboratoriumdata.
facSk	Coëfficiënt bijdrage golf skewness aan sedimenttransport	<i>0,15 [-]</i>	Deel 1 van dit rapport; op basis van laboratoriumdata.
facAs	Coëfficiënt bijdrage golf asymmetrie aan sedimenttransport	<i>0,20 [-]</i>	Deel 2 van dit rapport; op basis van velddata.
alfaD50	Coëfficiënt (α_{D50}) korrelgroottegevoeligheid in sedimenttransport	<i>0,4 [-]</i>	Deel 2 van dit rapport; op basis van velddata.
Wetslp	Coëfficiënt voor ondiep water avalanching	<i>0,15 [-]</i>	Deel 2 van dit rapport; op basis van velddata.

¹ Daly *et al.* (2012)

² Van Thiel de Vries (2009)

Samenvatting Tabel 2 – Overzicht van overige BOI standaardinstellingen voor de rekenkernel XBeach

Modelparameter	Beschrijving	Waarde / instelling	Afleiding
wbcEvarreduce	Coëfficiënt (α_E) voor het verdisconteren van richtingsverspreidings-effecten in 1D modellen	0,3 [-] voor veldcases (met golfrichtingsverspreiding) 1,0 [-] voor golfgoot experimenten (zonder golfrichtingsverspreiding)	Deltares (2021a)
CFL	Waarde voor Courant–Friedrichs–Lewy numerieke stabiliteitscriterium	0,95 [-] (voor 1D modellen)	Deltares (2021a)
fixedAvaltime	Optie om duin avalanching met vaste (1) of golfperiode-afhankelijke (0) tijdschaal uit te rekenen	0 [-]	Deltares (2021b)
nTrepAvaltime	Aantal golfperiodes in golfperiode-afhankelijke tijdschaal voor avalanching	1,0 [-]	Deltares (2021b)
oldTsmín	Optie om dimensiehoudende (1) of dimensieloze (0) minimum adaptatietijdschaal voor sedimentconcentratie toe te passen	0 [-]	Deltares (2021b)
dtLimTs	Aantal numerieke tijdstappen voor minimum adaptatietijdschaal voor sedimentconcentratie	5 [-]	Deltares (2021b)
DeltaHmin	Fractie van de brekende golfhoogte die toegevoegd wordt aan de waterdiepte ter bepaling van de retourstroom	0,1 [-]	Deltares (2021b)
Hswitch	Waterdiepte voor overgang tussen droge en natte avalanching	0,0 [m]	Deltares (2021b)
Eps	Minimum numerieke waterdiepte voor natte cellen	0,005 [m] (op prototypeschaal)	Deltares (2021b)
eps_sd	Snelheidsverschil tussen aanliggende rekencellen waarbij van een impuls-behoudende numerieke rekenschema overgegaan wordt naar een energiebehoudende numerieke rekenschema	0,50 [m/s] (op prototypeschaal)	Deltares (2021b)
Tidetype	Formulering voor getijde randvoorwaarden	hybrid [-]	Deltares (2021c)
wbcScaleEnergy	Optie om de op de modelrand gegenereerde golftijdserie wel (1) of niet (0) te schalen naar de opgelegde golfhoogte	1 [-]	Deltares (2021c)
wbcRemoveStokes	Optie om de op de modelrand gegenereerde fluxtijdserie wel (1) of niet (0) de IG Stokes drift te compenseren	1 [-]	Deltares (2021c)
Nuhfac	Factor om door roller-geïnduceerde viscositeit mee te nemen in de bewegingsvergelijkingen	0,0 [-]	Deltares/Arcadis (2020)
Random	Optie om een simulatie-specifieke randomizer wel (1) of niet (0) toe te passen in het genereren van golfrandvoorwaarden	0 [-]	Deltares (2021a)

Inhoud

	Samenvatting	5
1	Opzet van het rapport	11
1.1	Achtergrond	11
1.1.1	Algemeen	11
1.1.2	Huidige studie	11
1.2	Doelstelling	12
1.3	Proces en aanpak	12
	Deel 1 – Kalibratie BOI Standaard instellingen met laboratoriumexperimenten	14
2	Deel 1 – Introductie	15
2.1	Achtergrond	15
2.2	Doel van deze studie	15
2.3	Aanpak en leeswijzer	15
3	Deel 1 – Methode	17
3.1	Algehele aanpak	17
3.2	Indicatoren en foutmaten	18
3.2.1	Hydrodynamica	18
3.2.2	Morfologie	19
3.3	Vorstudie formuleringen	20
3.3.1	Bodemwrijving (gedefinieerd via <i>bedfriction</i>)	20
3.3.2	Golfbrekkingsmodel (gedefinieerd via <i>break</i>)	20
3.3.3	Golfvorm (gedefinieerd via <i>waveform</i>)	20
3.3.4	Helling van de swashzone (gedefinieerd via <i>bermslope</i>)	21
3.4	Voorselectie parameters	21
3.5	Gevoeligheid parameters	21
3.6	<i>DUD</i> kalibratie methode	22
4	Deel 1 – Kalibratie van hydrodynamische en morfologische parameters	24
4.1	Hydrodynamica	24
4.2	Morfologie	28
4.3	Vergelijking met WTI versie	34
5	Deel 1 – Conclusies en aanbevelingen	37
5.1	Conclusies	37
5.2	Aanbevelingen	38
5.2.1	Voor vervolg BOI	38
5.2.2	Overige vervolgstudies	38

	Deel 2 – Herkalibratie BOI Standaard instellingen met veldmetingen	39
6	Deel 2 – Introductie	40
6.1	Doel van deze studie	40
6.2	Achtergrond	40
6.3	Aanpak	41
6.4	Leeswijzer	42
7	Deel 2 – Kalibratie ondiep water sedimenttransport	43
7.1	Aanpak	43
7.1.1	Selectie profielen	43
7.1.2	Parameter variatie	43
7.2	Analyse morfologische ontwikkeling	44
7.3	Selectie parameter waarden	47
8	Deel 2 – Kalibratie korrelgrootteafhankelijkheid	50
8.1	Achtergrond korrelgrootteafhankelijkheid in XBeach	50
8.2	Aanpak	51
8.2.1	Doelstelling en modelaanpak	51
8.2.2	Selectie profielen	52
8.2.3	Parameter variatie	52
8.3	Selectie α_{D50} waarden per profiel en <i>wets/p-facAs</i> combinatie	53
8.4	Selectie α_{D50} waarden per <i>wets/p-facAs</i> combinatie	58
9	Deel 2 – Definitieve BOI-standaardinstellingen	60
9.1	Selectie definitieve morfologische modelparameters	60
9.2	Kwantitatieve onderbouwing morfologische modelparameters	61
9.3	Consequenties definitieve instellingen op laboratoriumexperimenten	65
10	Deel 2 – Conclusies en aanbevelingen	68
	Referenties	71
A	Deel 1 - DUD kalibratie methode	73
B	Deel 1 – Geselecteerde laboratorium experimenten	74
C	Deel 1 – Details definitie indicatoren	77
C.1	Erosievolume	77
C.2	Duinfront migratie	77
C.3	Onderwaterhelling	78
D	Deel 1 – Beschrijving potentiële kalibratie parameters	79
E	Deel 1 – Gevoeligheidsanalyse	81

E.1	Gevoeligheidsanalyse morfologie	81
E.2	Gevoeligheidsanalyse hydrodynamica	84
E.3	Selectie parameters voor kalibratiestudie	84
F	Deel 1 – Overzichtsfiguren morfologische kalibratie	85
G	Deel 1 – Overzichtsfiguren WTI versie	97
G.1	Hydrodynamica	97
G.2	Morfologie	99
H	Schatting α_{D50} waarde op basis van laboratorium experimenten en duinafslagmodellen	108
H.1	Introductie	108
H.2	Schatting op basis van kleinschalige laboratorium experimenten	109
H.3	Schatting op basis van resultaten duinafslagmodellen	113
H.4	Keuze parameterwaarde voor concept validatiestudie	115
I	Appendix Deel 2 – Definitieve BOI-standaardinstellingen	117
I.1	Skill scores	117
I.2	Figuren consequenties nieuwe instellingen op laboratoriumexperimenten	118
J	Conceptversie veldvalidatierapport	124

1 Opzet van het rapport

1.1 Achtergrond

1.1.1 Algemeen

Een groot deel van het Nederlandse duinsysteem heeft de status primaire waterkering (gericht op het voorkomen van kustoverstromingen). Wettelijk is een periodieke beoordeling vereist om aan te tonen dat deze zandige waterkeringen voldoen aan de wettelijke waterveiligheidsnorm. De huidige beoordeling van de duinveiligheid maakt gebruik van een methode die gebaseerd is op het empirische DUROS+ model dat initieel ontwikkeld is in de jaren tachtig van de vorige eeuw (Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, 1984; Expertise Netwerk Waterveiligheid, 2007). Momenteel beperken onderliggende aannames van het doorontwikkelde empirische model de toepassing van deze methodiek voor grote delen van de Nederlandse kust (Deltares, 2015). Verder heeft recent onderzoek (Deltares/Arcadis, 2019b) gewezen op onnauwkeurigheden in DUROS+ voor grote golfperiodes, waardoor onzekerheid bestaat over de nauwkeurigheid van het bestaande beoordelingsmethodiek voor delen van de Nederlandse duinenkust.

Ter voorbereiding op de volgende waterveiligheidsbeoordeling van de zandige kust vanaf 2023, hebben Deltares en Arcadis in opdracht van Rijkswaterstaat een Plan van Aanpak Vernieuwd Instrumentarium Zandige Keringen (2019a, voortaan Plan van Aanpak genoemd) ontwikkeld. Het Plan van Aanpak beschrijft een overgang van de huidige 1D (dwarsprofiel) beoordelingsmethodiek op basis van de DUROS+ rekenkernel, naar een verbeterde, 2DH gebiedsgerichte beoordeling op basis van het state-of-the-art, proces-gebaseerde model XBeach (Roelvink, et al., 2009). Het Plan van Aanpak stelt een gefaseerde ontwikkeling van de nieuwe methodologie voor, met vier ambitiefasen voor de lange termijn. In Ambitiefase 1 wordt de rekenkernel DUROS+ vervangen door XBeach. Het Plan van Aanpak beschrijft een set van werkzaamheden die uitgevoerd moeten worden om deze vervanging te realiseren. Deze taken zijn voornamelijk gericht op de ontwikkeling en validatie van het XBeach-model, de ontwikkeling en validatie van een probabilistische en semi-probabilistische versie van het beoordelingsinstrument, en een herdefiniëring van de beoordelingsmethodologie, gebruikmakend van het nieuwe instrument. De werkzaamheden om Ambitiefase 1 te realiseren worden uitgevoerd in het project BOI Zandige Waterkeringen.

1.1.2 Huidige studie

Dit rapport beschrijft de resultaten van de vernieuwde XBeach model kalibratie binnen het project BOI Zandige Waterkeringen. In 2014 is een XBeach model versie, genaamd WTI (Wettelijk Toetsinstrumentarium), met bijbehorende standaardinstellingen opgeleverd voor de wettelijke toetsing van de Nederlandse kust (Deltares, 2014). Door ontwikkelingen in het XBeach model sinds 2014 is een hernieuwde afleiding van de modelparameters nodig. Daarnaast moet een correcte toepassing binnen het BOI project – met de daarbij behorende condities – worden gewaarborgd.

De verkregen optimale parameterinstellingen worden voorgesteld als standaardinstellingen binnen het BOI Zandige Waterkeringen project en voor gebruik in de duinveiligheidsbeoordeling 2023. Validatie van de hier gevonden optimale parameterinstelling op basis van data uit veldmetingen wordt beschreven in Arcadis/Deltares (2021).

1.2 Doelstelling

Het doel van dit onderzoek is:

“Het afleiden van parameterinstellingen voor het XBeach model, die representatief zijn voor de Nederlandse kust, op basis van meetgegevens”.

1.3 Proces en aanpak

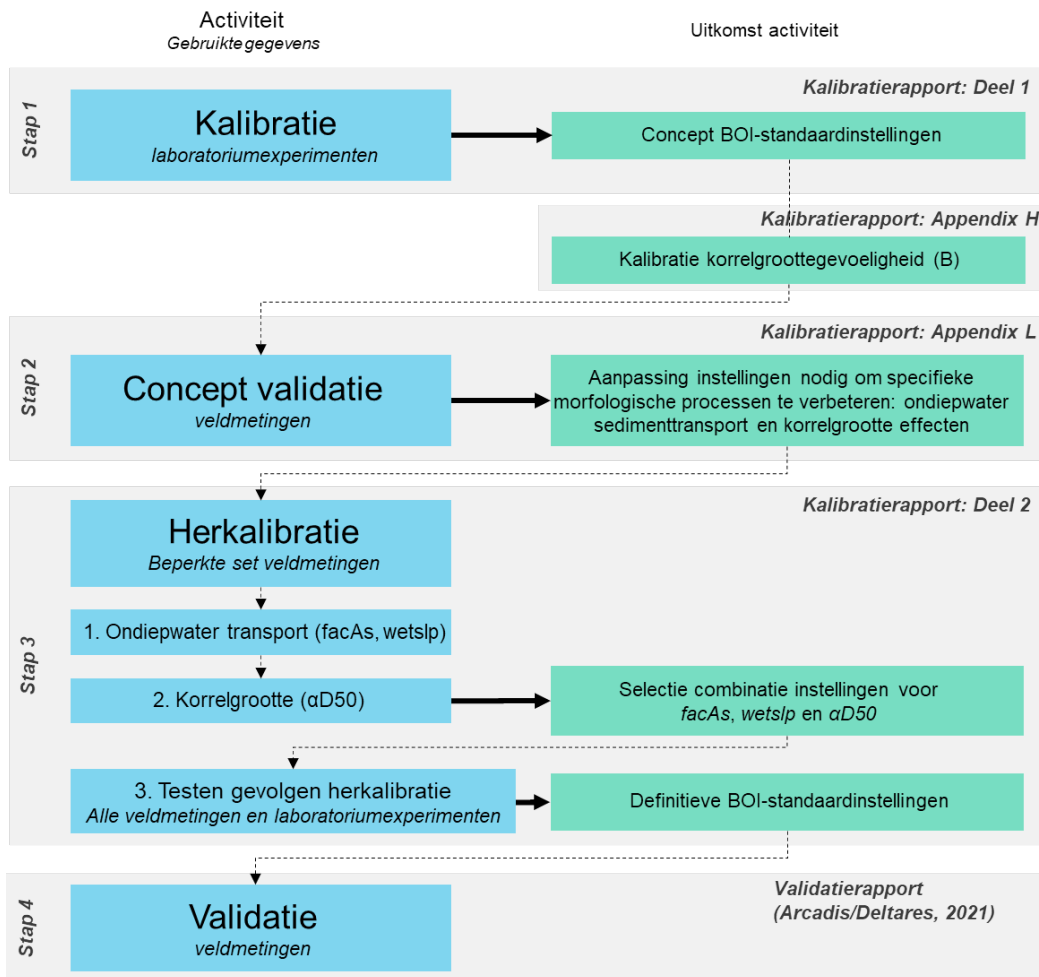
In het Plan van Aanpak (Deltares/Arcadis, 2019a) is oorspronkelijk voorzien dat de XBeach BOI-standaardinstellingen worden afgeleid door middel van een kalibratie op laboratoriumexperimenten. Deze BOI-standaardinstellingen worden vervolgens gevalideerd met representatieve veldmetingen van duïnerosie.

Gedurende het BOI Zandige Waterkeringen project is, in overleg met Rijkswaterstaat, besloten om een concept-validatiestap en een herkalibratiestap aan het kalibratie-validatie proces toe te voegen, zie Figuur 1-1. In Stap 1 van het kalibratie-validatie proces zijn de concept BOI-standaardinstellingen gekalibreerd op basis van laboratoriummetingen, overeenkomstig het Plan van Aanpak. De concept BOI-standaardinstellingen zijn vervolgens in Stap 2 getoetst aan de hand van veldmetingen in de concept validatiestudie. Op basis hiervan zijn in Stap 3 drie modelparameters geherkalibreerd om te komen tot de definitieve BOI-standaardinstellingen. De definitieve BOI-standaardinstellingen zijn, overeenkomstig het Plan van Aanpak, in Stap 4 gevalideerd aan de hand van veldmetingen in de definitieve validatiestudie.

In dit rapport wordt de kalibratie van de BOI-standaardinstellingen in twee delen besproken:

- In Deel 1 van dit rapport (Hoofdstuk 2–5) wordt de kalibratie van de concept BOI-standaardinstellingen met laboratorium experimenten uitgewerkt. Dit is Stap 1 van het kalibratie-validatie proces.
- In Deel 2 van dit rapport (Hoofdstuk 6–10) wordt de herkalibratie van drie modelparameters beschreven (Stap 3) naar aanleiding van de conceptuele validatiestudie (Stap 2). De optimale standaardinstellingen die uit Deel 2 volgen, zijn de ‘definitieve BOI-standaardinstellingen’ voor toepassingen binnen het programma BOI.

In Figuur 1-1 wordt met grijze vlakken aangegeven in welk deel van dit kalibratierapport de stappen van het kalibratie-validatie proces beschreven zijn. Een meer gedetailleerde uitwerking van de toegepaste aanpak is in de desbetreffende rapportdelen te vinden. De rapportage van de concept validatiestudie met de concept BOI-standaardinstellingen (Stap 2 van het kalibratie-validatie proces), die de basis vormt voor Deel 2 van dit kalibratierapport, is ter informatie in Appendix J opgenomen. Validatie van de definitieve BOI -standaardinstellingen (Stap 4) wordt beschreven in Arcadsi/Deltares (2021).



Figuur 1-1 – Stappen binnen het kalibratie-validatie proces om de BOI-standaardinstellingen af te leiden en te valideren. De blauwe vakken geven een activiteit weer, inclusief de gebruikte gegevens. De groene vakken laten de uitkomst van de activiteit zien, welke vervolgens leidt tot de volgende activiteit. De grijze vakken geven aan in welk (deel van het) rapport de activiteiten zijn uitgewerkt.

Deel 1 – Kalibratie BOI Standaard instellingen met laboratoriumexperimenten

2 Deel 1 – Introductie

2.1 Achtergrond

In het kalibratie-proces zijn representatieve laboratorium experimenten gesimuleerd met het XBeach model. De modelinstellingen zijn op een systematische manier gevarieerd tot de beste overeenstemming met de meetdata is verkregen, en daarmee de optimale parameterinstellingen bekend zijn. De kalibratie is beperkt tot een selectie van de meest gevoelige parameters. Verder is onderscheid gemaakt tussen een kalibratie van hydrodynamische parameters op hydrodynamische laboratorium testen en een kalibratie van morfologische parameters op morfologische laboratorium testen.

De verkregen optimale parameterinstellingen worden in Deel 2 van dit rapport benoemd als concept BOI-standaardinstellingen.

2.2 Doel van deze studie

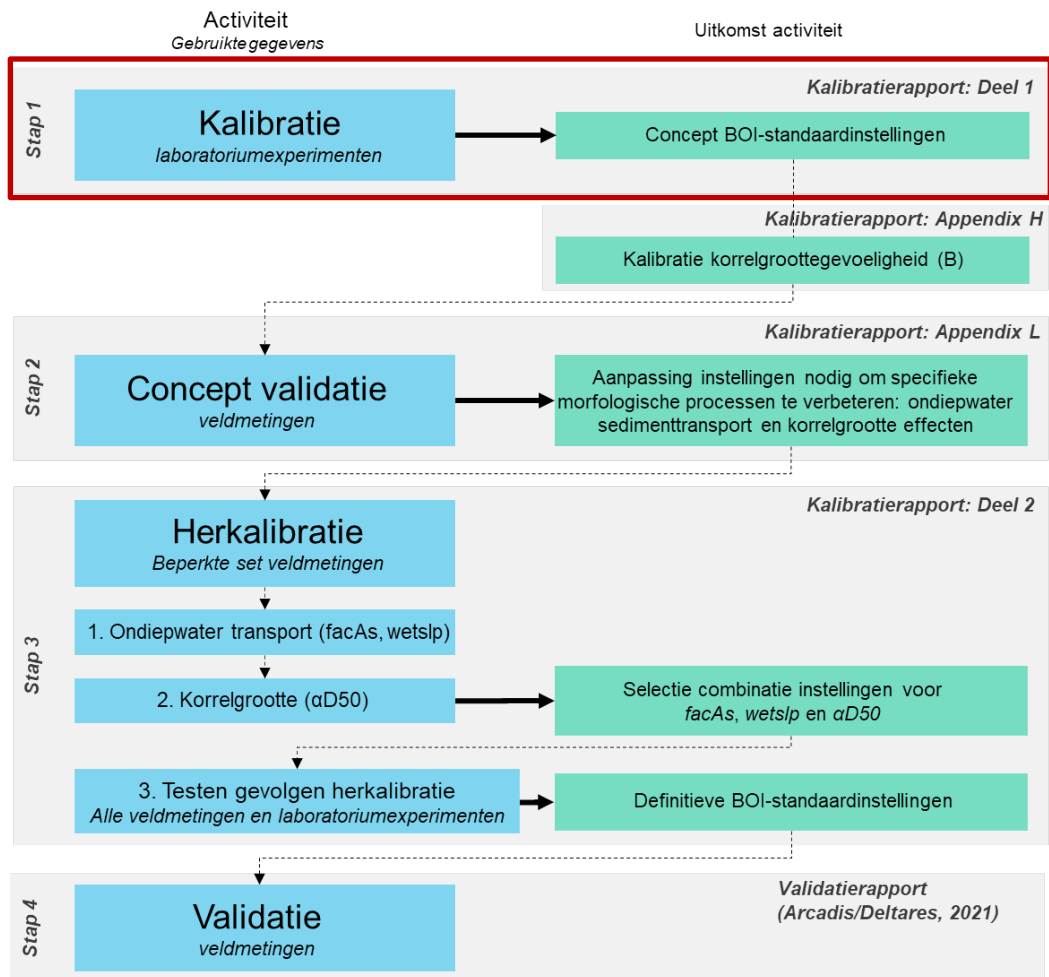
De doel van dit onderzoek is:

“Het afleiden van de XBeach model instellingen door kalibratie met laboratorium experimenten die representatief zijn voor de Nederlandse kust”.

2.3 Aanpak en leeswijzer

Ten eerste wordt de aanpak van deze studie beschreven in Hoofdstuk 3, waarna de selectie van de te kalibreren parameters kort wordt toegelicht. Ook wordt het kalibratie-algoritme kort omschreven. Vervolgens worden de resultaten van de hydrodynamische en morfologische kalibratie gepresenteerd in Hoofdstuk 4. In dit derde hoofdstuk wordt ook een korte vergelijking met de WTI versie uit 2014 getoond. De conclusies en aanbevelingen worden genoemd in Hoofdstuk 5.

In de bijlagen worden de aanpak en resultaten verder verduidelijkt. In Bijlage A wordt de DUD (Doesn't Use Derivatives; Ralston and Jennrich, 1978) kalibratie methode verder toegelicht. In Bijlage B worden de geselecteerde laboratorium experimenten omschreven. In Bijlage C worden de morfologische indicatoren gedefinieerd die zijn gebruikt bij de kalibratie, en in Bijlage D worden de modelparameters beschreven die in de gevoeligheidsstudie zijn meegenomen. Vervolgens wordt in Bijlage E de selectiemethode van de te kalibreren parameters in detail uitgelegd. In Bijlage F worden de overzichtsfiguren gepresenteerd van de nieuw gekalibreerde morfologische tests, en ter vergelijking in Bijlage G de overzichtsfiguren met de WTI versie van XBeach uit 2014.

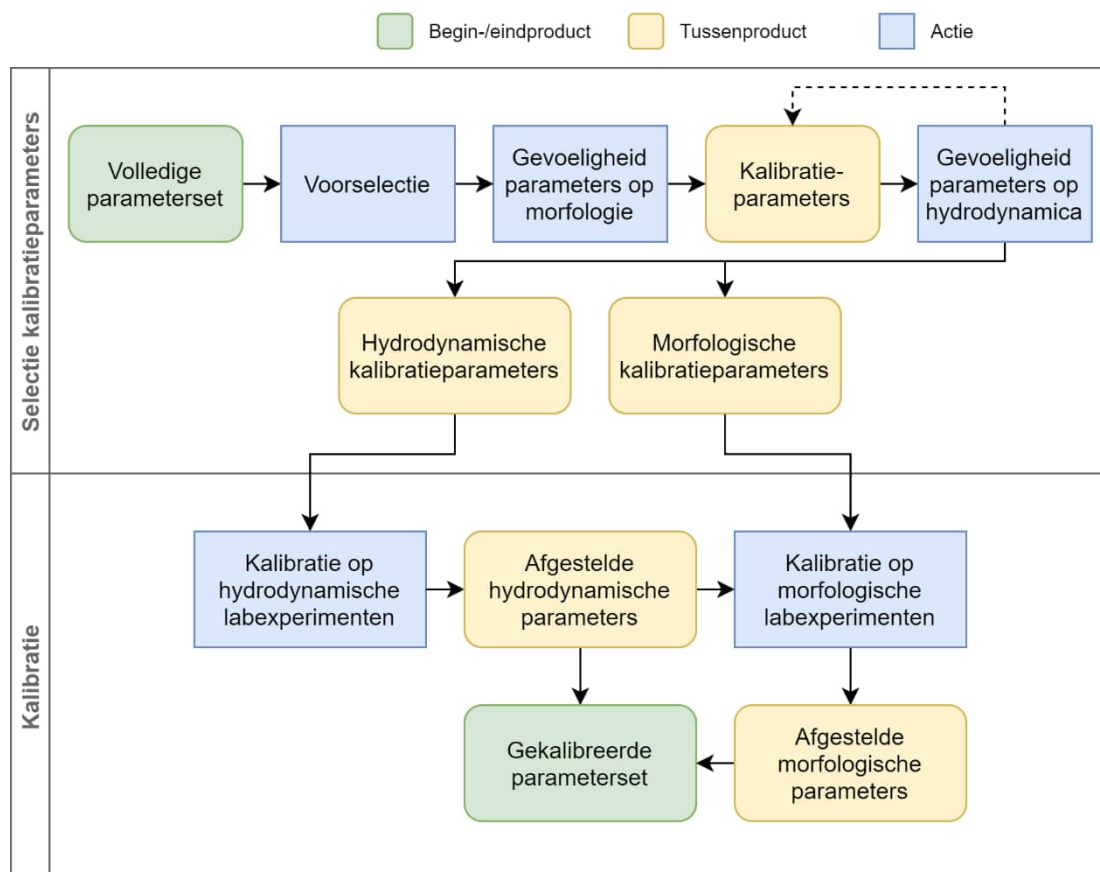


Figuur 2-1 – Stappen binnen het kalibratie-validatie proces om de BOI-standaardinstellingen af te leiden en te valideren. In dit hoofdstuk wordt Stap 1 beschreven.

3 Deel 1 – Methode

3.1 Algehele aanpak

In het kalibratieproces zijn laboratorium experimenten, die representatief zijn voor de Nederlandse kust, gemodelleerd met het XBeach model. De modelinstellingen zijn op een systematische manier gevarieerd tot de beste overeenstemming met de meetdata kon worden verkregen. Hiermee zijn de optimale parameter instellingen bepaald. De mate van overeenstemming tussen de modelvoorspellingen en de laboratoriumexperimenten wordt gekarakteriseerd met behulp van specifieke indicatoren. Deze zijn in paragraaf 3.2 toegelicht. Keuzes in de representatie (formulering) van specifieke processen zoals golfbreking of zandtransport worden besproken in paragraaf 3.3. Vanwege het grote aantal numerieke parameters (383 in totaal) worden allereerst de belangrijkste parameters geselecteerd op basis van expert beoordeling (paragraaf 3.4). Vervolgens wordt een verdere selectie uitgevoerd op basis van een gevoeligheidsanalyse (paragraaf 3.5). Met deze analyse wordt de gevoeligheid van het door XBeach voorspelde duinerosievolume, vooroeverhelling en duinfront migratie bepaald voor representatieve variaties in parameterinstellingen. De parameters die de grootste variaties in deze drie karakteristieken veroorzaken worden vervolgens meegenomen in het kalibratieproces. Het kalibreren zelf is gedaan met behulp van de *DUD*-methode, zie paragraaf 3.6. Een overzicht van de aanpak is geschetst in Figuur 3-1.



Figuur 3-1 Visuele samenvatting van de in deze studie gehanteerde aanpak. De gestippelde pijl representeert een terugkoppeling op basis van de resultaten uit de hydrodynamische gevoeligheidsanalyse dat tot de uitsluiting van één van de parameters heeft geleid (Bijlage E).

Deze aanpak komt grotendeels overeen met de aanpak die is gebruikt tijdens de afleiding van de WTI-instellingen (Deltares, 2014), al zijn er enkele aanpassingen. In de huidige studie is een nieuwe selectieprocedure toegepast voor de laboratoriumtesten die worden gebruikt in de kalibratie (Bijlage A). Verder is naar een aanbeveling van de WTI studie (Hoofdstuk 3.7 van Deltares, 2014) de kalibratie nu afzonderlijk uitgevoerd voor de hydrodynamische en morfologische parameters. Eerst zijn de hydrodynamische parameters gekalibreerd op basis van de indicator golfhoogte. Reden hiervan is dat de hydrodynamische parameters niet onrealistisch worden gecompenseerd door een morfologische parameter. Vervolgens zijn deze hydrodynamische parameters vastgezet en zijn de morfologische parameters afgeleid op basis van morfologische indicatoren (erosie volume, duinfront migratie en vooroeverhelling). Ook zijn de indicatoren voor de kalibratie uitgebreid, van alleen het voorspellen van het duinerosievolume tijdens de afleiding voor WTI, naar ook de juiste vooroeverhelling en migratie van het duinfront. Een korte vergelijking met de WTI versie is toegevoegd in paragraaf 4.3.

3.2 Indicatoren en foutmaten

De focus binnen het BOI Zandige Waterkeringen project ligt op het goed kunnen simuleren en voorspellen van morfologische ontwikkelingen met het XBeach model. Voor de beoordeling van deze morfologische voorspellingen is een drietal indicatoren opgesteld: duinerosievolume, duinfront migratie, en vooroeverhelling. Aangezien de morfologische ontwikkelingen afhankelijk zijn van de kwaliteit van de hydrodynamische voorspellingen, vergroot een goede voorspelling van de hydrodynamica het vertrouwen in het model. Om deze reden wordt ten eerste een hydrodynamische kalibratie uitgevoerd (zoals hierboven beschreven), met een hydrodynamische indicator gerelateerd aan de golfhoogte. Met foutmaten wordt uitgedrukt hoe goed de resultaten op deze indicatoren met de data overeenkomen. Voor alle foutmaten geldt: hoe kleiner (dichter bij 0), hoe beter.

3.2.1 Hydrodynamica

Voor de beoordeling van de hydrodynamische simulaties wordt uitsluitend gekeken naar de korte golven. Een goede overeenkomst voor lange golven of setup is in deze kalibratiefase niet beschouwd, omdat deze karakteristieken voornamelijk beïnvloed worden door de gekozen bodemwrijvingscoëfficiënt. Aangezien de bodemwrijvingscoëfficiënt in de laboratoriumproeven niet representatief is voor de Nederlandse kust (betonnen bodem) zou kalibratie met deze onrealistische waarde leiden tot een onrealistische parameter-set voor toepassingen binnen BOI (zoals beschreven in Bijlage E.1). In de volgende validatiefase met velddata (*Fase 1*) zal daarom extra aandacht worden geschonken aan de lange golf- en setup-representatie.

Als foutmaat voor de korte golfhoogte wordt de mate van overeenkomst tussen de gesimuleerde korte golven en in het laboratorium geobserveerde korte golven gerepresenteerd, op basis van de *relatieve fout* en *spreidingsindex*:

$$\begin{aligned} \text{relatieve fout} &= \frac{(xb - data)}{\max(RMS_{data}, |\langle data \rangle|)} \\ \text{spreidingsindex} &= \frac{RMS_{xb-data}}{\max(RMS_{data}, |\langle data \rangle|)} \end{aligned}$$

$$foutmaat_{hydro} = (\text{spreidingsindex} + \text{abs}(\text{relatieve fout})) * \text{sign}(\text{relatieve fout})$$

Hierin is *xb* de golfhoogte voorspeld door het model, en *data* de gemeten golfhoogte.

Het teken in de foutmaat zorgt dat er ook aangegeven wordt dat er een over- of onderschatting plaatsvindt. Dit is nodig zodat de optimalisatieroutine een optimum kan vinden.

3.2.2 Morfologie

Voor het beoordelen van de kwaliteit van de morfologische simulaties is een indicator voor het erosievolume, de duinfrontmigratie en de onderwaterhelling toegepast (Figuur 3-2). Voor elk van deze drie eigenschappen is de relatieve fout berekend (de foutmaat) voor afzonderlijke tijdstippen waarop metingen beschikbaar zijn. Hierbij is het eerste uur niet meegenomen. De totale fout over de tijdstippen is gegeven door:

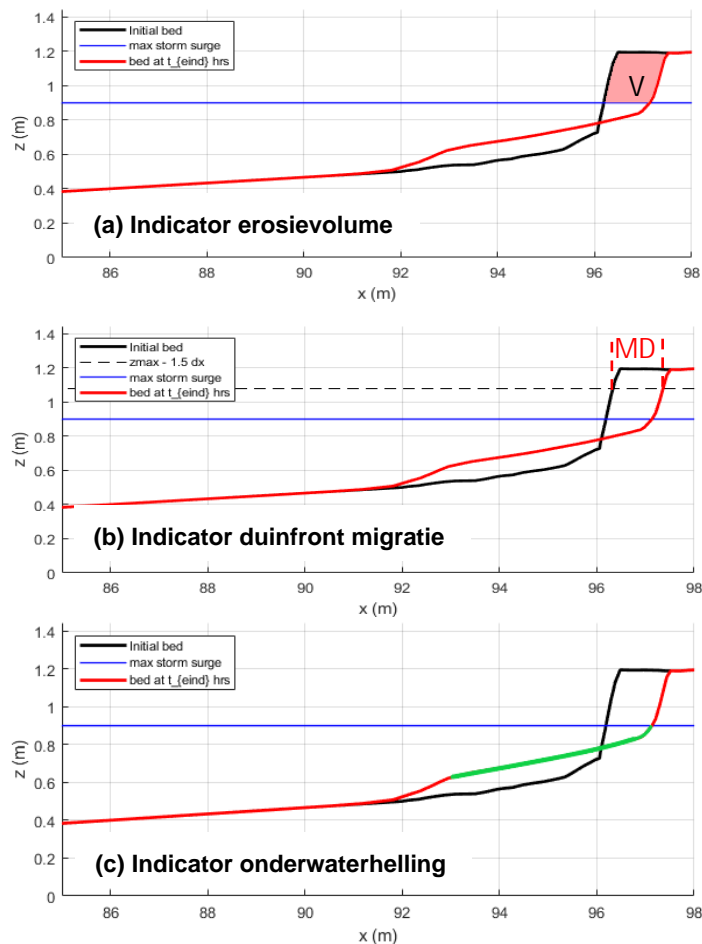
$$foutmaat_{volume} = RMS((V_{xb}(t) - V_{data}(t))/V_{data}(t_{eind}))$$

$$foutmaat_{migratie\ duinfront} = RMS((MD_{xb}(t) - MD_{data}(t))/MD_{data}(t_{eind}))$$

$$foutmaat_{onderwaterhelling} = RMS((S_{xb}(t) - S_{data}(t))/S_{data}(t))$$

Waarbij V het duinafslagvolume boven het maximale stormvloedpeil is, MD de migratie van het duinfront en S de onderwater helling. Details over de precieze berekening van deze indicatoren zijn gegeven in Bijlage C.

De relatieve fout voor het duinafslagvolume en de migratie van het duinfront zijn genormaliseerd ten opzichte van de laatste meting, zodat relatief grote relatieve, maar kleine absolute, verschillen in het begin van de simulatie de optimalisatie niet te sterk beïnvloeden. Dit is gegeven de absolute, in plaats van relatieve, bodemhelling normalisatieterm niet nodig voor de bepaling van de foutmaat van de onderwaterhelling.



Figuur 3-2 Indicatoren voor (a) het erosie volume, (b) de duinfront migratie -MD- en (c) de onderwaterhelling – in groen. De horizontale blauwe lijn is het maximale stormpeil.

De totale foutmaat is gedefinieerd als de som van de drie losse relatieve fouten vermenigvuldigd met het teken van de gemiddelde relatieve fout in het duinafslagvolume:

$$f_{\text{foutmaat}} = \frac{(f_{\text{foutmaat}}_{\text{onderwaterhelling}} + f_{\text{foutmaat}}_{\text{migratie duinfront}} + f_{\text{foutmaat}}_{\text{onderwaterhelling}})}{3} \cdot \text{sign}(\text{mean}((V_{xb}(t) - V_{\text{data}}(t))/V_{\text{data}}(t_{\text{eind}})))$$

Het teken in het afslagvolume zorgt dat de foutmaat ook aangeeft of er een over- of onderschatting plaatsvindt. Dit is nodig zodat de optimalisatie routine een optimum kan vinden. Het teken in het afslagvolume en de migratie van het duinfront zijn over het algemeen gelijk en kunnen daarom samen worden vertegenwoordigd door het teken van het afslagvolume.

3.3 Voorstudie formuleringen

Voor het XBeach model bestaan verschillende formuleringen voor de beschrijving van de fysische processen. Het hangt van de toepassing af welke formulering het meest geschikt is. Hieronder wordt voor verschillende fysische processen beargumenteerd welke formuleringen worden gebruikt binnen het kader van het BOI project.

3.3.1 Bodemwrijving (gedefinieerd via *bedfriction*)

In XBeach wordt het effect van de bodemwrijving op de stroming geparametriseerd aan de hand van de formuleringen van Chézy, Manning of White-Colebrook. Deze vergelijkingen hebben een verschillende diepteafhankelijkheid. Verkennende modelsimulaties, gebruikmakend van de standaard waarden voor de verschillende formuleringen, toonden geen substantiële verschillen in duinafslag. Bovendien wordt het model in deze studie bewust niet op bodemwrijving gekalibreerd (Bijlage E.1). Daarom is de keuze tussen de verschillende ruweheidsvergelijkingen gebaseerd op eerdere ervaringen. Tijdens condities waar golfoverslag of bresvorming plaatsvinden is de toepassing van de vergelijking van Manning te verkiezen boven de andere twee representaties (Van der Lugt et.al, 2019). Dit is iets wat in een latere fase van het BOI project relevant kan zijn. Daarom is gekozen voor de vergelijking van Manning, al zijn de implicaties van deze keuze relatief beperkt.

3.3.2 Golfbrekingsmodel (gedefinieerd via *break*)

Er zijn verschillende golfbrekingsmodellen beschikbaar in XBeach. Binnen deze studie is de hydrodynamische kalibratie parallel doorlopen voor zowel de 'roelvink2' formulering als de meer geavanceerde 'roelvink_daly' formulering (Daly et. al, 2012). Het voordeel van deze parallelle aanpak is dat de keuze tussen deze formuleringen gebaseerd is op de nauwkeurigheid van het uiteindelijk gekalibreerde model. De nauwkeurigheid van het afgestelde XBeach model was zeer vergelijkbaar voor beide golfbrekingsmodellen. Omdat gebleken is dat de 'roelvink_daly' formulering beter in staat is om de korte golfhoogte in de brekerzone te modelleren, is uiteindelijk voor deze formulering gekozen (de rapportage is verder ook tot deze formulering beperkt). Deze keuze is ook in lijn met de bevindingen van Daly et. al (2012), die over het algemeen betere resultaten constateerden door de toepassing van deze formulering.

3.3.3 Golfvorm (gedefinieerd via *waveform*)

De golfvorm heeft directe implicaties op het sedimenttransport. Aangezien XBeach deze in de *surfbeat* versie niet expliciet simuleert, worden deze geparametriseerd volgens in de literatuur voorgestelde formuleringen. De verschillen tussen deze formuleringen beïnvloeden het zandtransport en daarmee de resulterende morfologische veranderingen zoals duinerosie. In dit onderzoek zijn de formuleringen 'vanthiel' en 'ruessink_vanrijn' met elkaar vergeleken. De morfologische kalibratie is parallel doorlopen voor beide golfvorm-representaties.

Hieruit is gebleken dat, binnen het kader van dit BOI project, de ‘*vanthiel*’ (Van Thiel de Vries, 2009) formuleringen stabielere en meer realistische resultaten geeft. De rapportage is daarom verder ook tot de ‘*vanthiel*’- formulering beperkt.

3.3.4 Helling van de swashzone (gedefinieerd via *bermslope*)

In XBeach is het mogelijk om de gewenste helling van de swashzone op te leggen (*bermslope*). Het profiel in de swashzone wordt door het model vervolgens richting deze helling gevormd middels aanpassing van het sedimenttransport in deze zone. Dit kan interessant zijn als meer controle op de profielvorm vereist is. In deze studie is gekeken of de kalibratie van dit proces, via de kalibratie van de parameters *bermslope* en *bermslopefac*, tot nog betere voorspellingen leidt (nadat de overige parameters al waren afgesteld).

De resultaten tonen aan dat de reeds geïmplementeerde *bermslope*-formulering voor de nagebootste condities niet leidt tot een betere overeenkomst met de laboratorium observaties. Daarom is er voor de BOI-instellingen gekozen voor een zo simpel mogelijke aanpak, waarbij deze formulering niet meegenomen wordt tijdens de simulaties.

3.4 Voorselectie parameters

Voordat in detail is bepaald op welke parameters het model werd gekalibreerd, is eerst een voorselectie uit alle XBeach parameters gemaakt. XBeach (trunk versie 5644) kent in totaal 383 modelparameters. Deze zijn gereduceerd tot 46 kalibreerbare parameters die relevant zijn voor het BOI project volgens het volgende stramien:

- 156 parameters zijn afgefallen, omdat ze onderdeel uitmaken van een module die buiten de focus van het BOI project valt (bijvoorbeeld de grondwaterparameters);
- 129 parameters zijn afgefallen vanwege een uitgezonderd parametertype (bijvoorbeeld voor het aan- of uitzetten van fysische processen in het model);
- 51 parameters zijn afgefallen omdat ze locatie- of modelafhankelijk zijn (bijvoorbeeld parameters met betrekking tot de resolutie van het rekenrooster).

De 46 resulterende kalibreerbare parameters zijn gepresenteerd in Tabel 3-1. Met behulp van de gevoeligheidsanalyse (Sectie 3.5), is de selectie van parameters waarop daadwerkelijk is gekalibreerd verder gereduceerd.

Tabel 3-1 Voorselectie van kalibreerbare parameters (46). De set parameters waarop het model daadwerkelijk is gekalibreerd is slechts een selectie van deze set, zie daarvoor Tabel 3-2.

XBeach parameters volgend uit de voorselectie						
<i>fcutoff</i>	<i>gammax</i>	<i>beta</i>	<i>vicmol</i>	<i>smax</i>	<i>facthr</i>	<i>hswitch</i>
<i>trepfac</i>	<i>delta</i>	<i>bedfriccoef</i>	<i>sigfac</i>	<i>tsfac</i>	<i>bermslope</i>	<i>avaltime</i>
<i>sprdthr</i>	<i>deltahmin</i>	<i>maxcf</i>	<i>deltar</i>	<i>facSk</i>	<i>bermslopefac</i>	<i>nTrepavaltime</i>
<i>gamma</i>	<i>wavfriccoef</i>	<i>nuh</i>	<i>rwave</i>	<i>facAs</i>	<i>bermslopegamma</i>	<i>cmax</i>
<i>gamma2</i>	<i>fwcutoff</i>	<i>nuhfac</i>	<i>BRfac</i>	<i>dtlimTs</i>	<i>bermslopedepth</i>	
<i>alpha</i>	<i>breakerdelay</i>	<i>gamma_turb</i>	<i>facsl</i>	<i>betad</i>	<i>wetslp</i>	
<i>n</i>	<i>facsd</i>	<i>vonkar</i>	<i>z0</i>	<i>facDc</i>	<i>dryslp</i>	

3.5 Gevoeligheid parameters

Het aantal parameters dat effectief kan worden geoptimaliseerd, wordt beperkt door de hoeveelheid onafhankelijke, beschikbare laboratorium experimenten en de rekenkracht. Als vuistregel mag het aantal te kalibreren parameters niet groter zijn dan het aantal experimenten

dat in de optimalisatie wordt beschouwd om onrealistische instellingen te voorkomen (zie paragraaf 3.6). Op basis van de gevoeligheid van de parameters op de morfologische voorspellingen is een verfijning gemaakt van de selectie van de kalibratieparameters.

De gevoeligheid van de 46 kalibreerbare parameters is bepaald op het erosievolume, de migratieafstand van het duinfront en de onderwaterhelling (depositiezone t/m maximaal stormpeil) op het morfologische *Deltaflume_H4731/T14* experiment (WL | Delft Hydraulics, 2007). De gevoeligheid van de parameters is onderzocht tussen de minimale en maximale waarden zoals gedefinieerd in de broncode (onrealistische ranges zijn bijgesteld, zie Bijlage E). Hoe gevoeliger de resultaten zijn voor de variatie van een parameter, hoe zinvoller het is om op deze parameter te kalibreren. In Bijlage E zijn de resultaten van de gevoeligheidsstudie gepresenteerd en is tot de volgende zeven parameters gekomen waarop het model vervolgens is gekalibreerd: *alpha*, *gamma*, *gamma2*, *beta*, *facAs*, *facSk* en *wetslp*.

Tabel 3-2 Geselecteerde parameters waarop daadwerkelijk is gekalibreerd.

	Parameter	Functie
Parameters gekalibreerd op hydrodynamische experimenten (Stap 1)	<i>Alpha</i>	Intensiteit golfdissipatie
	<i>Gamma</i>	Initiatie golfbreking
	<i>Gamma2</i>	Beëindiging golfbreking
Parameters gekalibreerd op morfologische experimenten (Stap 2)	<i>Beta</i>	Parameter in het roller-model welke de dissipatie van rollerenergie beïnvloedt.
	<i>facAs</i>	Parameter om sediment transport door golfasymmetrie te simuleren
	<i>facSk</i>	Parameter om sediment transport door golfscheefheid (skewness) te simuleren.
	<i>wetslp</i>	Kritische helling onder water voor start avalanching (dz/dx)

Van deze parameters beïnvloeden *alpha*, *gamma* en *gamma2* de morfologische veranderingen hoofdzakelijk via veranderingen in de hydrodynamica (Bijlage E.2). Om deze reden is er voor gekozen om ten eerste *alpha*, *gamma* en *gamma2* op de hydrodynamische experimenten te kalibreren (stap 1). Nadat deze drie parameters zijn afgesteld, zijn vervolgens de overige parameters op de morfologische experimenten gekalibreerd (stap 2). Dit onderscheid is samengevat in Tabel 3-2. Details over de kalibratiemethodiek zijn gepresenteerd in de volgende sectie.

3.6 DUD kalibratie methode

Om de optimale waarden voor de parameters te vinden is op een vergelijkbare manier als in Deltares (2014) de *DUD*-methode (Doesn't Use Derivatives; Ralston and Jennrich, 1978) toegepast. De *DUD*-methode optimaliseert de modelparameters iteratief door middel van een lineaire schatting op basis van de resultaten van een aantal voorgaande iteraties. Dit heeft als voordeel dat er geen gradiënten gebruikt worden, waardoor de methode relatief robuust is. Om de fout te bepalen zijn een aantal meetpunten (laboratorium experimenten) nodig, waarmee de uitkomsten kunnen worden vergeleken op basis van foutmaten op indicatoren (Sectie 3.2). Het aantal te optimaliseren parameters mag niet groter zijn dan het aantal meetpunten aangezien het stelsel van vergelijkingen dan geen oplossing heeft.

