

Onderzoek Geschiktheid Deltaklei in kader van demonstratieproject Brede Groene Dijk

Stap 3: OpenFOAM berekeningen voor invloed van waterstand en golfhoogte op erosiesnelheid



Onderzoek Geschiktheid Deltaklei in kader van demonstratieproject Brede Groene Dijk

Stap 3: OpenFOAM berekeningen voor invloed van waterstand en golfhoogte op erosiesnelheid

Auteur(s)




M. Klein Breteler

Onderzoek Geschiktheid Deltaklei in kader van demonstratieproject Brede Groene Dijk
 Stap 3: OpenFOAM berekeningen voor invloed van waterstand en golfhoogte op erosiesnelheid

Opdrachtgever	Waterschap Hunze en Aa's
Contactpersoon	Erik Jolink, Henk van Norel en Marco Veendorp
Referenties	Opdracht van 19-3-'21 met verplichtingnummer 2021001001 en projectnummer H04/06/6/6 71300
Trefwoorden	Kleibekleding, erosie, Deltagoot, dijk, kleirijperij, OpenFOAM

Documentgegevens

Versie	2
Datum	29-03-2022
Projectnummer	11206194-002
Document ID	11206194-002-HYE-0016
Pagina's	35
Classificatie	
Status	definitief

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	datum
0.1	M. Klein Breteler	G. Wolters	P. van Steeg	10-3-2022
2	M. Klein Breteler 	G. Wolters 	P. van Steeg 	29-3-2022

Samenvatting

In het kader van het demonstratieproject Brede Groene Dijk (BGD) wordt onderzocht of een dijk gebouwd kan worden met lokaal gewonnen klei afkomstig van de kwelder en klei gemaakt van zout (bagger)slib. Het onderzoek wordt uitgevoerd onder de naam Onderzoek Geschiktheid Deltaklei (OGD). Binnen het OGD wordt een koppeling gelegd met de Pilot Kleirijperij waarin onderzocht wordt hoe slib om te vormen tot klei.

In de Deltagoot van Deltares is in 2021 de erosiesnelheid bepaald van klei uit de kleirijperij, van de huidige Dollarddijk en van de Groene dijk bij Blija in Friesland. Als vervolg op dat onderzoek zijn in de onderhavige rapportage berekeningen beschreven met het numerieke rekenmodel OpenFOAM. Het aantal proeven in de Deltagoot was namelijk vrij beperkt, maar door daarbij ook numerieke berekeningen uit te voeren, is het toepassingsbereik van de proefresultaten verbreed.

Met OpenFOAM is de invloed berekend van de waterstand en de golfhoogte op de grootte van de erosiesnelheid. Op basis daarvan kan de erosieformule voor klei verbeterd worden, gericht op deze specifieke klei, taludhelling en grootte van de golven. De invloed van de golfhoogte op de erosiesnelheid is nodig om probabilistische berekeningen te kunnen maken voor het bepalen van de faalkans van de kleilaag van het ontwerp van de Brede Groene Dijk.

Uit de analyse van de berekeningen met OpenFOAM blijkt dat de door Van Steijn e.a. (2021) aangepaste formule van Mourik (2020) goed aansluit op de huidige OpenFOAM berekeningen en derhalve gebruikt kan worden voor het ontwerp van de Brede Groene Dijk.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	6
1.1	Achtergrond	6
1.1.1	Aanleiding project	6
1.1.2	Doel van het demonstratieproject Brede Groene Dijk	7
1.1.3	Fasering onderzoek	7
1.2	Onderhavige deelproject	8
2	Aanpak van het onderzoek	9
2.1	Aanpak	9
2.2	Deltagootproeven	11
3	Resultaten van de OpenFOAM berekeningen	14
3.1	OpenFOAM	14
3.2	Uitgevoerde berekeningen en resultaten	16
3.2.1	Narekenen van de proeven uit de Deltagoot	16
3.2.2	Berekeningen met diverse waterstanden en golfcondities	17
4	Analyse van de resultaten	19
4.1	Relatie tussen de stijghoogte tegen de klif en de erosiesnelheid	19
4.2	Invloed van de waterstand op de erosiesnelheid	20
4.3	Invloed van de golfhoogte op de erosiesnelheid	21
5	Conclusies	24
	Referenties	25
A	Resultaten van de berekeningen met OpenFOAM	27