Voor een gedetailleerde beschrijving van de *DUD*-methode wordt verwezen naar Ralston en Jennrich (1978) en Deltares (2014). In het kort komt de methode neer op een aantal iteratieve stappen, waarbij in elke iteratieve stap XBeach simulaties worden uitgevoerd voor alle laboratorium experimenten. Per laboratorium experiment is één gewenste uitkomst (de meting) en de XBeach voorspelling van deze uitkomst. In de huidige kalibratie is een foutmaat gebruikt

als uitkomst, waarbij de gewenste foutmaat gelijk is aan 0. Op basis van een multidimensionale lineaire fit door de resultaten van verschillende parametersets worden de parameters van de volgende iteratie bepaald. De methode start met een aantal initialisatiestappen door elke parameter per initialisatiestap één voor één te variëren ten opzichte van de standaard parameter waarde. Aan de hand van deze resultaten kan de gevoeligheid van de verschillende parameters worden bepaald. De multidimensionale fit door de resultaten van deze initialisatiestappen, bepaalt de waarde van de parameters voor de eerste iteratie. Om te voorkomen dat niet-lineaire effecten een rol spelen, worden niet direct deze parameterwaarden gebruikt, maar wordt een stap-grootte van 25% (relaxatie-parameter) toegepast in de parameter-ruimte richting het gevonden optimum. Verder wordt de relaxatie-parameter verkleind als de volgende iteratie niet leidt tot een beter resultaat. Indien de relaxatie-parameter drie keer is verkleind en daarna drie keer negatief is vergroot, wordt een willekeurige stap in de parameter-ruimte wordt uitgevoerd. Het principe van de *DUD*-methode is verder toegelicht in Bijlage A.

4 Deel 1 – Kalibratie van hydrodynamische en morfologische parameters

4.1 Hydrodynamica

De hydrodynamica is gekalibreerd op een drietal parameters: *alpha*, *gamma* en *gamma2* (voor een toelichting op deze keuze wordt verwezen naar Appendix E.2). De *DUD*-methode is gebruikt om gemiddeld over een zestal experimenten een optimale fit (uitgedrukt in de foutmaat uit paragraaf 3.2) te vinden tussen de gemeten korte golfhoogte en de gemodelleerde korte golfhoogte.

In de gevoeligheidsstudie zijn standaard boven- en ondergrenzen voor parameterwaardes gebruikt om een eerste indicatie te krijgen van het belang van verschillende parameters. Echter, in de kalibratie waarbij meerdere parameters tegelijk kunnen veranderen, zijn combinaties van modelparameters mogelijk die zeer afwijken van fysisch realistische waarden en waarden die in de literatuur gerapporteerd worden. Zo is het met een standaard *DUD*-aanpak mogelijk om een onrealistische combinatie van *gamma* en *alpha* (welke in de literatuur waarden hebben rond 0,5 en 1,0, e.g., Roelvink, 1993) te krijgen (omdat deze elkaar deels kunnen compenseren) en is het fysisch onmogelijk dat *gamma2* groter is dan *gamma*. Binnen het kader van BOI is het wenselijk om parameter waardes te zoeken die fysisch correct zijn en dicht liggen bij gerapporteerde waarden in andere onafhankelijke studies. Om de *DUD*-methode richting een realistisch optimum te laten convergeren is daarom, op basis van deze inzichten en eerdere ervaringen, de range van deze parameters vooraf vernauwd ten opzichte van de range gebruikt in de gevoeligheidsstudie. Een overzicht van de gebruikte ranges is getoond in Tabel 4-1. Daarnaast is bij beperkte verbetering van de foutmaat (<0,01 verbetering in de relatieve fout) door verdere optimalisatie van de parameters gekozen voor parameter instellingen die dicht bij eerder gepubliceerde waarden liggen.

Tabel 4-1 Overzicht van de vernauwde parameterranges die gebruikt zijn in de hydrodynamische optimalisatie

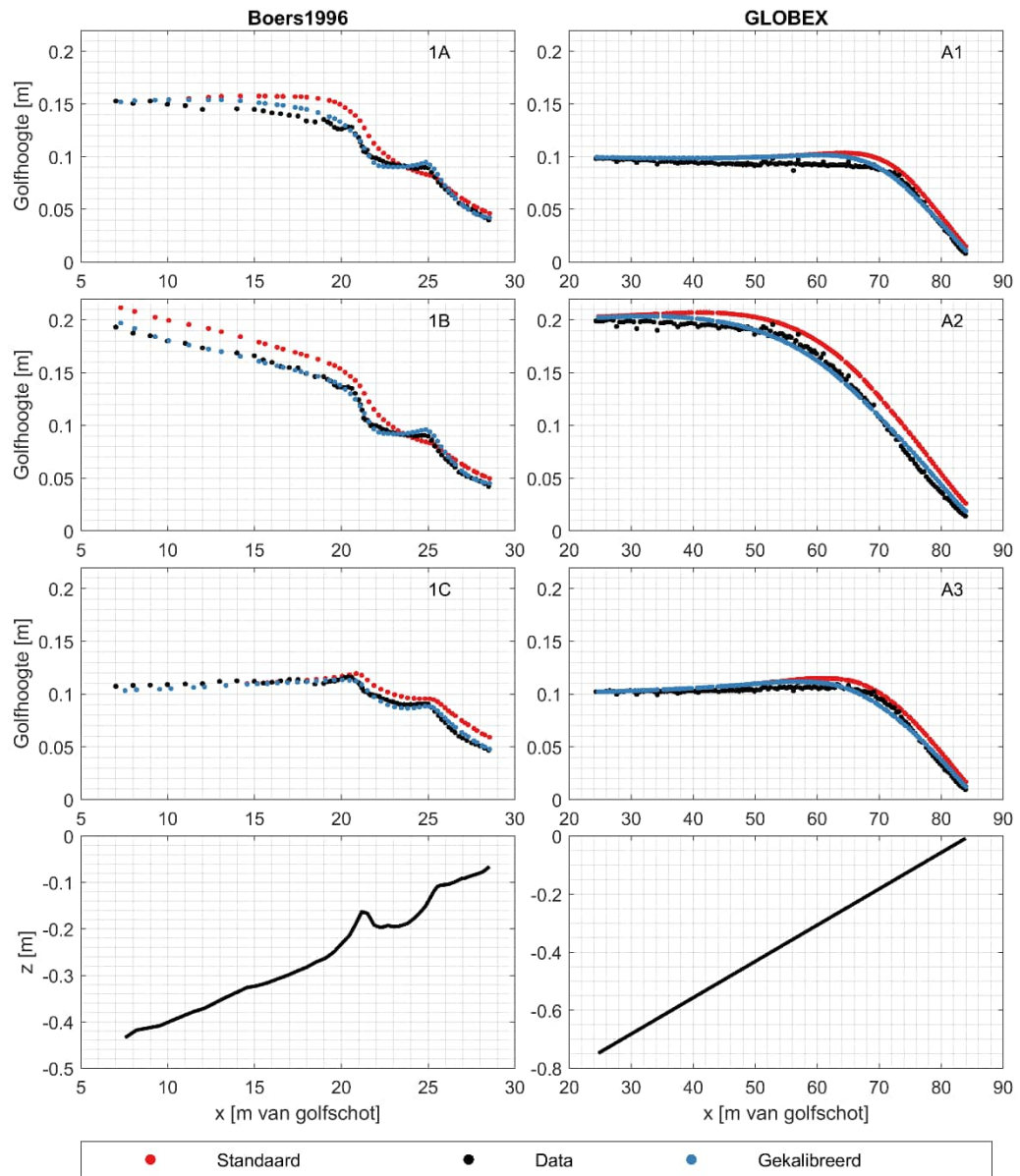
Parameter	alpha	gamma	gamma2
Range	0,5-1,5	0,46-0,6	0,24-0,38

In Tabel 4-2 is een overzicht weergegeven van de uitkomsten van de *DUD* kalibratie. Voor de bestaande standaardwaarden ('default settings' in het Engels) van de parameters werd een fout (RMS - *root-mean-square* - van de foutmaat van de zes experimenten) gevonden van 0,16. Voor de gekalibreerde parameterwaardes reduceerde deze fout met 59% (Tabel 4-2).

Tabel 4-2 Overzicht van de verschillende parameterwaardes met bijbehorende fout (*root-mean-square* over de foutmaat van de 6 hydrodynamische experimenten). De gekozen afgestelde waardes van de parameters zijn groen gemarkeerd.

Parameterset	Fout	alpha	gamma2	gamma	Verbetering van de fout ten opzichte van standaard waarden
Standaard	0,16	1,00	0,30	0,55	
Gekalibreerd	0,07	1,38	0,34	0,46	59%

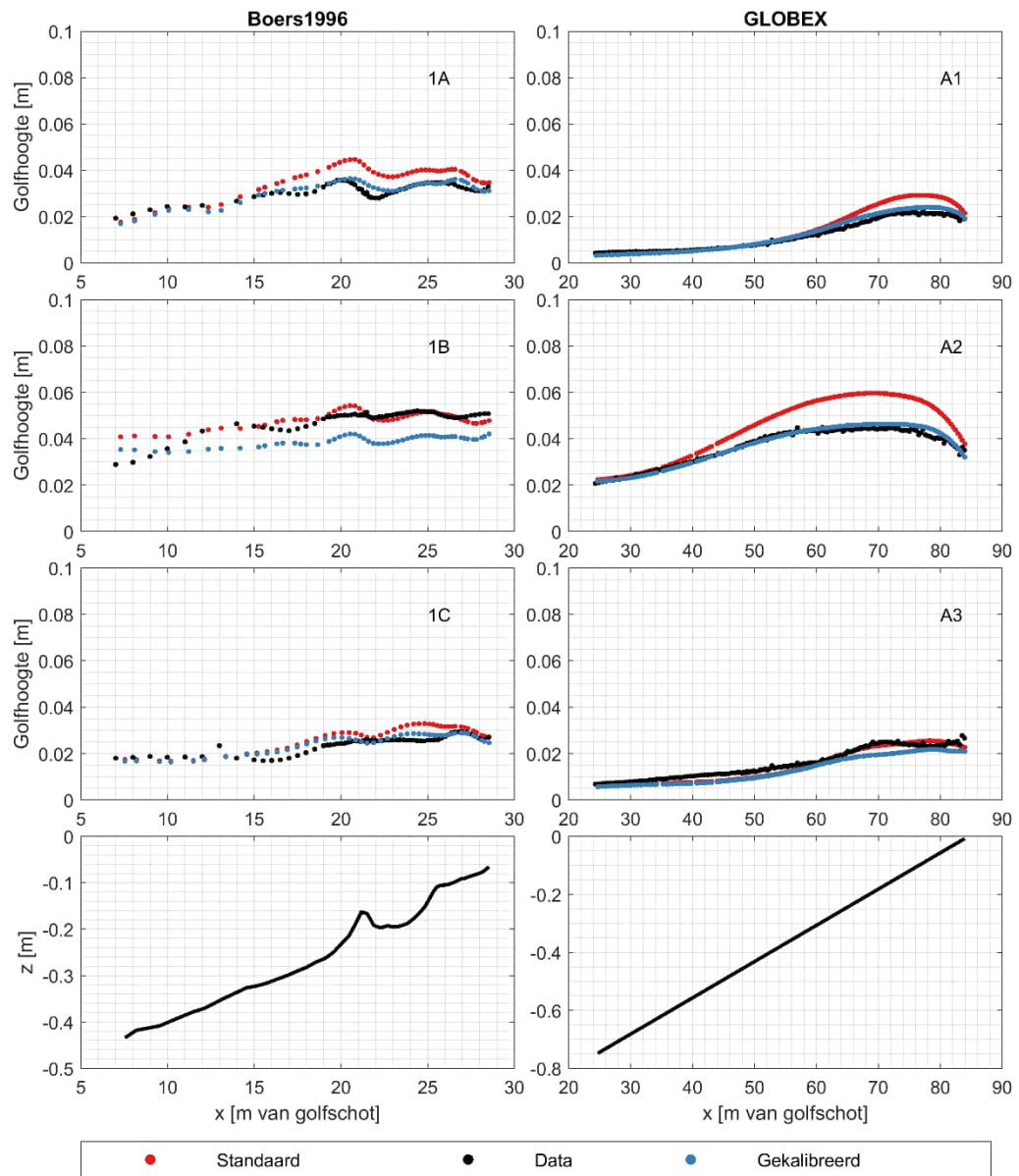
Figuur 4-1 toont voor de verschillende parameterwaarden de gemodelleerde korte golfhoogte versus de in het laboratorium geobserveerde korte golfhoogte. Voor de Boers (1996) experimenten is een significante verbetering waarneembaar voor de simulaties met gekalibreerde parameterwaarden, voornamelijk in de brekerzone. Voor de GLOBEX experimenten zijn de verschillen tussen standaard- en gekalibreerde parameterwaarden minimaal.



Figuur 4-1 Overzicht van de voor 6 experimenten (3x Boers1996 en 3x GLOBEX) in het laboratorium geobserveerde korte golfhoogte (in zwart) versus de met XBeach gesimuleerde korte golfhoogte voor 2 verschillende parameterwaarden, met in rood de standaard parameterwaarden en in blauw de gekalibreerde parameterwaarden.

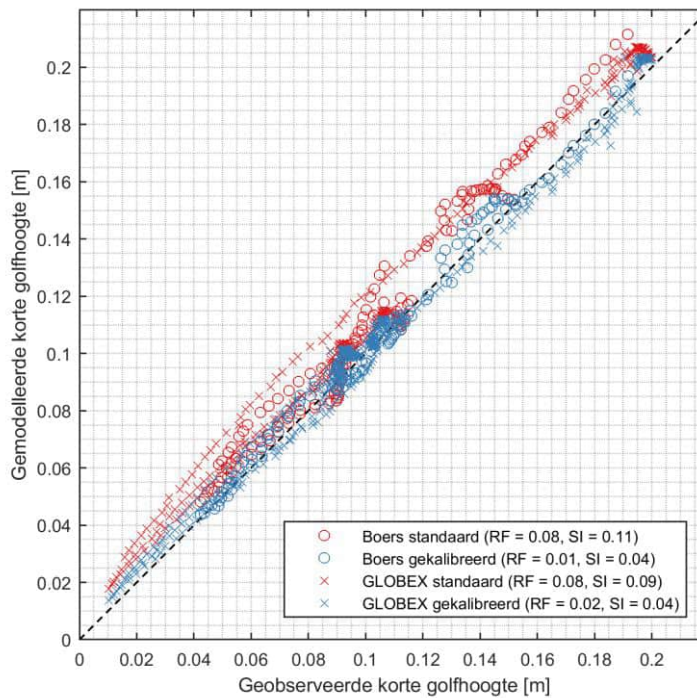
Als aanvulling op de beschouwing van de korte golfhoogtes is in Figuur 4-2 een overzicht van de in het laboratorium geobserveerde en de met XBeach gemodelleerde lange golven weergegeven.

Hoewel er niet op expliciet op de lange golven is gekalibreerd door het weglaten van bodemwrijving als kalibratieparameter, resulteren de gekalibreerde parameterwaarden ook voor de lange golven in een betere fit van de modelresultaten met de observaties. In de veldvalidatie taken van BOI Zandige Waterkeringen Projectfase 1 zal in meer detail worden gekeken naar de representatie van lange golven door XBeach aan de hand van velddata.

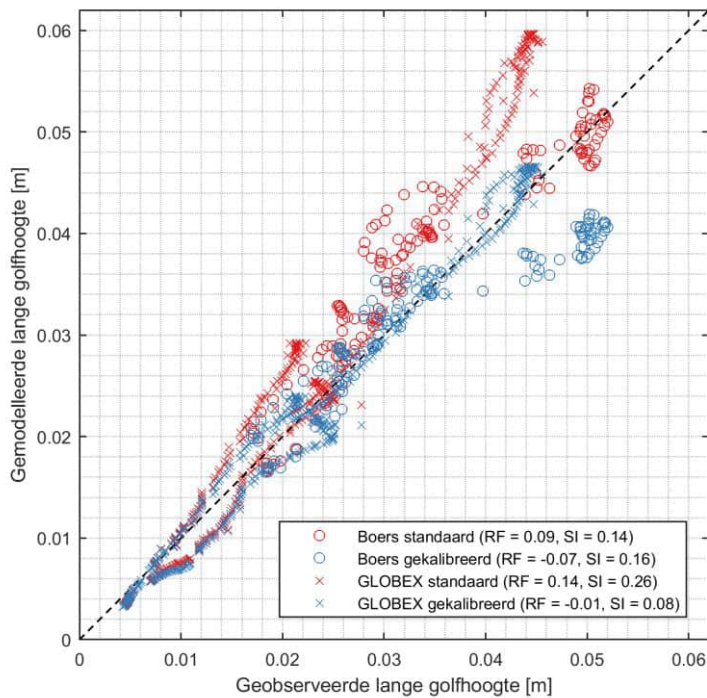


Figuur 4-2 Overzicht van de voor 6 experimenten (3x Boers1996 en 3x GLOBEX) in het laboratorium geobserveerde lange golfhoogte (in zwart) versus de met XBeach gesimuleerde lange golfhoogte voor 2 verschillende parameterwaarden, met in rood de standaard parameterwaarden en in blauw de gekalibreerde parameterwaarden.

Om de verbetering in hydrodynamische prestaties inzichtelijker te maken is een grafische vergelijking gemaakt van alle geobserveerde golfhoogtes (verdeeld over de zes hydrodynamische experimenten) tegenover de gemodelleerde golfhoogtes. De spreidingsplots weergegeven in Figuur 4-3 en Figuur 4-4 laten zien dat de gemodelleerde golfhoogtes voor de gekalibreerde parameterwaarden dichter bij de 1-op-1 lijn liggen dan voor de standaard waarden voor zowel de korte- als lange golfhoogte.



Figuur 4-3 Geobserveerde korte golfhoogte versus de gemodelleerde korte golfhoogtes, geaggregeerd voor de 6 verschillende hydrodynamische experimenten (Boers weergegeven met 'o' en GLOBEX met 'x') en twee verschillende parametersets met in rood de standaard waarden en in blauw de gekalibreerde set. De waarden van de relatieve fout (RF) en spreidingsindex (SI) zijn voor de verschillende sets weergegeven in de legenda.



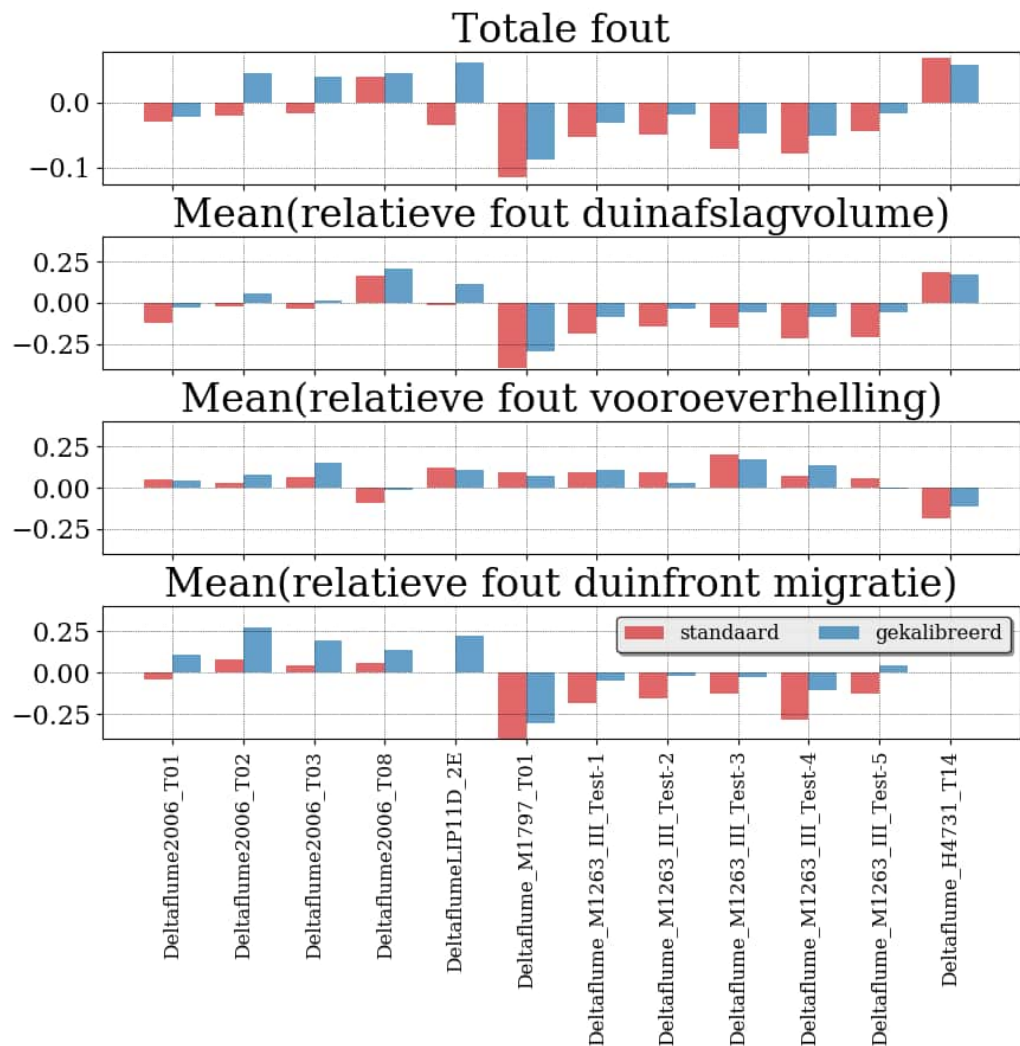
Figuur 4-4 Geobserveerde lange golfhoogte versus de gemodelleerde lange golfhoogtes, geaggregeerd voor de 6 verschillende hydrodynamische experimenten (Boers weergegeven met 'o' en GLOBEX met 'x') en twee verschillende parametersets met in rood de standaard waarden en in blauw de gekalibreerde set. De waarden van de relatieve fout (RF) en spreidingsindex (SI) zijn voor de verschillende sets weergegeven in de legenda.

4.2 Morfologie

De *DUD*-kalibratiemethode is toegepast om de morfologische parameters te optimaliseren op basis van een set laboratoriumexperimenten (voor een overzicht van de experimenten zie Bijlage B). Op basis van een gevoeligheidsanalyse (Bijlage E) zijn de morfologische parameters *facSk*, *facAs*, *beta* en *Wetslp* geselecteerd voor kalibratie, waarbij overige parameters zijn ingesteld op de bestaande standaard waarden.

De totale foutmaat en de RMS-waarden van de drie relatieve fouten zijn weergegeven in Figuur 4-5 voor de afzonderlijke experimenten. Gemiddeld over alle simulaties is de relatieve fout 0,13. De gemiddelde foutmaat in erosievolume is 0,11, in vooroeverhelling 0,13 en duinfront migratie 0,14.

Ten opzichte van de huidige standaardinstellingen is een duidelijke verbetering zichtbaar. Alleen voor de Deltagoot 2006 experimenten is de fout groter dan met de bestaande standaard instellingen, maar voor de overige experimenten is de fout verkleind. Dit komt voornamelijk doordat de Deltagoot 2006 tests zijn gebruikt om de huidige standaardinstellingen vast te stellen, maar niet de M1263 experimenten. Deze laatste zijn nu ook meegenomen in de kalibratie en bepalen mede de optimale parameterinstellingen voor alle laboratoriumproeven samen. In de modelresultaten is een duidelijk onderscheid zichtbaar tussen de Deltagoot 2006 sommen met een overschatting (positieve fout) in het afslagvolume en de Deltagoot M1263 sommen waar het duinafslagvolume is onderschat (negatieve fout). Dit onderscheid suggereert ook dat er geen beter optimum gevonden kan worden. Een verandering van een van de morfologische parameters met bijvoorbeeld als gevolg een vermindering van de erosie zal namelijk resulteren in een kleinere fout bij de Deltagoot 2006 sommen (aangezien de erosievolumes werden overschat), maar tegelijkertijd zal de onderschatting van het afslagvolume voor de Deltagoot M1263 sommen nog groter worden. Het gevonden optimum voor deze 4 parameters is weergegeven in Tabel 4-3.



Figuur 4-5 Histogrammen van de verschillende fouten per laboratorium experiment, met in rood de fout bij de standaard (default) instellingen, en in blauw de fout bij de nieuw gekalibreerde (optimale) instellingen. De totale fout bestaat uit de gemiddelde absolute waarde van de drie afzonderlijke relatieve fouten, vermenigvuldigd met het teken van het erosievolumen (overschatting of onderschatting). Gemiddeld over alle simulaties is de relatieve fout 0,13. De gemiddelde absolute foutmaat in erosie volume is 0,11, voor de vooroeverhelling 0,13 en voor de duinfront migratie 0,14.

Tabel 4-3 Oude standaard instellingen en nieuw gekalibreerde parameters. De gekozen afgestelde waarden van de parameters zijn groen gemarkeerd.

Parameterset	beta	facSk	facAs	wetslp	Totale foutmaat
Standaard instellingen	0,1	0,1	0,1	0,3	0,16
Gekalibreerd	0,08	0,15	0,25	0,18	0,13

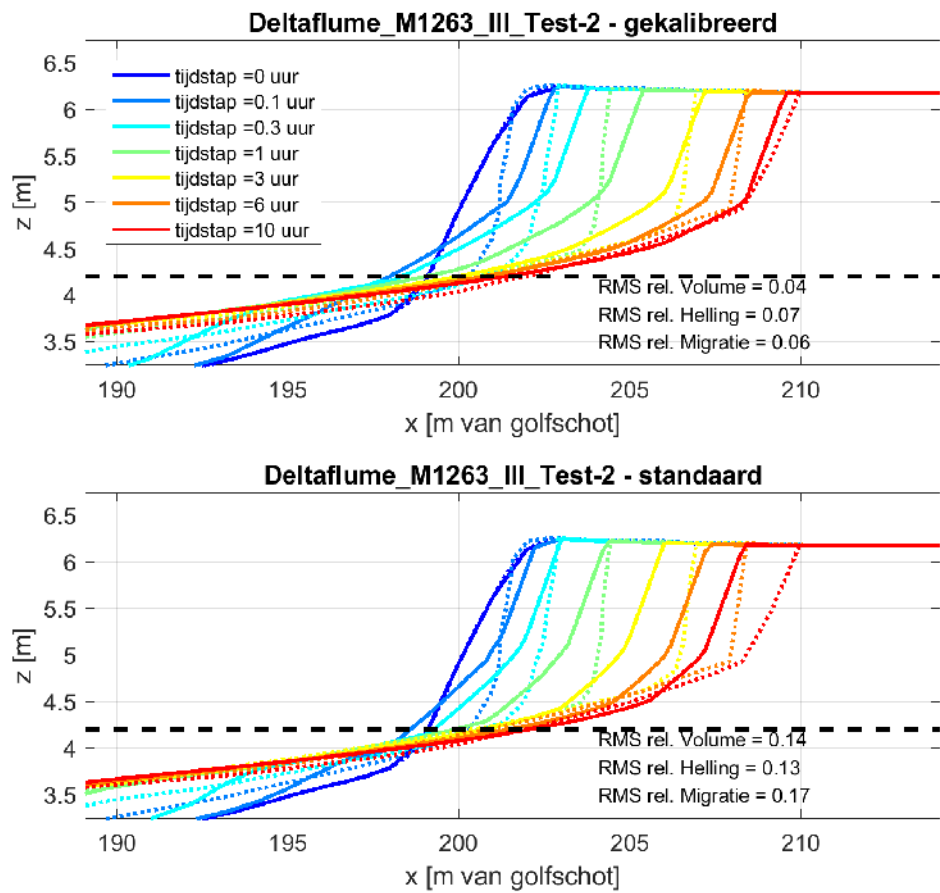
Om een indruk te geven van de overeenkomsten en verschillen in morfologische verandering tussen laboratorium observaties en modelvoorspellingen, zijn hieronder vier voorbeelden uitgelicht variërend van een relatief kleine naar een grotere fout. De figuren van de overige experimenten zijn toegevoegd in Bijlage F.

Als eerste zijn de geobserveerde en voorspelde morfologische veranderingen vergeleken voor test 2 van de Deltagoot M1263 experimenten (Figuur 4-6). Modelresultaten met de nieuw gekalibreerde parameterwaarden laten voor dit experiment een goede overeenkomst zien met de metingen, met een kleine onderschatting van het totale relatieve erosie volume (0,04) en een totale fout van 0,06.

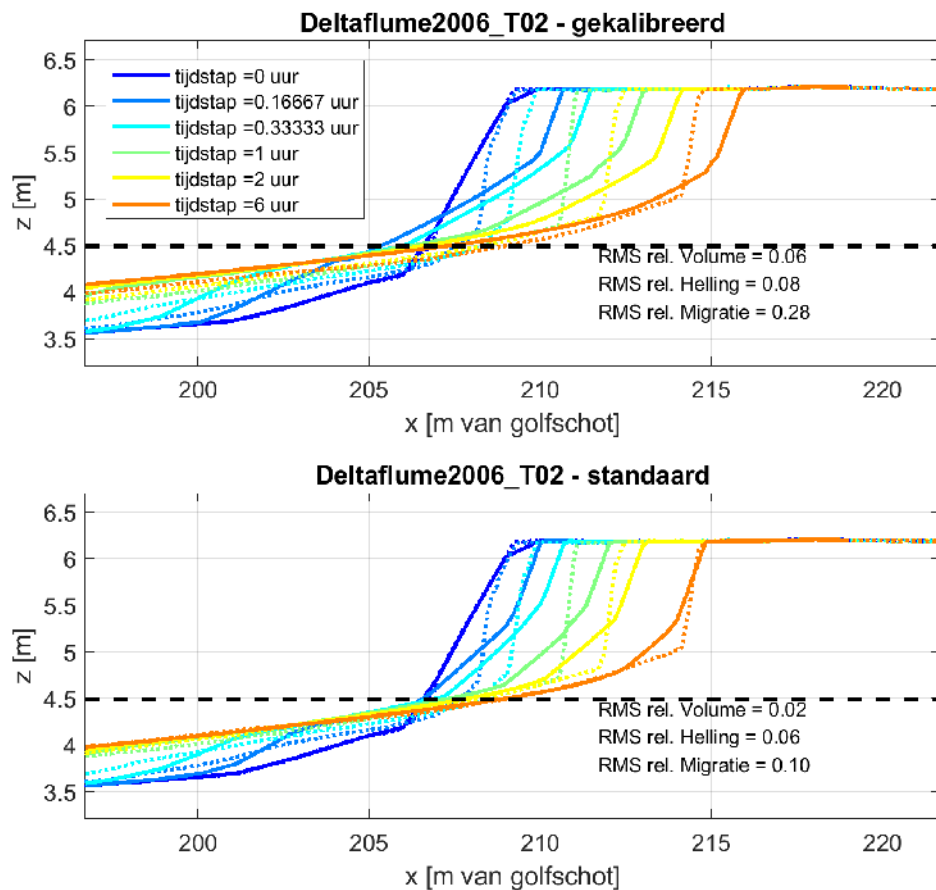
Bij het gevonden optimum komen de profielen beter overeen dan bij de eerder afgeleide standaard instellingen (RMS van het relatieve erosievolume is verbeterd van 0,14 naar 0,04). In de simulatie met de eerder afgeleide standaard instellingen is het afslagvolume kleiner dan in de meting, waardoor ook de duinmigratie niet overeen komt met de metingen voor de eerder afgeleide instellingen. Dit verschil is kleiner voor het gevonden optimum, waar het afslagvolume en de duinmigratie beter overeen komen met de metingen. Voor dit specifieke experiment is ook de onderwaterhelling significant verbeterd voor de nieuw gekalibreerde parameterset.

Voor test 2 van de Deltagoot M1263 geldt, maar ook meer in het algemeen voor de overige experimenten, dat de fout aan het begin van de simulatie groter is dan aan het eind. Dit kan verklaard worden door het feit dat een kleine verandering in het begin een relatief grote afwijking kan veroorzaken, en daarmee een grote fout, ondanks het feit dat er consequent genormaliseerd wordt met het totale erosievolume aan het eind van de simulatie. Daarbij is het belangrijk om te vermelden dat ook de gemeten hellingen variabel zijn door de tijd heen, met een eindhelling die over het algemeen wat flauwer is. Het kan zijn dat tijdens de experimenten de eindhelling relatief laat ingemeten is, waardoor een latere aanpassing van het duinfront, na de afloop van de gesimuleerde storm in het laboratorium door bijvoorbeeld avalanching zorgt voor verflauwing. Daarentegen laten de XBeach simulaties een constante profielvorm zien, die met de tijd en toenemende erosie verder landwaarts verschuift. De XBeach voorspellingen sluiten beter aan bij de flauwere eindprofielen. De *bermslope*-formulering zou theoretisch uitkomst kunnen bieden, maar zorgt voor de huidige set aan laboratorium experimenten niet voor een betere overeenkomst (zie paragraaf 3.3).

Het Deltagoot 2006 T02 experiment laat daarentegen een relatief minder goede overeenkomst zien tussen laboratoriummetingen en modelvoorspellingen (Figuur 4-7) met een relatieve fout van 0,14. De XBeach modelvoorspellingen voor deze specifieke proef zijn minder goed met de algemene nieuw gekalibreerde instellingen dan met de eerder afgeleide standaardinstellingen. Voornamelijk de duinfrontmigratie is overschat met de nieuwe parameter instellingen (0,28) ten opzichte van de eerder afgeleide instellingen (0,10). Zoals eerder genoemd zal een verdere parameter optimalisatie op deze Deltagoot 2006 experimenten helaas tot ongunstige resultaten leiden voor de Deltagoot M1263 sommen, waar nu een onderschatting van duinfrontmigratie is geregistreerd.

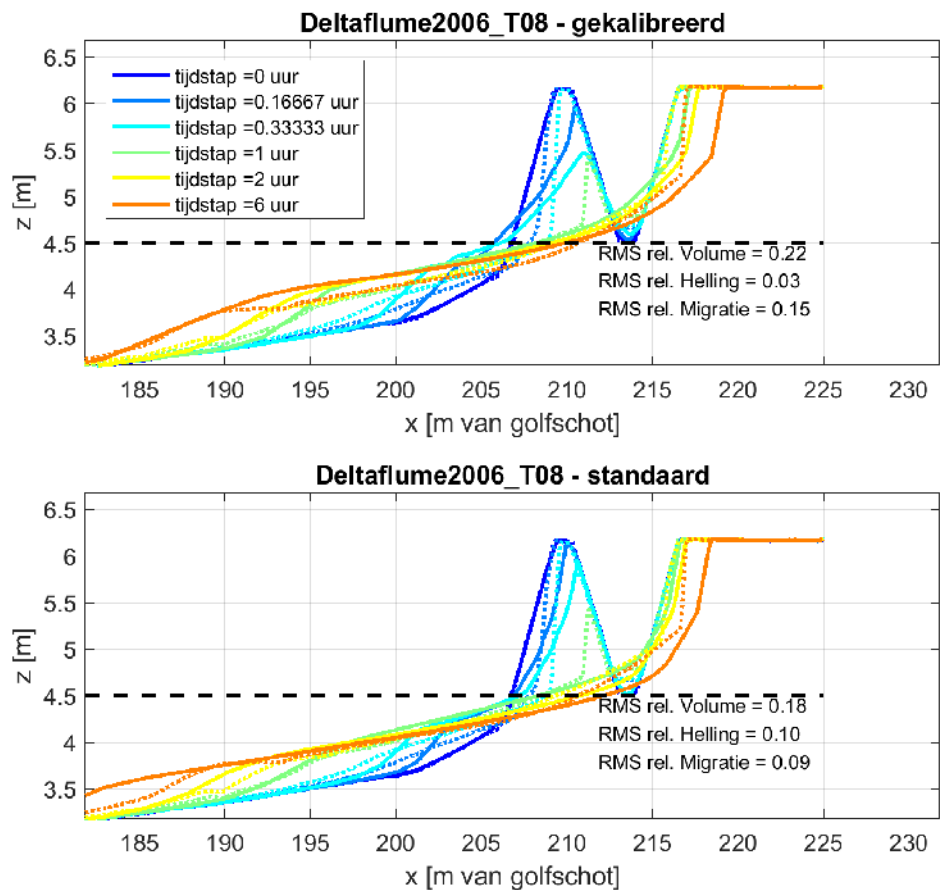


Figuur 4-6 Duinafslag-profielen voor het Deltagoot M1263 Test 2 experiment met de nieuw gekalibreerde parameterinstellingen (boven) en de oude standaard parameterinstellingen (onder). De gemeten profielen zijn weergegeven in gestippelde lijnen en de XBeach resultaten zijn weergegeven in volle lijnen. De zwarte onderbroken lijn is het maximale stormpeil.



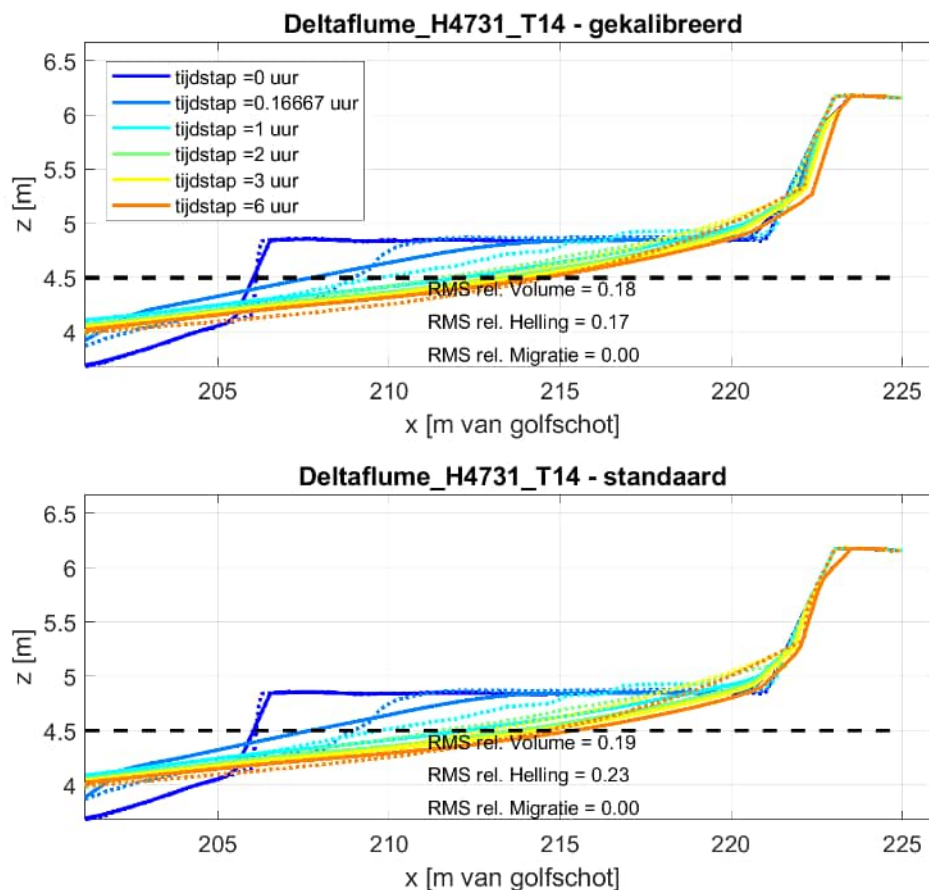
Figuur 4-7 Afslag profielen voor het Deltagoot 2006 T02 experiment bij de nieuw gekalibreerde parameterinstellingen (boven) en de oude standaard parameterinstellingen (onder). De gemeten profielen zijn weergegeven in gestippelde lijnen en de XBeach resultaten zijn weergegeven in volle lijnen. De zwarte onderbroken lijn is het maximale stormpeil.

De resultaten voor Deltagoot 2006 T08 laten een vergelijkbare relatieve fout zien van 0,13 (Figuur 4-8). In dit geval wordt dit met name veroorzaakt door het dubbele duin die aanwezig is in het profiel, waarbij het eerste duin erg dynamisch is. Hierdoor geeft een relatief kleine afwijking in erosiesnelheid een relatief grote fout in bijv. migratie van het duinfront. Over het algemeen komt de voorspelde profielverandering tijdens de storm, en met name het eindprofiel, goed overeen met de metingen.



Figuur 4-8 Afslag profielen voor het Deltagoot 2006 T08 experiment bij de nieuw gekalibreerde parameterinstellingen (boven) en de oude standaard parameterinstellingen (onder). De gemeten profielen zijn weergegeven in gestippelde lijnen en de XBeach resultaten zijn weergegeven in volle lijnen. De zwarte onderbroken lijn is het maximale stormpeil.

Een ander experiment dat nog een relatief grote fout (0,17) laat zien is het Deltagoot H4731 T14 experiment, waarin de XBeach modelvoorspellingen de erosieve trend overschatten (Figuur 4-9). Het startprofiel van het Deltagoot H4731 T14 experiment is een lage en brede duin, met een hogere duin verder landwaarts. De lage duin wordt geërodeerd tijdens de eerste twee uur van de storm, en het zand wordt zeewaarts meegenomen en op het strand afgezet. Over het algemeen voorspelt XBeach de morfologische veranderingen goed, al is er een kleine overschatting van de erosiesnelheden, en wordt de hogere duin teveel afgeslagen terwijl dat in de metingen beperkt blijft. Er zijn nauwelijks verschillen tussen de modelsimulaties met de oude standaardinstellingen en nieuw gekalibreerde instellingen. Voor deze specifieke test is de duinmigratie niet meegenomen in de totale score voor de kalibratie, vanwege een duinmigratie van 0 m in de gemeten profielen. Het is dus niet mogelijk om een relatieve fout ten opzichten van de metingen te definiëren. Er is daarom gekozen om de fout in de duinmigratie niet mee te nemen, ondanks dat XBeach berekeningen wel een duinmigratie toont. Er wordt verwacht dat dit effect niet heel groot zou zijn op de gevonden parameters, omdat de duinmigratie voor deze specifieke test erg minimaal is.



Figuur 4-9 Afslag profielen voor het Deltagoot H4731 T14 experiment bij de nieuw gekalibreerde parameterinstellingen (boven) en de oude standaard parameterinstellingen (onder). De gemeten profielen zijn weergegeven in gestippelde lijnen en de XBeach resultaten zijn weergegeven in volle lijnen. De zwarte onderbroken lijn is het maximale stormpeil.

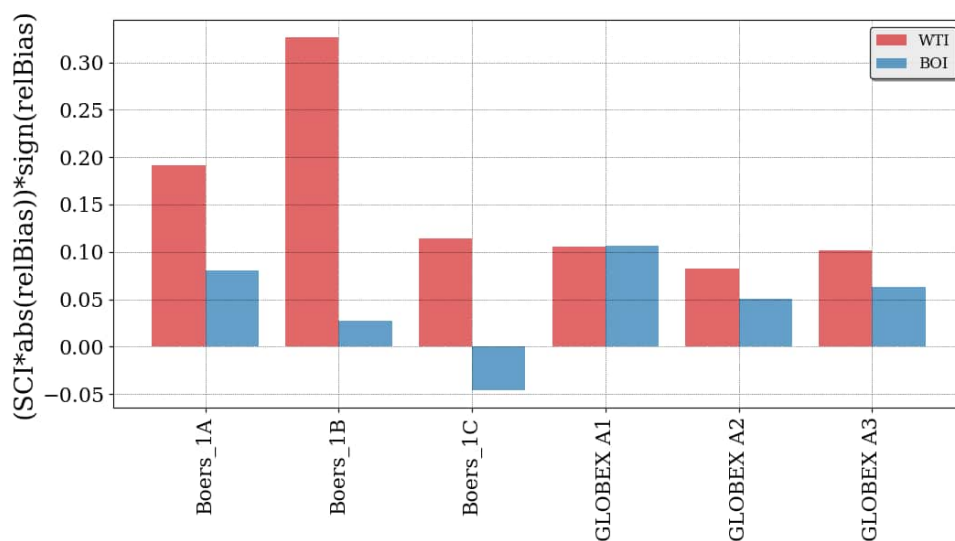
4.3 Vergelijking met WTI versie

In 2014 is het XBeach model met bijbehorende standaardinstellingen opgeleverd voor toepassing aan de Nederlandse kust, dit wordt ook wel de WTI versie genoemd (Deltares, 2014). Deze versie en instellingen zijn sinds 2014 meermaals binnen de Nederlandse context toegepast voor ontwerp en toets-op-maat. Sinds 2014 is echter het XBeach model verder ontwikkeld, waardoor de WTI instellingen niet meer eenduidig toepasbaar zijn op de huidige versie. Om ook een indruk te geven van de verandering in resultaten sinds de WTI versie, zijn hieronder de algehele foutmaten van de WTI versie (WTI versie van XBeach in combinatie met de WTI instellingen) vergeleken met de nieuwe XBeach versie en de nieuw afgeleide BOI instellingen. Gedetailleerde figuren zijn gepresenteerd in Bijlage G.

Het is belangrijk om te herhalen dat de huidige kalibratieaanpak grotendeels overeen komt met aanpak die is gebruikt tijdens de afleiding van de WTI-instellingen (Deltares, 2014), al zijn er enkele aanpassingen. In de huidige studie is een nieuwe selectieprocedure toegepast voor de laboratoriumexperimenten die worden gebruikt in de kalibratie (Bijlage A). Verder is naar een aanbeveling van de WTI studie (Hoofdstuk 3.7 van Deltares, 2014) de kalibratie nu afzonderlijk uitgevoerd voor de hydrodynamische parameters op basis van golfmetingen, en morfologische parameters op basis van morfologische metingen. Dit is anders dan bij het afleiden van de WTI-instellingen, waarbij de hydrodynamische en morfologische parameters gezamenlijk zijn gekalibreerd, op basis van alleen het berekende duinerosievolume. In de huidige opzet wordt

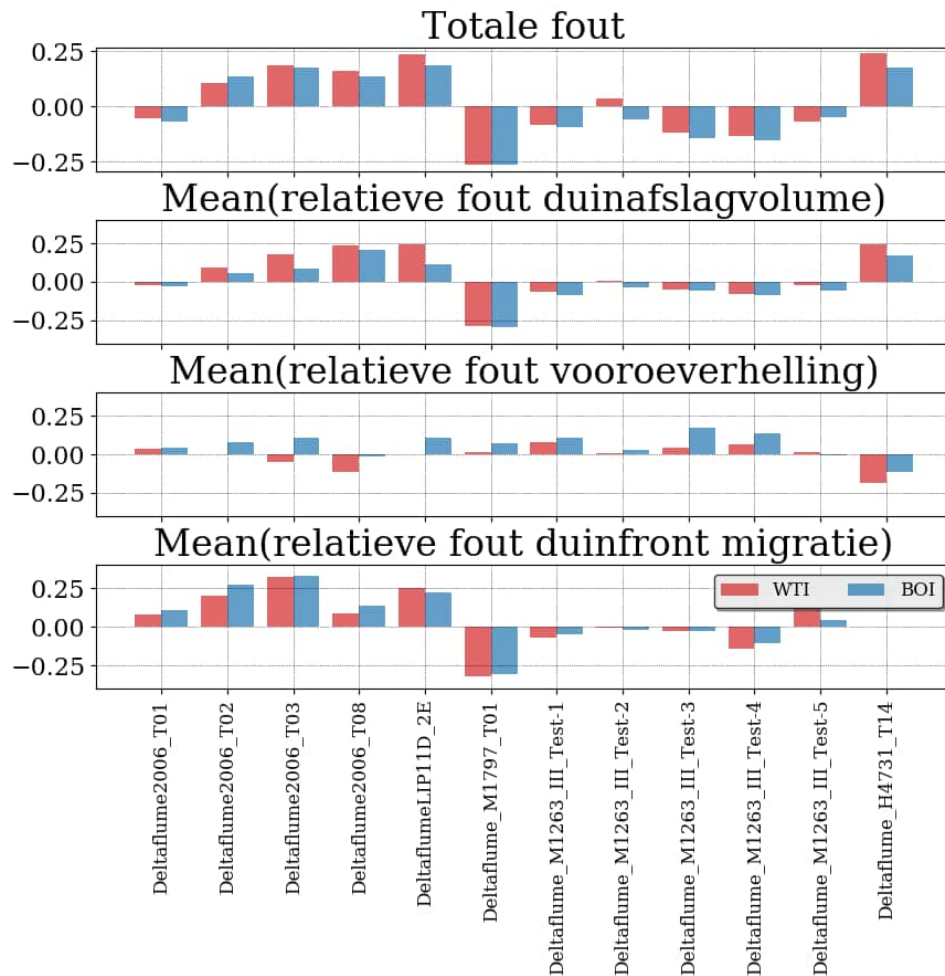
voorkomen dat slecht gekozen hydrodynamische parameters, met bijvoorbeeld als gevolg te veel golfbreken, qua morfologisch gedrag worden gecompenseerd door andere slecht gekozen morfologische parameters. Aangezien de morfologische ontwikkelingen op natuurlijke kustprofielen afhankelijk zijn van de kwaliteit van de hydrodynamische voorspellingen, vergroot een goede voorspelling van de hydrodynamica met de BOI versie en nieuw afgeleide instellingen het vertrouwen in het model.