1 Inleiding

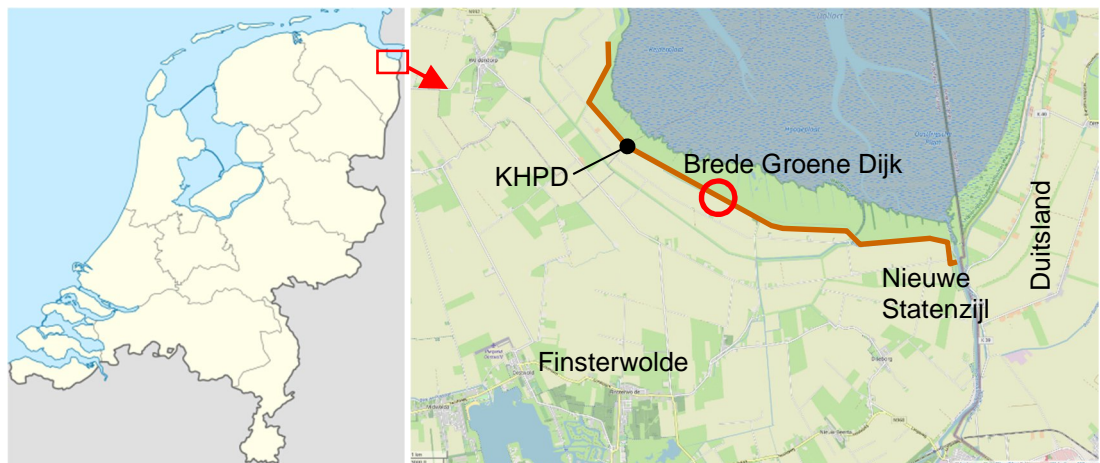
1.1 Achtergrond

In het kader van het demonstratieproject Brede Groene Dijk (BGD) wordt onderzocht of een dijk gebouwd kan worden met lokaal gewonnen klei afkomstig van de kwelder en klei gemaakt van zout (bagger)slib. Het onderzoek wordt uitgevoerd onder de naam Onderzoek Geschiktheid Deltaklei (OGD). Binnen het OGD wordt een koppeling gelegd met de Pilot Kleirijperij waarin onderzocht wordt hoe slib om te vormen tot klei.

Uit de voorbereidingen van het demonstratieproject blijkt dat extra onderzoek in Nederland nodig is om de toepasbaarheid (en voorspelbaarheid van de uiteindelijke functionele eigenschappen) van lokaal gewonnen kweldermateriaal en gerijpte baggerspecie te vergroten. De verwachting is dat een aantal van deze eigenschappen verbeteren door verdere rijping van de klei in de loop van de tijd. Bij de start van een rijpingsproces is er inzicht gewenst of er een geschikt bouw materiaal van te maken is.

Het demonstratieproject Brede Groene Dijk (BGD) is onderdeel van het dijktraject Kerkhovenpolder-Duitsland (normtraject 6-7), zie Figuur 1.1. Aan de zeezijde grenst de kering aan het Natura 2000-gebied van de Dollard, onderdeel van de Waddenzee. Aan de landzijde grenst de kering aan polders van Oost-Groningen. Voorzien is om het project uit te voeren met gerijpte klei afkomstig van de Kleirijperij en van de kwelder. Uit bepalingen op dit materiaal is echter vastgesteld dat het zoutgehalte en het gehalte aan organisch stof van de gerijpte klei niet voldoen aan de voor klei als dijkbouw materiaal geldende eisen (TAW, 1996).

Ter voorbereiding op het demonstratieproject wordt daarom onderzoek uitgevoerd naar de mogelijkheid om met dit materiaal wel een waterveilige dijk te kunnen bouwen. Dit extra onderzoek richt zich op vragen zoals: welke dimensionering is nodig, hoeveel materiaal is daarvoor nodig, is de uitvoering realiseerbaar, hoe gedragen de functionele eigenschappen zich als functie van ouderdom e.d..



Figuur 1.1 Locatie van het demonstratieproject Brede Groene Dijk (KHPD = dijktraject Kerkhovenpolder - Duitsland).

1.1.1 Aanleiding project

Voor het omvormen van de bestaande afgekeurde dijk tot een Brede Groene Dijk is veel klei nodig: er is berekend dat voor een BGD op het traject Kerkhovenpolder-Duitsland dit ca. 1,7

miljoen m³ klei is. Om aan de huidige en toekomstige veiligheidseisen te kunnen voldoen, wordt het talud van de nieuwe dijk namelijk een stuk flauwer. Alleen dan is de dijk in staat om de golfklappen die op de dijk slaan op te vangen. Natuurlijk kan die grote hoeveelheid klei van elders worden aangevoerd: we hebben het dan over vele tienduizenden vrachtwagenbewegingen. Waterschap Hunze en Aa's vroeg zich af of dit anders kon. Er zijn diverse alternatieve kleibronnen in de buurt van de dijk die ook gebruikt kunnen worden. In het demonstratieproject BGD wordt onderzocht of dit kan. Samen met andere partijen kijkt het Waterschap naar de mogelijkheden van klei uit kwelders die vóór de dijk liggen, klei gemaakt van slib uit de binnendijkse brakwater natuurland Breebaart én naar klei gemaakt van zout (bagger)slib uit het havenkanaal van Delfzijl.