De afzonderlijke resultaten voor de hydrodynamische indicator zijn zichtbaar in Figuur 4-10. Hierin is een duidelijke overschatting van de korte golfhoogte zichtbaar voor de WTI versie. De nieuw afgeleide instellingen bij de nieuwe XBeach versie laten een meer gematigd beeld zien met lichte overschatting of onderschatting afhankelijk van de test – wat duidt op een optimum voor deze zes tests tezamen. De totale hydrodynamische foutmaat met de WTI instellingen is 0,18, wat aanzienlijk hoger is dan de foutmaat met de nieuw gekalibreerde BOI instellingen van 0,07. Deze reductie van de foutmaat is voornamelijk bewerkstelligt door een betere reproductie van de Boers (1996) experimenten.



Figuur 4-10 Histogrammen van de verschillende fouten per laboratorium experiment, met in rood de fout bij WTI versie (en bijbehorende instellingen), en in blauw de fout bij de nieuwe XBeach versie met nieuw afgeleide BOI standaardinstellingen.

Een vergelijking van de morfologische voorspellingen op basis van de drie indicatoren (erosievolume, vooroeverhelling en duinfront migratie) toont aan dat met de WTI versie sterk vergelijkbare resultaten kunnen worden behaald als met de nieuwe BOI versie (Figuur 4-10). De algehele foutmaat met de WTI instellingen is 0,14 wat bijna gelijk is aan de foutmaat van de nieuw gekalibreerde BOI instellingen (0,13). Dit geeft aan dat beide modellen de morfologische veranderingen, voor de onderzochte strandprofielen, ongeveer even goed voorspellen.



Figuur 4-11 Histogrammen van de verschillende fouten per laboratorium experiment, met in rood de fout bij WTI versie, en in blauw de fout bij de nieuwe XBeach versie met nieuw afgeleide instellingen. De totale fout bestaat uit de gemiddelde absolute waarde van de drie afzonderlijke relatieve fouten, vermenigvuldigd met het teken van het erosievolumen (overschatting of onderschatting).

De algemene overeenkomsten in de morfologische voorspellingen tussen WTI XBeach, welke sinds 2014 voor de Nederlands kust wordt toegepast, en de nieuwe BOI XBeach versie (inclusief nieuwe instellingen) geven algemeen vertrouwen in de toepasbaarheid van deze versie voor de beoordeling van de Nederlandse duinenkust. De betere hydrodynamische onderbouwing van de voorspellingen in de nieuwe BOI XBeach versie vergroot daarbij het vertrouwen in het model ten opzichte van de WTI versie, vooral voor gebruik onder omstandigheden die afwijken van de (geschaalde) condities in de laboratorium experimenten.

5 Deel 1 – Conclusies en aanbevelingen

5.1 Conclusies

De doel van dit onderzoek is: “*Het afleiden van de XBeach model instellingen door kalibratie met laboratorium experimenten die representatief zijn voor de Nederlandse kust*”.

Aangezien niet alle modelparameters kunnen worden meegenomen in het kalibratieproces, zijn allereerst de relevante parameters geselecteerd op basis van expertbeoordeling. Daaropvolgend zijn met een uitgebreide gevoeligheidsanalyse de volgende zeven parameters geselecteerd voor kalibratie: *alpha*, *gamma*, *gamma2*, *beta*, *facAs*, *facSk* en *wetslp*. Aanvullend op de selectie van deze parameters is ook aandacht besteed aan de keuzes in de representatie (formuleringen) van de fysische processen. Voor de bodemwrijving is gekozen voor de formulering van *Manning*, de *roelvink_daly* formulering is gekozen als golfbrekingsmodel en de *van_thiel* formulering is gebruikt ter beschrijving van het effect van de golfvorm op het sedimenttransport.

De hydrodynamische parameters *alpha*, *gamma* en *gamma2* zijn als eerste gekalibreerd op basis van gedetailleerde, hoge-resolutie laboratorium datasets met een gefixeerde bodem. Deze hydrodynamische kalibratie was in het bijzonder gericht op een goede overeenkomst tussen de geobserveerde en voorspelde korte golfhoogten over het kustdwarse profiel. Aansluitend zijn de morfologische parameters *beta*, *facAs*, *facSk* en *wetslp* gekalibreerd met datasets van laboratorium proeven met een ontwikkelende zandige bodem. Voor deze tweede kalibratiestap is er een foutmaat gedefinieerd waarin het duinerosievolume, de duinfrontmigratie en de vooroeverhelling zijn meegenomen. Het verschil tussen de observaties en modelvoorspellingen is vervolgens geminimaliseerd door middel van het kalibratieproces, waarmee de afgestelde parameterinstellingen zijn gevonden.

De afgestelde parameterinstellingen van de zeven geselecteerde parameters zijn hieronder gepresenteerd:

Tabel 5-1 Nieuw gekalibreerde parameterwaarden voor de geselecteerde parameters.

alpha	gamma	gamma2	beta	facSk	facAs	wetslp
1,38	0,46	0,34	0,08	0,15	0,25	0,18

Gemiddeld over de morfologische simulaties genomen is de relatieve fout met de nieuw gekalibreerde parameterwaarden 13% ten opzichte van de metingen (samengenomen voor duinerosievolume, duinfrontmigratie en vooroeverhelling). De hydrodynamische voorspellingen zijn sterk verbeterd ten opzichte van de WTI versie (7% afwijking i.p.v. 18% met WTI), terwijl de morfologische voorspellingen vrijwel gelijk zijn gebleven. Door de sterk verbeterde beschrijving van de hydrodynamische processen is het echter aannemelijk dat de nieuw gekalibreerde parameterwaarden duinerosieprocessen beter zullen beschrijven op kustprofielen die afwijken van de kalibratiedataset dan de WTI versie.

5.2 Aanbevelingen

5.2.1 Voor vervolg BOI

- In lijn met de Plan van Aanpak Vernieuwd Instrumentarium Zandige Keringen, dienen de nieuw gekalibreerde parameterinstelling onafhankelijk gevalideerd te worden op basis van data uit veldexperimenten. Dit kan plaatsvinden binnen de taken “Validatie lange golven”, “Validatie hoger frequente stormen” en “Validatie kernmodel” van het project BOI Zandige Waterkeringen (Projectfase 1).
- Tot eventuele nieuwe inzichten beschikbaar worden aan de hand van de veldvalidatie studies, wordt het gebruik van de nieuw gekalibreerde parameterinstelling in plaats van de default modelinstellingen wordt aangeraden in alle opvolgende studies binnen het BOI Zandige Waterkeringen project.
- De reeds geïmplementeerde *bermslope*-formulering is meegenomen tijdens het kalibratieproces, maar heeft voor de nagebootste condities niet tot een betere overeenkomst geleid met de laboratoriumobservaties. Daarom is er voor de BOI-instellingen gekozen voor een zo simpel mogelijke aanpak, waarbij deze formulering niet meegenomen wordt tijdens de simulaties. Het moet genoemd worden dat voor mildere condities de *bermslope*-formulering wel zou kunnen leiden tot betere voorspellingen. In de taak “Validatie hoger frequente stormen” (Projectfase 1 BOI Zandige Waterkeringen) zou daarom opnieuw gekeken kunnen worden naar mogelijke verbetering door gebruik van de *bermslope*-formulering.

5.2.2 Overige vervolgstudies

- Wat betreft de DUD kalibratiemethode, is het aan te raden het aantal te kalibreren parameters zo klein mogelijk te houden en te beperken tot parameters die zoveel mogelijk onafhankelijk van elkaar zijn. Dit om parameters die overlap in functionaliteit hebben elkaar niet te laten beïnvloeden.
- Voor het toepassen van de DUD kalibratiemethode is een goede afbakening nodig van de bandbreedte van parameter instelling die wordt opgegeven bij de start van de kalibratie. Extreme waarden kunnen anders onrealistisch worden gecompenseerd door andere parameters.
- De XBeach parameterinstellingen zijn in deze studie afgeleid voor een 1D profiel, en zullen tijdens Fase 1 verder gevalideerd worden met hoofdzakelijk 1D velddata. Wanneer in de toekomst 2D validatie data beschikbaar is, wordt aanbevolen om via 2D modelsimulaties de parameterinstellingen verder te optimaliseren.
- De XBeach parameterinstellingen zijn in deze studie afgeleid op basis van beschikbare data van fysische schaalexperimenten. Deze experimenten hebben qua morfologie en hydraulische belasting gelijkenis hebben met extreme condities op de Hollandse kust en Noordzee-Wadden kust. In toekomstige kalibratieprocedures is het wenselijk om ook meetdata te gebruiken van situaties met een ander kustmorfologie (bijvoorbeeld de Nederlandse Delta kust) en ander korrelgrootte (bijvoorbeeld 150 en 300 micrometer). Hiervoor moeten nieuwe laboratoriumexperimenten plaatsvinden. Bij het beschikbaar komen van meer (nauwkeurige) velddata, of laboratoriumdata uit golfbasis, is het ook wenselijk om parameters met betrekking tot langstransporten, (langs-)hellingseffecten, en golfrichtingsspreiding te kalibreren.

Deel 2 – Herkalibratie BOI Standaard instellingen met veldmetingen

6 Deel 2 – Introductie

6.1 Doel van deze studie

Het doel van Deel 2 van deze studie is om drie morfologische modelparameters van de concept BOI-standaardinstellingen te herkalibreren om de nauwkeurigheid van het XBeach model met betrekking tot duinafslag in veldsituaties te vergroten. Deze modelparameters zijn in de concept validatiestudie geïdentificeerd en hebben betrekking op ondiep water sedimenttransport (*facAs* en *wets/p*) en korrelgrootteafhankelijkheid in het afslagproces (α_{D50}), zie Tabel 6.1. De uitkomst van de herkalibratie in Deel 2 is een set met definitieve BOI-standaardinstellingen.

Deze studie betreft een herkalibratie op basis van een beperkte hoeveelheid velddata, kwalitatieve analyse van modelresultaten en *expert-judgement*, zie Sectie 6.3. Hoewel de velddata die gebruikt worden in deze studie representatief zijn voor grote delen van de Nederlandse kust (e.g., gebruik van velddata van de Noorzeekust van Duitsland, Vlaanderen en Holland), is de beschikbare veldinformatie onvoldoende om voor specifieke delen van de Nederlandse kust (e.g., de Zeeuwse kust) afzonderlijk modelparameters te kalibreren. Een volledige beschrijving van de validatie van de rekenkernel XBeach model op basis van de definitieve BOI-standaardinstellingen wordt gegeven in Arcadis/Deltares (2021).

Tabel 6.1 – Overzicht modelparameters voor herkalibratie in Deel 2.

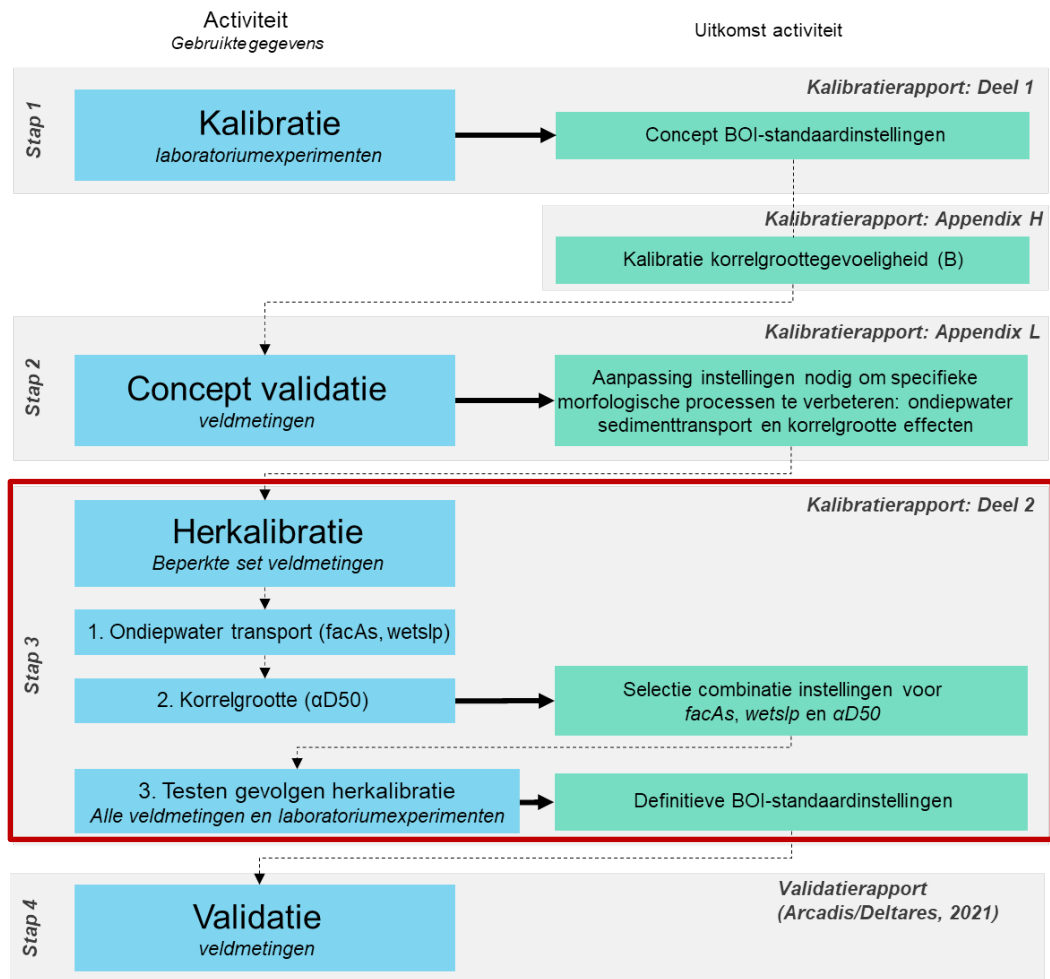
Parameter	Beschrijving	Concept BOI instelling	
		Waarde	Afleiding
wets/p	Kritieke helling (tangens) voor stabiliteit van het onderwaterprofiel. In het XBeach model wordt een onderwaterhelling steiler dan <i>wets/p</i> als geotechnisch instabiel gezien en vindt afschuiving plaats tot de helling gelijk aan <i>wets/p</i> is. Dit vindt vooral plaats in ondiepe delen van het profiel waar door afslag tijdelijk steile hellingen kunnen ontstaan.	0,18	Kalibratie op basis van laboratorium proeven met een ontwikkelende zandige bodem (Deel 1 van deze studie).
facAs	Factor voor sedimenttransport door golfasymmetrie. In het model XBeach wordt een deel (bepaald door parameter <i>facAs</i>) van de orbitaalbeweging van een asymmetrische golf gebruikt om de transportsnelheid van sediment te bepalen. De bijdrage van transport door golfasymmetrie (in de richting van de golf) verkleint de transport in kust-afwaartse richting door de retourstroming (undertow). De mate van deze bijdrage is afhankelijk van de asymmetrie van de golven, en is daarom vooral van belang in ondiep water (grote golfasymmetrie).	0,25	Kalibratie op basis van laboratorium proeven met een ontwikkelende zandige bodem (Deel 1 van deze studie).
α_{D50}	Factor om gesimuleerde sediment transport additioneel te verhogen voor kleine korreldiameters (en verkleinen voor grove korreldiameters) ten opzichte van de transporten berekend op basis Van Rijn (2007). De parameter α_{D50} (waarde groter dan nul) vergroot de gevoeligheid van het XBeach model voor variaties in korreldiameter. De parameter is gebaseerd het werk van Steetzel (1993) en is beschreven in Paragraaf 8.1.	1,6	Kalibratie op basis van resultaten van het DurosTA model (Appendix H)

6.2 Achtergrond

Als onderdeel van het project BOI Zandige Waterkeringen zijn op basis van laboratoriumdata concept BOI-standaardinstellingen bepaald voor de rekenkernel XBeach (zie Deel 1 van dit rapport en Figuur 6-1). Deze standaardinstellingen zijn vervolgens getest in een concept

validatiestudie (Appendix J) aan de hand van veldmetingen van hydrodynamica en duinafslag tijdens stormen.

De concept validatiestudie laat zien dat het model op basis van de concept BOI-standaardinstellingen goed in staat is om gemeten lange en korte golfhoogten aan de kust te reproduceren. Met betrekking tot het berekende afslagprofiel op basis van de concept BOI-standaardinstellingen zijn echter drie punten van aandacht geïdentificeerd: lokaal onnatuurlijk landwaarts transport van zand tijdens een storm, een te hoge positie van de duinvoet in het afslagprofiel, en een te grote gevoeligheid van het model voor variaties in de korrelgrootte. Op basis van de concept validatiestudie is bepaald dat een herkalibratie van de concept BOI-standaardinstellingen nodig is om de nauwkeurigheid van het XBeach model te verbeteren voor toepassingen binnen het programma BOI.



Figuur 6-1 – Stappen binnen het kalibratie-validatie proces om de BOI-standaardinstellingen af te leiden en te valideren. In dit hoofdstuk wordt Stap 3 beschreven.

6.3 Aanpak

De herkalibratie van de drie modelparameters is in drie stappen uitgevoerd (zie ook Figuur 6-1):

Stap 1: kalibratie ondiep water sedimenttransport (wetslp, facAs)

In deze stap worden een vijftal mogelijke wetslp-facAs combinaties geïdentificeerd waarvoor het model een betere voorspelling geeft van het lokaal onnatuurlijk landwaarts transport van zand tijdens een storm en een te hoge positie van de duinvoet in het afslagprofiel. Voor een

beperkte set profielen uit de veldmetingen wordt de *wets/p-facAs* waarden gevarieerd. Op basis van een kwalitatieve vergelijking tussen de berekende en gemeten afslagprofielen wordt voor ieder profiel de meest representatieve *wets/p-facAs* combinatie bepaald.

Stap 2: kalibratie korrelgrootteafhankelijkheid (α_{D50})

Het doel van deze stap is het bepalen van de optimale α_{D50} waarde per *wets/p-facAs* combinatie. Voor een beperkte set profielen uit de veldmetingen wordt de α_{D50} waarde gevarieerd. Op basis van een kwalitatieve vergelijking tussen de berekende en gemeten afslagprofielen wordt voor ieder profiel de meest representatieve α_{D50} waarde per *wets/p-facAs* combinatie bepaald.

Stap 3: testen gevolgen herkalibratie

In deze stap wordt eerst kwalitatief bepaald met welke *wets/p-facAs*- α_{D50} combinatie het model de gemeten afslagprofielen het beste beschrijft voor de beperkte set veldmetingen. Hieruit worden de definitieve BOI-standaardinstellingen geselecteerd. Vervolgens wordt kwantitatief onderbouwd dat de herkalibratie aanpak leidt tot betere modelvoorspellingen van duinafslag voor alle validatie veldcases. Voor de definitieve BOI-standaardinstellingen worden ook de consequenties voor de voorspellingen van de laboratoriumexperimenten uit Deel 1 gekwantificeerd.

6.4 Leeswijzer

De gedetailleerde aanpak en resultaten van de kalibratie ondiep water sedimenttransport (Stap 1) wordt uitgewerkt in Hoofdstuk 7. De kalibratie van de korrelgrootteafhankelijkheid (Stap 2) wordt besproken in Hoofdstuk 8. De gevolgen van de herkalibratie en de uiteindelijke definitieve BOI-standaardinstellingen worden gepresenteerd in Hoofdstuk 9. Ten slotte worden de conclusies van de gehele kalibratie-studie (Deel 1 en 2) gegeven in Hoofdstuk 10.

7 Deel 2 – Kalibratie ondiep water sedimenttransport

7.1 Aanpak

Uit het concept validatierapport (Appendix J), waarin de validatie van de concept BOI-standaardinstellingen is gepresenteerd, volgt dat voor een aantal morfologische veld-cases XBeach een profielvorm berekent die niet overeenkomt met de observaties. In deze simulaties wordt het afslagvolume onderschat en ligt de knikpunt in het duinfront te hoog. Een mogelijke oorzaak hiervoor is een overschatting van het kustwaartsgerichte sedimenttransport in het model (Appendix J). Herkalibratie van een tweetal modelparameters binnen de concept BOI-standaardinstellingen kan het door XBeach berekende ondiep water sedimenttransport verbeteren:

- *facAs*: Parameter om sedimenttransport door golfasymmetrie te simuleren
- *wetslp*: Kritische helling op ondiep water voor start van avalanching

7.1.1 Selectie profielen

Voor de herkalibratie is een subset van vijf profielen geselecteerd uit de morfologische veld-cases waarvoor de *facAs* en *wetslp* parameters geoptimaliseerd worden. De profielen zijn geselecteerd op basis van de waargenomen onderschatting van erosievolume en/of het vormen van een onrealistisch profielvorm. Daarnaast is er gekozen voor de profielen waarbij de D_{50} zo dicht mogelijk bij 225 μm ligt, zodat de gekozen waarde voor de modelparameter met betrekking tot korrelgrootteafhankelijkheid (α_{D50}) een minimaal effect heeft op de modelresultaten. De kalibratie van de parameter α_{D50} wordt beschreven in Hoofdstuk 8.

In Tabel 7.1 is voor de vijf geselecteerde profielen weergegeven hoe de modelresultaten afwijken van de metingen, en welke processen verbeterd dienen te worden door middel van de herkalibratie van de parameters *facAs* en *wetslp*.

Tabel 7.1 – Overzicht veldmetingen toegepast in de herkalibratie van de parameters *facAs* en *wetslp*.

Case	Profiel	Geobserveerde model resultaten	Doel
Vlaamse Kust (België)	62	Figuur 6-43 in Appendix J: onderschatting erosievolume, maar profielvorm komt overeen met meting. $D_{50} = 0,215 \text{ mm}$	Bias (onderschatting) erosievolume verkleinen, zonder grote verandering in berekende profielvorm.
	117	Figuur 6-51 in Appendix J: onderschatting erosievolume, onshore te hoog. $D_{50} = 0,257 \text{ mm}$	
Hollandse Kust 1976 (NL)	4500	Figuur 6-112 in Appendix J: knikpunt in het profiel ligt hoger dan in meting (& t.o.v. SVP), onderschatting erosievolume, $D_{50} = 0,227 \text{ mm}$	Verlagen positie knikpunt en verkleinen onderschatting erosievolume
Langeoog (Duitsland)	B	Figuur 6-85 in Appendix J: strandsuppletie wordt tegen de duin op geduwd en creëert een onrealistisch profiel, $D_{50} = 0,225 \text{ mm}$	Reduceren onshore transport naar duin toe
	E	Figuur 6-87 in Appendix J: knikpunt in het profiel ligt hoger dan in meting (& tov SVP), $D_{50} = 0,225 \text{ mm}$	Verlagen positie knikpunt

7.1.2 Parameter variatie

Voor elk van de vijf geselecteerde profielen zijn berekeningen uitgevoerd waarbij de *facAs* en *wetslp* zijn gevarieerd van 0,1 tot 0,24, in stappen van 0,02. Dit geeft in totaal $8 \times 8 \times 5 = 320$

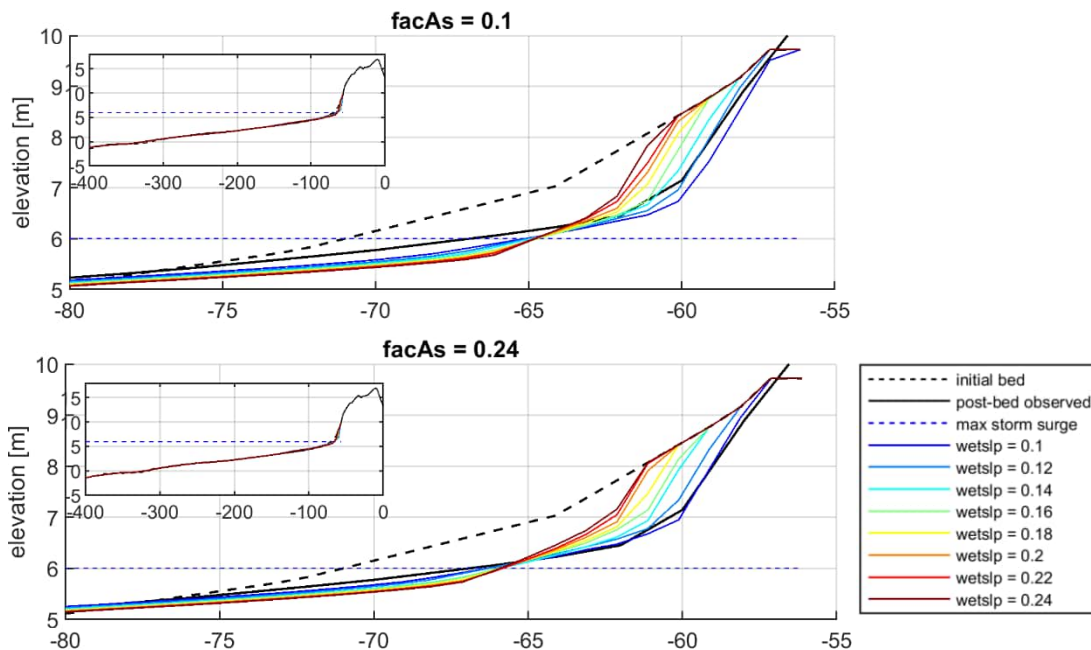
simulaties met een brede scala van modelparameter combinaties binnen een realistisch fysisch bereik. De overige parameters zijn hierbij gehouden op de parameterinstellingen zoals afgeleid in Deel 1 (concept BOI-standaardinstellingen). Het doel is om enkele combinaties van *facAs/wetslp* te vinden waarvoor de modelresultaten qua afslagvolume en profielvorm verbeterd worden. In tegenstelling tot de automatische optimalisatieroutine van Deel 1 van deze studie, worden in deze analyse relatief weinig parameter gevarieerd en vergeleken met relatief weinig data. Het identificeren van mogelijk verbeterde combinaties van *facAs/wetslp* is daarom handmatig uitgevoerd en is *expert judgement* toegepast bij de analyse van de berekende profielvorm.

7.2 Analyse morfologische ontwikkeling

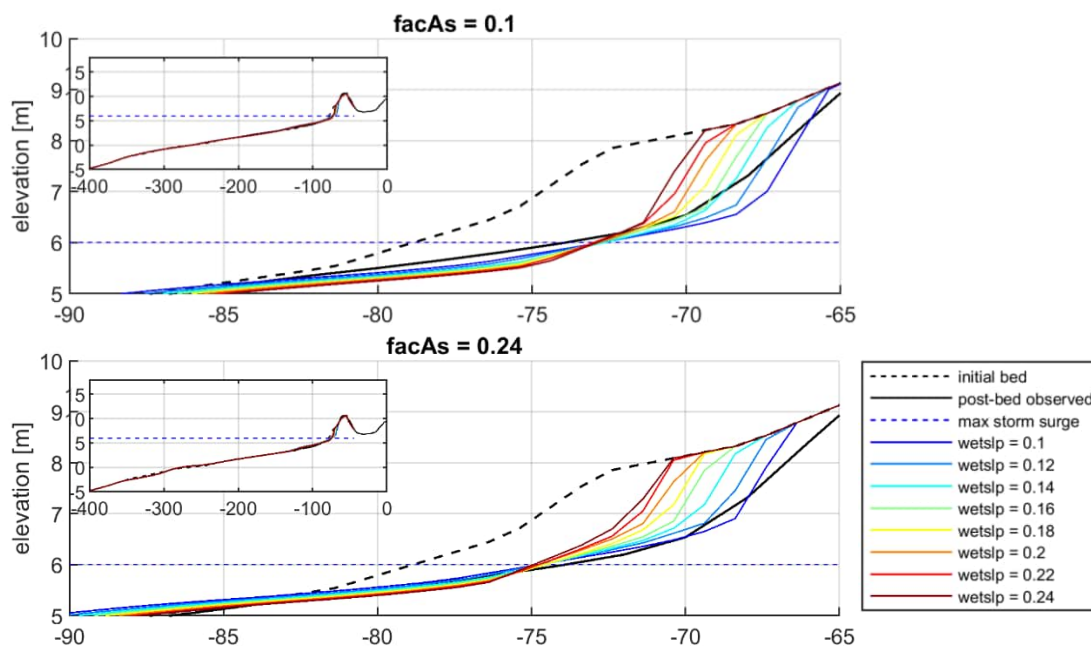
De resultaten zijn beoordeeld door middel van een kwalitatieve analyse van de verandering van de profielvorm ten gevolge van de verschillende combinaties en variaties in *wetslp* en *facAs*. Voor het Vlaamse Kust profiel 62 (Figuur 7-1) en 117 (Figuur 7-2), Hollandse Kust profiel 4500 (Figuur 7-3) en Langeoog profiel B (Figuur 7-4) en E (Figuur 7-5) is de gevoeligheid van de *wetslp* weergegeven. Hierbij worden alleen de uiterste waarden van *facAs* (0,1 en 0,24) weergegeven om een indicatie van de gevoeligheid van de berekende profielvorm voor *facAs* te geven.

Een lagere *facAs* zorgt voor een lagere bijdrage aan het kustgerichte sedimenttransport en resulteert in een sterkere terugtrekking van het duinprofiel. Een lagere *wetslp* betekent dat de kritische onder water helling flauwer is, en er dus sneller avalanching optreedt, en vervolgens zorgt voor meer duinerosie. Voor alle vijf profielen zijn deze trends te zien voor de *facAs* en *wetslp* variaties, maar de *wetslp* heeft relatief meer effect dan de *facAs*. Om de XBeach resultaten beter te laten overeenkomen met de metingen kan het volgende worden waargenomen per set profielen:

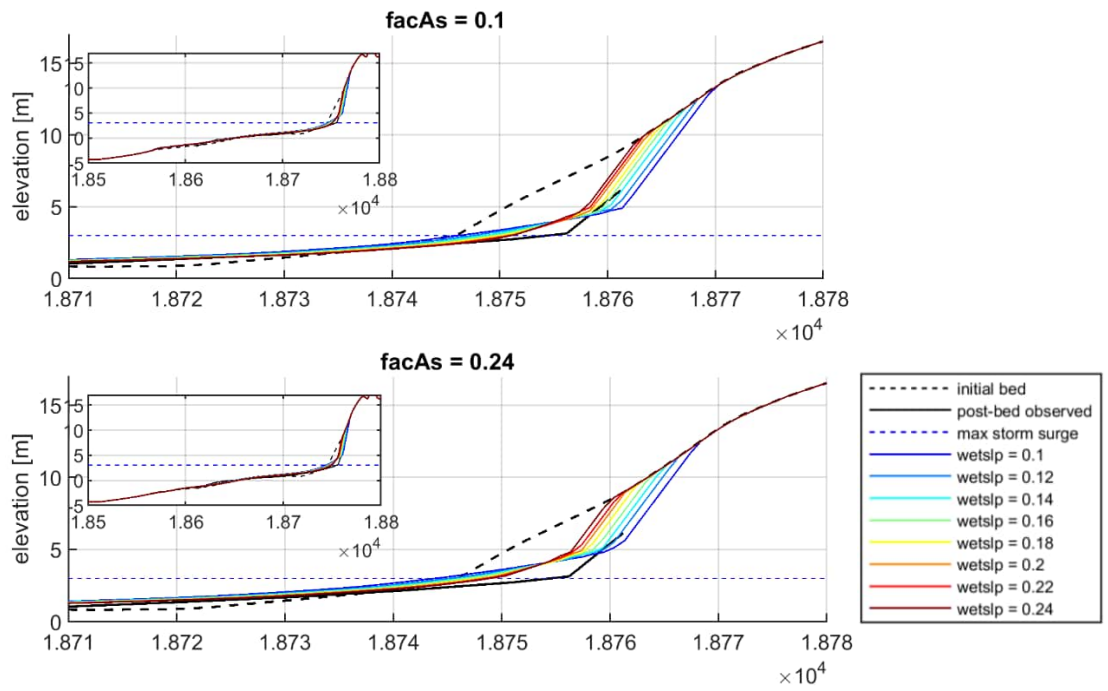
- **Vlaamse kust profielen:** de resultaten verbeteren voornamelijk door een lagere *wetslp*, het erosievolume en profielvorm komt beter overeen. De optimale *wetslp* hangt dan vervolgens af van de *facAs*, een lagere *facAs* kan het beste gecombineerd worden met een wat hogere *wetslp*.
- **Hollandse kust profiel:** lagere *wetslp* zorgt ervoor dat het knikpunt lager komt te liggen, dichterbij het maximale (offshore) stormvloedpeil. De optimale *wetslp* hangt dan vervolgens af van de *facAs*, een lagere *facAs* kan het beste gecombineerd worden met een hogere *wetslp*.
- **Langeoog profielen:** er is voor alle variaties een significante overschatting van het erosievolume, en er is een hoge *wetslp* nodig om dit te compenseren. Ondanks dat een lagere *facAs* zorgt voor een verlaging van knikpunt en strandprofiel, komt het nog niet volledig overeen met het gemeten profiel.



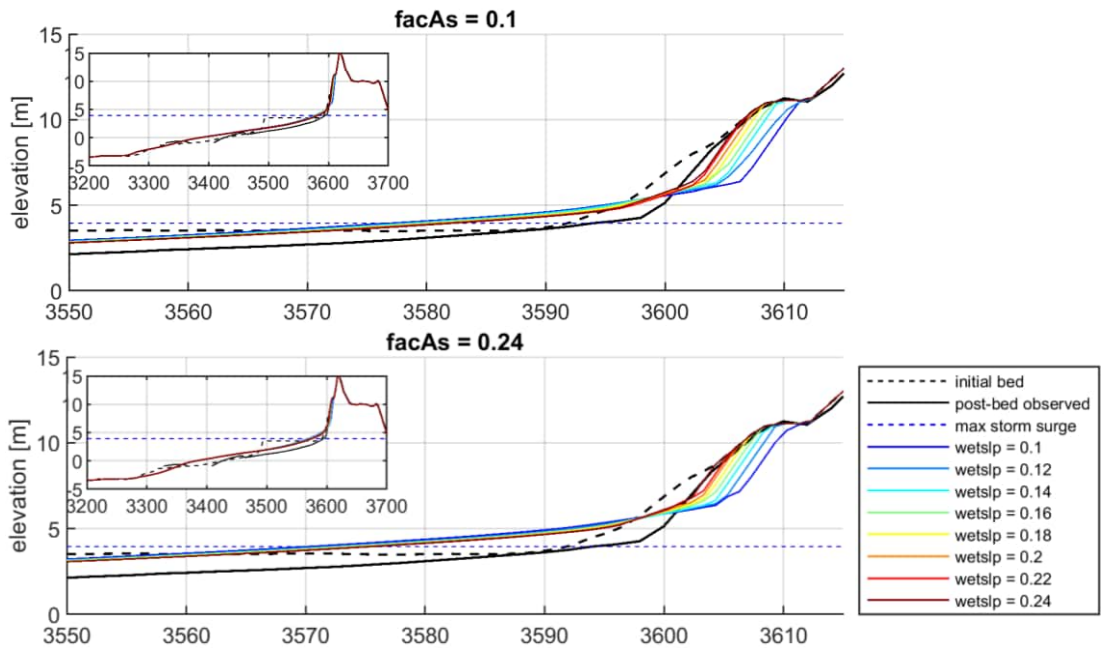
Figuur 7-1 – Vlaamse Kust profiel 62 gevoeligheid profielontwikkeling voor variaties in wetslp (gekleurde lijnen), bij een facAs van 0,1 (boven) en 0,24 (onder).



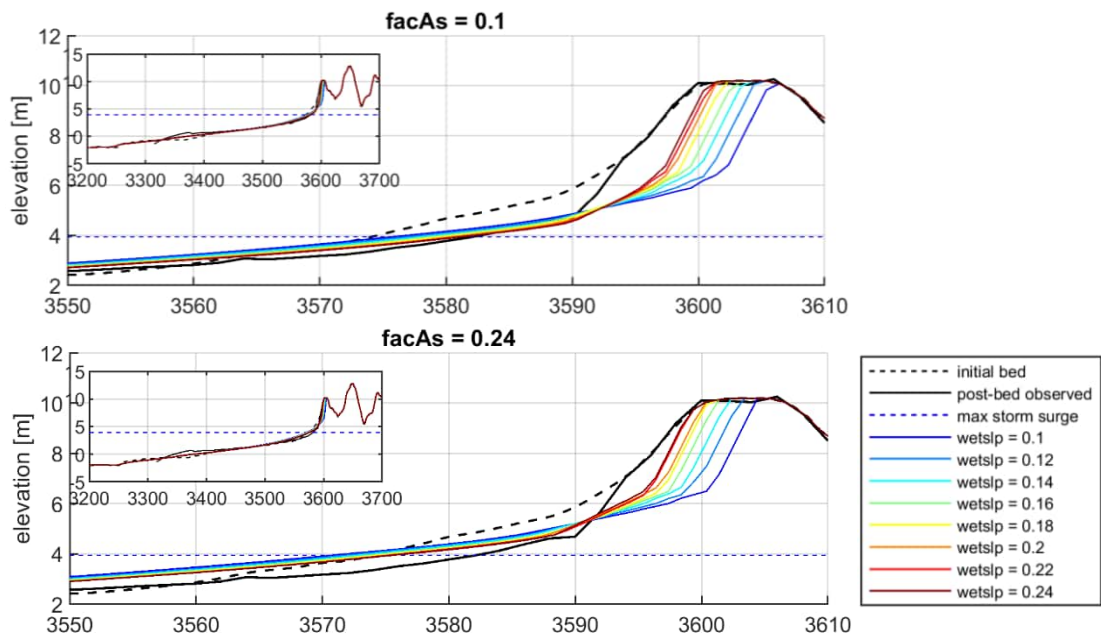
Figuur 7-2 – Vlaamse Kust profiel 117 gevoeligheid profielontwikkeling voor variaties in wetslp (gekleurde lijnen), bij een facAs van 0,1 (boven) en 0,24 (onder).



Figuur 7-3 – Hollandse Kust profiel 4500 gevoeligheid profielontwikkeling voor variaties in wetslp (gekleurde lijnen), bij een facAs van 0,1 (boven) en 0,24 (onder).



Figuur 7-4 – Langeoog profiel B gevoeligheid profielontwikkeling voor variaties in wetslp (gekleurde lijnen), bij een facAs van 0,1 (boven) en 0,24 (onder).



Figuur 7-5 – Langeoog profiel E gevoeligheid profielontwikkeling voor variaties in wetslp (gekleurde lijnen), bij een facAs van 0,1 (boven) en 0,24 (onder).

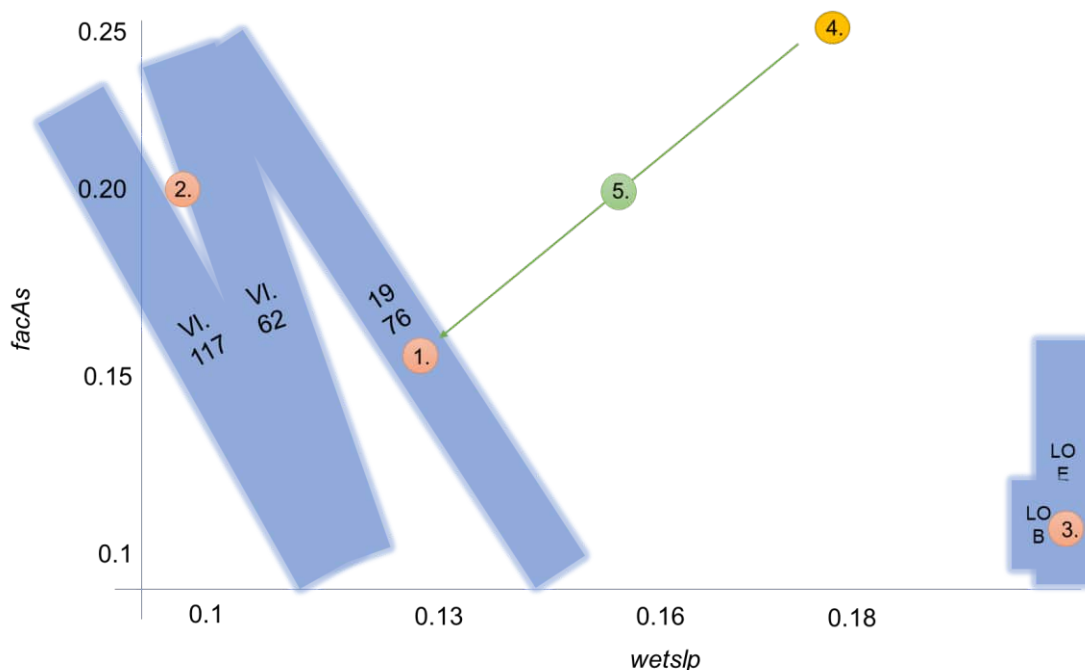
7.3 Selectie parameter waarden

Voor elk van de vijf profielen zijn de optimale combinaties van *wetslp* en *facAs* bepaald waarmee de modelafwijking, zoals gedefinieerd in Tabel 7.1, wordt verkleind. In Figuur 7-6 worden de resultaten conceptueel samengevat. De blauwe vlakken geven schematisch voor elk van de vijf profielen weer voor welke *wetslp/facAs* combinatie de berekende profielen kwalitatief het beste overeenkomen met de metingen (profielvorm en erosievolume). Omdat

verschillende combinaties van *wetslp* en *facAs* tot vergelijkbare resultaten kunnen leiden (vandaar vlakken in plaats van punten), is op basis van deskundig oordeel een optimale *wetslp/facAs* set gekozen dat representatief is voor de veldcase, weergegeven door middel van de oranje stippen in Figuur 7-6. Deze representatieve combinaties zijn in Tabel 7.2 gekwantificeerd. De positie van de concept BOI standaard instellingen (Deel 1) is weergegeven met de gele stip in Figuur 7-6.

Voor de Vlaamse en Hollandse kust profielen zijn er verschillende combinaties van *wetslp* en *facAs* mogelijk, maar voor beide cases is een substantiële verlaging van de *wetslp* nodig (optimale waarde van *wetslp* = 0,10 en 0,13 ten opzichte van concept BOI-standaard instellingen *wetslp* = 0,18). De optimale *wetslp/facAs* set voor Langeoog ligt relatief ver van de Hollandse en Vlaamse kust sets, met een *wetslp* = 0,24 en *facAs* = 0,12. Vanwege de relatief ruime spreiding van de optimale sets in de parameter ruimte, is er ook gekozen om een *wetslp/facAs* set toe te voegen dat in het centrum van de drie nieuwe *wetslp/facAs* sets en de Deel 1-set ligt (groene stip in Figuur 7-6). Deze 'centrum-set' beschrijft een oplossing op basis van de combinatie van informatie uit laboratoriumexperimenten (Deel 1) en veldobservaties. De centrum-set heeft een *wetslp* van 0,15 en *facAs* van 0,20.

Dit geeft in totaal 5 sets met combinaties van *wetslp* en *facAs*, weergegeven in Tabel 7.2, waarvoor in Hoofdstuk 8 een parameter voor de korrelgrootteafhankelijkheid wordt gekalibreerd. Op basis hiervan wordt in Hoofdstuk 9 een definitieve keuze voor de waarden van *wetslp* en *facAs* gemaakt.



Figuur 7-6 – Conceptuele weergave van de *wetslp* en *facAs* combinaties waarmee de XBeach resultaten overeenkomen met de observaties, weergegeven per geselecteerde profiel (blauwe vlakken). De gekleurde bollen geven de positie van de concept BOI-standaardinstellingen van Deel 1 (4.), representatieve set voor Vlaanderen (2.), representatieve set voor Hollandse Kust (1.), representatieve set voor Langeoog (3.) en de centrum set (5.).

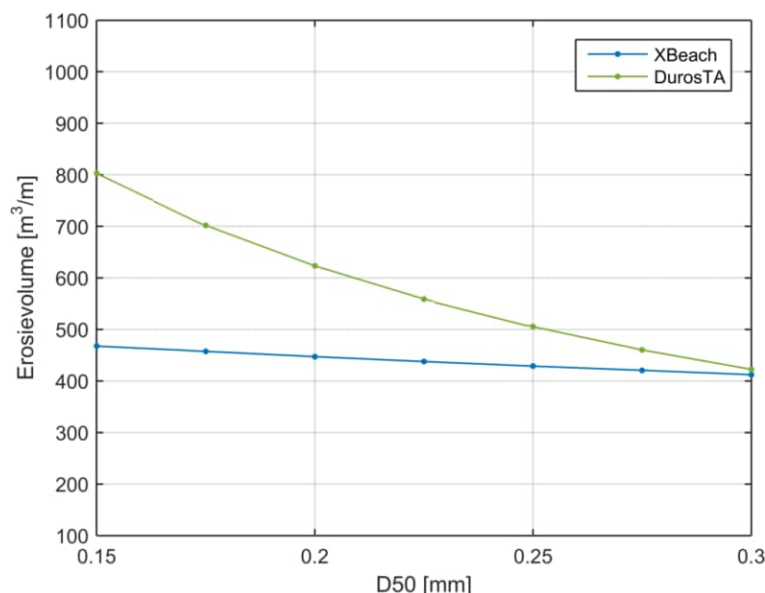
Tabel 7.2 – Overzicht geselecteerde parameter waarden voor facAs en wetslp zoals weergegeven in het conceptuele Figuur 7-6. De verschillende combinaties zijn genummerd (1 t/m 5), zodat hiernaar terugverwezen kan worden bij de nadere analyses in deze rapportage.

	Naam set	facAs	wetslp
1.	Representatief voor Hollandse Kust	0,15	0,13
2.	Representatief voor Vlaanderen	0,20	0,10
3.	Representatief voor Langeoog	0,12	0,24
4.	Deel 1 – concept BOI standaardinstellingen	0,25	0,18
5.	Centrum-set	0,20	0,15

8 Deel 2 – Kalibratie korrelgrootteafhankelijkheid

8.1 Achtergrond korrelgrootteafhankelijkheid in XBeach

In eerder onderzoek (Deltares, 2008; Deltares/Arcadis, 2018) is aangetoond dat de berekende morfologische verandering (duinafslag) in XBeach minder gevoelig is voor variaties in de korrelgrootte dan in de modellen DUROS+ en DurosTA, zie Figuur 8-1.



Figuur 8-1 – Het effect van D_{50} variatie op duinafslagvolumes voor een prototype-geschaalde simulatie van de Deltagoot 2006 experimenten met XBeach (blauw) en met DurosTA (groen). Bron: Deltares/Arcadis (2018). Merk op dat de parameterinstellingen voor XBeach in de Deltares/Arcadis (2018) studie afwijken van de BOI-standaardinstellingen.

Op basis van beperkte meetdata uit laboratoriumexperimenten (schaal 1:26), is in Deltares/Arcadis (2018) bepaald dat de korrelgrootteafhankelijkheid in XBeach kleiner is dan de werkelijkheid. Om de korrelgrootteafhankelijkheid in XBeach te vergroten, is in Deltares/Arcadis (2020) een methode voorgesteld op basis van het werk van Steetzel (1993) om het sedimenttransport voor kleine korreldiameters te vergroten, en voor grote korreldiameters te verkleinen. In Fase 1 van het BOI Zandige Waterkeringen project (11206818-018) is de methode van Deltares/Arcadis (2020) verder uitgewerkt. Hierbij is de kalibratieparameter α_{D50} gebruikt om de berekende dieptegemiddelde evenwichtsconcentratie (C_{eq} , Vergelijking 8-1) en effectieve sedimenttransportsnelheid (u_{sed} , Vergelijking 8-2) aan te passen:

$$C_{eq} = \left(\frac{D_{50,ref}}{D_{50}} \right)^{\alpha_{D50}} C_{eq,VanRijn} \quad \text{Vergelijking 8-1}$$

$$u_{sed} = u_E + \left(\frac{D_{50}}{D_{50,ref}} \right)^{\alpha_{D50}} u_{A,S} \quad \text{Vergelijking 8-2}$$

Hierin is D_{50} de rekenkorreldiameter, $D_{50,ref}$ de referentiekorreldiameter (225 μm), $C_{eq,VanRijn}$ de onaangepaste evenwichtsconcentratie die berekend wordt op basis van de transportvergelijking in XBeach (Van Rijn, 2007), u_E de dieptegemiddelde Eulerse snelheid, en $u_{A,S}$ de effectieve transportsnelheid door golfasymmetrie en -skewness in de richting van de

golven. Met deze vergelijkingen wordt de aanpak van Steetzel (1993) en Deltares/Arcadis (2018) om het sedimenttransport te kalibreren opgesplitst in twee componenten. In Vergelijking 8-1 wordt een korrelgroottecorrectie aangebracht op de evenwichtsconcentratie in XBeach, die berekend wordt op basis van Van Rijn (2007) en die de concentratie van fijn zand mogelijk onderschat (pers. corr. Van Rijn, 2021). In Vergelijking 8-2 wordt een korrelgroottecorrectie toegepast op de bijdrage van golf niet-lineariteit op sedimenttransport, waarbij in lijn met e.g., Miles (2013) aangenomen wordt dat golf niet-lineariteit relatief sterker bijdraagt aan sedimenttransport voor grotere korreldiameters. In beide vergelijkingen moet α_{D50} echter als heuristische kalibratieparameter worden gezien, en is verder onderzoek nodig om de werkelijke fysica van het effect van korrelgroottevariaties te doorgronden.

Uit deze vergelijkingen volgt dat voor positieve waarden van de kalibratieparameter α_{D50} , C_{eq} relatief *toeneemt* voor korrelgroottes kleiner dan $D_{50,ref}$. Tegelijkertijd neemt de effectieve transportsnelheid in de richting van de golven *af* voor korrelgroottes kleiner dan $D_{50,ref}$, omdat u_E (undertow in tegengestelde richting van de golven; kustafwaarts) gelijk blijft, maar $u_{A,S}$ (in de richting van de golven; kustwaarts) *af* neemt. Voor korreldiameters *groter* dan de referentiekorreldiameter geldt het omgekeerde.

De aangepaste evenwichtsconcentratie en effectieve transportsnelheid worden in het model gebruikt om de momentane sedimentconcentratie (C , Vergelijking 8-3) en het suspensietransport (S_{sus} , Vergelijking 8-4) te berekenen:

$$\frac{\partial hC}{\partial t} + \frac{\partial hCu_{sed}}{\partial x} = \frac{hC_{eq} - hC}{T_s} - \text{diffusieterm} \quad \text{Vergelijking 8-3}$$

$$S_{sus} = \rho_s Chu_{sed} - \text{diffusieterm} \quad \text{Vergelijking 8-4}$$

Waarin x en t de ruimte en tijd representeren (hier wordt ter illustratie alleen de 1D vergelijking weergegeven), h de momentane waterdiepte is, T_s een representatieve adaptatie tijdschaal is, en ρ_s de dichtheid van het sediment is. Door aanpassing van C_{eq} en u_{sed} in de richting van de golven, neemt algemeen het kustafwaartsgericht transport *toe* voor korreldiameters kleiner dan $D_{50,ref}$, en *af* voor korreldiameters groter dan $D_{50,ref}$.

Op basis van vergelijkingen met (kleinschalige) laboratoriumexperimenten en resultaten van de duinafslagmodellen DUROS+ en DuroSTA is de waarde van de kalibratieparameter α_{D50} in de concept BOI-standaardinstellingen vastgesteld op 1,6 (Appendix H). Deze waarde voor de parameter α_{D50} is toegepast in de concept validatiestudie (Figuur 1-1 en Appendix J).

Op basis van de resultaten van de concept-validatiestudie is echter gebleken dat de gesimuleerde korrelgrootteafhankelijkheid, met de initieel gekozen parameterinstelling $\alpha_{D50} = 1,6$, groter is dan de korrelgrootteafhankelijkheid die af te leiden is uit de veldmetingen. Daarom is in het concept validatierapport (Appendix J) voorgesteld om de waarde van de parameter α_{D50} te herkalibreren ten behoeve van de definitieve BOI-standaardinstellingen.

8.2 Aanpak

8.2.1 Doelstelling en modelaanpak

In Hoofdstuk 7 is een vijftal mogelijke *wets/p-facAs* combinaties geïdentificeerd. Omdat de *facAs*-parameter de effectieve transportsnelheid door golfasymmetrie in de richting van de golven beïnvloedt (Vergelijking 8-2), is het nodig om voor iedere *wets/p-facAs* combinatie afzonderlijk een optimale waarde van de parameter α_{D50} te bepalen. Het doel van de modelanalyse in dit hoofdstuk is het bepalen van de optimale α_{D50} waarde per *wets/p-facAs* combinatie.

In deze analyse is in twee stappen de optimale α_{D50} waarde per *wets/p-facAs* combinatie bepaald. In de eerste stap is per *wets/p-facAs* combinatie en per kalibratieprofiel de α_{D50} waarde gevarieerd. Op basis van een kwalitatieve vergelijking tussen de berekende en gemeten afslagprofielen is voor ieder kalibratieprofiel en iedere *wets/p-facAs* combinatie een case-specifieke optimale waarde van α_{D50} bepaald. In de tweede stap is de informatie uit de eerste stap gecombineerd om te komen tot de meest representatieve α_{D50} waarde per *wets/p-facAs* combinatie.

In dit hoofdstuk worden de representatieve α_{D50} waarden per *wets/p-facAs* combinatie bepaald. In Hoofdstuk 9 wordt de best mogelijke *wets/p-facAs*- α_{D50} combinatie vastgesteld, als zijnde onderdeel van de definitieve set met BOI-instellingen.

8.2.2 Selectie profielen

Voor de herkalibratie van de korrelgrootteafhankelijkheid is een subset van vier profielen geselecteerd uit de morfologische veldcases waarvoor de α_{D50} parameter geoptimaliseerd wordt. De profielen zijn geselecteerd op basis van:

- 1 Een goede spreiding van D_{50} -waarden, groter en kleiner dan 225 μm .
- 2 Profielen die in de concept-validatiestudie resulteerden in een over- of onderschatting van het afslagvolume of een fysisch onrealistisch profielvorm.

In Tabel 8.1 is voor de vier geselecteerde profielen weergegeven hoe de modelresultaten afwijken van de metingen, en welke processen verbeterd dienen te worden door middel van herkalibratie van de α_{D50} parameter.

Tabel 8.1 - Overzicht veldmetingen toegepast in de herkalibratie van de parameter α_{D50} .

Case	Profiel	D_{50} (relatief verschil met $D_{50,ref}$ [%])	Geobserveerde model resultaten	Doel
Fire Island (NY, USA)	365	400 μm (+78%)	Figuur 6-65 in Appendix J: Voor $\alpha_{D50} = 1,6$ extreme onderschatting erosie (zelfs toename duin volume, onrealistisch fysisch proces).	Verbeteren erosie & reduceren onrealistische processen
Vlaamse Kust (België)	69	308 μm (+37%)	Figuur 6-46 in Appendix J: onderschatting erosievolume, maar profielvorm komt overeen met meting.	Verbeteren erosie & check of profielvorm niet teveel verandert.
Hollandse Kust 1976 (NL)	6500	174 μm (-23%)	Figuur 6-125 in Appendix J: profielen met een lage D_{50} en lichte overschatting erosievolume,	Verbeteren erosie volume
	7000	192 μm (-15%)	Figuur 6-126 in Appendix J.	

8.2.3 Parameter variatie

Voor elk van de vier geselecteerde profielen zijn berekeningen uitgevoerd met de vijf *wets/p-facAs* combinaties zoals afgeleid in Hoofdstuk 7 (Tabel 7.2), en voor een variërende waarde van α_{D50} tussen 0,0 en 1,6, in stappen van 0,4 en nog een 'uiterste' waarde van $\alpha_{D50} = 2,4$. Dit geeft in totaal $4 \times 5 \times 6 = 120$ simulaties. De overige modelparameters zijn hierbij gehouden op de concept BOI-standaardinstellingen zoals afgeleid in Deel 1.

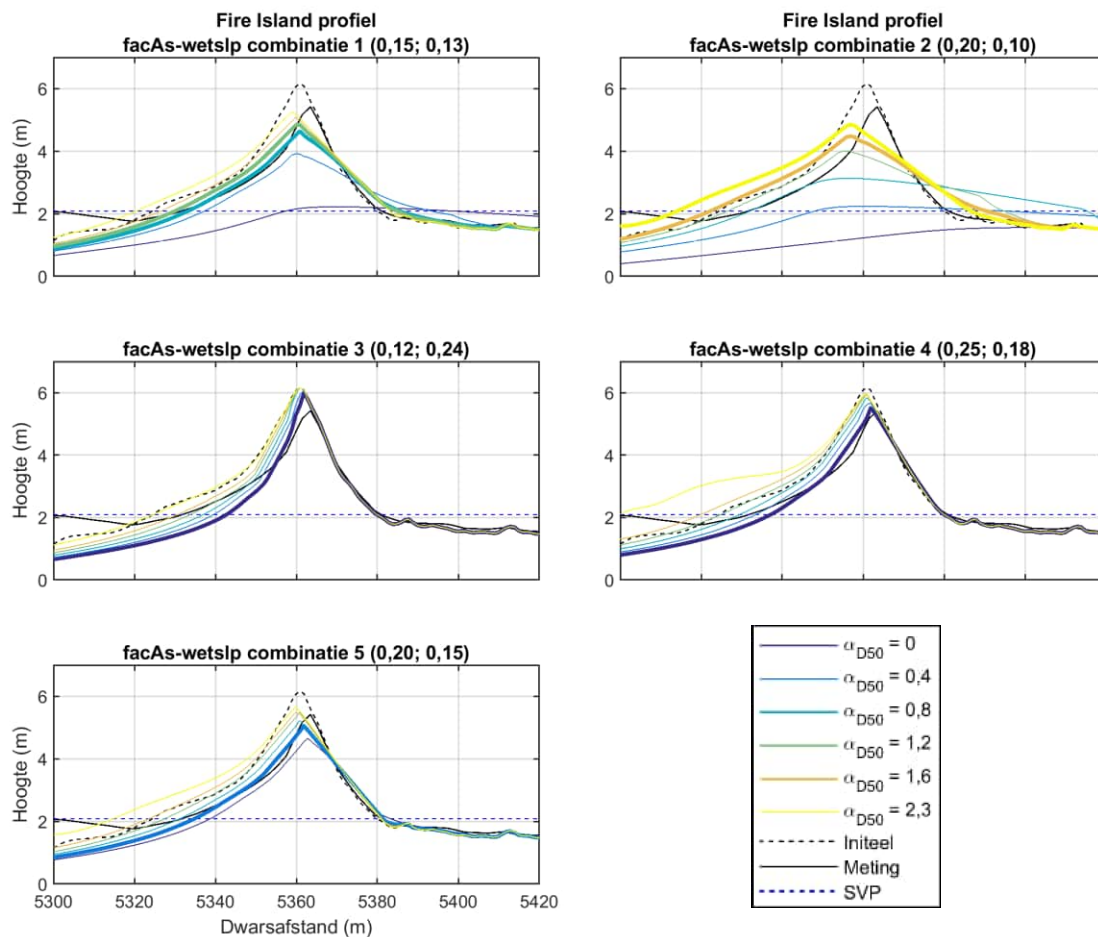
8.3 Selectie α_{D50} waarden per profiel en *wets/p-facAs* combinatie

De modelresultaten zijn beoordeeld door middel van een kwalitatieve analyse van de overeenkomst tussen het berekende afslagprofiel en het gemeten afslagprofiel. Per profiel en per *wets/p-facAs* combinatie is visueel bepaald voor welke waarde van de parameter α_{D50} het berekende afslagprofiel het beste overeenkomt met het gemeten afslagprofiel. In deze beoordeling is, met het oog op het verbeteren van het berekende afslagvolume, vooral gekeken naar de profielvorm boven stormvloedpeil.

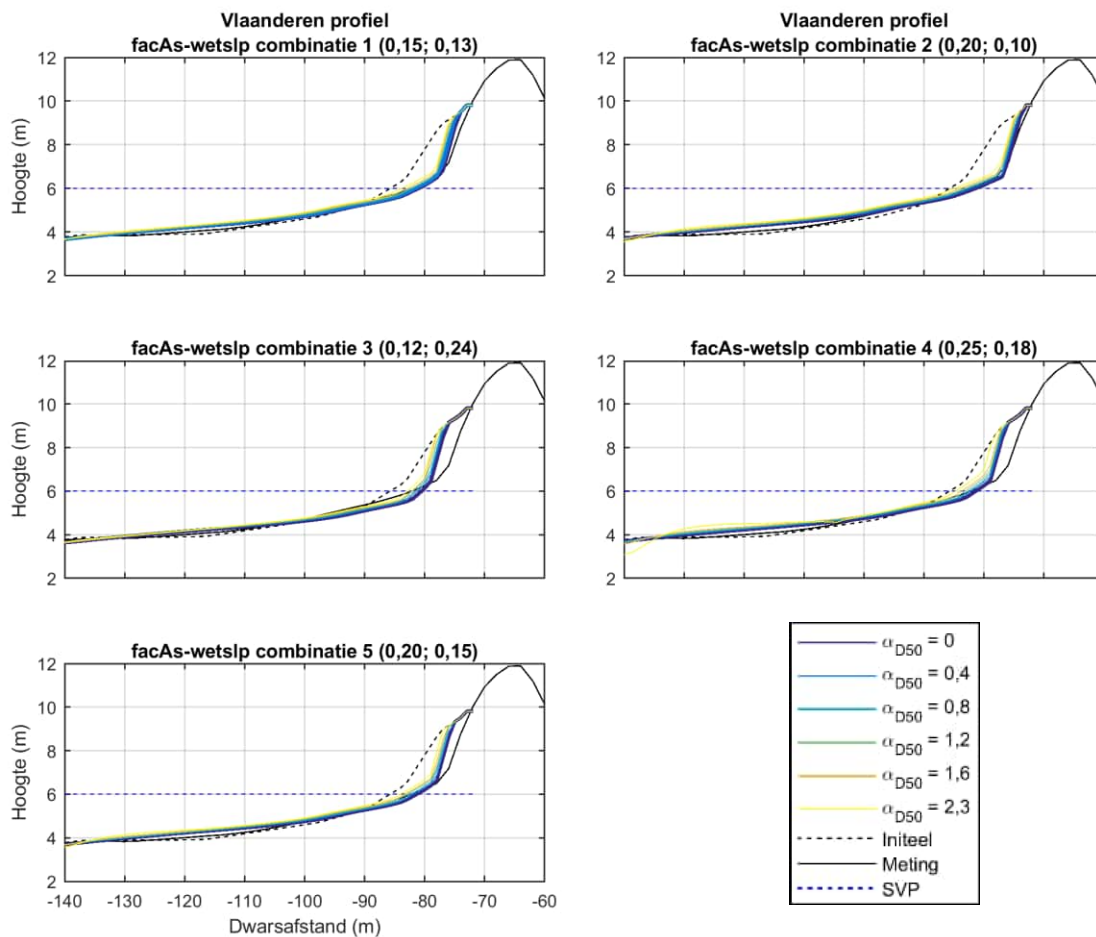
In Figuur 8-2 zijn voor het profiel van de Fire Island veldcase, de gemeten en berekende afslagprofielen getoond voor de vijf *wets/p-facAs* combinaties van Hoofdstuk 7 en verschillende waarden van α_{D50} . Het figuur laat zien dat het variëren van de waarde van α_{D50} zeer veel invloed heeft op het berekende afslagprofiel voor de *wets/p-facAs* combinaties 1 en 2 (representatief voor respectievelijk de Hollandse Kust en voor Vlaanderen; zie Tabel 7.2). Hierbij varieert het berekende morfologische respons tussen beperkte duinverlaging en duinafslag voor hoge waarden van α_{D50} , tot het geheel verdwijnen van de duin (maximumhoogte rondom, of lager dan het stormvloedpeil). Voor de *wets/p-facAs* combinaties 3–5 (representatief voor respectievelijk Langeoog, de concept BOI-instellingen van Deel 1, en de Centrum-set), is de invloed van de variatie van α_{D50} kleiner, maar heeft de waarde van de parameter wel invloed op de mate van duinverlaging en de grootte van het afslagvolume.

Voor iedere *wets/p-facAs* combinatie is op basis van *expert-judgement* en visuele vergelijking tussen het berekende en gemeten afslagprofiel (Figuur 8-2, Figuur 8-3, Figuur 8-4 en Figuur 8-5) bepaald welke waarde(n) van α_{D50} het beste overeen te komen met het gemeten afslagprofiel. De case-specifieke optimale waarden van α_{D50} van alle vier profielen en vijf *wets/p-facAs* combinaties zijn weergegeven in Tabel 8.2. Hierbij is met kleuren per profiel aangegeven of een *wets/p-facAs*- α_{D50} combinatie, ten opzichte van de andere *wets/p-facAs*- α_{D50} combinaties, het gemeten goed (lichtgroen), matig (oranje), of slecht (donkerrood) benadert. Als voorbeeld is voor de Fire Island veldcase de optimale α_{D50} waarde 1,6–2,3 voor *wets/p-facAs* combinatie 2, en 0 voor *wets/p-facAs* combinatie 4 (zie ook Figuur 8-2). Omdat het gemeten afslagprofiel veel beter beschreven wordt door *wets/p-facAs* combinatie 4 ($\alpha_{D50} = 0$) dan door *wets/p-facAs* combinatie 2 ($\alpha_{D50} = 1,6–2,3$), wordt in Tabel 8.2 de *wets/p-facAs* combinatie 2 rood gekleurd, en *wets/p-facAs* combinatie 4 groen gekleurd.

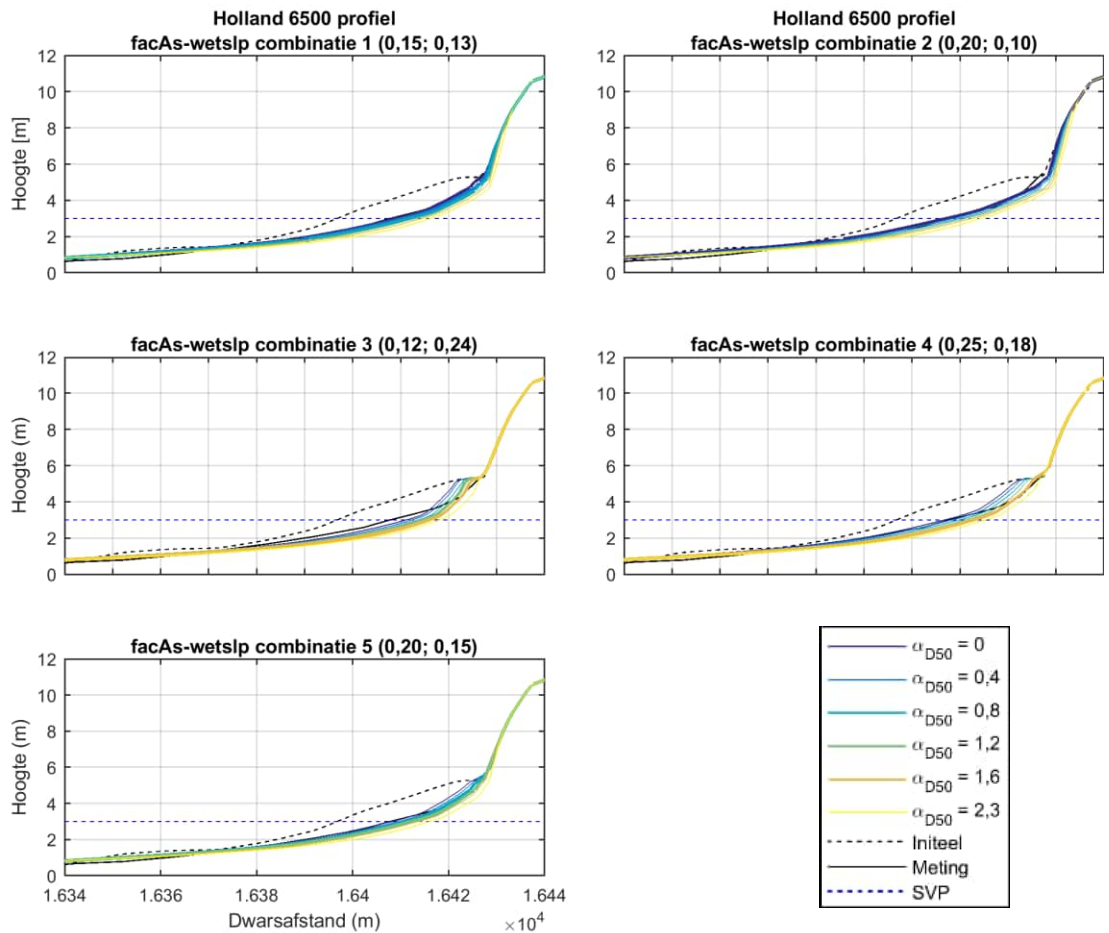
In Tabel 8.2 is duidelijk dat voor alle veldcases en *wets/p-facAs* combinaties, met uitzondering van de Fire Island case voor de *wets/p-facAs* combinatie 2, een lagere waarde van α_{D50} gewenst is om veldsituaties te simuleren met het model XBeach dan de waarde van de concept BOI-standaardinstellingen (1,6). Dit wijst op mogelijke schaafeffecten in de korrelgrootteafhankelijkheid van duinafslag, daar de waarde van α_{D50} in de concept BOI-standaardinstellingen afgeleid is op basis van laboratoriumdata en de resultaten van andere – op laboratoriumdata afgeleide – modellen. De kwantitatieve uitwerking van de lagere waarde van α_{D50} wordt verderop in Hoofdstuk 9 gegeven.



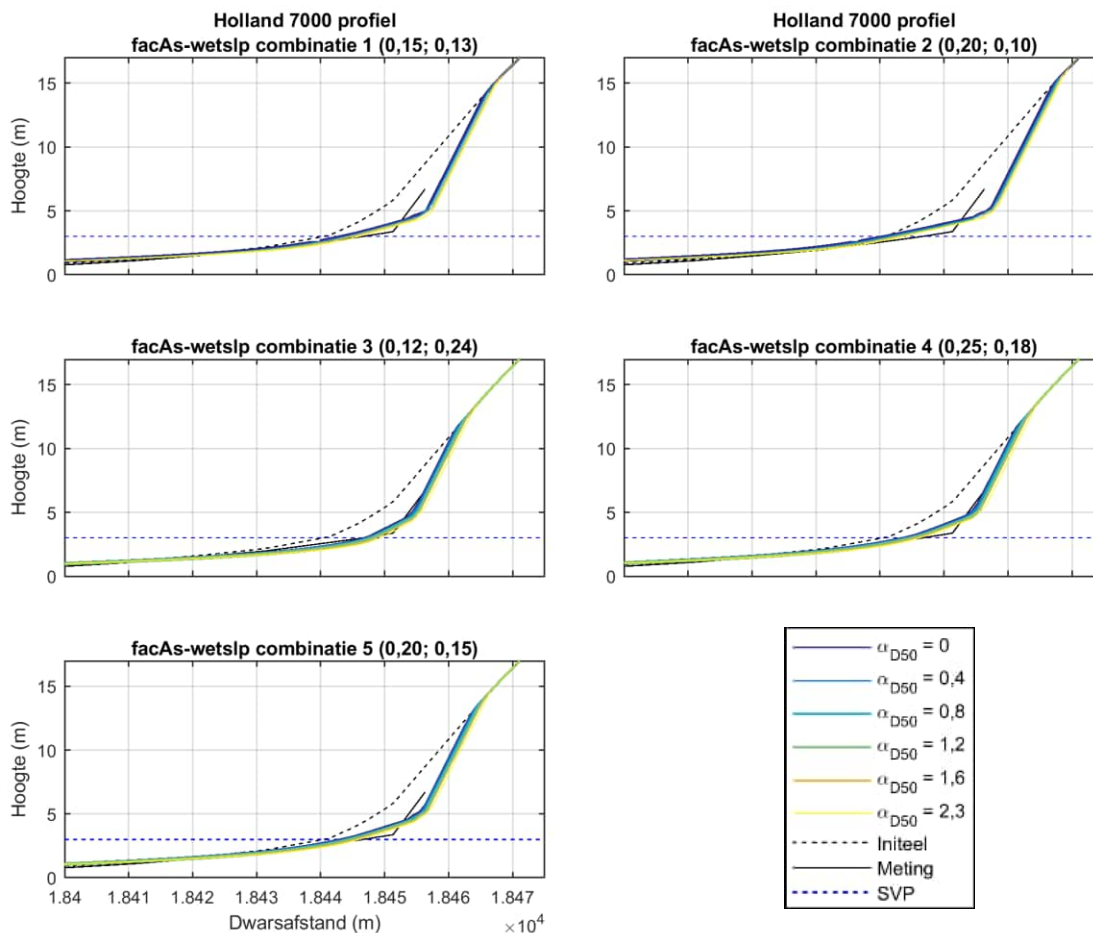
Figuur 8-2 – Variaties in morfologische respons voor het kalibratieprofiel voor Fire Island voor verschillende combinaties van facAs-wetslp uit Hoofdstuk 7 en waarden van de parameter α_{D50} (gekleurde lijnen). De simulatieresultaten met de beste case-specifieke waarden van α_{D50} zijn dikgedrukt.



Figuur 8-3 – Variaties in morfologische respons voor het kalibratieprofiel voor Vlaanderen voor verschillende combinaties van facAs-wetslp uit Hoofdstuk 7 en waarden van de parameter α_{D50} (gekleurde lijnen). De simulatieresultaten met de beste case-specifieke waarden van α_{D50} zijn dikgedrukt.



Figuur 8-4 – Variaties in morfologische respons voor het kalibratieprofiel voor de Hollandse kust (raai 6500) voor verschillende combinaties van facAs-wetslp uit Hoofdstuk 7 en waarden van de parameter α_{D50} (gekleurde lijnen). De simulatieresultaten met de beste case-specifieke waarden van α_{D50} zijn dikgedrukt.



Figuur 8-5 – Variaties in morfologische respons voor het kalibratieprofiel voor de Hollandse kust (raai 7000) voor verschillende combinaties van facAs-wetslp uit Hoofdstuk 7 en waarden van de parameter α_{D50} (gekleurde lijnen). De simulatieresultaten met de beste case-specifieke waarden van α_{D50} zijn dikgedrukt.

Tabel 8.2 – Overzicht van de α_{D50} per profiel en wetslp-facAs combinatie. Per combinatie wordt aangegeven welke waarde van α_{D50} leidt tot de beste modelresultaten. Per profiel geeft de kleur van het vak aan of het model het gemeten eindprofiel goed (lichtgroen), matig (geel) of slecht (donkerrood) benadert ten opzichte van de andere wetslp-facAs- α_{D50} combinaties.

Beste α_{D50} per profiel en wetslp-facAs combinatie							
	Naam set	facAs	wetslp	Fire Island	Vlaamse kust	Holland 6500	Holland 7000
1	Repr. voor Hollandse Kust	0,15	0,13	0,8-1,2	0-0,4	0-0,8	0
2	Repr. voor Vlaanderen	0,20	0,10	1,6-2,3	0	0	0
3	Repr. voor Langeoog	0,12	0,24	0	0	1,2-1,6	0-1,2
4	Deel 1 - BOI instellingen	0,25	0,18	0	0	1,6	0-1,2
5	Centrum-set	0,20	0,15	0,4	0	0,8-1,2	0-0,4

8.4 Selectie α_{D50} waarden per *wetslp-facAs* combinatie

In Sectie 8.3 is per kalibratieprofiel en per *wetslp-facAs* combinatie een optimale waarde van α_{D50} bepaald (Tabel 8.2). Voor alle *wetslp-facAs* combinaties geldt dat de optimale α_{D50} waarden per kalibratieprofiel verschillen (zie bijvoorbeeld *wetslp-facAs* combinatie 2 in Tabel 8.2, waarvan de optimale α_{D50} waarden variëren tussen 0 en 1,6–2,3), en dat er geen enkele waarde voor α_{D50} bestaat die voor alle validatieprofielen optimaal is. Voor een bruikbare toepassing binnen het beoordelings- en ontwerpinstrumentarium, is het echter nodig om per *wetslp-facAs* combinatie een representatieve waarde van α_{D50} te bepalen die op alle profieltypen toegepast kan worden.

Om dit te bereiken is op basis van *expert-judgement* per *wetslp-facAs* combinatie gekeken naar drie aspecten van Tabel 8.2. Ten eerste is gekeken naar de overlap tussen de case-specifieke optimale α_{D50} waarden om waarden van α_{D50} te vinden die voor een meerderheid van de kalibratieprofielen optimaal zijn. Ten tweede is gekeken naar de mate waarin het model het gemeten afslagprofiel benadert (kleur van de cellen in Tabel 8.2). Hierbij worden case-specifieke α_{D50} waarden met een slechte representatie van het gemeten afslagprofiel (e.g., slechte representatie ondanks kalibratie van α_{D50}) minder meegewogen in het bepalen van een representatieve α_{D50} waarde voor de *wetslp-facAs* combinatie. Ten derde is gekeken naar het verschil tussen de korreldiameters van de kalibratieprofielen en de referentiekorreldiameter ($D_{50,ref}$, zie Tabel 8.1), welke in absolute zin het grootst is voor het Fire Island profiel (78% groter dan $D_{50,ref}$) en het kleinst voor het Holland 7000 profiel (15% kleiner dan $D_{50,ref}$). Hierbij worden case-specifieke α_{D50} waarden voor profielen met een groot verschil in korreldiameter ten opzichte van $D_{50,ref}$ relatief zwaarder meegewogen in het bepalen van een representatieve α_{D50} waarde voor de *wetslp-facAs* combinatie.

In Tabel 8.3 zijn de vastgestelde meest optimale waarden van α_{D50} per *wetslp-facAs* combinatie weergegeven. Voor *wetslp-facAs* combinatie 1 (Representatief voor Hollandse Kust) is de representatieve α_{D50} waarde 0,8 bepaald, op basis van overlap tussen de Fire Island en Holland 6500 α_{D50} case-specifieke waarden, en bijna gelijke overeenkomst met de Vlaanderen case-specifieke α_{D50} waarde. De *wetslp-facAs* combinatie 2 (Representatief voor Vlaanderen) reproduceert de gemeten afslagprofielen slecht, met uitzondering van het Vlaanderen kalibratieprofiel. Op basis hiervan is de representatieve α_{D50} waarde 0 bepaald. Voor *wetslp-facAs* combinaties 3 en 4 (respectievelijk Representatief voor Langeoog en Deel 1 concept BOI-instellingen) is de grote spreiding in case-specifieke optimale α_{D50} waarden gemiddeld met een representatieve α_{D50} waarde van 0,4, met relatief meer gewicht gegeven aan de resultaten van het Fire Island kalibratieprofiel dan het Holland 6500 profiel. Ten slotte is voor *wetslp-facAs* combinatie 5 (Centrum-set) de spreiding in case-specifieke α_{D50} waarden beperkt. Op basis van de resultaten van de Fire Island, Vlaanderen en Holland 7000 profielen wordt een representatieve α_{D50} waarde van 0,4 gekozen. Om de goede overeenkomst met het Holland 6500 profiel te reproduceren, en om de gevoeligheid van de definitieve BOI-instellingen te onderzoeken (zie Sectie 9.2) wordt voor deze *wetslp-facAs* combinatie ook een representatieve α_{D50} waarde van 0,8 geselecteerd voor verdere analyse.

De zes mogelijke *wetslp-facAs*- α_{D50} combinaties van Tabel 8.3 worden in Hoofdstuk 9 verder geanalyseerd. Hierbij wordt een kwantitatieve vergelijking gemaakt met de concept BOI-standaardinstellingen voor de veldcases en laboratoriumexperimenten van Deel 1 om de *expert-judgement* keuze van modelparameterinstellingen in Hoofdstuk 7 en 8 te onderbouwen.

Tabel 8.3 – Optimale waarde van α_{D50} per wetslp-facAs combinatie bepaald voor alle kalibratieprofielen.

	Naam set	facAs	wetslp	Representatieve α_{D50}	
1	Repr. voor Hollandse Kust	0,15	0,13	0,8	
2	Repr. voor Vlaanderen	0,20	0,10	0	
3	Repr. voor Langeoog	0,12	0,24	0,4	
4	Deel 1 - BOI instellingen	0,25	0,18	0,4	
5	Centrum-set	0,20	0,15	0,4 (5a)	0,8 (5b)

9 Deel 2 – Definitieve BOI-standaardinstellingen

9.1 Selectie definitieve morfologische modelparameters

In Hoofdstuk 8 zijn zes mogelijke *wetslp-facAs- α_{D50}* combinaties bepaald (Tabel 8.3). In deze sectie wordt *kwalitatief* bepaald met welke combinatie het model de gemeten afslagprofielen van de vier cases van Hoofdstuk 8 het beste beschrijft. Deze kwalitatieve keuze wordt in Sectie 9.2 *kwantitatief* onderbouwd.

De berekende en gemeten afslagprofielen van de vier cases van Hoofdstuk 8 zijn voor de zes mogelijke *wetslp-facAs- α_{D50}* combinaties in Figuur 9-1 weergegeven. Het figuur laat zien dat Combinatie 2 (Representatief voor Vlaanderen) voor het Vlaamse profiel een goede overeenkomst met de metingen heeft, maar dat de andere profielen, met name Fire Island, niet goed gereproduceerd worden. Deze uitkomst is niet verrassend gegeven de spreiding van α_{D50} waarden en lage scores in Tabel 8.3. Combinatie 2 wordt als minst goede *wetslp-facAs- α_{D50}* combinatie beschouwd.

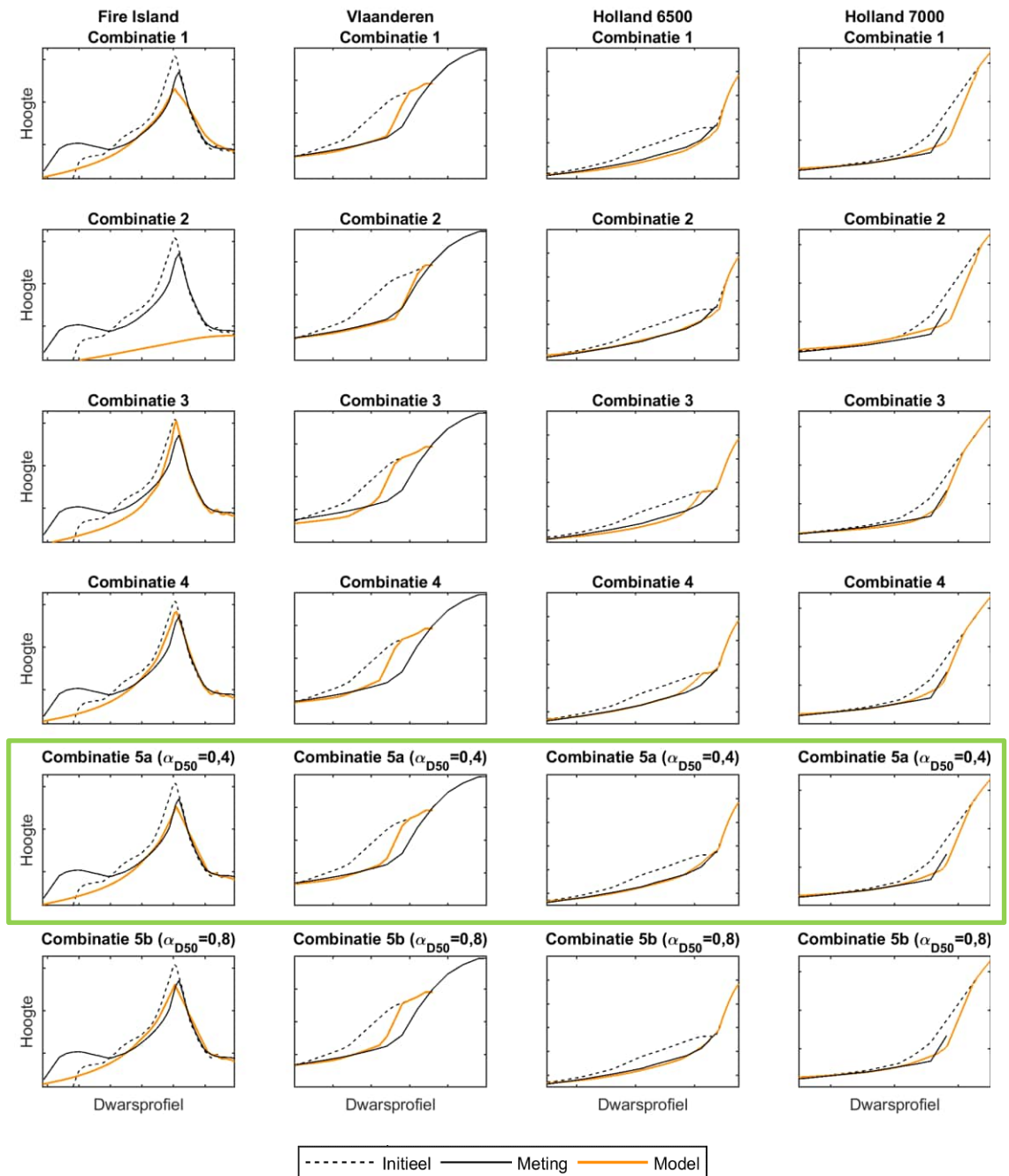
Combinaties 3 (Representatief voor Langeoog) en 4 (Deel 1 – BOI instellingen) tonen een sterke verbetering aan in het afslagprofiel voor Fire Island ten opzichte van Combinatie 2. Met deze combinaties van modelparameters onderschat het model echter nog de duinverlaging en afslagvolume voor de Fire Island case, en wordt het erosievolume voor de Vlaanderen en Holland 6500 cases ook onderschat. Deze combinaties dragen daarom – ten opzichte van andere modelparameter combinaties – onvoldoende bij aan het bereiken van de doelstelling van Deel 2 van dit rapport.

Combinaties 1 (Representatief voor Hollandse Kust) en 5b (Centrum-set, met $\alpha_{D50} = 0,8$) beschrijven de afslagprofielen van de kalibratiecases relatief goed. Combinatie 1 geeft een beperkte onderschatting van het gemeten afslagvolume voor Vlaanderen, een beperkte overschatting van het afslagvolume voor de Holland profielen, en een overschatting van de duinverlaging en het afslagvolume voor Fire Island. Combinatie 5b leidt daarentegen tot een lichte onderschatting van het afslagvolume voor Fire Island, een grotere onderschatting van het afslagvolume voor Vlaanderen, en een goede beschrijving van de Holland profielen. Hoewel deze combinaties niet tot de beste resultaten leiden voor de vier kalibratieprofielen, worden deze wel meegenomen in de gevoeligheidsanalyse (Sectie 9.2) om de keuze van de definitieve BOI-standaardinstellingen te onderbouwen.

De modelresultaten van Combinatie 5a (Centrum-set, met $\alpha_{D50} = 0,4$) komen – ten opzichte van de andere combinaties – het beste overeen met de gemeten afslagprofielen. Deze modelparameter instellingen geven een zeer goede beschrijving van de duinverlaging en het afslagvolume voor de Fire Island case, en beschrijven het profiel en afslagvolume van de Holland profielen goed. De afslagvolume voor Vlaanderen wordt onderschat, maar in mindere mate dan Combinaties 3, 4 en 5b. Deze modelinstelling wordt daarom geacht het beste te zijn voor toepassing binnen BOI en worden deze parameters opgenomen in de definitieve BOI-standaardinstellingen (Tabel 9.1). Deze keuze wordt kwantitatief onderbouwd in Sectie 9.2.

Tabel 9.1 – Definitieve BOI-standaardinstellingen voor de parameters *wetslp*, *facAs*, en α_{D50} .

	<i>wetslp</i>	<i>facAs</i>	α_{D50}
Definitieve BOI-standaardinstellingen	0,15	0,20	0,4



Figuur 9-1 – Afslagprofielen van de vier kalibratieprofielen en zes wetslp-facAs- α_{D50} combinaties. De geselecteerde combinatie voor de definitieve BOI-standaardinstellingen (Combinatie 5a) is groen omringd.

9.2 Kwantitatieve onderbouwing morfologische modelparameters

De selectie van mogelijke combinaties van *wetslp*, *facAs*, en α_{D50} (Hoofdstukken 7 en 8) en de definitieve BOI-standaardinstellingen voor deze parameters (Sectie 9.1) is gebaseerd op expertkennis en kwalitatieve vergelijkingen van berekende en gemeten afslagprofielen van een zeer beperkt aantal veldcases (een subset van de beschikbare profielgegevens uit de veldcases).

Om kwantitatief aan te tonen dat deze herkalibratie aanpak tot betere modelvoorspellingen van duinafslag leidt, worden de modelresultaten voor alle validatie veldcases (zie Appendix J voor

een volledige beschrijving van de veldcases) met de definitieve BOI-standaardinstellingen vergeleken met de modelresultaten op basis van de concept BOI-standaardinstellingen uit Deel 1 (Figuur 9-2; bovenste twee rijen).

De vergelijking tussen de concept- en definitieve BOI-standaardinstellingen (Figuur 9-2) laat zien dat de herkalibratie in Deel 2 van dit rapport de nauwkeurigheid van het model sterk verbetert. De relatieve fout (relative bias, zie Appendix I.1) in het duinafslagvolume neemt af van 0,31 naar 0,03, en de relatieve spreidingsfout (scatter index, zie Appendix I.1) neemt af van 0,45 naar 0,24. Het verkleinen van deze fouten draagt bij aan de BOI-doelstelling om de overstromingskans zo scherp mogelijk te kunnen kwantificeren.

Een volledige beschrijving van de rekenkundige aanpak, case-specifieke uitgangspunten en de uiteindelijke rekenresultaten van de veldcases op basis van de vastgesteld set met definitieve BOI-standaardinstellingen, is gegeven in het definitieve validatierapport (Arcadis/Deltares, 2021).

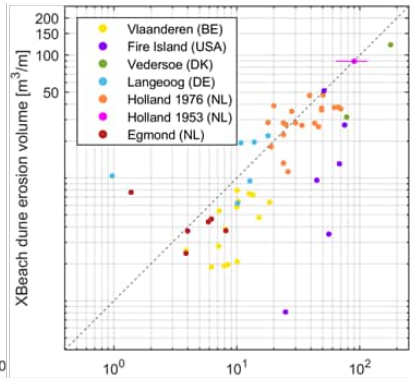
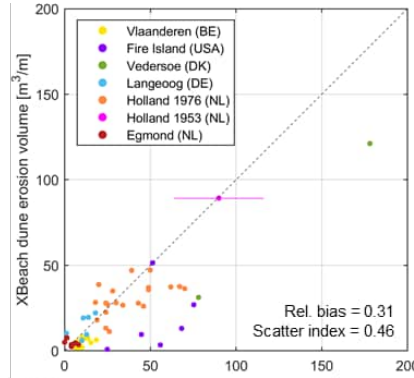
Om aan te tonen dat verbeterde resultaten van de definitieve BOI-standaardinstellingen niet bepaald worden door toevalligheden in de kwalitatieve analysemethode van Deel 2 van dit rapport, is tot slot een vergelijking gemaakt tussen de modelresultaten op basis van de definitieve BOI-standaardinstellingen, en die op basis van Combinaties 1 en 5b (zie Sectie 9.1). De resultaten van deze gevoeligheidsanalyse zijn weergegeven in Figuur 9-2 voor het duinerosie volume en in Figuur 9-3 voor de duinfront migratie (tweede, derde en vierde rijen).

Deze resultaten laten zien dat het verschil in nauwkeurigheid tussen de definitieve BOI-standaardinstellingen en Combinaties 1 en 5b is relatief klein is. Ook is er op basis van de kwantitatieve fout-scores geen eenduidige 'beste' combinatie te identificeren, dit varieert tussen het duinerosie volume en duinfront migratie. Dit betekent ook dat de nauwkeurigheid van de definitieve BOI-standaardinstellingen relatief ongevoelig is voor toevalligheden in het analyseproces.

Hoewel het herkalibratieproces heeft geleid tot een verbetering van het modelgedrag (duinafslagvolume, korrelgrootteafhankelijkheid), moet opgemerkt worden dat de herkalibratie noodzakelijk uitgevoerd is op basis van beperkte data en bestaande kennis over fysische processen. Verbeterde kennis over de fysica van duinafslag (inclusief golfeffecten en korrelgrootteafhankelijkheden), in combinatie met meer observaties in veldcondities, zou een tot een meer generiek model zonder inherente heuristiek leiden. Dit valt echter buiten de scope van het project BOI Zandige Waterkeringen.

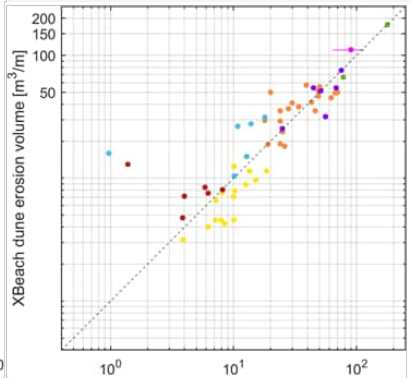
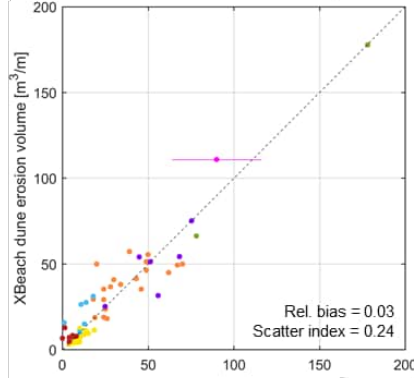
Deel 1 – concept BOI-standaardinstellingen

$wetslp = 0.18$
 $facAs = 0.25$
 $\alpha_{D50} = 1.6$



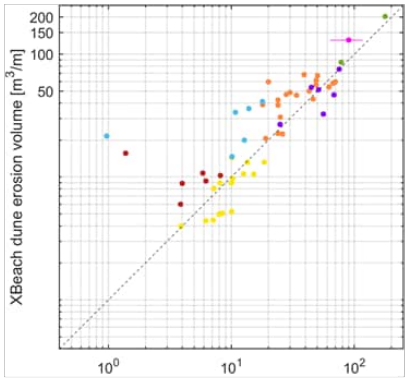
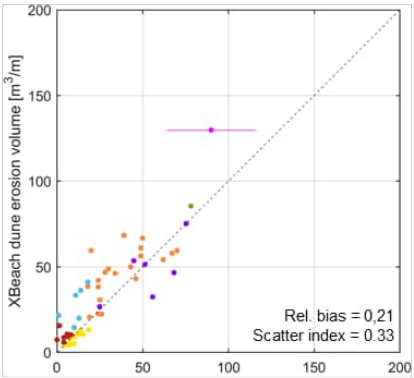
Deel 2 – definitieve BOI-standaardinstellingen

$wetslp = 0.15$
 $facAs = 0.20$
 $\alpha_{D50} = 0.4$



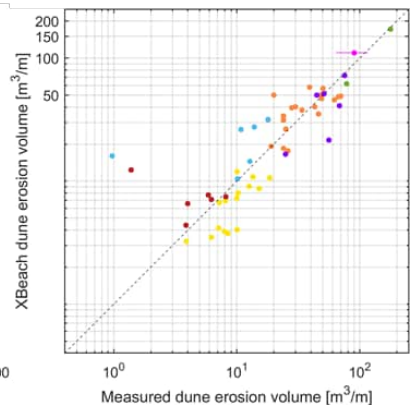
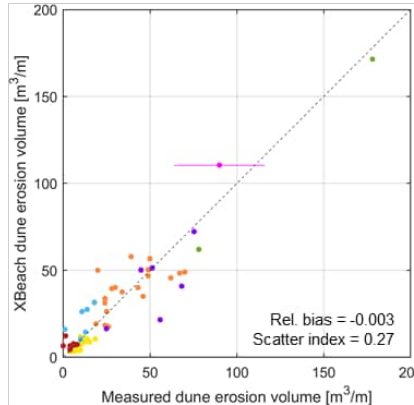
Combinatie 1 – Repr. voor Hollandse Kust

$wetslp = 0.13$
 $facAs = 0.15$
 $\alpha_{D50} = 0.8$



Combinatie 5b – Centrum-set $\alpha_{D50} = 0.8$

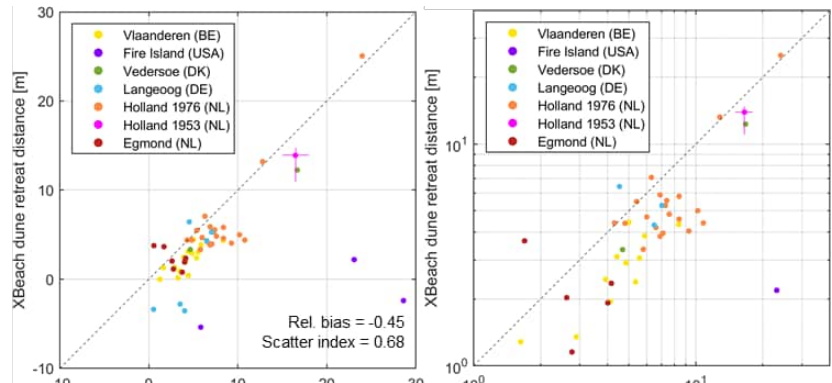
$wetslp = 0.15$
 $facAs = 0.20$
 $\alpha_{D50} = 0.8$



Figuur 9-2 – Vergelijking van de gemeten met gemodelleerde duinerosie volume voor alle veldmetingen voor de Deel 1 concept BOI-standaardinstellingen (eerste rij), Deel 2 definitieve BOI-standaardinstellingen (tweede rij), Combinatie 1 (Representatief voor Hollandse Kust; derde rij), en Combinatie 5b (Centrum-set met $\alpha_{D50} = 0.8$; vierde rij). De linker kolom geeft de resultaten weer op lineair geschaalde assen, de rechter kolom dezelfde resultaten maar dan op een logaritmisch geschaalde assen. De verschillende veldcases zijn aangegeven met de kleuren.

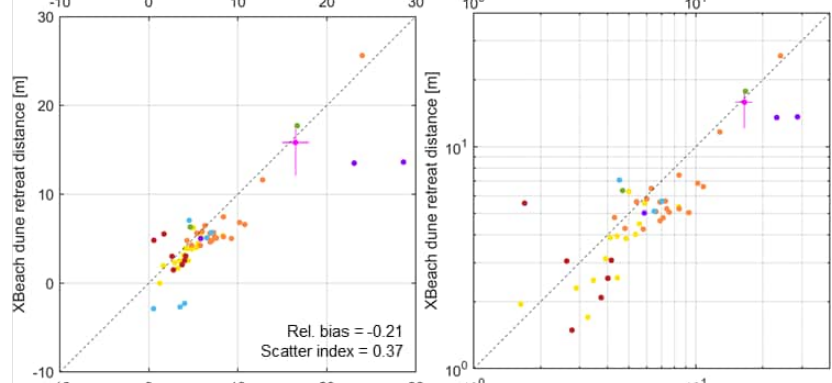
Deel 1 – concept BOI-standaardinstellingen

$wetslp = 0.18$
 $facAs = 0.25$
 $\alpha_{D50} = 1.6$



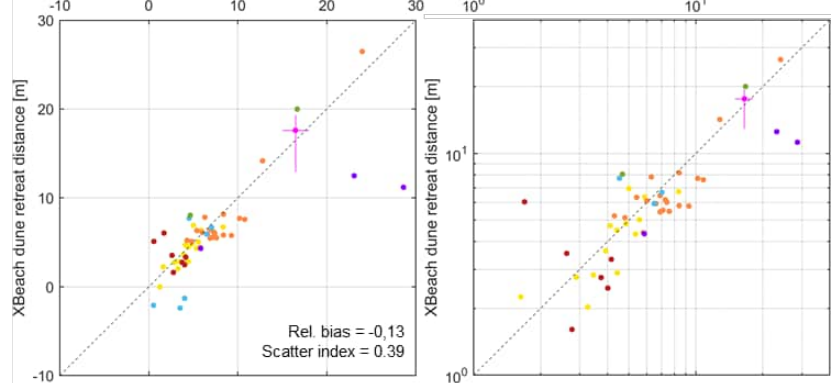
Deel 2 – definitieve BOI-standaardinstellingen

$wetslp = 0.15$
 $facAs = 0.20$
 $\alpha_{D50} = 0.4$



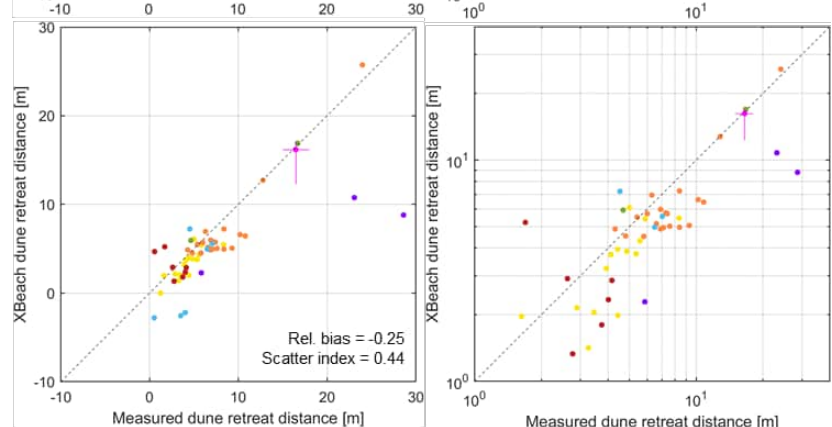
Combinatie 1 – Repr. voor Hollandse Kust

$wetslp = 0.13$
 $facAs = 0.15$
 $\alpha_{D50} = 0.8$



Combinatie 5b – Centrum-set $\alpha_{D50} = 0.8$

$wetslp = 0.15$
 $facAs = 0.20$
 $\alpha_{D50} = 0.8$



Figuur 9-3 – Vergelijking van de gemeten met gemodelleerde duinfront migratie voor alle veldmetingen voor de Deel 1 concept BOI-standaardinstellingen (eerste rij), Deel 2 definitieve BOI-standaardinstellingen (tweede rij), Combinatie 1 (Representatief voor Hollandse Kust; derde rij), en Combinatie 5b (Centrum-set met $\alpha_{D50} = 0.8$; vierde rij). De linker kolom geeft de resultaten weer op lineair geschaalde assen, de rechter kolom dezelfde resultaten maar dan op een logaritmisch geschaalde assen. De verschillende veldcases zijn aangegeven met de kleuren.

9.3 Consequenties definitieve instellingen op laboratoriumexperimenten

In Deel 1 zijn de concept BOI-standaardinstellingen afgeleid door kalibratie met laboratoriumexperimenten. Op basis van de veldcases is een aanpassing (herkalibratie) gedaan voor enkele modelparameters uit deze set. Voordat de (nieuwe) set met definitieve BOI-standaardinstellingen kan worden vastgesteld, wordt eerst nog een controleslag uitgevoerd om te beoordelen wat het effect is van de gewijzigde parameterinstellingen op de modelsimulaties van de laboratoriumexperimenten uit Deel 1. De resultaten van de analyses zijn in deze paragraaf gepresenteerd.

Bij het beoordelen van de kwaliteit van de morfologische resultaten in Deel 1 is de relatieve fout (de foutmaat) voor de indicatoren erosievolume boven stormvloedpeil, duinfrontmigratie en onderwaterhelling berekend. Deze foutmaten staan beschreven in paragraaf 3.2.2 in Deel 1 van dit rapport en beschrijven de gemiddelde waarde (voor alle metingen in de tijd) van de modelfout ten opzichte van de gemeten erosievolume, duinfrontmigratie, of onderwaterhelling. Voor de modelsimulaties van de laboratoriumexperimenten met de definitieve BOI-standaardinstellingen is dezelfde foutmaat berekend om de verandering in de foutmaat te kwantificeren, zie Tabel 9.2.

Bij de kalibratie van de concept BOI-standaardinstellingen in Deel 1 is de korrelgrootteafhankelijkheid (door middel van de α_{D50} parameter) niet meegenomen in de analyse. In de concept BOI-standaardinstellingen en in het concept validatierapport is een α_{D50} waarde van 1,6 toegepast. Om een eerlijke vergelijking tussen de definitieve en concept BOI-standaardinstellingen te maken voor de laboratoriumexperimenten, is de foutmaat voor de concept BOI-standaardinstellingen berekend met een α_{D50} van 1,6. Hieruit is te zien dat het introduceren van een korrelgrootte effect ($\alpha_{D50}=1,6$) de nauwkeurigheid van het model ten opzicht van de resultaten van Deel 1 doet verslechteren, waarbij bijvoorbeeld de foutmaat voor de erosievolume toeneemt van 0,11 tot 0,15. Dit komt door een toename van de fout voor de experimenten met een korreldiameter van 200 μm (e.g., Deltagoot 2006 experimenten).

Met de definitieve BOI-standaardinstellingen wordt, ten opzichte van de concept BOI-standaardinstellingen inclusief korrelgrootte effect, de foutmaat beperkt groter voor het erosievolume (van 0,15 naar 0,16) en de duinfrontmigratie (van 0,17 naar 0,21). Voor de onderwaterhelling is een lichte verbetering in de foutmaat te zien (van 0,14 naar 0,12). Een geringe afname van de nauwkeurigheid is verwacht, daar de concept BOI-standaardinstellingen geoptimaliseerd zijn op basis van data van de laboratorium experimenten. Hoewel de nauwkeurigheid van het model met de definitieve BOI-standaardinstellingen voor de laboratorium experimenten afneemt ten opzichte van de nauwkeurigheid met de concept BOI-standaardinstellingen, is het verschil relatief gering en veel kleiner dan de toename in nauwkeurigheid voor de veldcases (Sectie 9.2).

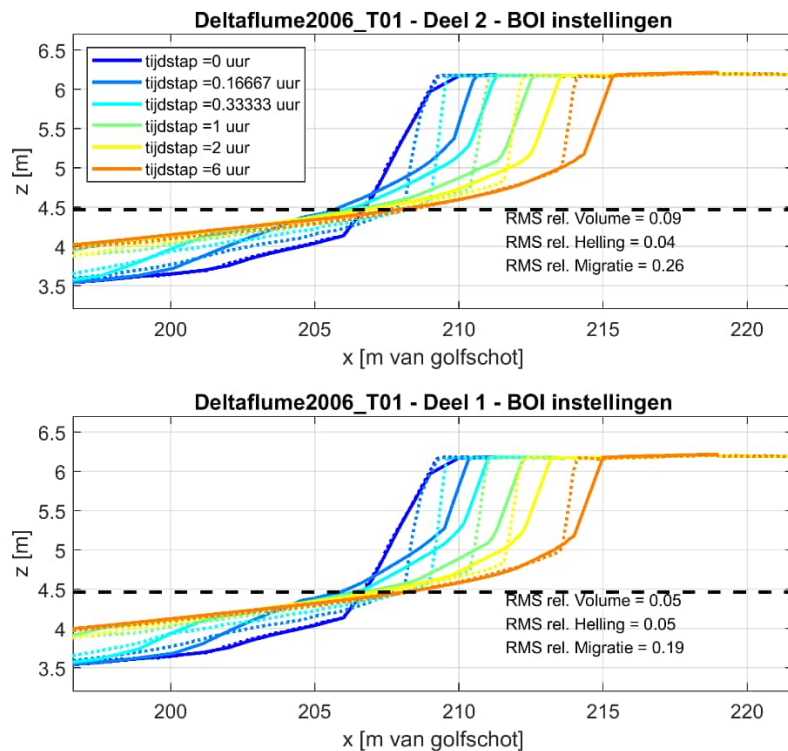
Tabel 9.2 – Foutmaat erosievolume, duinfrontmigratie en onderwaterhelling voor de laboratoriumexperimenten ten gevolge van de concept BOI-standaardinstellingen uit Deel 1 en definitieve BOI-standaardinstellingen uit Deel 2.

	Foutmaat erosievolume	Foutmaat migratie duinfront	Foutmaat onderwaterhelling
Resultaten Deel 1 (zonder korrelgrootte effect: $\alpha_{D50}=0$)	0,11	0,14	0,13
Concept BOI-standaardinstellingen (inclusief $\alpha_{D50} = 1,6$)	0,15	0,17	0,14
Definitieve BOI-standaardinstellingen	0,16	0,21	0,12

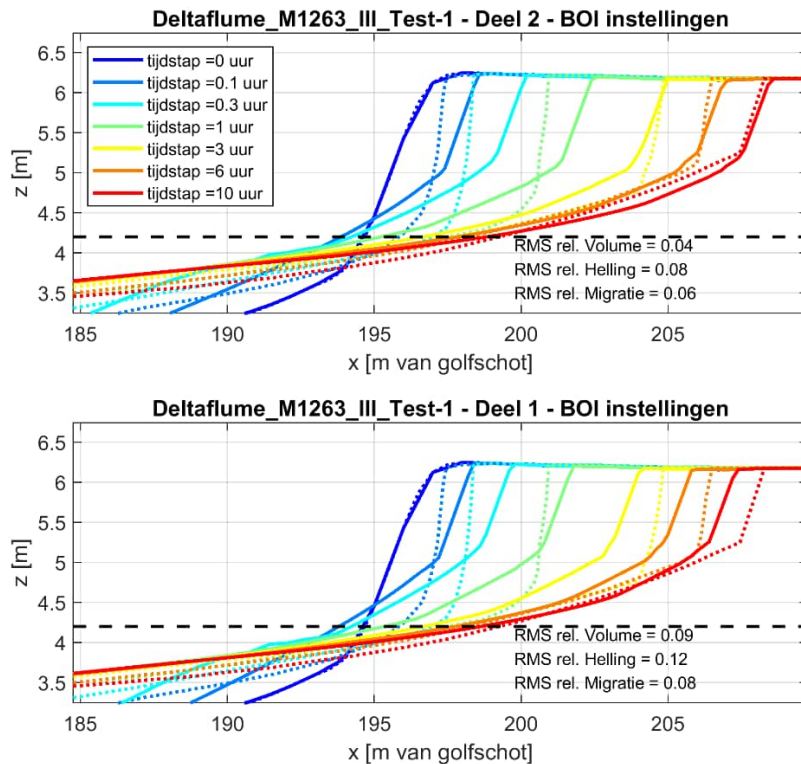
Om een indruk te geven van de geringe verschillen in morfologische verandering tussen beide standaardinstellingen voor de laboratoriumexperimenten, is hieronder de resultaten van experiment Deltagoot 2006 T02 (Figuur 9-4) en Deltagoot M1263 Test 2 (Figuur 9-5) gegeven. Een vergelijking voor alle experimenten is in Appendix I.2 te zien.

Voor de Deltagoot 2006 T02 experiment is te zien dat met de concept BOI-standaardinstellingen het erosievolume en de duinfrontmigratie wordt overschat door het model. Met de definitieve BOI-standaardinstellingen neemt deze overschatting verder toe. Voor het Deltagoot M1263 Test 2 experiment resulteren de definitieve BOI-standaardinstellingen juist in een verbetering van het voorspelde erosievolume en duinfrontmigratie, door de initiële onderschatting bij de concept BOI-standaardinstellingen. Dit illustreert de variabiliteit in het effect van de definitieve BOI-standaardinstellingen op de laboratoriumexperimenten. De gemiddelde foutmaat over alle experimenten neemt met 1 tot 4 percentagepunten toe en af ten gevolge van de definitieve BOI-standaardinstellingen (Tabel 9.2), maar voor de individuele experimenten zijn de resultaten meer variabel.

Het toepassen van de definitieve BOI-standaardinstellingen voor de laboratorium experimenten leidt tot iets minder nauwkeurige resultaten op laboratoriumschaal in vergelijking met het toepassen van de concept BOI-standaardinstellingen die hiervoor afgeleid zijn. Deze verschillen zijn echter relatief klein, en worden, gezien de relatief grotere verbetering in de nauwkeurigheid voor veldcases, én de beoogde toepassing van het model in een ontwerp- en beoordelingsinstrument voor veldsituaties, acceptabel geacht.



Figuur 9-4 - Duinafslag-profielen voor het Deltagoot 2006 T02 experiment met de definitieve BOI-standaardinstellingen (boven) en de concept BOI-standaardinstellingen (onder). De gemeten profielen zijn weergegeven in gestippelde lijnen en de XBeach resultaten zijn weergegeven in volle lijnen. De zwarte onderbroken lijn is het maximale stormpeil.



Figuur 9-5 - Duinafslag-profielen voor het Deltagoot M1263 Test 2 experiment met de definitieve BOI-standaardinstellingen (boven) en de concept BOI-standaardinstellingen (onder). De gemeten profielen zijn weergegeven in gestippelde lijnen en de XBeach resultaten zijn weergegeven in volle lijnen. De zwarte onderbroken lijn is het maximale stormpeil.

10 Deel 2 – Conclusies en aanbevelingen

In Deel 1 van dit rapport zijn de concept BOI-standaardinstellingen afgeleid op basis van laboratoriumdata. De concept BOI-standaardinstellingen zijn vervolgens aan de hand van veldmetingen in een concept validatiestudie (Appendix J) getest. Op basis van de concept validatiestudie is bepaald dat een herkalibratie van de concept BOI-standaardinstellingen nodig is om de nauwkeurigheid van het XBeach model te verbeteren voor toepassingen binnen het programma BOI.

Het doel van Deel 2 van dit rapport is om drie morfologische modelparameters van de concept BOI-standaardinstellingen te herkalibreren om de nauwkeurigheid van het XBeach model met betrekking tot duinafslag in veldsituaties te vergroten. Deze modelparameters zijn in de concept validatiestudie geïdentificeerd en hebben betrekking op ondiep water sedimenttransport (*facAs* en *wets/p*) en korrelgrootteafhankelijkheid in het afslagproces (α_{D50}).

De herkalibratie van de drie modelparameters is in twee stappen uitgevoerd op basis van een beperkte set velddata uit de concept validatiestudie en kwalitatieve vergelijkingen met de gemeten afslagprofielen. In de eerste stap zijn vijf profielen langs de Vlaamse, Hollandse en Duitse (Langeoog) kust gebruikt om mogelijke combinaties van de modelparameters *facAs* en *wets/p* te onderzoeken. Dit heeft geleid tot vijf combinaties van *facAs* en *wets/p*, inclusief de concept BOI-standaardinstellingen, en een “centrum” of gemiddelde parameter set. In de tweede stap zijn vier profielen met sterk afwijkende korrelgrootte ten opzichte van 225 μm , en daardoor grote bijdrage van de parameters α_{D50} , gebruikt om voor ieder *facAs-wets/p* combinatie een optimale waarde van de parameter α_{D50} te vinden. Op basis van een kwalitatieve vergelijking tussen de gemeten en berekende afslagprofielen van de veldkalibratie dataset, zijn de vijf mogelijke *facAs-wets/p- α_{D50}* combinaties geordend naar nauwkeurigheid, en is de beste combinatie geselecteerd voor de definitieve BOI-standaardinstellingen.

De selectie van de modelparameters voor de BOI-standaardinstellingen is kwantitatief onderbouwd met een vergelijkingen tussen de resultaten van het XBeach model op basis van de definitieve en concept BOI-standaardinstellingen voor alle veldcases van de concept validatiestudie. Deze vergelijking heeft aangetoond dat de nauwkeurigheid van het model voor de veldcases in de validatiestudie sterk verbetert. De relatieve fout (relative bias) in het duinafslagvolume neemt af van 0,28 naar -0,03, en de relatieve spreidingsfout (scatter index) neemt af van 0,59 naar 0,23. Het verkleinen van deze fouten draagt sterk bij aan de BOI-doelstelling om de doorbraakkans van zandige waterkeringen zo scherp mogelijk te kunnen kwantificeren. Een volledige beschrijving van de validatie van het XBeach model op basis van de definitieve BOI-standaardinstellingen wordt gegeven in Arcadis/Deltares (2021).

De herkalibratie in Deel 2 is noodzakelijk uitgevoerd op basis van beperkte data en bestaande kennis over de fysische processen van duinafslag. Hoewel hier met de huidige kennis nog geen verbetering in te brengen is, zijn er inherente beperkingen aan de heuristiek onderliggend aan de herkalibratie. Verder onderzoek naar de fysica van duinafslag (inclusief golfeffecten en korrelgrootteafhankelijkheden) in combinatie met meer observaties van hydro- en morfodynamica in veldcondities, zou hierin een verbetering brengen. Dit onderzoek valt echter buiten scope van het BOI Zandige Waterkeringen project.

De definitieve BOI-standaardinstellingen zijn, ondanks de inherente beperkingen van de inherente beperkingen van het kalibratieproces, uitvoerig getest en gevalideerd aan de hand van een grote dataset van laboratorium- (paragraaf 9.3) en velddata Arcadis/Deltares (2021). Voor verdere toepassing van het XBeach model binnen het project BOI Zandige

Waterkeringen, inclusief het kalibreren van het semi-probabilistisch model en het implementeren in MorphAn in Fase 2 van het project, wordt daarom aanbevolen om de definitieve BOI-standaardinstellingen van Deel 2 te gebruiken.

Een overzicht van de definitieve instellingen die in dit rapport behandeld worden is weergegeven in Tabel 10.1. De BOI-standaardinstellingen voor modelparameters die in andere rapporten zijn beschreven zijn opgenomen in Tabel 10.2.

Tabel 10.1 – Overzicht van definitieve BOI standaardinstellingen voor de rekenkernel XBeach die in dit rapport behandeld zijn.

Modelparameter	Beschrijving	Waarde / instelling	Uitleg
bedfriction	Formulering van de bodemwrijving voor stroming	<i>Manning</i>	Deel 1 van dit rapport; op basis van laboratoriumdata.
bedfriccoef	Waarde van de bodemwrijvingscoëfficiënt	0,02 [-]	Deel 1 van dit rapport; op basis van laboratoriumdata.
break	Formulering van korte golfbreking	<i>Roelvink_Daly</i> ³	Deel 1 van dit rapport; op basis van laboratoriumdata.
gamma	Brekingscoëfficiënt in golfbrekingsformulering	0,46 [-]	Deel 1 van dit rapport; op basis van laboratoriumdata.
gamma2	Coëfficiënt einde golfbreking in <i>Roelvink_Daly</i> golfbrekingsformulering	0,34 [-]	Deel 1 van dit rapport; op basis van laboratoriumdata.
alpha	Intensiteit van golfbreking in golfbrekingsformulering	1,38 [-]	Deel 1 van dit rapport; op basis van laboratoriumdata.
beta	Coëfficiënt voor rollerdissipatie	0,08 [-]	Deel 1 van dit rapport; op basis van laboratoriumdata.
form	Formulering van sedimenttransport	<i>VanThiel_VanRijn</i> ⁴	Deel 1 van dit rapport; op basis van laboratoriumdata.
waveform	Formulering van golf-nietlineariteit	<i>VanThiel</i> ⁴	Deel 1 van dit rapport; op basis van laboratoriumdata.
facSk	Coëfficiënt bijdrage golf skewness aan sedimenttransport	0,15 [-]	Deel 1 van dit rapport; op basis van laboratoriumdata.
facAs	Coëfficiënt bijdrage golf asymmetrie aan sedimenttransport	0,20 [-]	Deel 2 van dit rapport; op basis van velddata.
alfaD50	Coëfficiënt (α_{D50}) korrelgroottegevoeligheid in sedimenttransport	0,4 [-]	Deel 2 van dit rapport; op basis van velddata.
wetslp	Coëfficiënt voor ondiep water avalanching	0,15 [-]	Deel 2 van dit rapport; op basis van velddata.

³ Daly *et al.* (2012)

⁴ Van Thiel de Vries (2009)

Tabel 10.2 – Overzicht van overige definitieve BOI-standaardinstellingen voor de rekenkernel XBeach

Modelparameter	Beschrijving	Waarde / instelling	Uitleg
wbcEvarreduce	Coëfficiënt (α_E) voor het verdisconteren van richtingsverspreidings-effecten in 1D modellen	0,3 [-] voor veldcases (met golfrichtingsverspreiding) 1,0 [-] voor golfgoot experimenten (zonder golfrichtingsverspreiding)	Deltares (2021a)
CFL	Waarde voor Courant–Friedrichs–Lewy numerieke stabiliteitscriterium	0,95 [-] (voor 1D modellen)	Deltares (2021a)
fixedAvaltime	Optie om duin avalanching met vaste (1) of golfperiode-afhankelijke (0) tijdschaal uit te rekenen	0 [-]	Deltares (2021b)
nTrepAvaltime	Aantal golfperiodes in golfperiode-afhankelijke tijdschaal voor avalanching	1,0 [-]	Deltares (2021b)
oldTsmn	Optie om dimensiehoudende (1) of dimensieloze (0) minimum adaptatietijdschaal voor sedimentconcentratie toe te passen	0 [-]	Deltares (2021b)
dtLimTs	Aantal numerieke tijdstappen voor minimum adaptatietijdschaal voor sedimentconcentratie	5 [-]	Deltares (2021b)
DeltaHmin	Fractie van de brekende golfhoogte die toegevoegd wordt aan de waterdiepte ter bepaling van de retourstroom	0,1 [-]	Deltares (2021b)
Hswitch	Waterdiepte voor overgang tussen droge en natte avalanching	0,0 [m]	Deltares (2021b)
eps	Minimum numerieke waterdiepte voor natte cellen	0,005 [m] (op prototypeschaal)	Deltares (2021b)
eps_sd	Snelheidsverschil tussen aanliggende rekencellen waarbij van een impuls-behoudende numerieke rekenschema overgegaan wordt naar een energiebehoudende numerieke rekenschema	0,50 [m/s] (op prototypeschaal)	Deltares (2021b)
tidetype	Formulering voor getijde randvoorwaarden	hybrid [-]	Deltares (2021c)
wbcScaleEnergy	Optie om de op de modelrand gegenereerde golftijdserie wel (1) of niet (0) te schalen naar de opgelegde golfhoogte	1 [-]	Deltares (2021c)
wbcRemoveStokes	Optie om de op de modelrand gegenereerde fluxtijdserie wel (1) of niet (0) de IG Stokes drift te compenseren	1 [-]	Deltares (2021c)
nuhfac	Factor om door roller-geïnduceerde viscositeit mee te nemen in de bewegingsvergelijkingen	0,0 [-]	Deltares/Arcadis (2020)
random	Optie om een simulatie-specifieke randomizer wel (1) of niet (0) toe te passen in het genereren van golfrandvoorwaarden	0 [-]	Deltares (2021a)

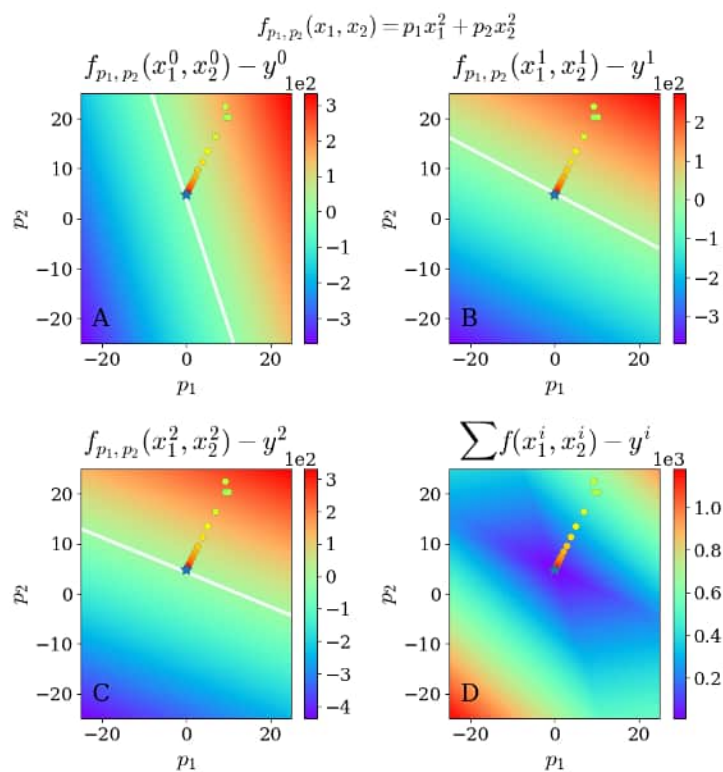
Referenties

- Arcadis/Deltares. (2021). Validation of dune erosion model XBeach: Development of 'BOI Sandy Coasts'. Arcadis tech. report D10029117:2.0.
- Boers, M. (1996). Simulation of a surf zone with a barred beach. Part 1: Wave heights and Wave breaking. Communications on Hydraulic and Geotechnical engineering. Report No 96-5.
- Daly, C., Roelvink, D., van Dongeren, A., de Vries, J.V.T. and McCall, R. (2012). Validation of an advective-deterministic approach to short wave breaking in a surf-beat model. Coastal Engineering, 60, pp.69-83.
- Deltares. (2008). BWDuinen2-Ontwikkeltraject. Eerste aanzet tot de ontwikkeling van het 2011 Duintoetsinstrumentarium. Deltares rapport H5019.20.
- Deltares (2014), rapport nummer 1209436-002. XBeach 1D – Probabilistic model ADIS, Settings, Model uncertainty and Graphical User Interface. Auteurs: Pieter van Geer, Joost den Bieman, Bas Hoonhout, Marien Boers.
- Deltares (2015). Achtergronddocument toetschema duinafslag: Filterregels bij toepassing van de gedetailleerde toets duinafslag WTI2017. Deltares rapport 1220085-006, september 2015. Auteur: M. Boers.
- Deltares/Arcadis (2018). Aanloopstudie XBeach WTI. Tech. Report 11202190-001-ZKS-0005. Auteurs: E. Quataert, R. van Santen, R. McCall, A. van Dongeren, H. Steetzel.
- Deltares/Arcadis (2019a). Plan van Aanpak Vernieuwd Instrumentarium Zandige Keringen. Tech. Report 11203720-014-GEO-0001. Auteurs: R. McCall, R. van Santen, H. Steetzel, A. van Dongeren.
- Deltares/Arcadis (2019b). Vervolgstudie XBeach. Deltares Rapport 11203720-013. Auteurs: R. McCall, R. van Santen, H. Steetzel, M. de Ridder, A. van Dongeren
- Deltares (2020). Scaling of dimensional parameters in the XBeach model. Rapport 11205758-029, September 2020. Auteurs: A. de Bakker, M. van der Lugt, L. de Vet, R. de Goede en R. McCall.
- Deltares/Arcadis. (2020). Wave spreading and sediment size effects in the XBeach model. Deltares rapport 11203720-030-GEO-0002. Auteurs: McCall, R., Quataert, E., De Bakker, A., De Ridder, M. Van Santen, R., Steetzel, H.
- Deltares. (2021a). XBeach BOI - Approaches to reduce calculation time. Deltares rapport 11205758-029-GEO-0012. Auteurs: De Goede, R., De Ridder, M., Quataert, E., McCall, R.
- Deltares. (2021b). BOI - Scaling of dimensional parameters in XBeach. Deltares rapport 11205758-029-GEO-0002. Auteurs: De Bakker, A., Van der Lugt, M., De Vet, L., De Goede, R., McCall, R.
- Deltares. (2021c). Voortgangsrapportage projectmanagement BOI Zandige Keringen Fase 1. Deltares memo 11206818-018-GEO-0002. Auteur: McCall, R.
- Expertise Netwerk Waterveiligheid/ENW (2007). TRDA2006 Duinafslag, Technisch Rapport Beoordeling van de veiligheid van duinen als waterkering ten behoeve van Voorschrift Toetsen op Veiligheid.

- Ralston, M. L., & Jennrich, R. I. (1978). DUD, a derivative-free algorithm for nonlinear least squares. *Technometrics*, 20(1), 7-14.
- Roelvink, J. A. (1993). Dissipation in random wave groups incident on a beach. *Coastal Engineering*, 19(1-2), 127-150.
- Roelvink, J.A., Reniers, A., Van Dongeren, A.P., De Vries, J.V.T., McCall, R. and Lescinski, J. (2009). Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coastal engineering*, 56(11-12), pp.1133-1152.
- Ruessink, G., Michallet, H., Bonneton, P., Mouazé, D., Lara, J.L., Silva, P.A. en P. Wellens (2013). GLOBEX: wave dynamics on a gently sloping, laboratory beach. *Coastal Dynamics Conference Proceedings*.
- Steezel, H. (1993). Cross-shore transport during storm surges. Ph.D. thesis: Delft University of Technology.
- Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen/TAW (1984). Leidraad voor de beoordeling van de veiligheid van duinen als waterkering.
- Van der Lugt, M. A., Quataert, E., Van Dongeren, A., Van Ormondt, M., & Sherwood, C. R. (2019). Morphodynamic modeling of the response of two barrier islands to Atlantic hurricane forcing. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2019.106404>
- Van Thiel de Vries, J. S. M. (2009), Dune erosion during storm surges, PhD thesis, Fac. of Civ. Eng. and Geosci., Delft Univ. of Technology., Delft, Netherlands
- Van Rijn, L. (2007). Unified view of sediment transport by currents and waves. ii: Suspended transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(6), 668-689.
- WL|Delft Hydraulics. (1976). Scale series dune erosion. WL|Delft Hydraulics rapport M1263 part I. Auteur: Van de Graaff, J.
- WL | Delft Hydraulics (1982). Onderzoek naar de werking van een duinvoetverdediging tijdens superstormvloed. Proeven M1797. Auteurs: onbekend.
- WL | Delft Hydraulics (1984). Schaalserie duinafslag, proeven op grote schaal in de Deltagoot, verslag modelonderzoek. M1263 deel 3A & 3B, april 1984. Auteurs: onbekend.
- WL | Delft Hydraulics (1995). LIP11D Delta flume experiments, januari 1995. Auteurs: J.A. Roelvink en A. Reniers.
- WL | Delft Hydraulics (2006). Measurement report large-scale model tests. H4357 – Deltagoot 2006 tests. Auteurs: onbekend.
- WL | Delft Hydraulics (2007). Influence of collapsed revetments on dune erosion. Large-scale model tests. H4731, february 2007. Auteurs: E.M. Coeveld and M.R.A. van Gent.

A Deel 1 - DUD kalibratie methode

In Figuur A-1 is het principe van de DUD methode weergegeven voor een functie $f(x_1, x_2)$ met twee variabelen (x_1 en x_2) en twee parameters (p_1 en p_2). De functie kan worden gezien als het XBeach model en de variabelen als de invoer van het XBeach model (bodem en randvoorwaarden). De parameters p_1 en p_2 vertegenwoordigen de XBeach parameters. In dit voorbeeld zijn er drie meetpunten met elk een waarde voor x_1 , x_2 en y . In dit voorbeeld is de parameter-ruimte glad, waardoor de DUD methode in een vrij rechte lijn richting het optimum loopt (de gekleurde bolletjes geven de verschillende parameters weer per iteratie). Op een vergelijkbare manier worden de XBeach parameters gekalibreerd, waarbij de parameter-ruimte een multidimensionale ruimte representeert en elk meetpunt een laboratorium experiment voorstelt.



Figuur A-1 Voorbeeld van de DUD optimalisatie voor een functie $f(x_1, x_2)$ met twee variabelen (x_1 en x_2) en twee parameters (p_1 , p_2). De fout voor de drie meetpunten is weergegeven als functie van de parameters (p_1 , en p_2) in paneel (A, B en C). In paneel D is de totale fout over de drie meetpunten weergegeven. Een fout van 0 is weergegeven met een witte lijn voor de drie meetpunten. De gekleurde bolletjes laten het pad in de parameter-ruimte zien, waarbij het uiteindelijke optimum is weergegeven met een sterretje.

B Deel 1 – Geselecteerde laboratorium experimenten

In vergelijking met de datasets die gebruikt zijn voor kalibratie tijdens het WTI project (Tabel B-1), vallen bij de BOI kalibratie verschillende datasets af, en zijn er twee laboratoriumproeven bij gekomen (Tabel B-2).

Hydrodynamische datasets

De hydrodynamische parameters worden apart gekalibreerd op experimenten met een gefixeerde bodem. Dit om te voorkomen dat de hydrodynamische parameterinstellingen onrealistisch worden beïnvloed door de morfologische parameterinstellingen. Voor de hydrodynamische kalibratie zijn experimenten gekozen met:

- **Hoge resolutie** in het aantal meetlocaties en meetfrequentie.
- **Actieve reflectie compensatie** (ARC), dat zeewaarts bewegende, gereflecteerde lange golven absorbeert bij het golfschot, en daarmee staande golven en ruis voorkomt.
- **Tweede-orde golfsturing**, voor het goed representeren van de lange golven.

Op basis van deze criteria zijn de Boers (1996) experimenten (strandprofiel met een zandbank) en de flauw-hellende (1:80) GLOBEX dataset (Ruessink et al., 2013), representatief voor het Amelandse strand, gebruikt als basis.

Morfologische datasets

De morfologische datasets zijn geselecteerd volgens criteria die voornamelijk invloed hebben op de morfologie. Als daarbij ook de bovenstaande selectie criteria voor de hydrodynamische kalibratie worden gebruikt, vallen bijna alle laboratorium experimenten af. Daarom is gekozen voor het loslaten van de restricties van een ARC en tweede-orde golfsturing bij de morfologische kalibratie.

- **Alleen laboratorium datasets:** Binnen het BOI project is er gekozen de kalibratie met laboratorium datasets uit te voeren en de latere validatie met velddata (Projectfase 1 van BOI project Zandige Waterkeringen). Hierdoor valt de *1976 storm* voor deze fase af.
- **Alleen laboratoriumscales groter dan 1:30:** De kleinste schalen van morfodynamische tests worden niet meer meegenomen, omdat de strandprofielen onrealistisch afgevlakt worden t.o.v. de grotere Deltagoot experimenten. Daardoor vallen de *Scheldegoet 1202124* experimenten met een schaal van 1:40 af.
- **Korrelgrootte groter dan 200 µm:** Bij experimenten die zijn uitgevoerd met een mediane korreldiameter (D_{50}) kleiner dan $< 200 \mu\text{m}$ ontwikkelen er niet-representatieve profielen doordat sediment cohesieve eigenschappen vertoont, en er overhellende kliffen vormen. De *Scheldegoet M_1819* experimenten, waar met uiterst tot zeer fijn zand is gewerkt (100 µm) wordt daarom niet meer meegenomen bij de kalibratie.

Tabel B-1 Geselecteerde testen voor het afleiden van de WTI parameter instellingen voor XBeach. De gebruikte codes in de eerste kolom zijn referenties naar technische rapporten van WL/Delft Hydraulics of Deltares die de experimenten beschrijven, van Deltares (2014).

Measurement	Tests	Scale	Remarks
Deltaflume H4731	T14	1:6	
Deltaflume M1263-III	T01, T02, T03, T04 and T05	1:5, 1:3 and 1:2.5	
Deltaflume M1797	T01	1:2	
Deltaflume 2006	T01, T02, T03, T05, T06 and T08	1:6	
Deltaflume LIP11D	2E	1:1	
Scheldtflume 1202124	A1A, A2A, B1A, B2A and C1A	1:40	Shallow foreshore
Scheldtflume M1819-I	T01, T02, T03, T04, T05, T06, T07 and T08	1:30	
1976 storm surge	Transect 568, 3400 and 6050	1:1	Field data

Tabel B-2 Geselecteerde laboratorium proeven voor de BOI kalibratie.

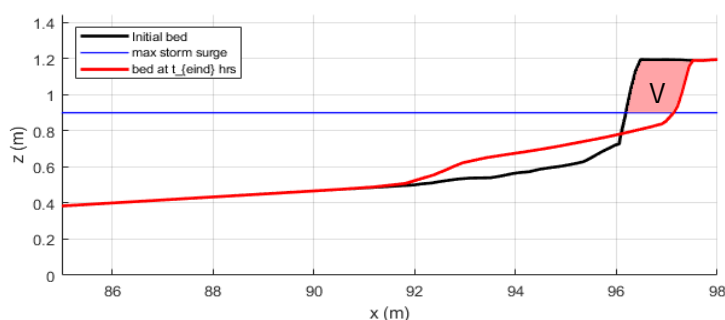
Skilbed folder	Code	Orde golfaansturing	ARC	Schaal	Golfhoogte	Golfperiode	D ₅₀	Uitvoermomenten
Hydrodynamische kalibratie								
Boers1996 (Boers et al. 1996)	1A	2	ja	28	0,16	2,1	-	Meetfrequentie van 20 Hz
Boers1996	1B	2	ja	28	0,22	2,1	-	Meetfrequentie van 20 Hz
Boers1996	1C	2	ja	28	0,1	3,4	-	Meetfrequentie van 20 Hz
Globex (Ruessink et al. 2013)	1A	2	ja	20	0,1	1,58	-	Meetfrequentie van 128 Hz
Globex	1B	2	ja	20	0,2	2,25	-	Meetfrequentie van 128 Hz
Globex	1C	2	ja	20	0,1	2,25	-	Meetfrequentie van 128 Hz
Morfologische kalibratie								
Deltaflume_H4731\ (WL Delft Hydraulics, 2007)	T14	2	ja	5	1,5	4,9	200	0,600,3600,7200,10800, 21600
Deltaflume2006\ (WL Delft Hydraulics, 2006)	T08	2	ja	6	1,5	7,35	200	0,600,1200,3600,7200, 21600
Deltaflume2006\	T01	2	ja	6	1,5	4,9	200	0,600,1200,3600,7200, 21600
Deltaflume2006\	T02	2	ja	6	1,5	6,12	200	0,600,1200,3600,7200, 21600
DeltaflumeLIP11D\ (WL Delft Hydraulics, 1995)	2E	1	ja	5	1,4	5	220	leder uur tot aan 64800 s
Deltaflume2006\	T03	2	ja	6	1,5	7,35	200	0,600,1200,3600, 7200,21600
Deltaflume_M1263\II\ (WL Delft Hydraulics, 1984)	Test-1	1	nee	5	1,5	5,4	225	0,360,1080,3600,10800, 21600,36000
Deltaflume_M1263\II\	Test-2	1	nee	5	1,5	5,4	225	0,360,1080,3600,10800, 21600,36000
Deltaflume_M1263\II\	Test-3	1	nee	5	1,5	5,4	225	0,5400, 14400, 69300
Deltaflume_M1263\II\	Test-4	1	nee	3.27	1,85	5	225	0, 18300, 61200
Deltaflume_M1263\II\	Test-5	1	nee	1	2	7,6	225	0,10800, 21600
Deltaflume_M1797\ (WL Delft Hydraulics, 1982)	T01	1	nee	2	1,875	4,5	206	0,25500,34200,42000, 51000

C Deel 1 – Details definitie indicatoren

In Hoofdstuk 3.2 zijn drie indicatoren geïntroduceerd om de kwaliteit van de morfologische simulaties te beoordelen. Dit betreft de volgende drie indicatoren: het erosie volume, de duinfront migratie en de onderwaterhelling. In deze bijlage is beschreven hoe deze indicatoren precies berekend zijn.

C.1 Erosievolume

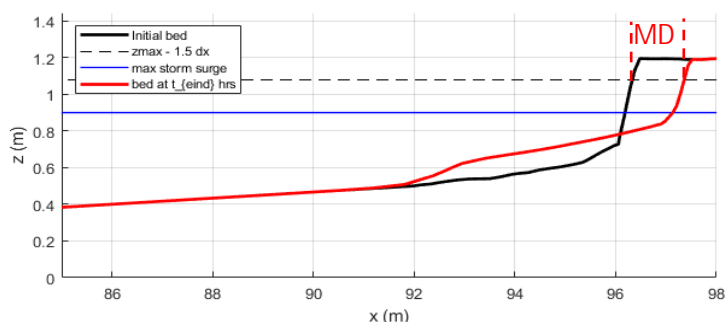
Het erosievolume V (duinafslagvolume) is berekend als het volume per strekkende meter tussen (1) de initiële bodemhoogte en (2) de bodemhoogte op de beschouwde tijdstap met beiden als ondergrens het maximale stormpeil. Dit is gevisualiseerd in Figuur C-1.



Figuur C-1 Definitie van het erosievolume. De horizontale blauwe lijn is het maximale stormpeil.

C.2 Duinfront migratie

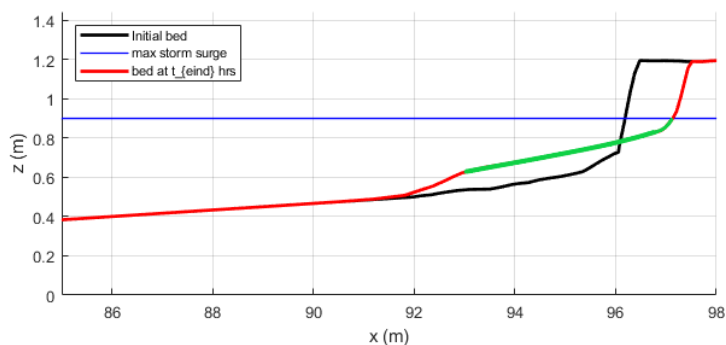
De duinfront migratie MD , van het begin van de simulatie tot de beschouwde tijdstap, is berekend als de horizontale verschuiving van het bodemprofiel op een bepaalde referentiehoogte. Gekozen is voor een referentiehoogte van anderhalf maal de rekenroosterresolutie onder de maximale initiële bodemhoogte (op de zwarte stippellijn in Figuur C-2, en in lijn met het vorige BOI deelrapport, Deltares 2020). Deze referentiehoogte is voldoende hoog voor een doorkruising van het duinfront. Deze referentiehoogte is verder voldoende laag voor een doorkruising van alle gemeten bodemprofielen op alle tijdstappen (de maximale bodemhoogte op een bepaald moment in de tijd kan door erosie lager zijn dan de maximale bodemhoogte aan het begin van het experiment).



Figuur C-2 Definitie van de duinfront migratie. De horizontale blauwe lijn is het maximale stormpeil.

C.3 Onderwaterhelling

De onderwaterhelling S is in deze studie gedefinieerd als de gemiddelde bodemhelling van de depositiezone. De bovengrens van de zone waarover deze helling is berekend is hier gelijk gesteld aan het maximale stormpeil. De ondergrens is gelijk gesteld aan het meest zeewaartse punt van het profiel waarvoor de verticale depositie nog minstens de helft is van de maximale verticale depositie in het profiel. Deze zone is met groen gevisualiseerd in Figuur C-3. De onderwaterhelling is berekend als de gemiddelde helling over deze zone, na interpolatie van het bodemprofiel naar een uniform rooster. Deze interpolatie is noodzakelijk om deze indicator niet beïnvloed te laten worden door de ruimtelijke variatie in rekenresolutie (relatief meer roosterpunten nabij het duinfront).



Figuur C-3 Definitie van de zone waarvoor de gemiddeld onderwaterhelling wordt bepaald (groen). De horizontale blauwe lijn is het maximale stormpeil.

D Deel 1 – Beschrijving potentiële kalibratie parameters

Tabel D-1 Korte beschrijving van alle potentiële kalibratie parameters welke zijn onderzocht in de gevoeligheidsstudie.

Parameter	Beschrijving
fcutoff	Laagfrequente cutoff frequentie voor Jonswap, Swan of vardens randvoorwaarden
trepfac	Bereken gemiddelde golfperiode over energieband: $trepfac \cdot \maxval(S_f)$ for Jonswap, Swan of vardens randvoorwaarden; convergeert naar Tm01 voor $trepfac=0,0$
sprdthr	Drempelwaarde van S waarboven spectrum dichtheden ingelezen worden
gamma	Brekingparameter in Baldock of Roelvink formulering
gamma2	Einde van brekingparameter in Roelvink Daly formulering
alpha	Golfdissipatie coëfficiënt in Roelvink formulering
n	Machts-coëfficiënt in het Roelvink dissipatiemodel
gammax	Maximum ratio golfhoogte tot waterdiepte
delta	Fractie van de golfhoogte om toe te voegen aan de waterdiepte
deltahmin	Fractie van de golfhoogte om toe te voegen aan de waterdiepte voor hmin
wavfriccoef	Golf wrijvings coëfficiënt
fwcutoff	Diepte waarbij voor grotere dieptes de bodemwrijvings factor niet meer wordt toegepast
breakerdelay	Schakelaar om het brekings-vertraging model aan te zetten
facsd	Fractie van de lokale golflengte gebruikt voor de shoaling vertragingdiepte in optionele breakerdelay module
beta	Brekingshelling coëfficiënt in roller model
bedfriccoef	Bodemwrijvingscoëfficiënt
maxcf	Maximale wrijvingscoëfficiënt (alleen relevant voor Manning en White-Colebrook)
nuh	Horizontale achtergrondviscositeit
nuhfac	Viscositeits schakelaar om roller geïnduceerde turbulente horizontale viscositeit aan te zetten
gamma_turb	Kalibratie factor voor de bijdrage van turbulentie aan de bodemwrijving
vonkar	von Karman constante
vicmol	Moleculaire viscositeit
sigfac	dsig schaalt met $\log(\text{sigfac})$
deltar	Geraamde ripple hoogte
rwave	Gebruikers-gedefinieerde golfrouwheids aanpassingsfactor

Parameter	Beschrijving
BRfac	Kalibratie factor voor oppervlaktehelling lange golf turbulentie model
facsl	Factor voor bodemhelling effecten
z0	Nul stroming snelheidslevel in Soulsby en van Rijn (1997) sediment concentratie formulering
smax	Maximale Shields parameter for evenwichts sedimentconcentratie volgens Diane Foster
tsfac	Coefficiënt om Ts te bepalen $T_s = tsfac \cdot h / ws$ in de sedimentbron term
facSk	Kalibratie factor voor sediment transport door golf scheefheid (skewness)
facAs	Kalibratie factor voor sediment transport door golf asymmetrie
betad	Dissipatie parameter voor turbulentie geïnitieerd door het breken van lange golven
facDc	Optie om sediment diffusie coëfficiënt te controleren
facthr	Vermenigvuldigingsfactor voor numerieke geraamde lange golf roller dikte
bermslope	Swash zone helling voor (semi-) reflecterende stranden
bermslopefac	Bodemhelling transport factor voor het bermslope model
bermslopegamma	Golfhoogte- waterdiepte ratio om het bermslope model aan te zetten in surfbeat modus
bermslopedepth	Waterdiepte waarop het bermslope model wordt aangezet in stationaire en nonhydrostatische modus
wetslp	Kritische avalanche helling onder water (dz/dx en dz/dy)
dryslp	Kritische avalanche helling boven water (dz/dx en dz/dy)
hswitch	Waterdiepte waarop wordt overgegaan van de wetslp naar de dryslp
avaltime	Tijdschaal waarop avalanching optreedt
nTrepavaltime	Aantal representatieve golfperiodes gebruikt voor de tijdschaal waarop avalanching optreedt
cmax	Maximale sediment concentratie
dtlimTs	Aantal tijdstappen in de limiter van de sedimentatie tijd

E Deel 1 – Gevoeligheidsanalyse

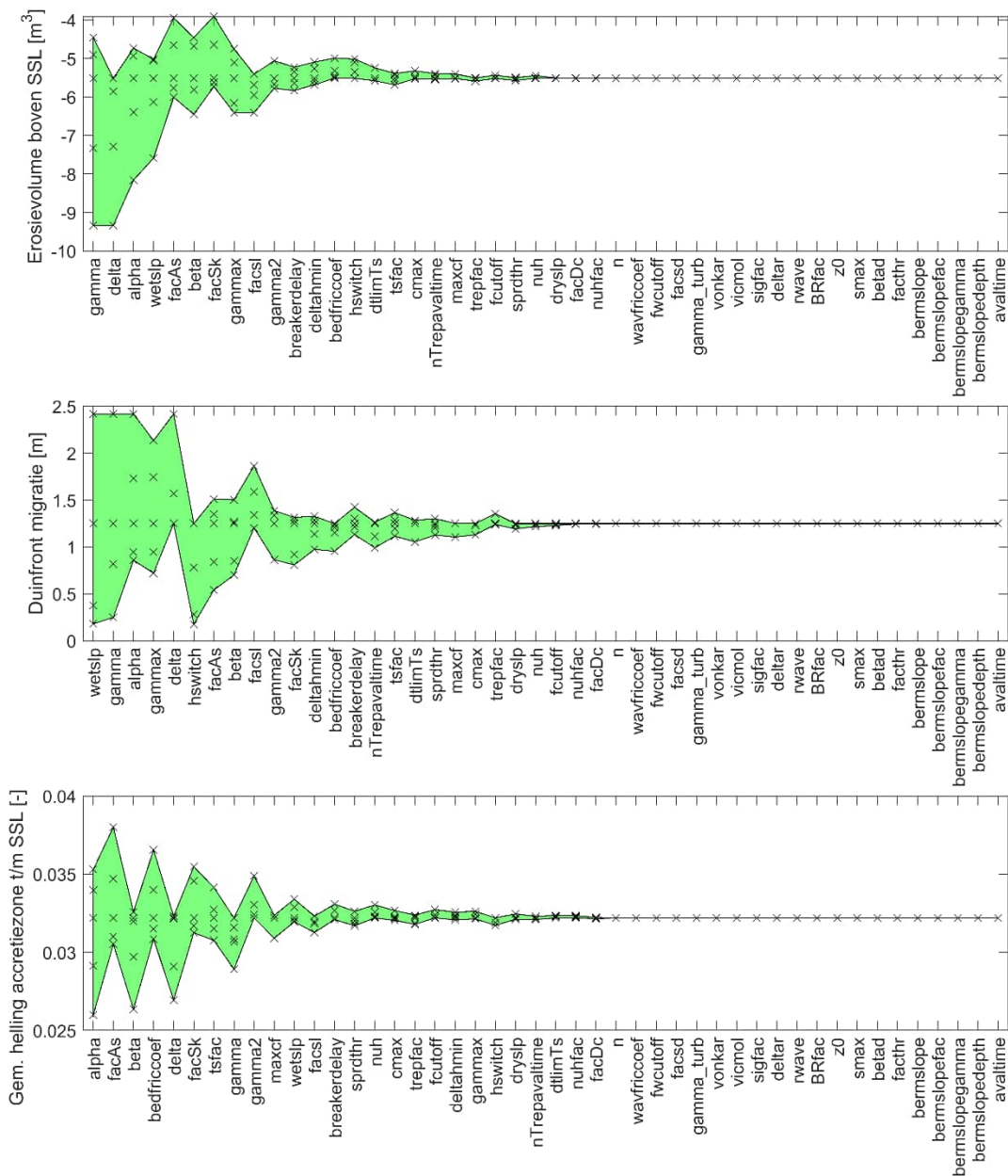
Binnen de kalibratiestudie (Hoofdstuk 4) is het XBeach model voor de morfologische parameters afgesteld op morfologische proeven en voor de hydrodynamische parameters op hydrodynamische proeven. In deze bijlage wordt toegelicht hoe de keuze voor deze parameters precies tot stand is gekomen.

Het XBeach model wordt binnen het BOI kader primair ingezet om morfologische voorspellingen te maken. Daarom is de selectie van parameters voor de kalibratiestudie gemaakt op basis van de rangorde van gevoeligheid van de parameters op de morfologische voorspellingen. Deze rangorde is gebaseerd op de resultaten van de gevoeligheidsanalyse van alle 46 parameters volgend uit een voorselectie (Tabel 3-1) op een morfologische proef (het Deltaflume_H4731/T14 experiment). Sommige van deze parameters beïnvloeden de morfologie vooral via de hydrodynamica. Welke parameters dit zijn volgt uit de gevoeligheid van de parameters op de modelresultaten van een hydrodynamische proef (Boers1996_1C). Deze inzichten zijn tot slot gecombineerd om een onderscheid te maken tussen de parameters die op hydrodynamische proeven werden afgesteld en de parameters op morfologische proeven werden afgesteld.

In de gevoeligheidsanalyse zijn de parameters gevarieerd over de parameter ranges zoals gedefinieerd in de broncode (revisie 5758). Voor bepaalde parameters (*gamma_{max}*, *deltah_{min}*, *tsfac*, *facAs*, *dryslp* en *hswitch*) zijn hiertoe wel eerst de onrealistische ranges aangepast (deze aanpassingen zijn verwerkt in het vermelde revisienummer van de broncode). De parameters zijn in de gevoeligheidsanalyse gevarieerd over vijf waarden: de ondergrens van de parameter range, de standaard waarde van de parameter, de bovengrens van de parameter range en de twee tussenliggende waarden.

E.1 Gevoeligheidsanalyse morfologie

Figuur E-1 toont de resultaten van de gevoeligheidsanalyse voor de erosievolumes, de duinfront migratie en de gemiddelde helling van de depositiezone tot en met het SSL. Deze resultaten zijn verkregen voor een simulatie van het Deltaflume_H4731/T14 experiment. De parameters zijn in dit figuur horizontaal gesorteerd op de bandbreedte van de uitkomsten voor elke indicator (de gevoeligheid). Iets minder dan de helft van de parameters zijn geheel of nagenoeg volledig ongevoelig. Voor de parameters die wel invloed hebben op de morfologische resultaten is de rangorde (volgorde) van gevoeligheid niet precies het zelfde voor elke indicator. Dit komt omdat sommige parameters processen beïnvloeden die vooral spelen rondom het duinprofiel (en dus vooral de erosievolumes en de duinfront migratie beïnvloeden) en minder elders in het profiel (en dus de helling van de depositiezone minder beïnvloeden). Dit is bijvoorbeeld het geval voor de *wetslp*.



Figuur E-1 Resultaten van de gevoeligheidsstudie voor alle 46 parameters uit de voorselectie voor de erosievolumes (boven), de duinfront migratie (midden) en de gemiddelde helling van de depositiezone tot en met het SSL (onder). De groene band geeft de maximale gevoeligheid van de parameters op deze indicatoren aan. De kruisjes tonen de resultaten voor de individuele simulaties (5 simulaties per parameter, gevarieerd in de waarde van deze parameter over de parameter-range).

In Tabel E-1 is een gecombineerde rangschikking gemaakt van de parameters op basis van de gevoeligheid op de morfologische uitkomsten. Hiertoe is allereerst de positie van elke parameter in de rangorde van de individuele indicatoren (Figuur E-1) gepresenteerd. Vervolgens is per parameter de gemiddelde positie over deze drie indicatoren bepaald, waarna de rijen in deze tabel zijn gesorteerd op een toenemende gemiddelde rank. Tot slot is een nieuwe gecombineerde rank gedefinieerd die de volgorde in deze gesorteerde tabel representeert. Bijvoorbeeld, *alpha* was voor twee van de indicatoren de op twee na gevoeligste parameter en voor één van de indicatoren de meest gevoelige parameter, resulterend in een gemiddelde rank van 2,3. Omdat dit de laagste gecombineerde rank is, is *alpha* daarmee de meest gevoelige parameter op basis van de gecombineerde indicatoren.

Op basis van een inschatting van de rekentijden van de kalibratiestudie is besloten om niet meer dan zeven parameters in de kalibratiestudie mee te nemen. De parameters waarop is gekalibreerd zijn geselecteerd op basis van de volgorde van de parameters in Tabel E-1. De eerste zeven in deze tabel hebben volgens dit protocol de voorkeur, de overige parameters zijn beperkt gevoelig en zouden daarmee ook minder bijdragen aan de kalibratie. *Delta* is uitgesloten op basis van resultaten uit Bijlage E.2. *Delta* is gevoelig in de hydrodynamische gevoeligheidsanalyse maar een variatie van de standaardwaarde leidt slechts tot minder optimale resultaten. Bovendien maakt de aard van de *delta* (fractie van de golfhoogte dat bij de waterdiepte wordt opgeteld) deze parameter minder geschikt voor een kalibratiestudie. Daarmee zijn de zeven geselecteerde parameters: *alpha*, *gamma*, *facAs*, *wetslp*, *beta*, *facSk* en *gamma2* (de functie van deze parameters is toegelicht in Tabel 3-2).

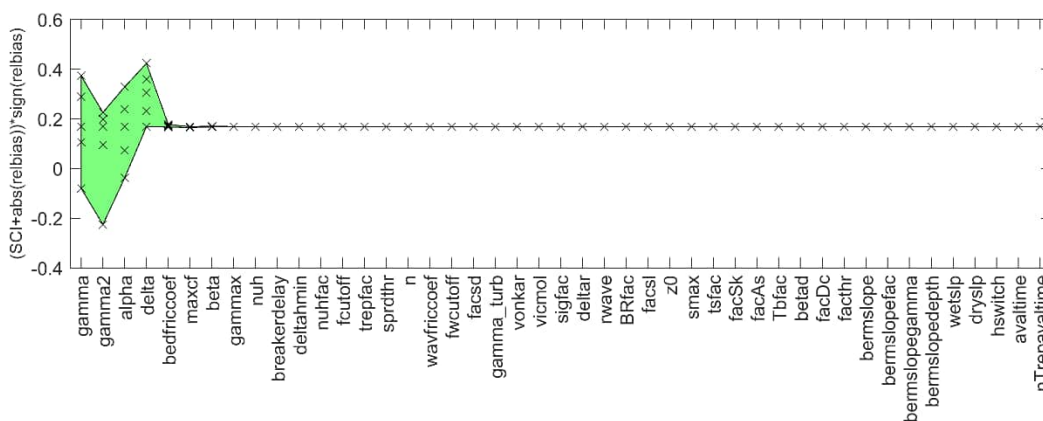
De overige parameters zijn daarmee uitgesloten van de kalibratiestudie. Hoewel *facsl* en *bedfriccoef* een zeer gelijkwaardige gemiddelde rank in gevoeligheid hebben (Tabel E-1) zijn er, naast een te lage plek in deze tabel, ook nog andere redenen waarom deze parameters niet beschouwd zijn. *Facsl* schaaft het sedimenttransport op basis van de bodemhelling. De beschouwde experimenten waarop gekalibreerd wordt bevatten geen, of slechts beperkte, omstandigheden waarin hellingseffecten echt belangrijk zullen zijn (bijvoorbeeld bresvorming, ook wel 'breaching' genoemd in het engels). Kalibreren op deze parameter heeft daarmee niet veel zin en maakt de afgestelde parameterset ongeschikt als nieuwe algemene standaard voor XBeach (kortom, een minder robuuste afstelling). Verder is gekozen om in deze fase de *bedfriccoef* op de representatieve waarde van *mannings' n* van 0,02 voor zandige stranden te houden. De bodemwrijving in de hydrodynamische laboratoriumproeven, van met name Boers (1996), met een betonnen bodem is niet representatief voor zandige stranden. Hiervoor is een *mannings' n* waarde van 0,015 gebruikt. Deze coëfficiënt zal gevalideerd worden in de latere validatie *Fase 1* met beschikbare velddata.

Tabel E-1 Gecombineerde rangschikking van de parameters op basis van de resultaten van de gevoeligheid op de morfologische simulatie. Rank V, Rank M en Rank H tonen de orde van de gevoeligheid van de resultaten voor respectievelijk de erosievolumes (V), duinfront migratie (M) en de helling van de depositiezone (H), zie Figuur E-1. De gemiddelde rank is het gemiddelde van Rank V, Rank M en Rank H. De rijen zijn gesorteerd op deze gemiddelde rank. De gecombineerde rank is de orde waarin de parameters in deze lijst voorkomen. De eerste zeven parameters zijn op basis van deze lijst geselecteerd voor de kalibratiestudie (groen gemarkeerd). *Delta is afgefallen op basis van resultaten uit Bijlage E.2.

		Rank V	Rank M	Rank H	Gemiddelde rank	Gecombineerde rank
Geselecteerde parameters ↑	alpha	3	3	1	2,3	1
	gamma	1	2	8	3,7	2
	delta (*)	2	5	5	4,0	
	facAs	5	7	2	4,7	3
	wetslp	4	1	11	5,3	4
	beta	6	8	3	5,7	5
	facSk	7	11	6	8,0	6
	gamma2	10	10	9	9,7	7
Overige ↓	facsl	9	9	12	10,0	8
	bedfriccoef	13	13	4	10,0	9
	...					10+

E.2 Gevoeligheidsanalyse hydrodynamica

Het experiment dat is gebruikt als uitgangspunt voor deze gevoeligheidsstudie is het experiment Boers1996_1C. Doordat dit een morfostatisch experiment betreft, kan bepaald worden welke van de parameters in Tabel E-1 de morfologie hoofdzakelijk beïnvloeden via de hydrodynamica en welke onafhankelijk zijn van de hydrodynamica. In Figuur E-2 zijn de resultaten van de gevoeligheidsstudie voor de foutmaat betreffende korte golven weergegeven. Ter herinnering, deze foutmaat representeert voor elke simulatie een mate van overeenkomst van de gesimuleerde korte golven en de geobserveerde korte golven op basis van de relatieve fout en spreidingsindex. De resultaten laten zien dat er een viertal parameters significante invloed heeft op de simulatie van korte golven, namelijk *gamma*, *gamma2*, *alpha* en *delta*. Met andere woorden, de morfologische gevoeligheid die in Bijlage E.1 werd aangetoond voor deze 4 parameters, wordt in belangrijke mate veroorzaakt door de effecten van deze parameters op de hydrodynamica. Een nadere analyse van de resultaten (hier niet getoond) liet daarbij nog zien dat de foutmaat voor *delta* optimaal is voor de standaardwaarde (*delta*=0), waardoor kalibratie op deze parameter geen meerwaarde heeft. Daarmee zijn de 3 parameters die geselecteerd zijn voor de hydrodynamische kalibratie: *gamma*, *gamma2* en *alpha*.

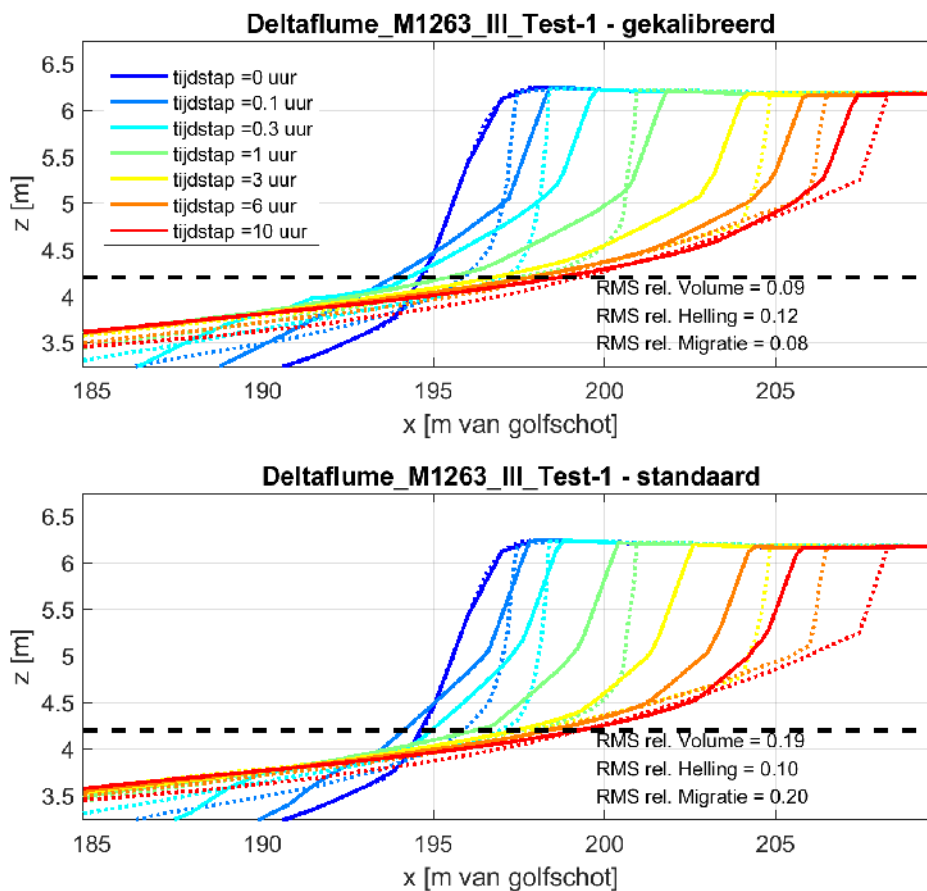


Figuur E-2 Resultaten van de gevoeligheidsstudie voor alle 46 parameters uit de voorselectie voor de foutmaat betreffende korte golven. De groene band geeft de maximale gevoeligheid van de parameters op deze indicatoren aan. De kruisjes tonen de resultaten voor de individuele simulaties (5 simulaties per parameter, gevarieerd in de waarde van deze parameter over de parameter-range).

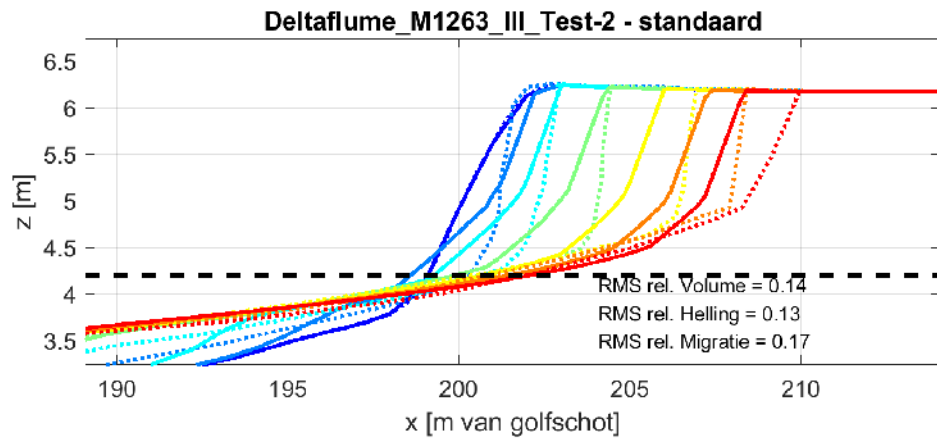
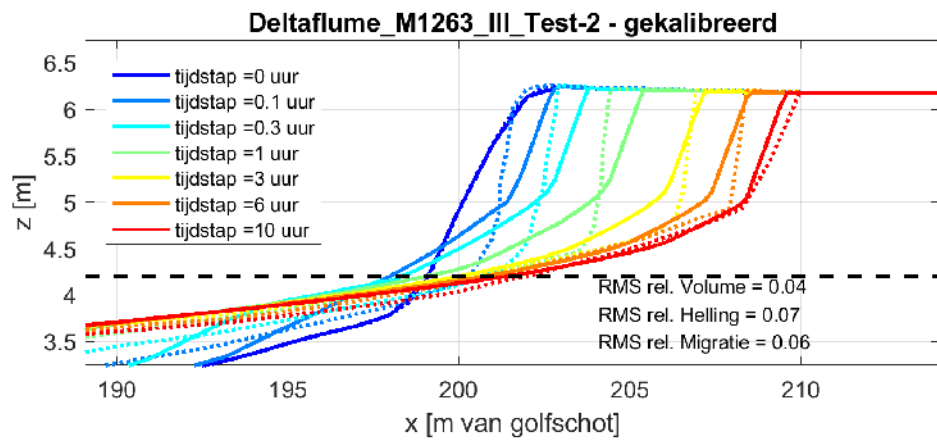
E.3 Selectie parameters voor kalibratiestudie

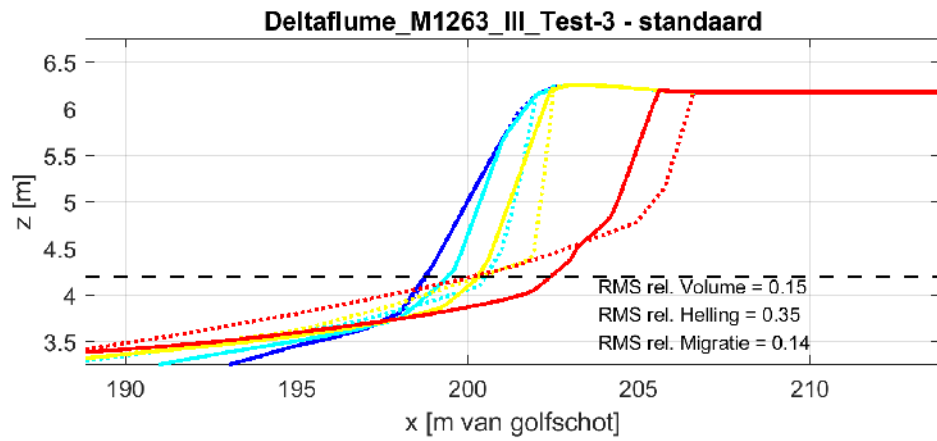
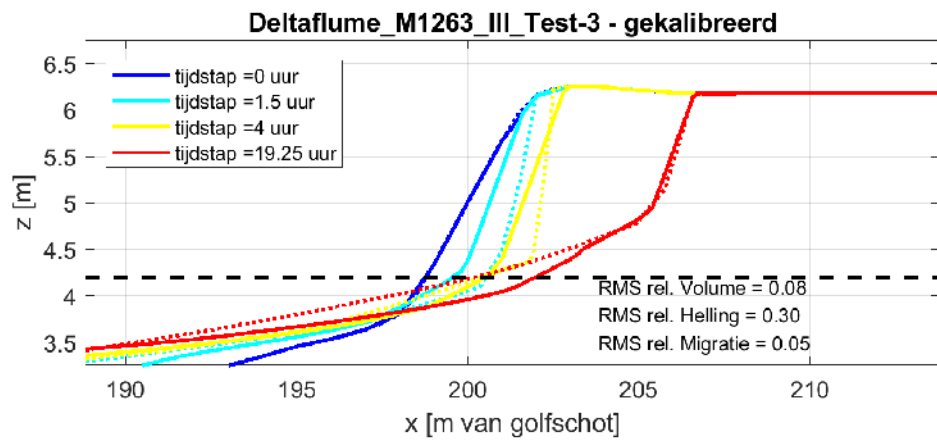
Op basis van de resultaten uit dit hoofdstuk is er voor gekozen om te kalibreren op de volgende zeven parameters: *alpha*, *gamma*, *gamma2*, *beta*, *facAs*, *facSk* en *wetslp*. Hiervan zijn *alpha*, *gamma* en *gamma2* geselecteerd als parameters t.b.v. de hydrodynamische kalibratie (stap 1) en zijn *beta*, *facAs*, *facSk* en *wetslp* geselecteerd als parameters t.b.v. de morfologische kalibratie (stap 2).

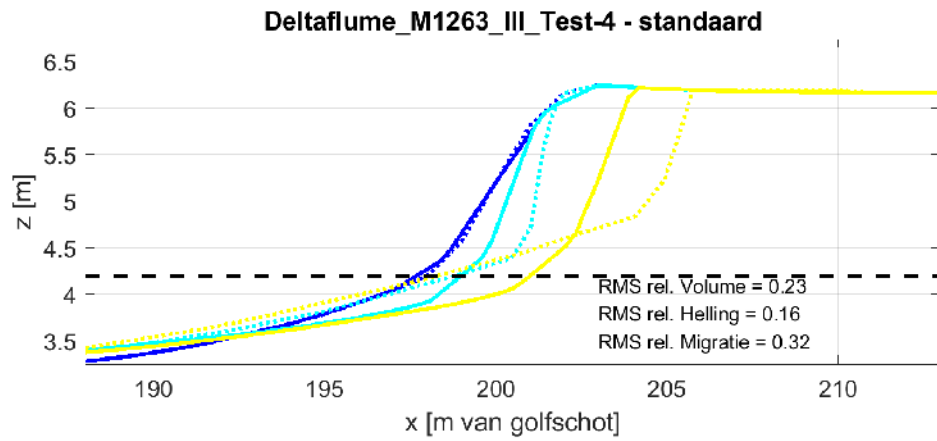
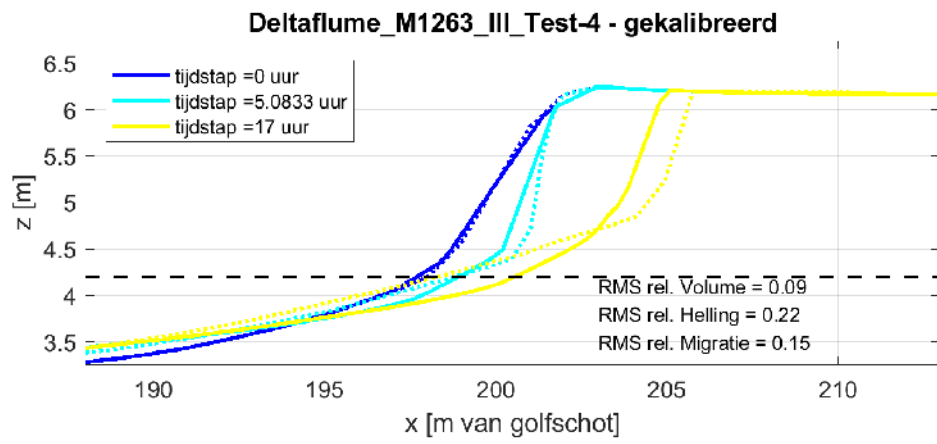
F Deel 1 – Overzichtsfiguren morfologische kalibratie



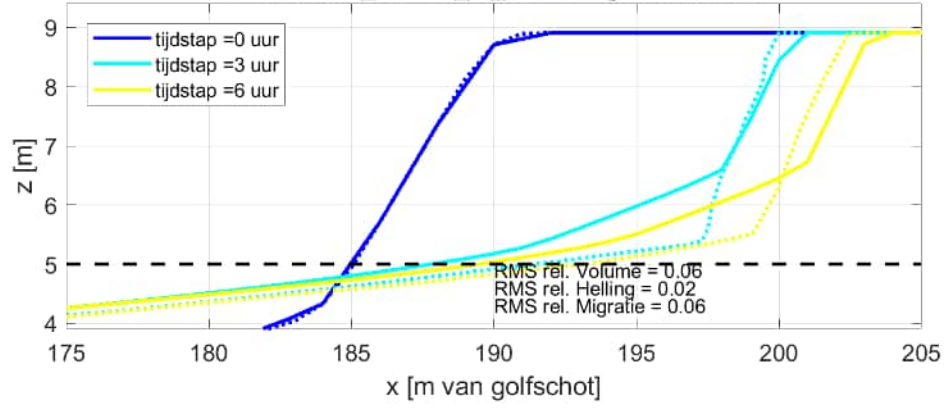
Figuur F-1 Duinafslag-profielen met de nieuw gekalibreerde parameterinstellingen (boven) en de oude standaard parameterinstellingen (onder). De gemeten profielen zijn weergegeven in gestippelde lijnen en de XBeach resultaten zijn weergegeven in volle lijnen. De zwarte onderbroken lijn is het maximale stormpeil.



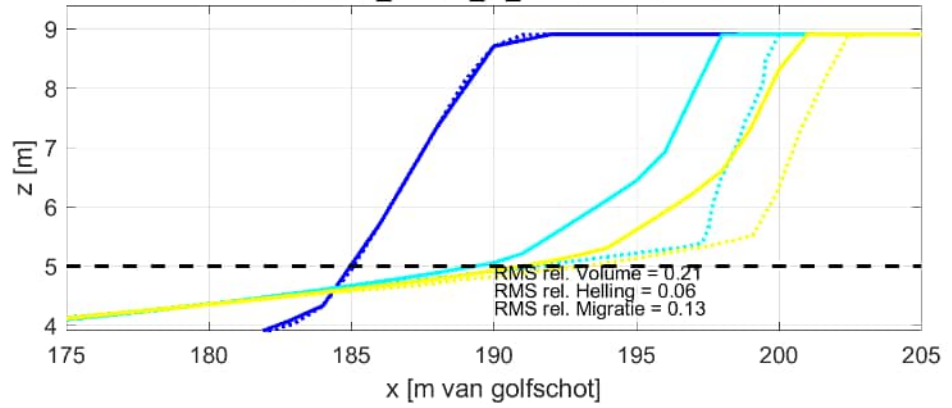


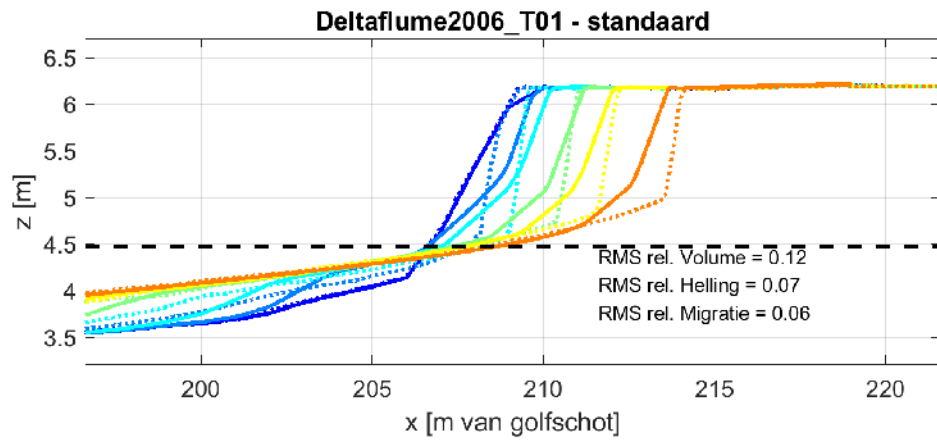
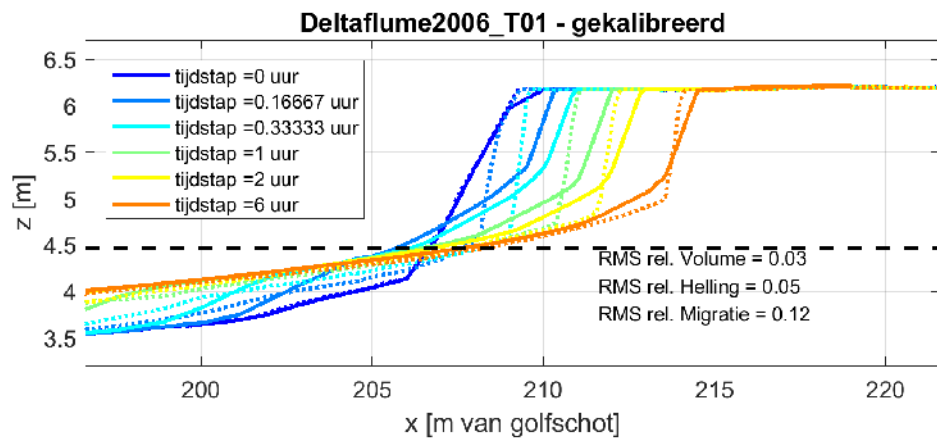


Deltaflume_M1263_III_Test-5 - gekalibreerd

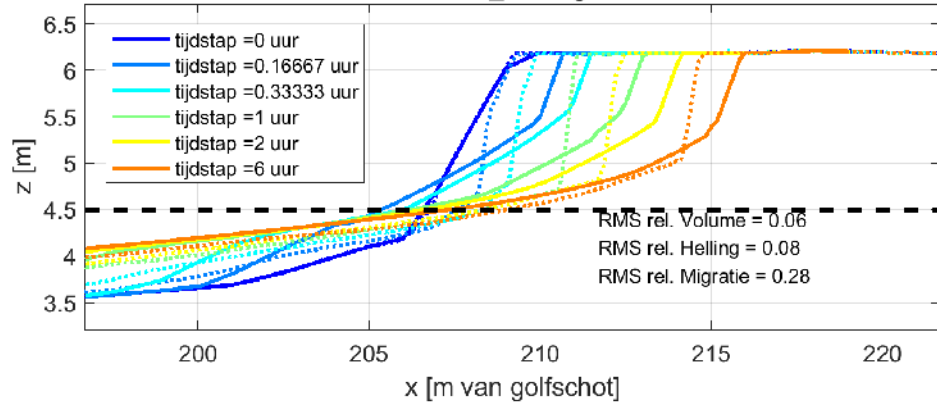


Deltaflume_M1263_III_Test-5 - standaard

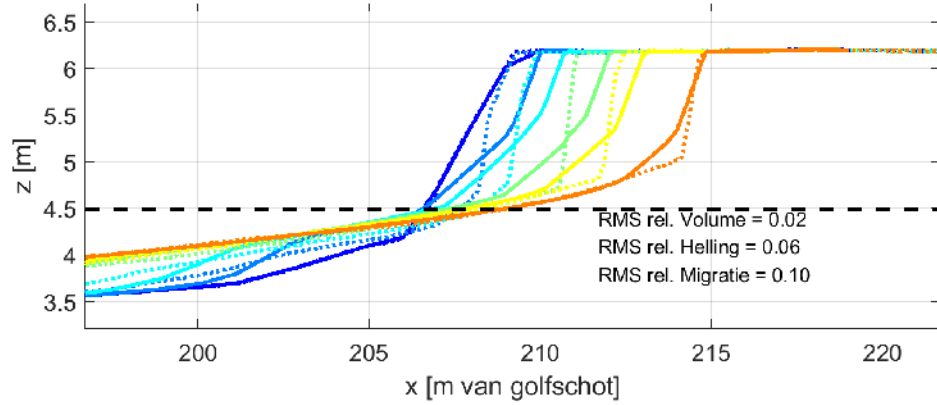




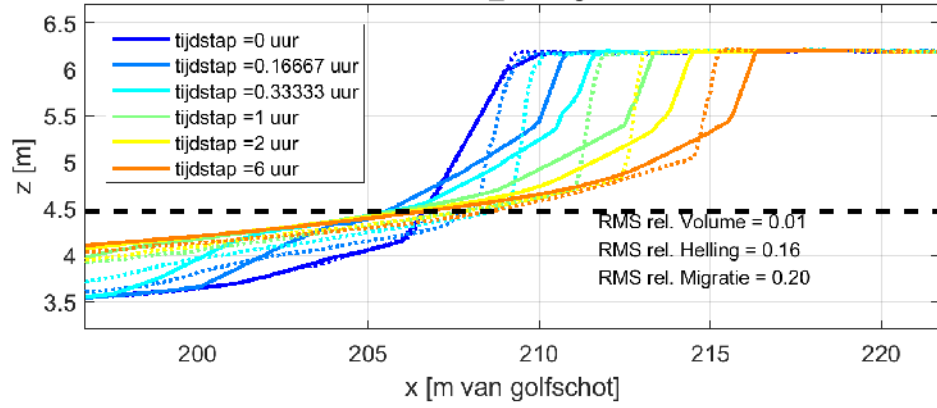
Deltaflume2006_T02 - gekalibreerd



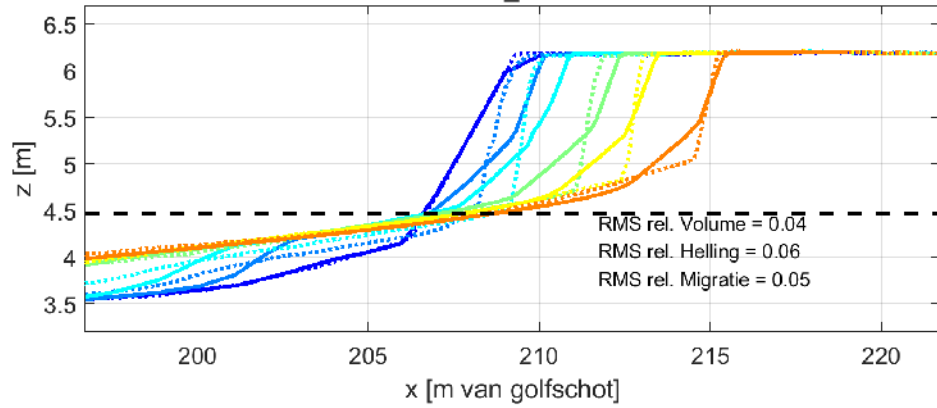
Deltaflume2006_T02 - standaard



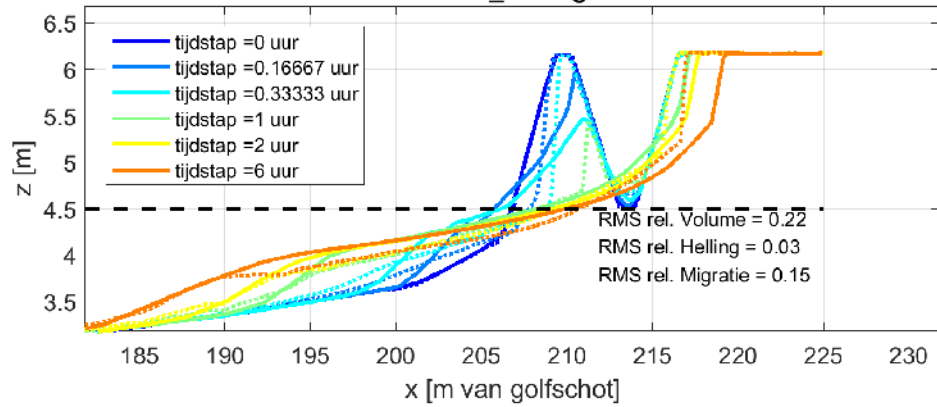
Deltaflume2006_T03 - gekalibreerd



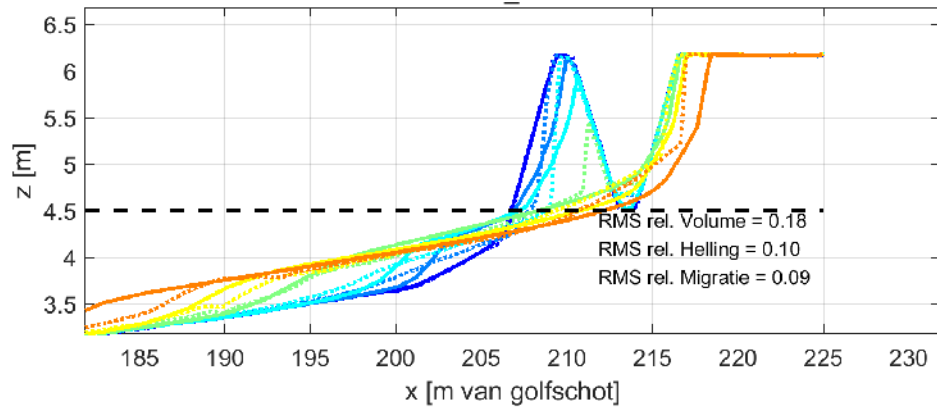
Deltaflume2006_T03 - standaard

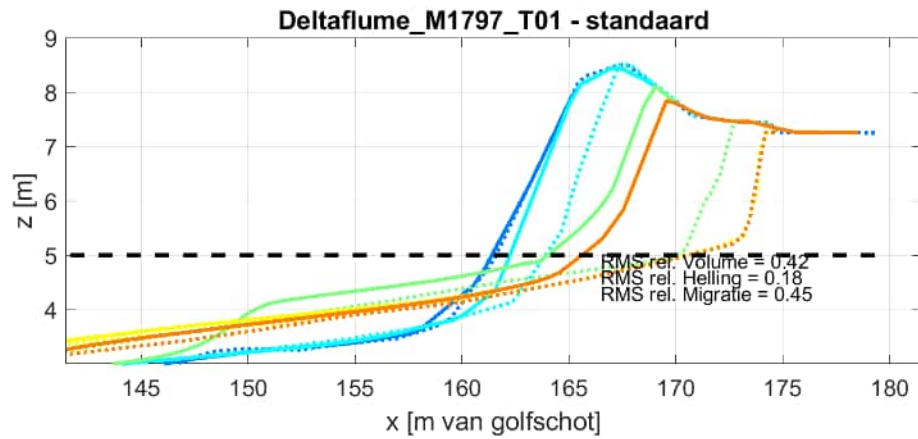
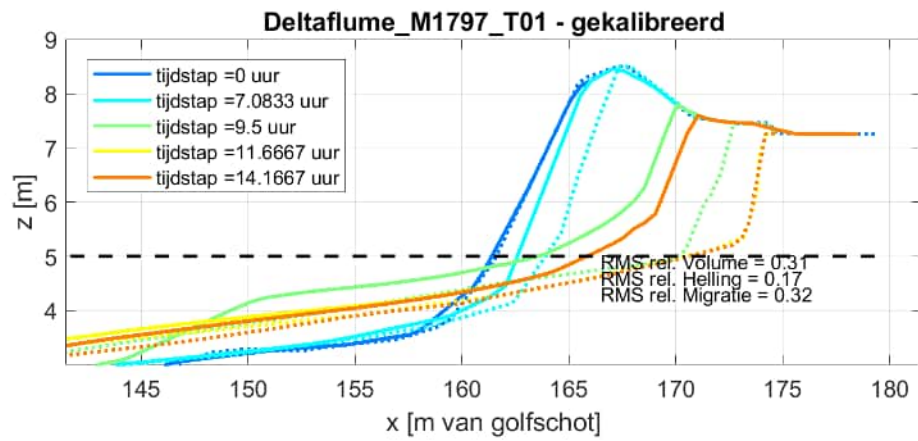


Deltaflume2006_T08 - gekalibreerd

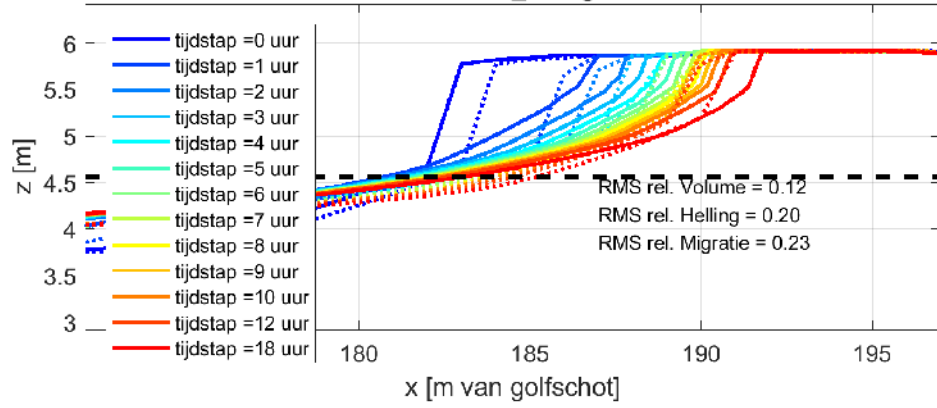


Deltaflume2006_T08 - standaard

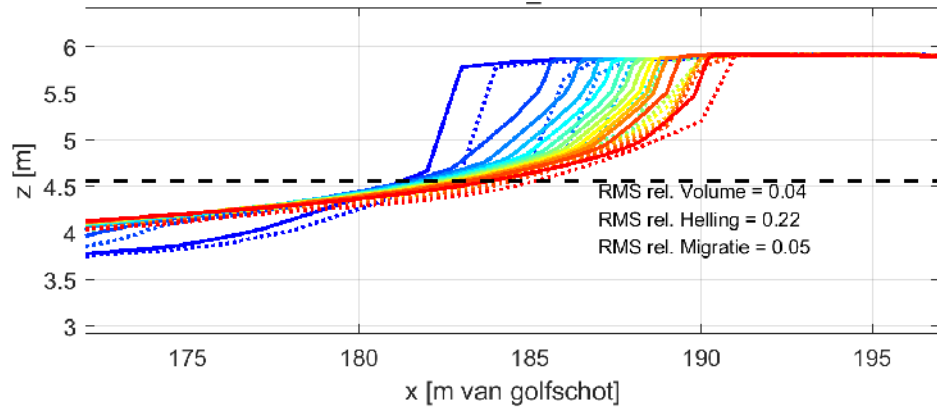




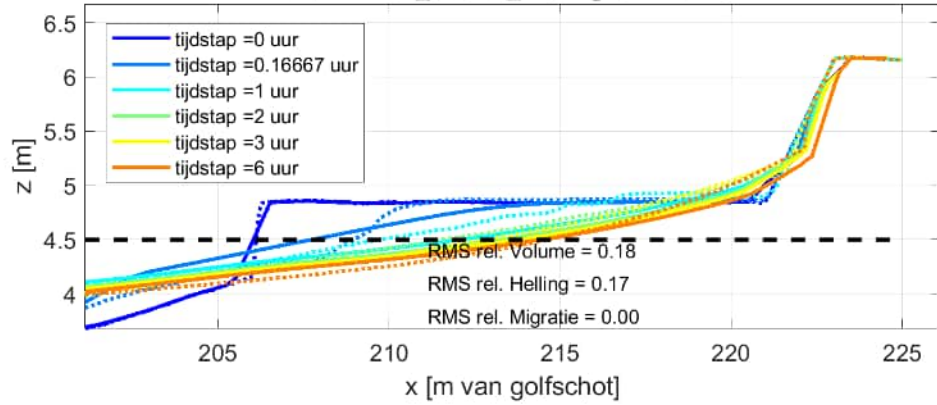
DeltaflumeLIP11D_2E - gekalibreerd



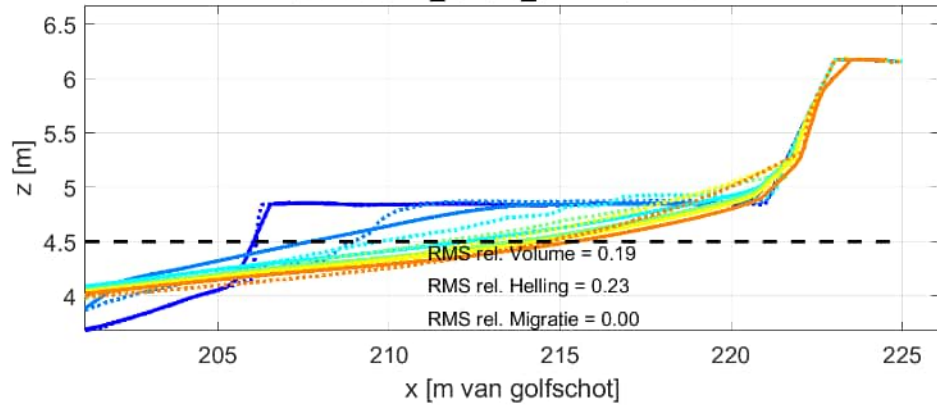
DeltaflumeLIP11D_2E - standaard



Deltaflume_H4731_T14 - gekalibreerd

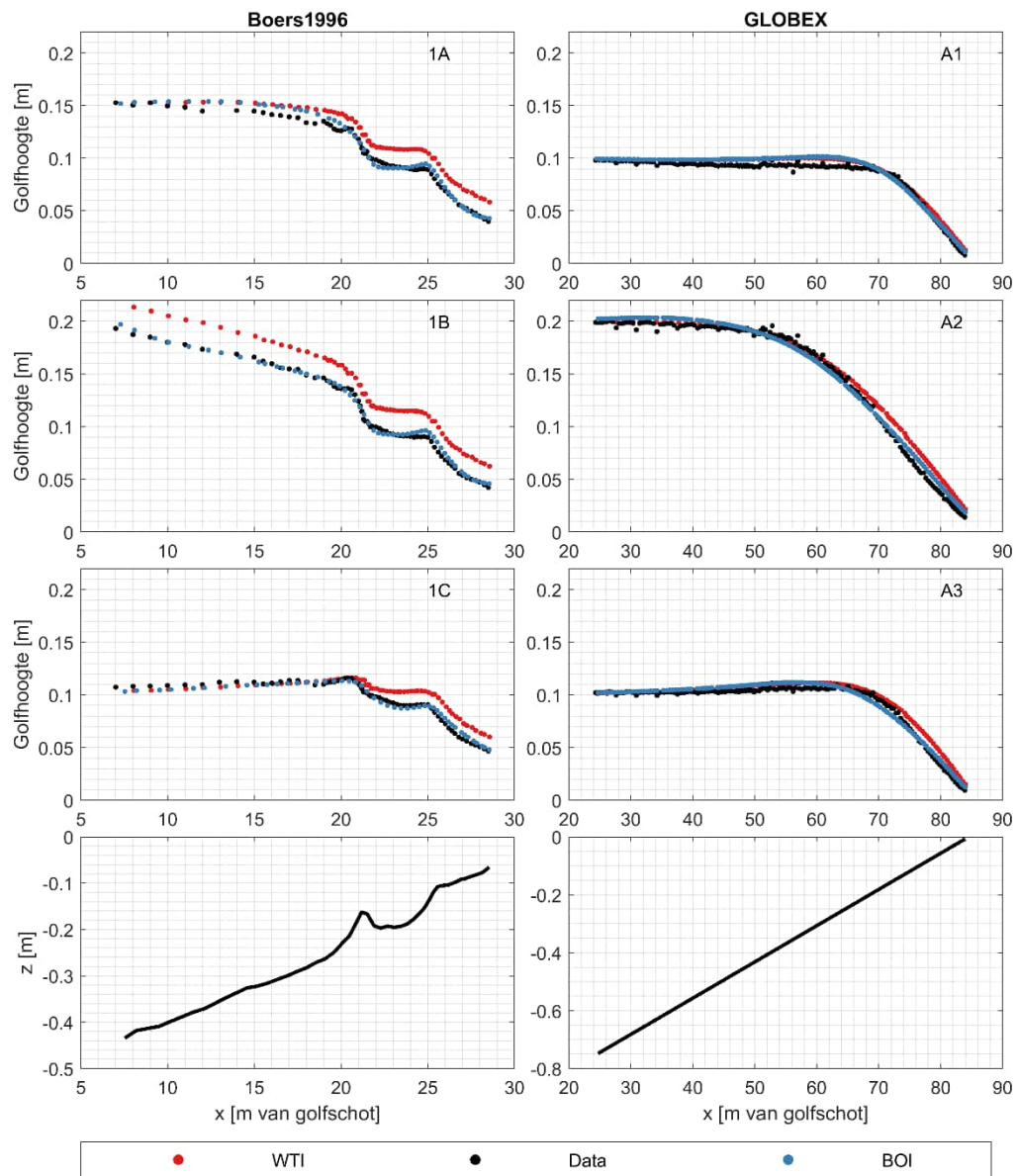


Deltaflume_H4731_T14 - standaard

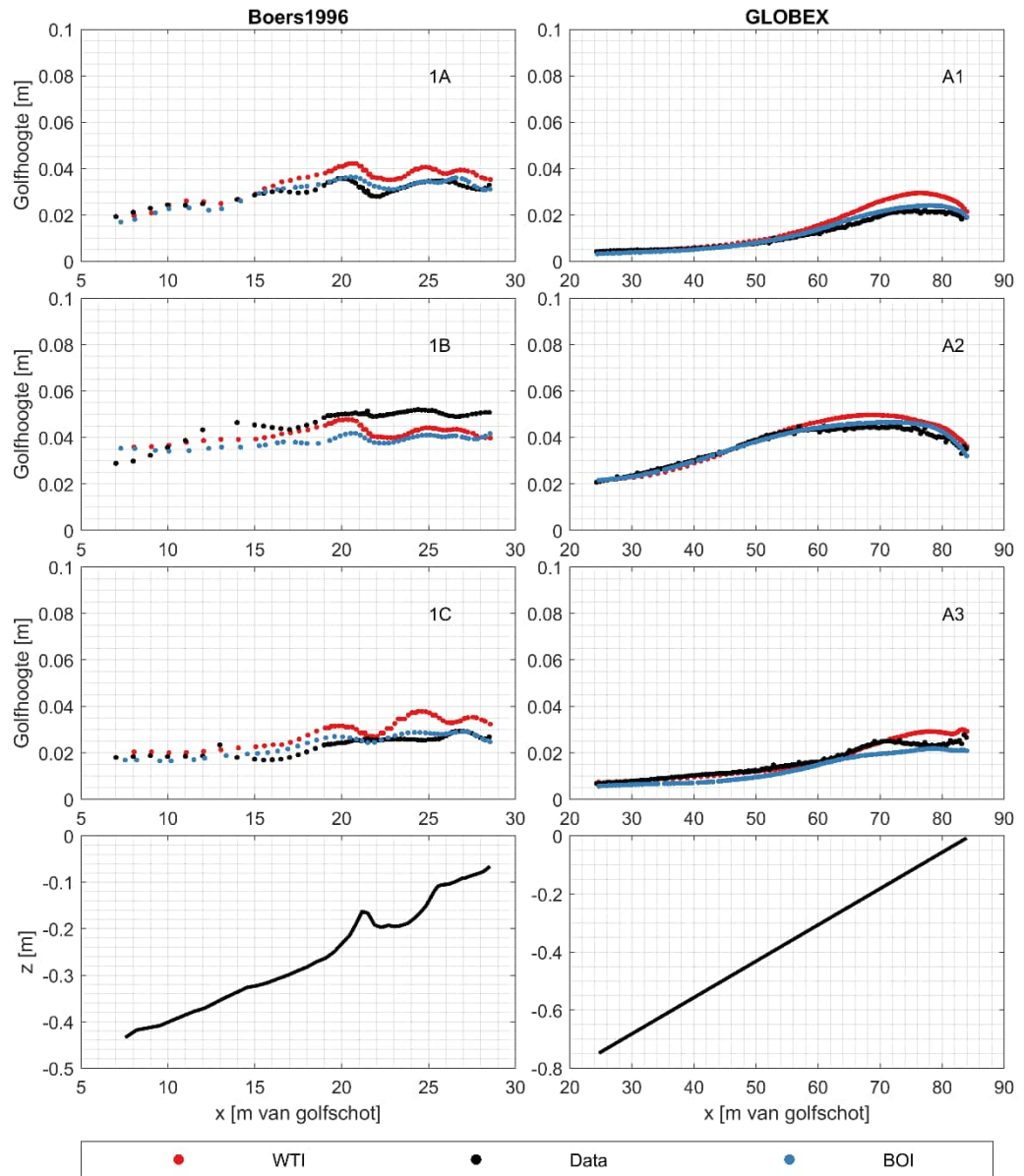


G Deel 1 – Overzichtsfiguren WTI versie

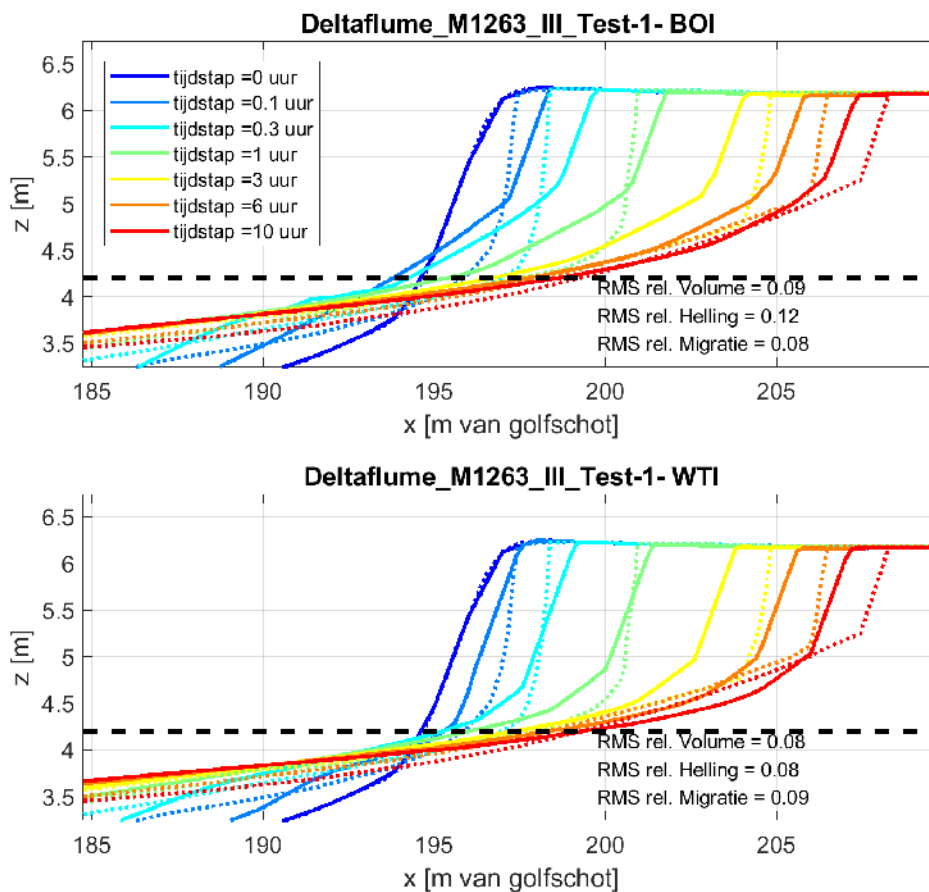
G.1 Hydrodynamica



Figuur G-1 Overzicht van de voor 6 experimenten (3x Boers1996 en 3x GLOBEX) in het laboratorium geobserveerde korte golfhoogte (in zwart) versus de met XBeach gesimuleerde korte golfhoogte. In blauw de nieuwe XBeach versie met nieuw afgeleide BOI parameterinstellingen en in rood de WTI versie met bijbehorende gekalibreerde parameterinstellingen.

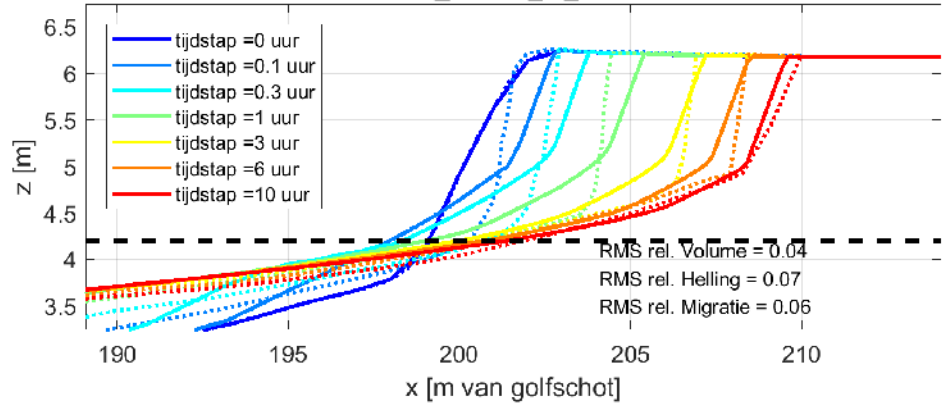


Figuur G-2 Overzicht van de voor 6 experimenten (3x Boers1996 en 3x GLOBEX) in het laboratorium geobserveerde lange golfhoogte (in zwart) versus de met XBeach gesimuleerde lange golfhoogte. In blauw de nieuwe XBeach versie met nieuw afgeleide BOI parameterinstellingen en in rood de WTI versie met bijbehorende gekalibreerde parameterinstellingen.

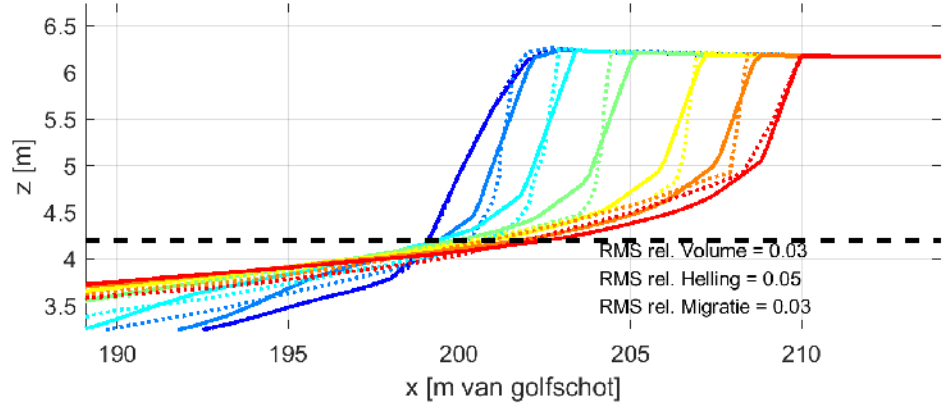


Figuur G-3 Duinafslag-profielen met de BOI XBeach versie met nieuw gekalibreerde parameterinstellingen (boven) en de WTI versie met bijbehorende gekalibreerde instellingen (onder). De gemeten profielen zijn weergegeven in gestippelde lijnen en de XBeach resultaten zijn weergegeven in volle lijnen. De zwarte onderbroken lijn is het maximale stormpeil.

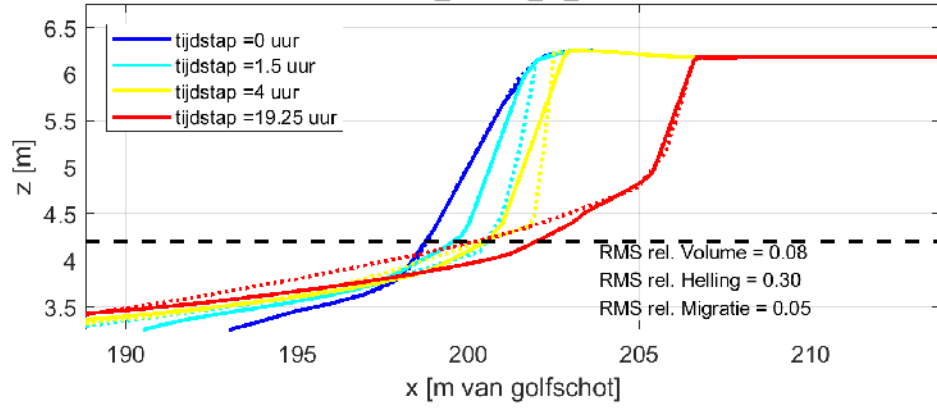
Deltaflume_M1263_III_Test-2- BOI



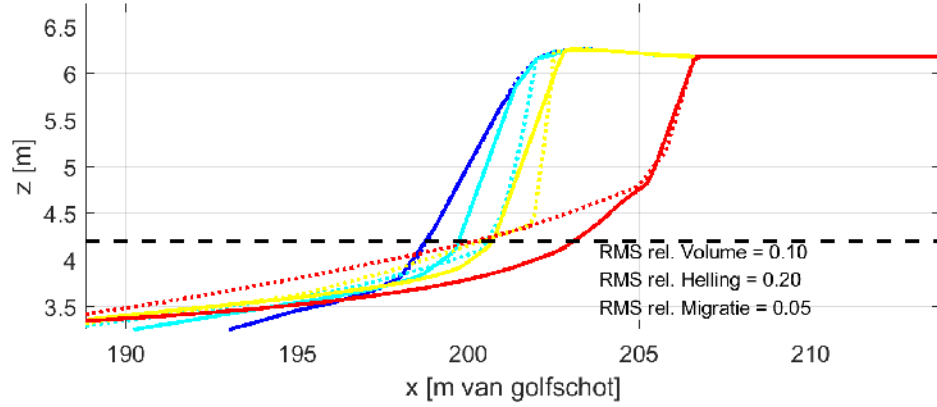
Deltaflume_M1263_III_Test-2- WTI

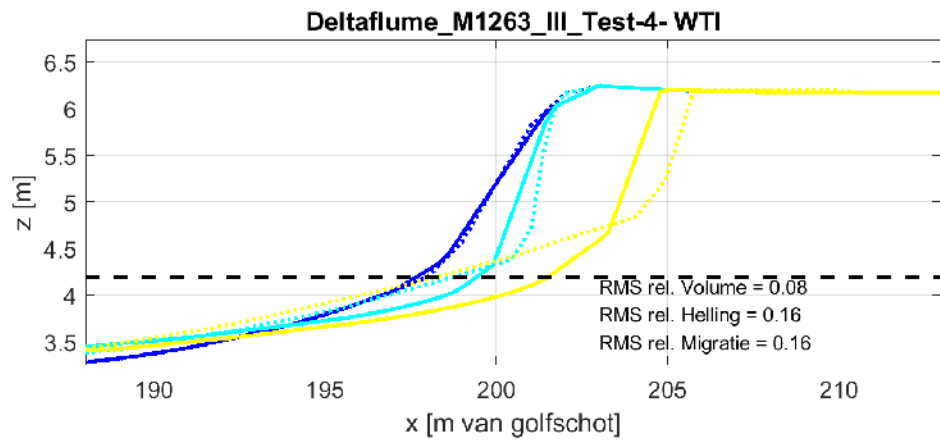
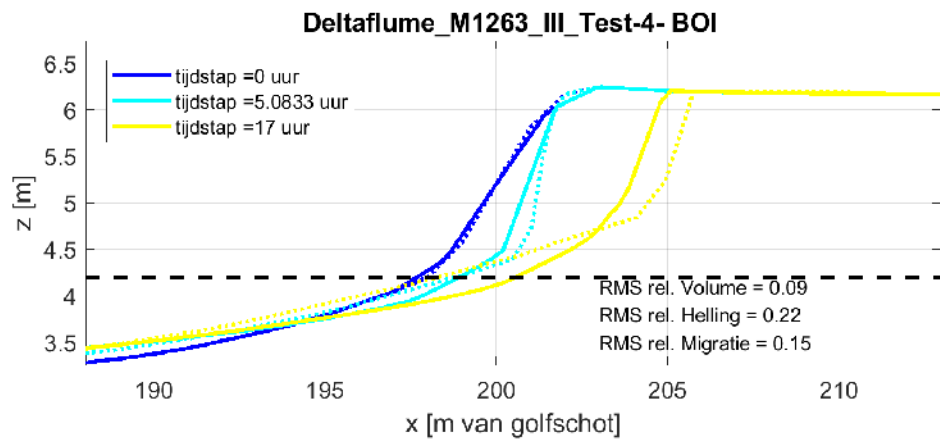


Deltaflume_M1263_III_Test-3- BOI

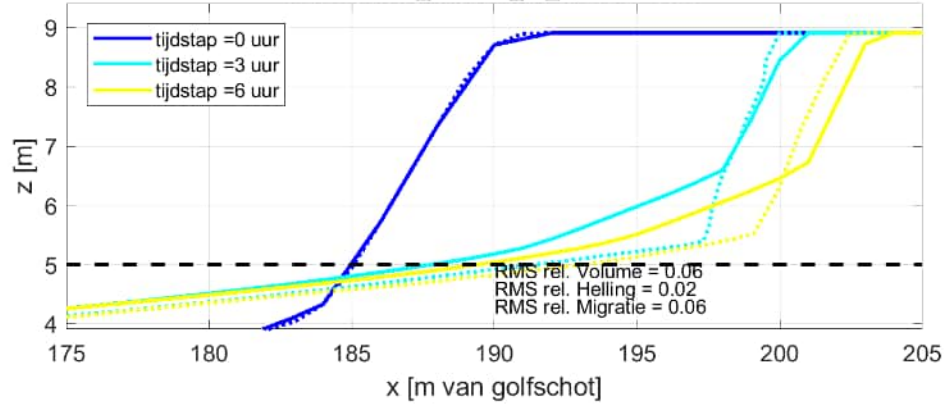


Deltaflume_M1263_III_Test-3- WTI

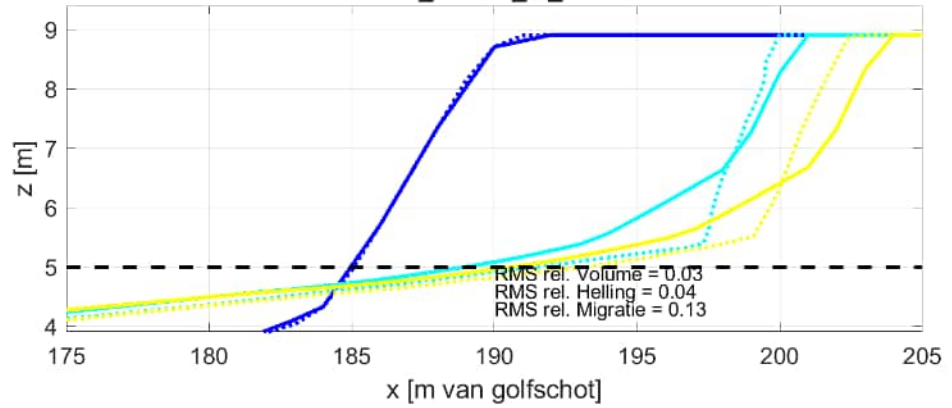




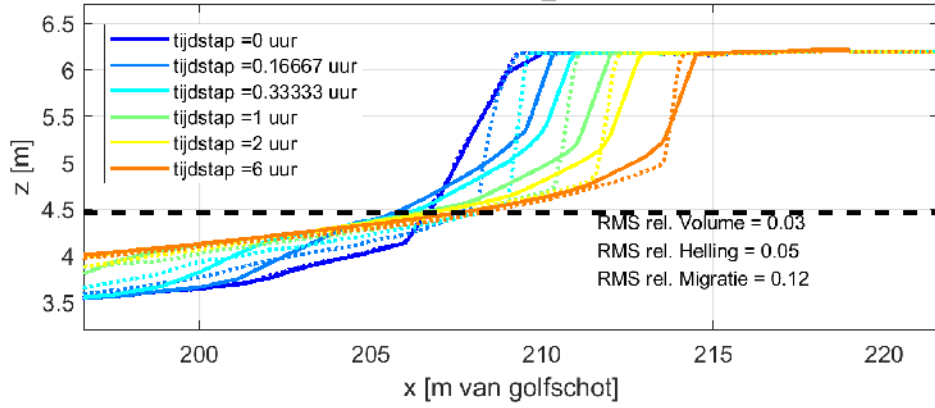
Deltaflume_M1263_III_Test-5- BOI



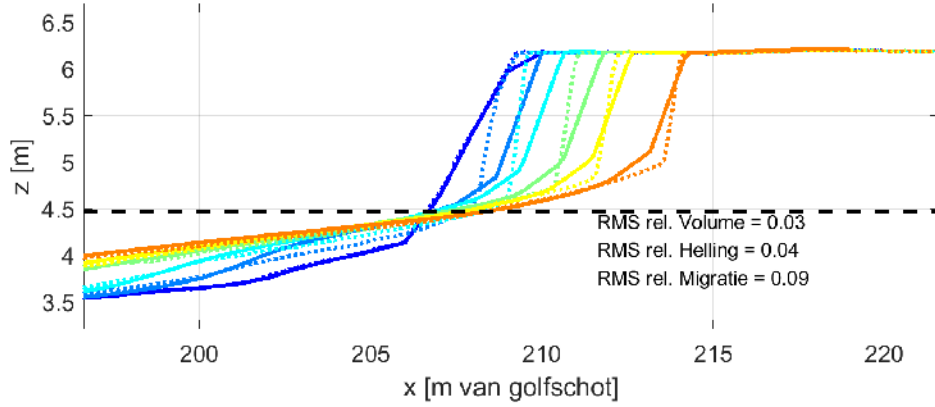
Deltaflume_M1263_III_Test-5- WTI

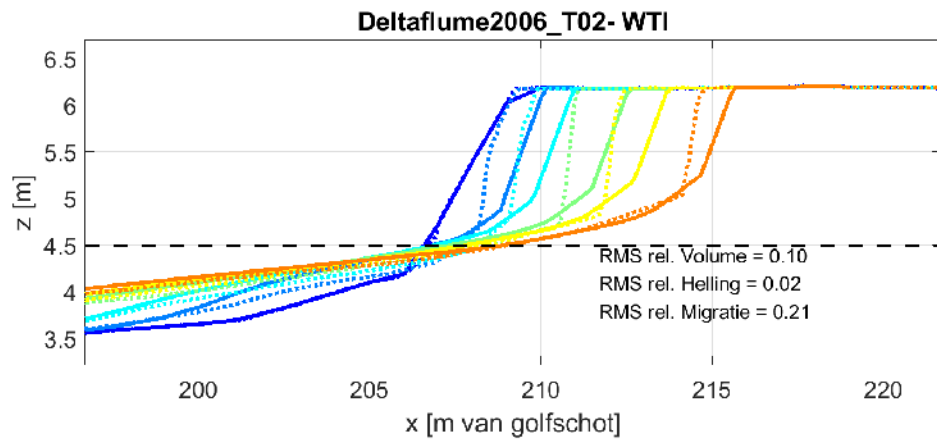
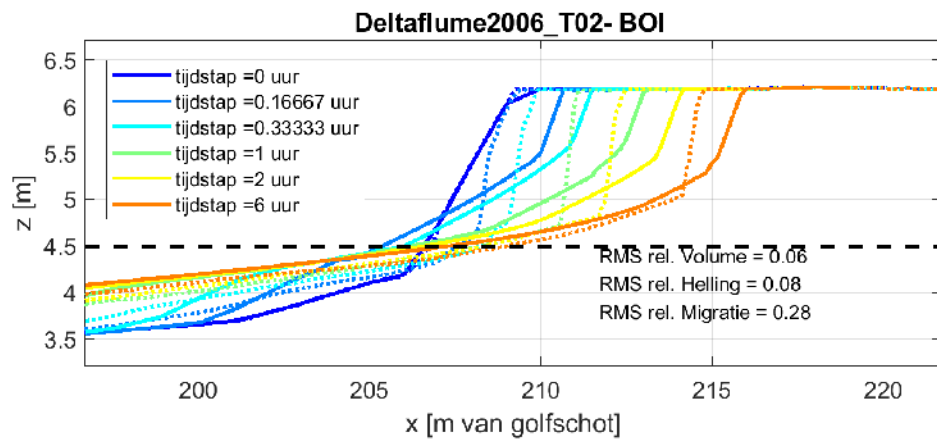


Deltaflume2006_T01- BOI

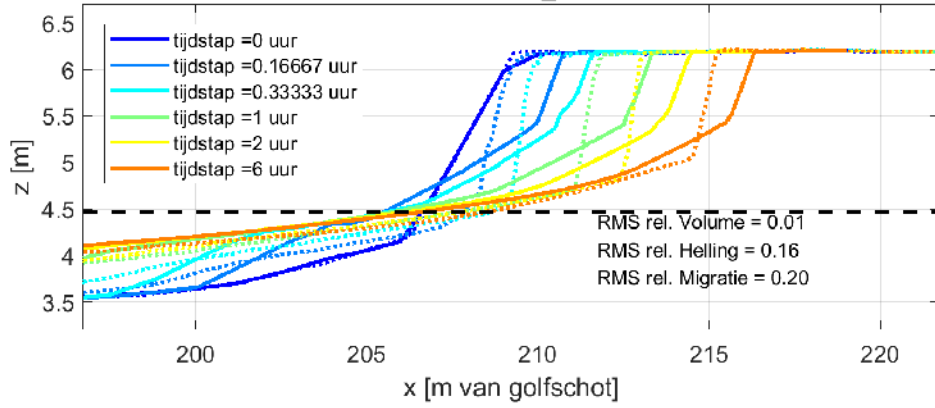


Deltaflume2006_T01- WTI

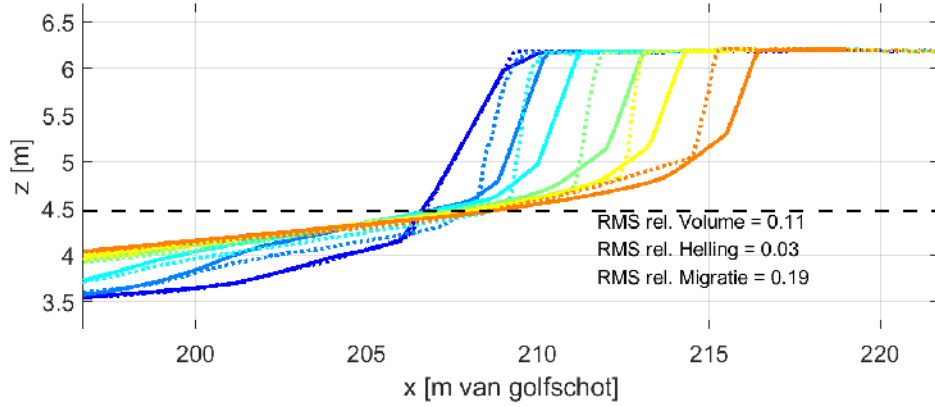


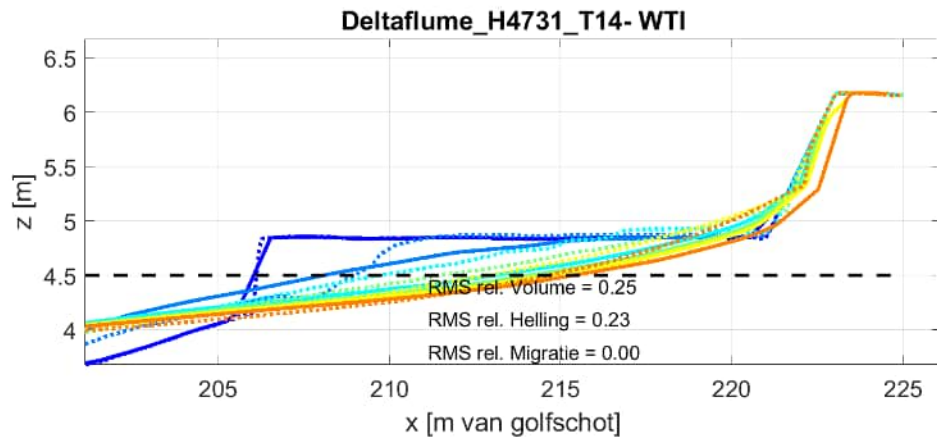
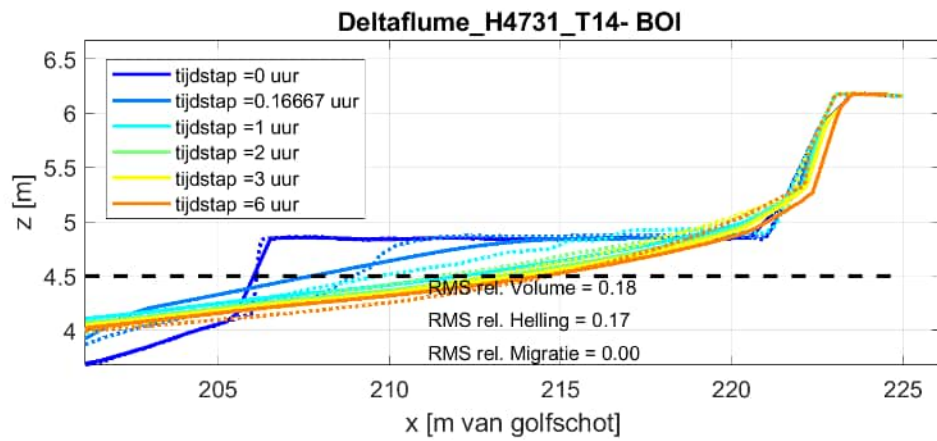


Deltaflume2006_T03- BOI



Deltaflume2006_T03- WTI





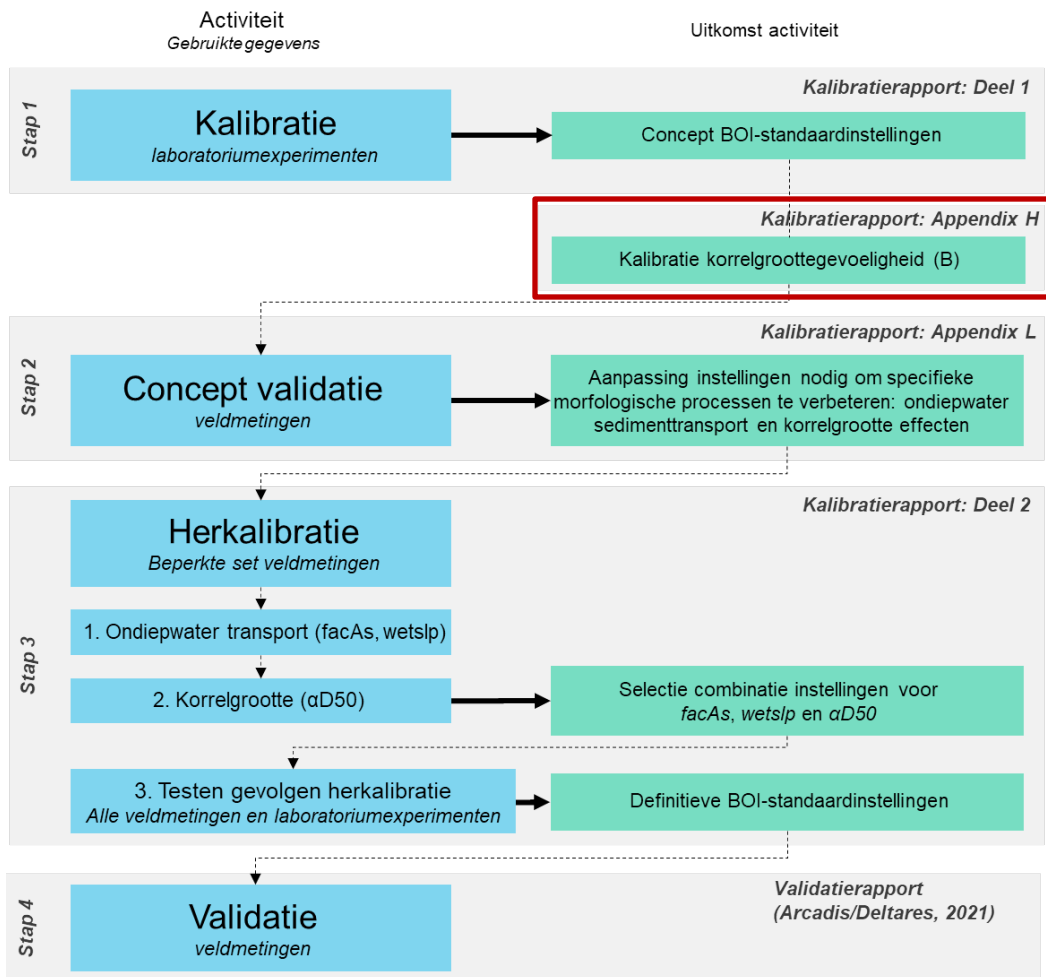
H Schatting α_{D50} waarde op basis van laboratorium experimenten en duinafslagmodellen

H.1 Introductie

In het Kalibratierapport Deel 1 zijn de dominante hydrodynamische en morfologische modelparameters geïdentificeerd en gekalibreerd op basis van een set grootschalige laboratoriumexperimenten. Deze experimenten zijn uitgevoerd met zand met een korreldiameter van 200–225 μm . Omdat deze korreldiameter overeenkomt met de referentie korreldiameter ($D_{50,ref}$) die gebruikt wordt om de korrelgrootteafhankelijkheid te vergroten (zie Sectie 8.1, Vergelijking 8-1 en Vergelijking 8-2), kunnen deze laboratoriumdata niet gebruikt worden om de waarde van de kalibratieparameter α_{D50} te bepalen.

Om de waarde van de kalibratieparameter α_{D50} af te schatten voor gebruik in de concept-validatiestudie (zie Figuur 10-1), is in Fase 1 van het BOI Zandige Waterkeringen project (11206818-018) een kalibratie van α_{D50} uitgevoerd op basis van data uit kleinschalige laboratorium experimenten en de korrelgroottegevoeligheid van andere duinafslagmodellen. De methodologie die hiervoor gebruikt is komt overeen met die van Deltares/Arcadis (2020), waarbij in plaats van de verouderde korrelgrootteafhankelijkheid formuleringen van Deltares/Arcadis (2020), de formuleringen van Sectie 8.1 zijn toegepast bij de kalibratie.

De kalibratie van de kalibratieparameter α_{D50} op basis van kleinschalige laboratorium experimenten wordt in Sectie H.2 beschreven. In Sectie H.3 wordt de kalibratie op basis van de duinafslagmodellen DUROS+ en DurosTA beschreven. In Sectie H.4 wordt de keuze van de parameterwaarde voor de eerste validatiestudie onderbouwd.



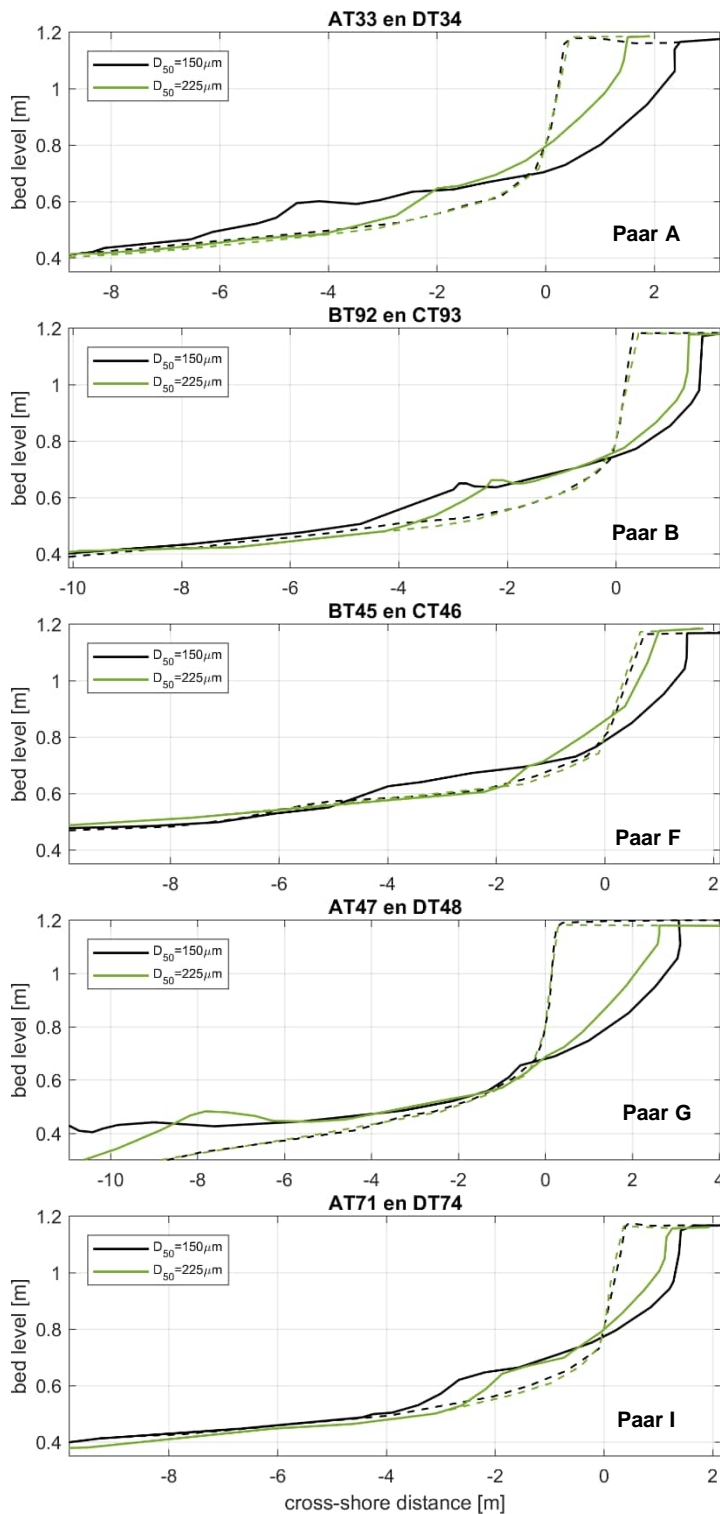
Figuur 10-1 – Stappen binnen het kalibratie-validatie proces om de BOI-standaardinstellingen af te leiden en te valideren. In dit hoofdstuk wordt de initiële kalibratie van de korrelgroottegevoeligheid voor de concept BOI-standaardinstellingen (onderdeel van Stap 1) beschreven.

H.2 Schatting op basis van kleinschalige laboratorium experimenten

Analoog aan Deltares/Arcadis (2020), zijn de kleinschalige (1:26) laboratoriumexperimenten van WL|Delft Hydraulics (1976) gebruikt bij het kalibreren van de parameter α_{D50} . In deze dataset zijn vijf bruikbare paren duinafslagsimulaties, waarbij het initieel profiel en de hydraulische belastingen gelijk zijn gehouden, en korreldiameters van 225 μm en 150 μm zijn getest, zie Tabel 10.3 en Figuur 10-2.

Tabel 10.3 – Geselecteerde experimenten uit WL/Delft Hydraulics (1976)

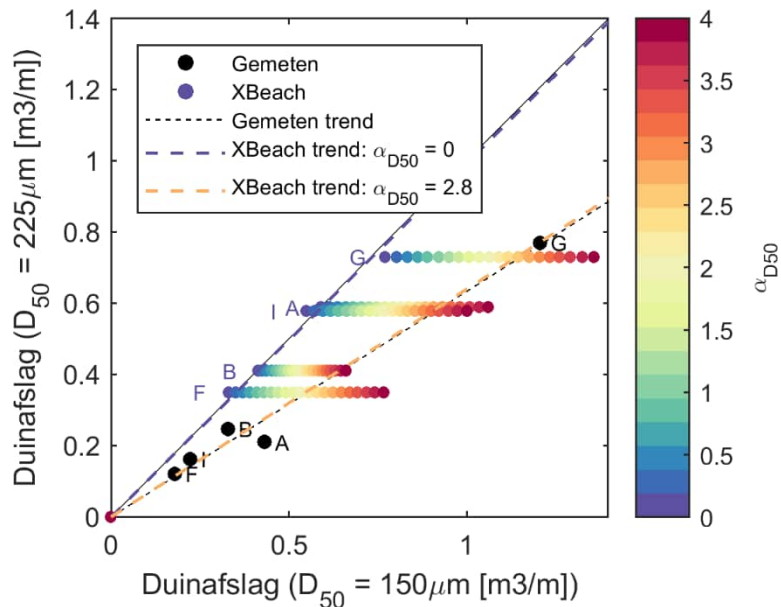
Paar	Test	D ₅₀ [µm]	Waterstand [m]	H _{m0} [m]	T _p [s]
A	AT33	150	0,806	0,292	2,35
	DT34	225	0,806	0,292	2,35
B	BT92	150	0,806	0,292	1,76
	CT93	225	0,806	0,292	1,76
F	BT45	150	0,806	0,292	2,35
	CT46	225	0,806	0,292	2,35
G	AT47	150	0,806	0,292	2,35
	DT48	225	0,806	0,292	2,35
I	AT71	150	0,806	0,292	2,35
	DT74	225	0,806	0,292	2,35



Figuur 10-2 – Gemeten begin- (gestippeld) en eindprofiel (doorgetrokken) voor de experimentparen A, B, F, G en I (van boven naar beneden geordend). Zwarte lijnen beschrijven de profielen van de experimenten met 150 μm zand, groene lijnen de experimenten met 225 μm zand.

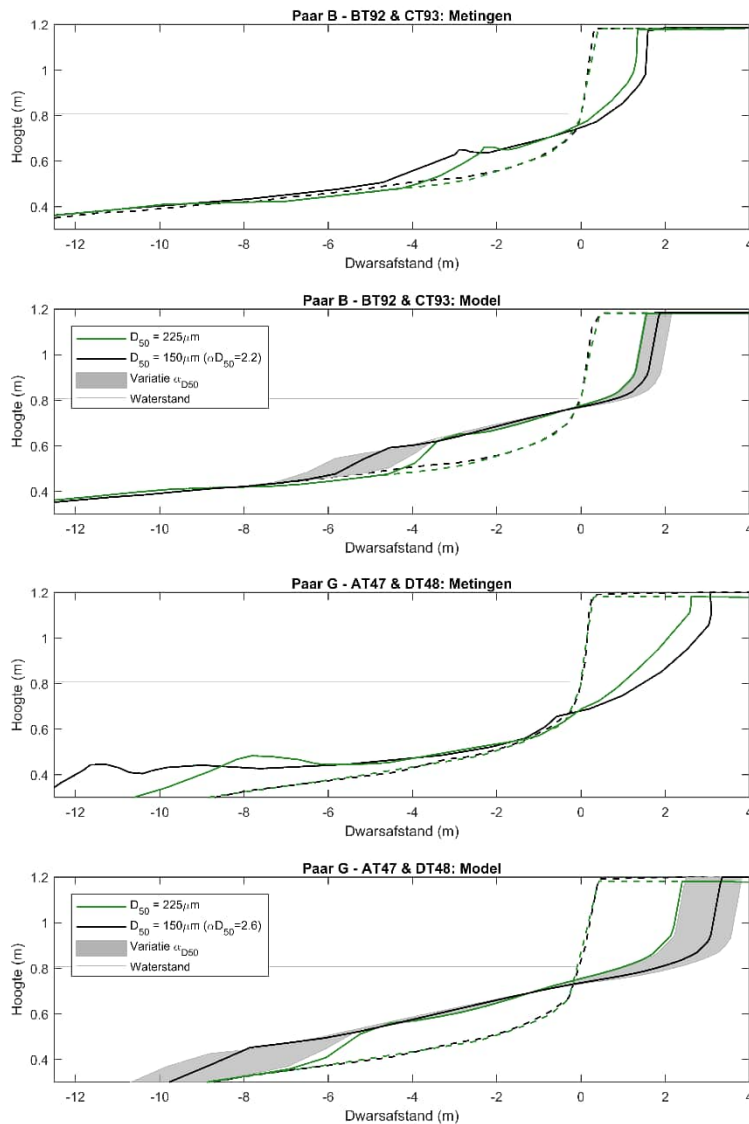
Voor ieder experimentpaar is een set XBeach modellen op laboratoriumschaal opgezet met gebruik van de concept BOI modelparameterinstellingen van Deel 1 van deze studie, en waarden van α_{D50} die variëren tussen 0 (geen additionele korrelgrootteafhankelijkheid) en 4 (veel additionele korrelgrootteafhankelijkheid).

De berekende en gemeten duinafslagvolumes van de vijf experimentparen zijn weergegeven in Figuur 10-3. Het figuur laat zien dat er in de metingen gemiddeld meer (~60%) afslag plaatsvindt in de experimenten met een korreldiameter van 150 μm dan die met een korreldiameter van 225 μm . Deze gemiddelde trend wordt door het XBeach model het beste benaderd met een α_{D50} waarde van 2,8 (oranje stippellijn in Figuur 10-3).



Figuur 10-3 – Gemeten (zwart) en berekende (gekleurd) duinafslagvolume voor korreldiameters van 150 μm en 225 μm voor ieder experimentpaar en verschillende waarden van α_{D50} .

Figuur 10-3 laat ook zien dat het XBeach model voor veel experimentparen (paren A, F, I) in absolute zin de gemeten duinafslag slecht benadert. Voor deze experimentparen overschat het model het duinafslagvolume substantieel voor zowel voor de experimenten met een korreldiameter van 150 μm als die met een korreldiameter van 225 μm . Voor de experimentparen B en G, waarbij het XBeach model de gemeten afslagprofielen en -volumes het beste benadert (zie Figuur 10-4), wordt de gemeten relatieve korrelgrootteafhankelijkheid door het model het beste benaderd met een α_{D50} waarde van 2,2 (Paar B) en 2,6 (Paar G).

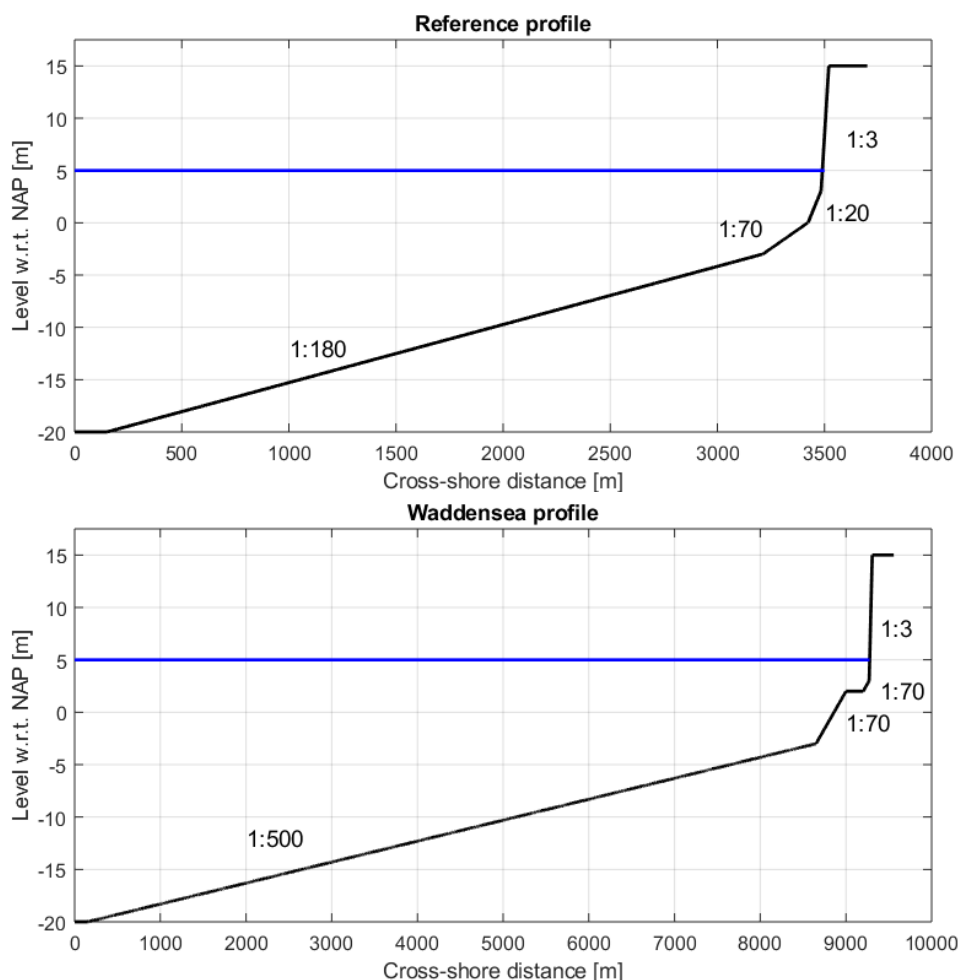


Figuur 10-4 – Gemeten en gemodelleerde afslagprofielen voor experimentparen B (bovenste twee panelen) en G (onderste twee panelen). De grijze vlakken bij de modelresultaten geven de bandbreedte aan van XBeach berekeningen met variërende waarden van α_{D50} tussen 0–4, de zwarte lijnen geven het resultaat aan voor de meest optimale waarde van α_{D50} .

Op basis van de XBeach simulaties van de laboratoriumexperimenten van WL|Delft Hydraulics (1976) wordt gesteld dat de, op kleine schaal, gemeten relatieve korrelgrootteafhankelijkheid voor duinafslag het beste door het model benaderd wordt met een α_{D50} waarde van 2,2–2,8.

H.3 Schatting op basis van resultaten duinafslagmodellen

Analoog aan Deltares/Arcadis (2020) is de korrelgrootteafhankelijkheid van het XBeach model voor verschillende waarden van α_{D50} op prototypeschaal vergeleken met de korrelgrootteafhankelijkheid van het DUROS+ model en het DurosTA model. In deze studie zijn simulaties uitgevoerd op twee referentieprofielen (Hollandse kust en Waddenkust, zie Figuur 10-5 en Deltares/Arcadis (2020) voor meer details) en met twee golfcondities per profiel (zie Tabel 10.4 en Deltares/Arcadis (2020) voor meer details). Simulaties zijn in alle modellen uitgevoerd met vijf korrelgrootten (150, 190, 225, 260 en 300 μm), en voor de XBeach simulaties is de waarde van α_{D50} gevarieerd tussen 0–5. Overige modelinstellingen voor het XBeach model zijn conform de concept-BOI parameterinstellingen van Deel 1 van deze studie.

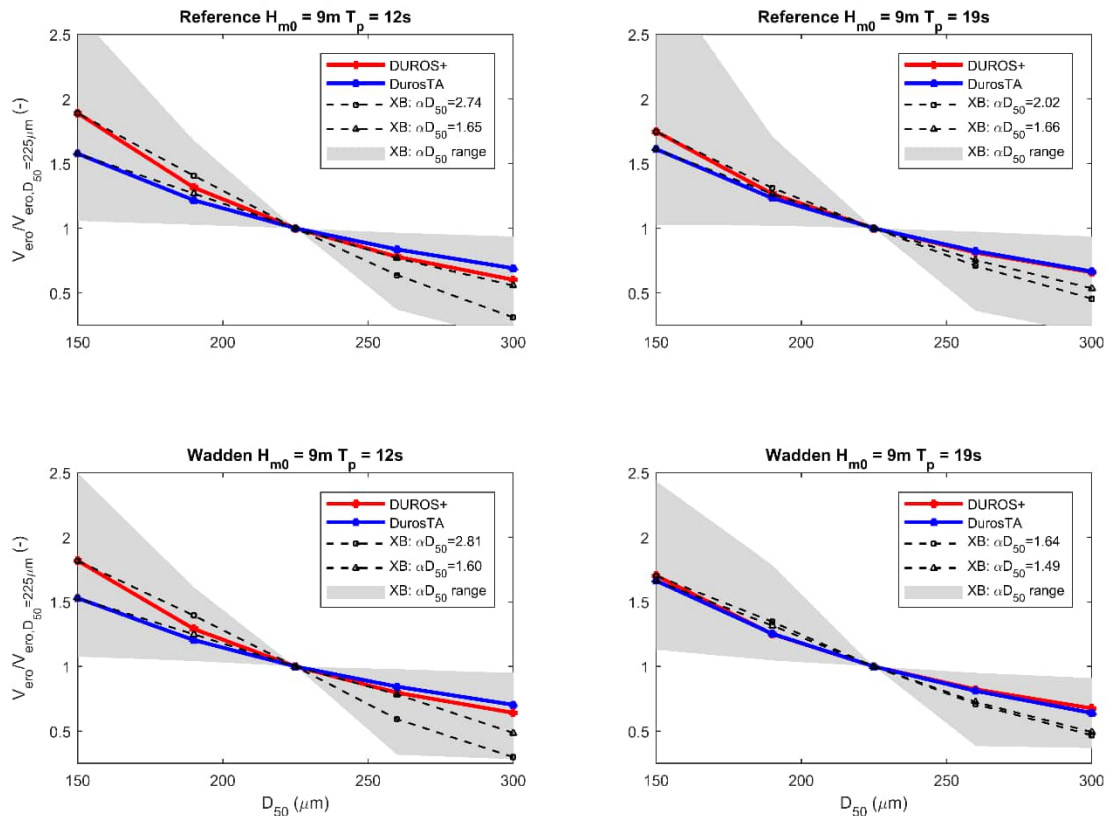


Figuur 10-5 – Hollandse kust referentieprofiel (boven) en Waddenkust referentieprofiel (onder) gebruikt in DUROS+, DurosTA en XBeach simulaties.

Tabel 10.4 – Gesimuleerde hydraulische belastingen, dwarsprofielen en korrelgrootten

Stormconditie	Referentieprofiel	Waterstand	H_{m0}	T_p	D_{50}
1	Hollandse kust	NAP + 5 m	9 m	12 s	150, 190, 225, 260, 300 μm
2	Hollandse kust	NAP + 5 m	9 m	19 s	150, 190, 225, 260, 300 μm
3	Waddenkust	NAP + 5 m	9 m	12 s	150, 190, 225, 260, 300 μm
4	Waddenkust	NAP + 5 m	9 m	19 s	150, 190, 225, 260, 300 μm

De relatieve gevoeligheid voor korrelgrootte, gedefinieerd als de berekende afslagvolume gedeeld door de referentie afslagvolume bij een korreldiameter van 225 μm , is voor ieder model en ieder stormsimulatie in Figuur 10-6 weergegeven. Het figuur laat zien dat, afhankelijk van de gekozen waarde van α_{D50} , de relatieve gevoeligheid van XBeach groter of kleiner kan worden gemaakt dan die van DUROS+ en DurosTA (vergelijk grijze vlak – bandbreedte XBeach resultaten – met rode en blauwe lijnen). Voor iedere stormsimulatie kan daarom een waarde voor α_{D50} gevonden worden waarmee de relatieve gevoeligheid van XBeach zo goed mogelijk overeenkomt met die van DUROS+ en DurosTA. Deze kalibratiewaarden van α_{D50} liggen tussen 1.64–2.81 voor gelijke gevoeligheid als DUROS+, en tussen 1.49–1.65 voor gelijke gevoeligheid als DurosTA.



Figuur 10-6 – Relatieve gevoeligheid in duinafslagvolumes in DUROS+ (rood), DurosTA (blauw) en XBeach (zwart, bandbreedte α_{D50} variatie grijs) voor de korrelgrootte voor de vier gesimuleerde stormcondities. De waarde van α_{D50} waarmee XBeach gelijke relatieve gevoeligheid heeft als DUROS+ (■) en DurosTA (▲) staat per stormsimulatie in de legenda weergegeven.

H.4 Keuze parameterwaarde voor concept validatiestudie

Op basis van de resultaten beschreven in Secties H.2 en H.3 zijn vier mogelijke opties voor de waarde van de parameter α_{D50} voor toepassing in de concept BOI standaardinstellingen geïdentificeerd:

- 1 De parameterwaarde $\alpha_{D50} = 0$. Hierbij wordt geen additioneel korrelgrootteafhankelijkheid in het model XBeach aangebracht. Een mogelijke reden om dit toe te passen is om ontbrekende fysica in het model niet te maskeren en transparant te kunnen zijn in de beperkingen van het model. Een groot nadeel is dat de gevoeligheid van het XBeach model met een waarde $\alpha_{D50} = 0$ veel kleiner is dan in de beschikbare metingen en bestaande duinafslagmodellen.
- 2 De parameterwaarde $\alpha_{D50} = 1,6$. Hiermee wordt de gevoeligheid van het XBeach model vergelijkbaar met de gevoeligheid van het DurosTA model.
- 3 De parameterwaarde $\alpha_{D50} = 2,3$. Hiermee wordt de gevoeligheid van het XBeach model vergelijkbaar met de *gemiddelde* gevoeligheid van het DUROS+ model. Hierbij moet worden opgemerkt dat de spreiding in de benodigde waarde van α_{D50} om de gevoeligheid van DUROS+ te benaderen groot is tussen de vier stormsimulaties. Met deze parameterwaarde komt de gevoeligheid van XBeach overeen met een deel van de kleinschalige laboratorium experimenten (WL|Delft Hydraulics, 1976).
- 4 De parameterwaarde $\alpha_{D50} = 2,8$. Hiermee wordt de gevoeligheid van het XBeach model vergelijkbaar met het gemiddelde van de kleinschalige laboratorium experimenten (WL|Delft Hydraulics, 1976).

Gegeven de doelstelling van het BOI programma om de overstromingsrisico, en dus erosievolumes zo scherp mogelijk te bepalen (geen systematische over- of onderschatting), is Optie 1 als ongewenst. Gegeven de spreiding in de relatieve gevoeligheden in de gemeten erosievolumes van de kleinschalige laboratoriumexperimenten, en de relatief grote verschillen tussen de gemeten erosievolumes in de laboratoriumexperimenten en de door XBeach berekende afslagvolumes, wordt Optie 4 onbetrouwbaar geacht. Gegeven de hierboven genoemde afweging, en de relatief grote spreiding in de kalibratiewaarde van α_{D50} om de gevoeligheid van DUROS+ te benaderen, wordt Optie 2 betrouwbaarder geacht dan Optie 3. In de concept BOI-standaardinstellingen wordt daarom de parameterwaarde $\alpha_{D50} = 1,6$ toegepast.

I Appendix Deel 2 – Definitieve BOI-standaardinstellingen

I.1 Skill scores

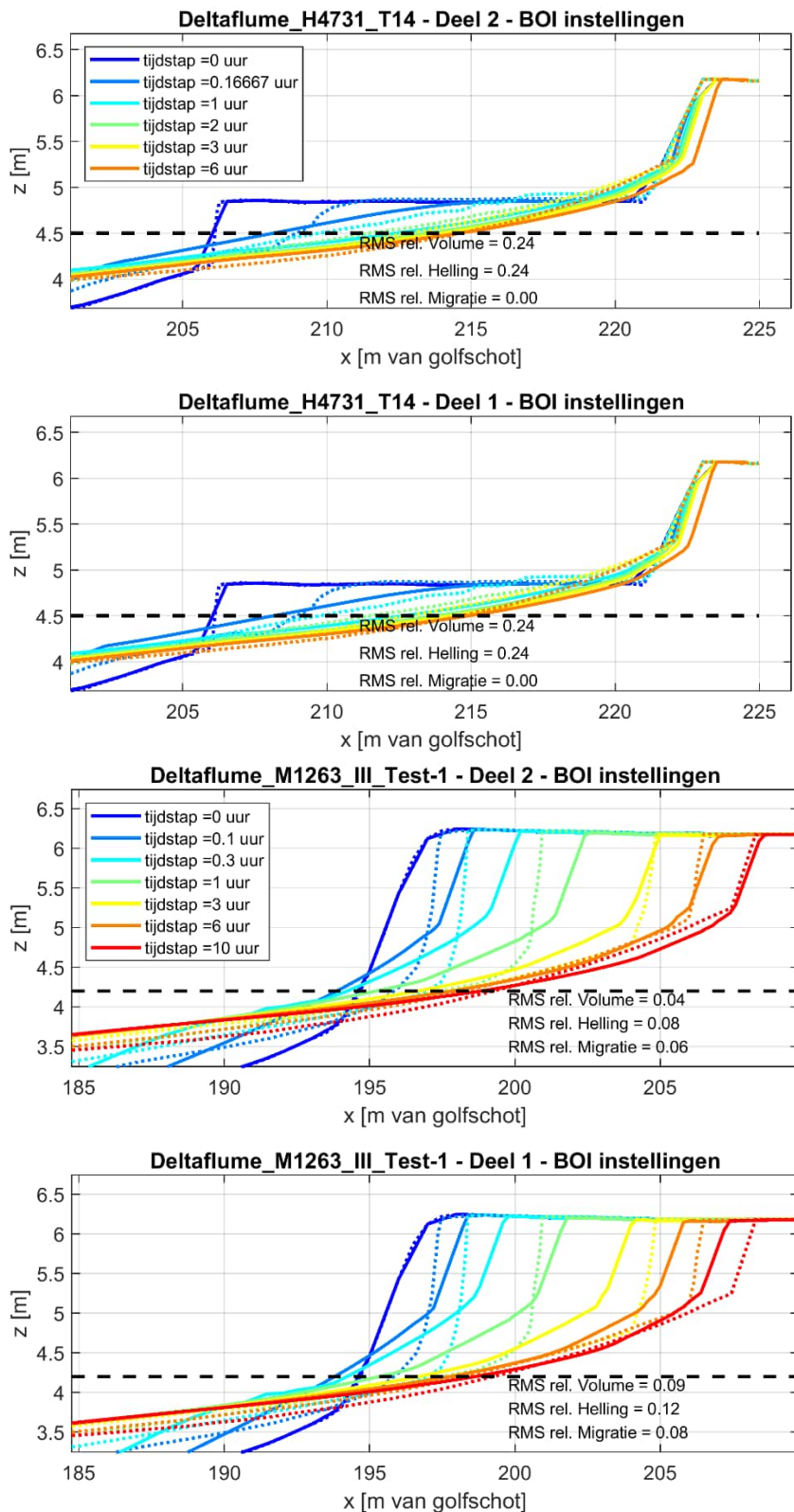
De relatieve gemiddelde fout (ook bekend als *relative bias*) en relatieve foutspreiding (*scatter index*):

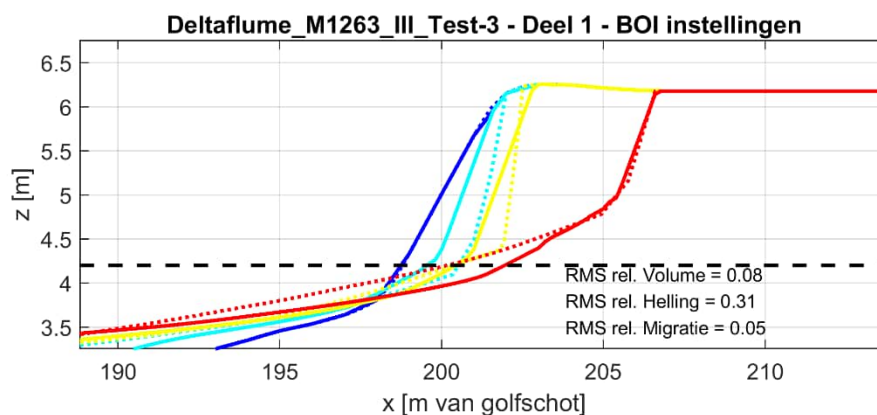
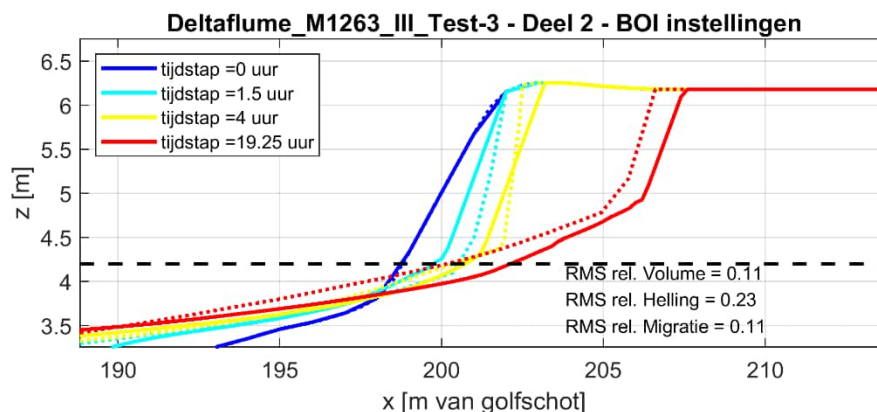
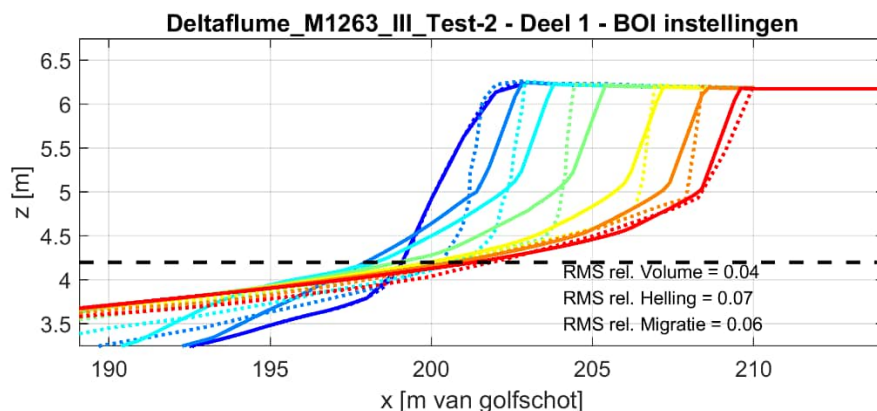
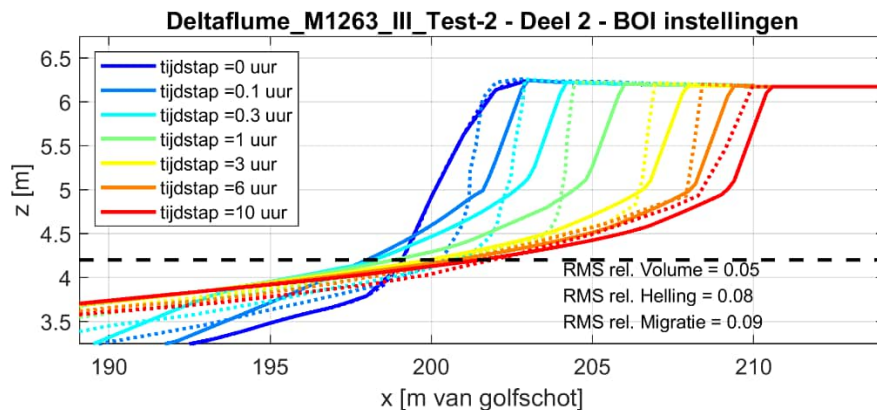
$$\text{Relatieve gemiddelde fout} = \frac{\sum_{i=1}^n V_{\text{model},i} - V_{\text{observatie},i}}{\sum_{i=1}^n V_{\text{observatie},i}} \quad (1)$$

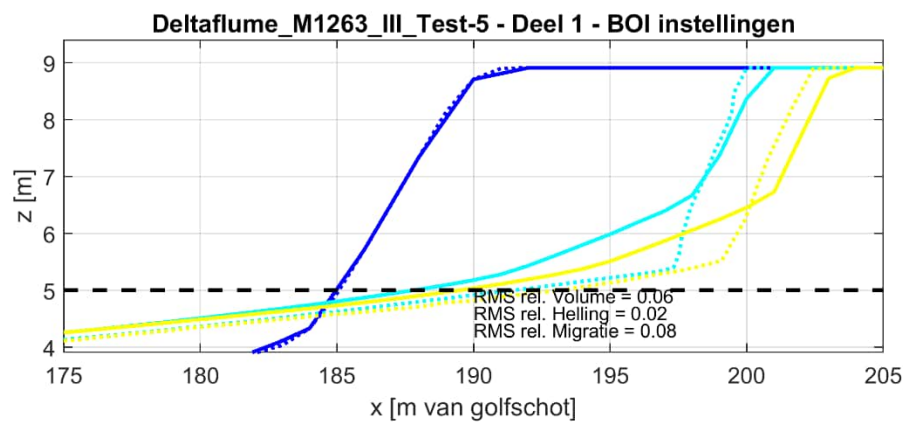
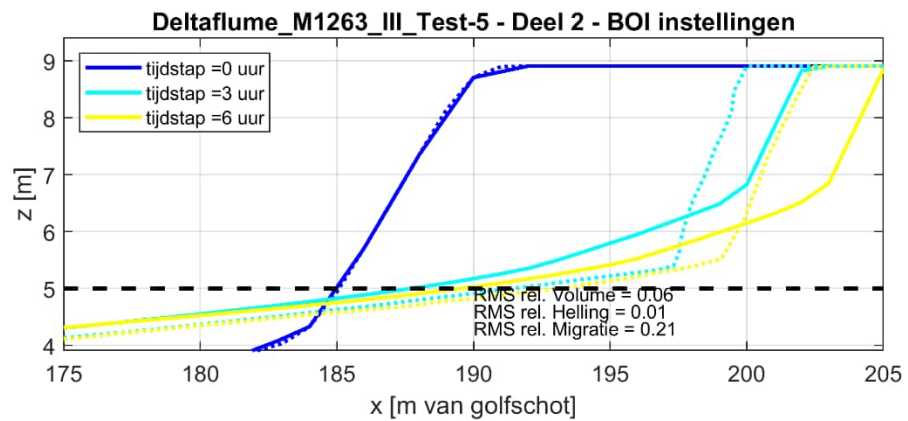
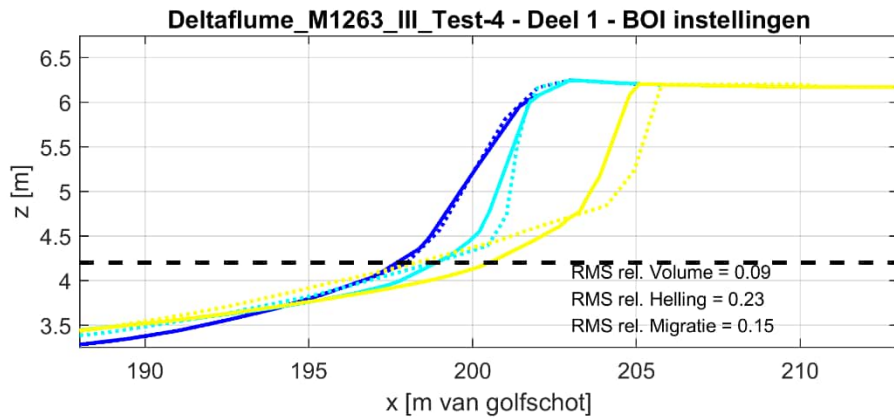
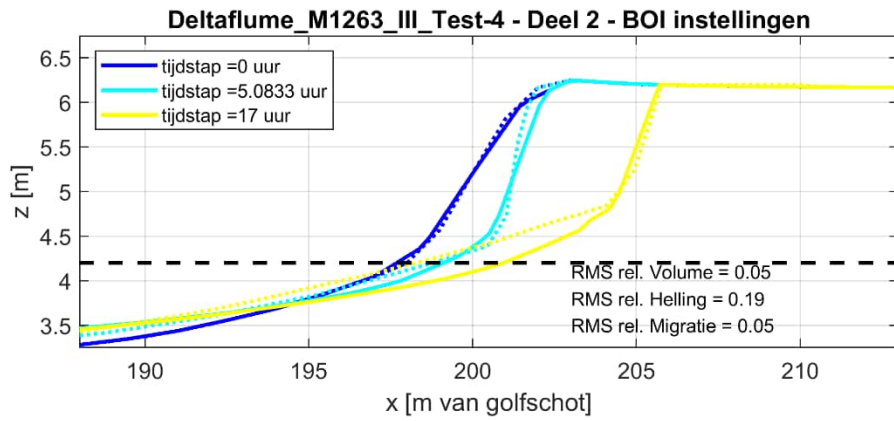
$$\text{Relatieve foutspreiding} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_{\text{model},i} - V_{\text{observatie},i})^2}}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_{\text{observatie},i})^2}} \quad (2)$$

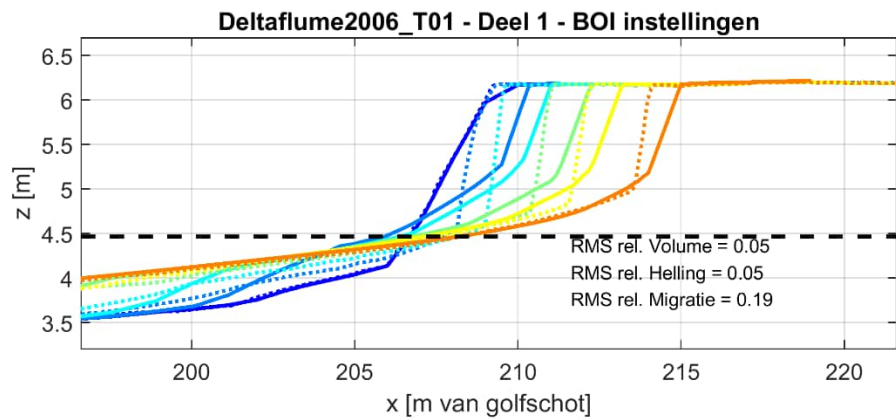
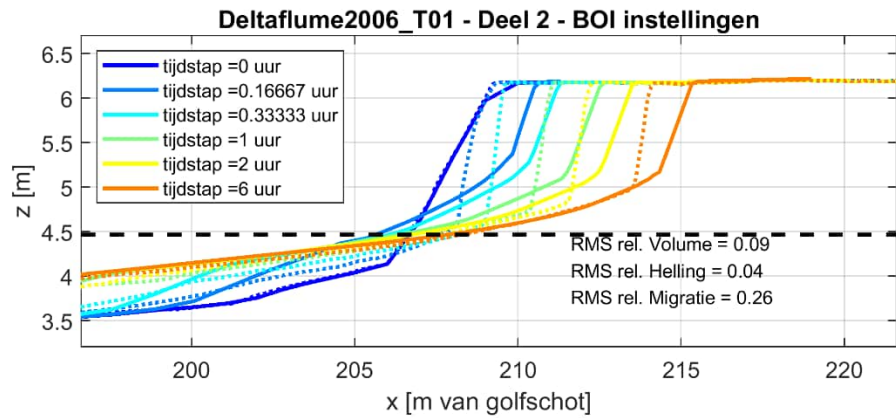
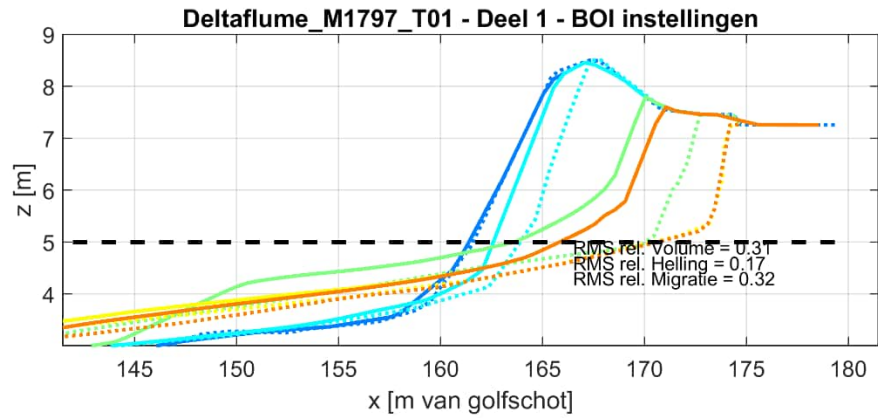
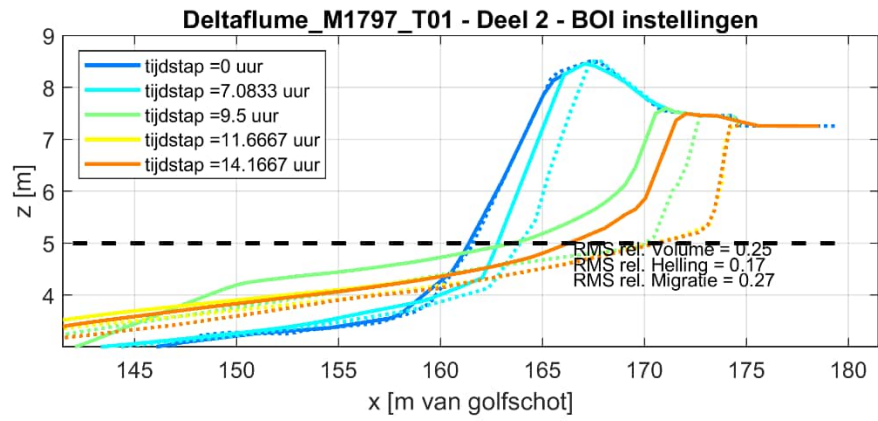
waarbij V de gemeten (*observatie*) of gesimuleerde (*model*) duinafslag is, en n het totale aantal simulaties is.

I.2 Figuren consequenties nieuwe instellingen op laboratoriumexperimenten

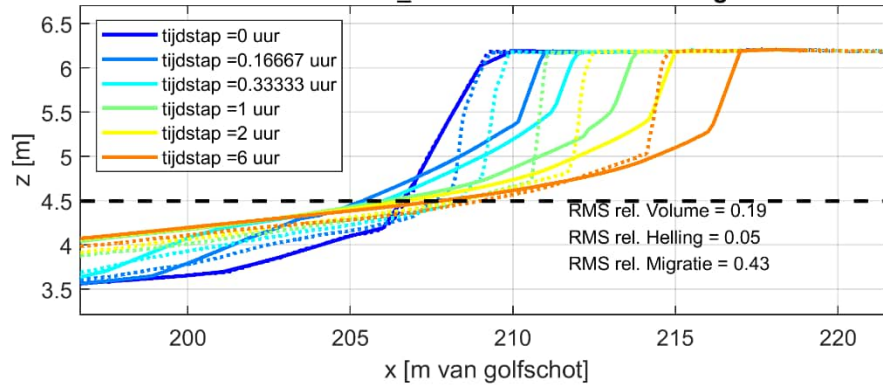




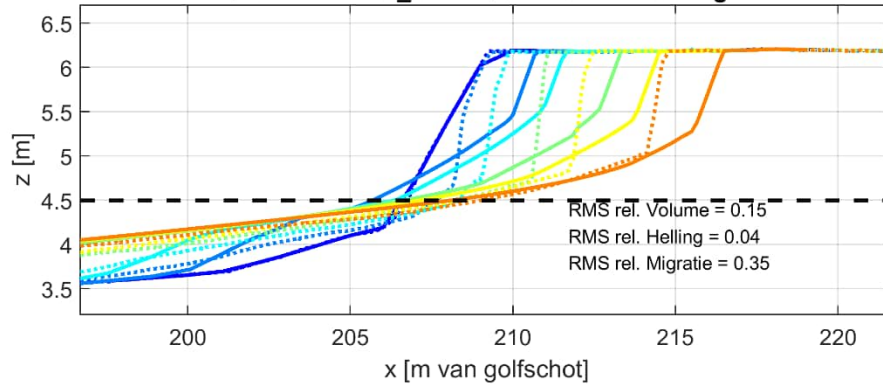




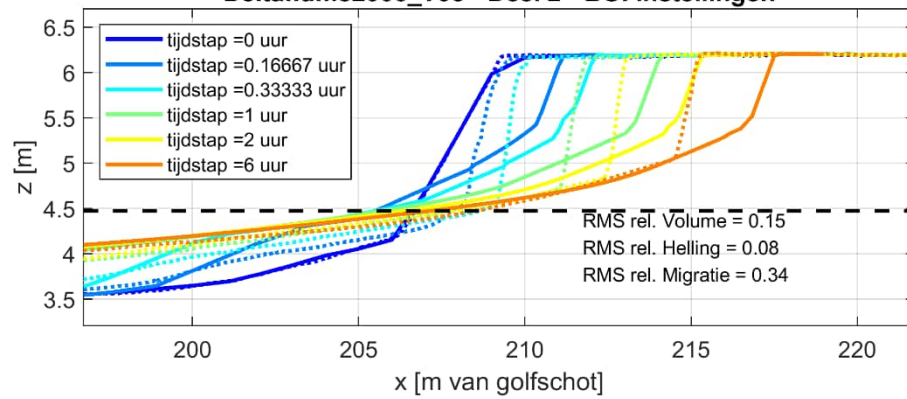
Deltaflume2006_T02 - Deel 2 - BOI instellingen



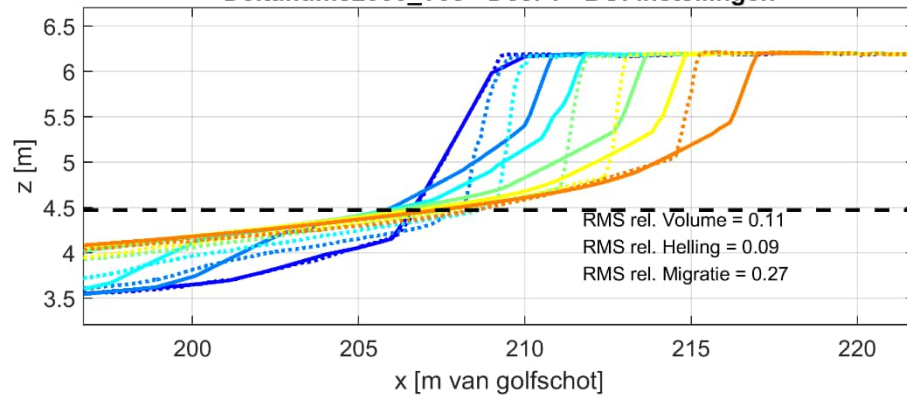
Deltaflume2006_T02 - Deel 1 - BOI instellingen



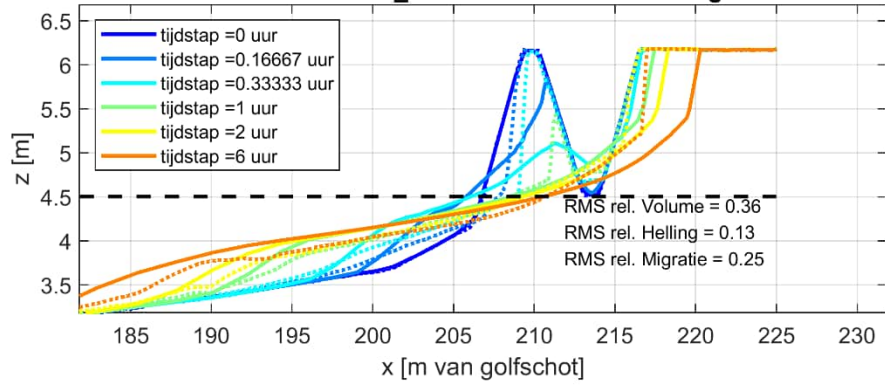
Deltaflume2006_T03 - Deel 2 - BOI instellingen



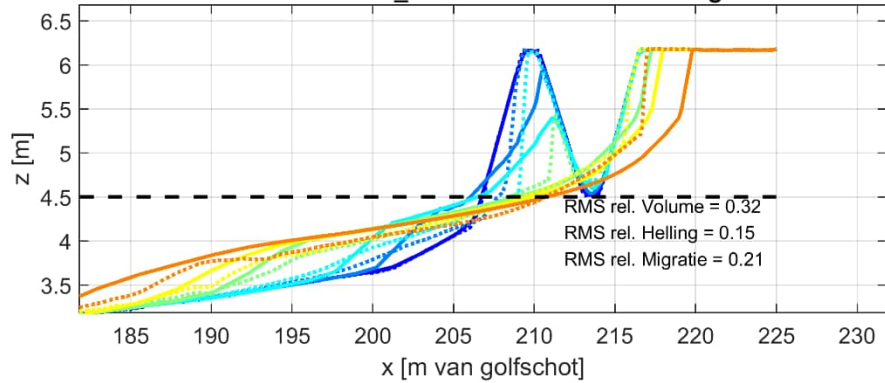
Deltaflume2006_T03 - Deel 1 - BOI instellingen



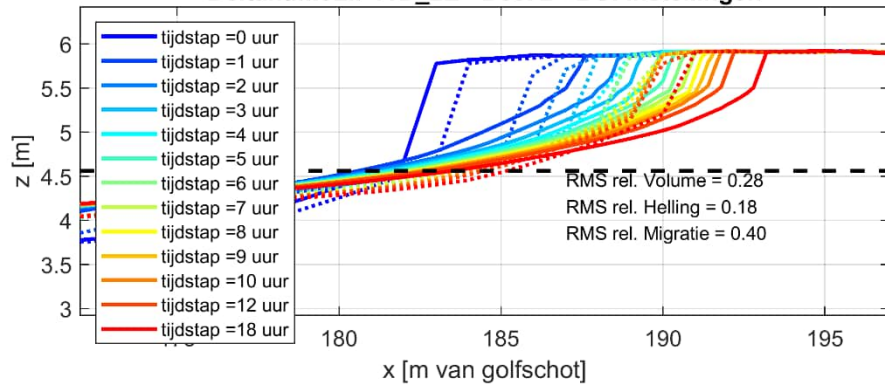
Deltaflume2006_T08 - Deel 2 - BOI instellingen



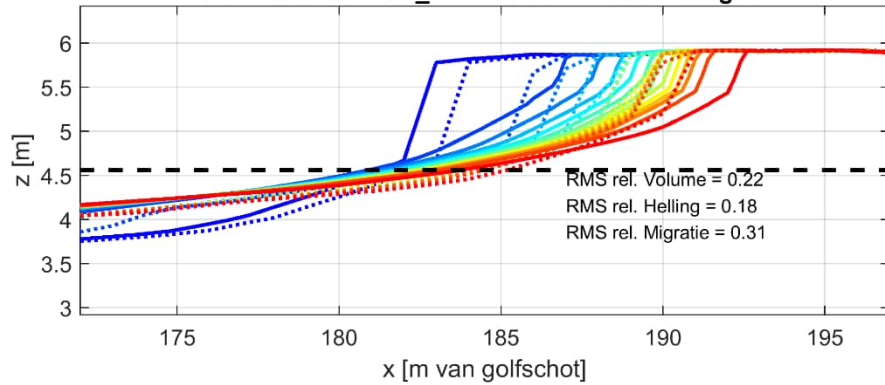
Deltaflume2006_T08 - Deel 1 - BOI instellingen



DeltaflumeLIP11D_2E - Deel 2 - BOI instellingen



DeltaflumeLIP11D_2E - Deel 1 - BOI instellingen



J Conceptversie veldvalidatierapport

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

Deltares

www.deltares.nl