Het gebruik van (bagger)slib creëert een win-win situatie. Het wegnemen van slib verbetert de waterkwaliteit in de Eems Dollard, wat positief is voor biodiversiteit in het gebied. Daarnaast kan het gesedimenteerde materiaal, na rijping, vervolgens gebruikt worden bij dijkversterkingen en krijgt het daarmee een maatschappelijke en economische waarde. Kortom, het gebruik van lokaal materiaal draagt bij aan een circulaire inzet.

1.1.2 Doel van het demonstratieproject Brede Groene Dijk

Het doel van dit project is aan te tonen, en daarmee vertrouwen op te bouwen, dat het gerijpte materiaal (het sediment), ondanks een hoog gehalte aan zout en organische stof, geschikt is om er een waterveilige dijk mee te realiseren. Met name het toetsen van verwerkbaarheid en erosiebestendigheid van de gerijpte klei in het veld (proefdijk) en in het laboratorium is hierbij van belang. Bovendien zal een antwoord worden gegeven op de vraag op welke wijze het materiaal verantwoord kan worden toegepast.

Voor het demonstratieproject BGD zal gekeken worden wat het effect is van een flauw talud met helling van 1:7 in combinatie met relatief hoge golven op de erosiesnelheid van de klei. Dit effect is nooit eerder op deze schaal getest en valt momenteel niet binnen het toepassingsgebied van het huidige rekenmodel voor klei-erosie. Het gevolg hiervan is dat er mogelijk te conservatieve aannames worden gedaan voor de dikte van de kleilaag. Daarnaast blijkt uit het demonstratieproject Brede Groene Dijk dat de waarde van een erosiecoëfficiënt van afwijkende kleisoorten niet kan worden bepaald aan de hand van standaard kleiparameters.

1.1.3 Fasering onderzoek

Voor het verwerven van meer inzicht in de toepasbaarheid, en dus inzicht in de functionele eigenschappen, van de huidige Kleirijperij klei – en de manier waarop met een aangepast ontwerp, adequate uitvoering en een afgestemd beheer kan worden gekomen tot een waterveilige dijk – is het onderzoeksplan onderverdeeld in de volgende onderdelen:

1. Definitiefase en bronnenonderzoek
2. Materiaalonderzoek
 - a. Bestaande dijken
 - b. Aanleg proefdijk
3. Probabilistische berekeningen
4. Structuurproeven met bakken klei
5. Evaluatie en tussenrapportage
6. Krimpgrens en erosiemeterproeven
7. Onderzoek diverse parameters
8. Analyse gevolgen afwijkende parameters
9. Deltagootproeven
10. Eindrapportage

1.2 Onderhavige deelproject

De onderhavige rapportage betreft Stap 3 uit paragraaf 1.1.3, die opgesplitst kan worden in twee deelstappen:

1. OpenFOAM berekeningen om de invloed van de waterstand en de golfhoogte op de erosiesnelheid te bepalen.
2. Probabilistische berekeningen met de afgeleide formules voor het bepalen van de faalkans van het ontwerp van de Brede Groene Dijk.

De onderhavige rapportage gaat over de eerste deelstap: OpenFOAM berekeningen.

Als basis voor deze berekeningen wordt het onderzoek in de Deltagoot gebruikt (Van Steijn en Klein Breteler, 2021). In dat onderzoek zijn van vier soorten klei de erosiesnelheid tijdens golfaanval bepaald. De proevenserie met klei van de Dollarddijk is hierbij het meest relevant, gezien de geconstateerde hoge erosiesnelheid. Daarom zijn de resultaten van die proevenserie als uitgangspunt gebruikt voor de OpenFOAM berekeningen.

De invloed van de golfhoogte op de erosiesnelheid is nodig om probabilistische berekeningen te kunnen maken voor het bepalen van de faalkans van de kleilaag van het ontwerp van de Brede Groene Dijk. Deze invloed is met name rondom het ontwerppunt nodig (waterstand en golfcondities op de grens van falen en niet falen met de hoogste kans van voorkomen). Het ontwerppunt ligt naar verwachting dicht bij de waterstand en golfcondities die toegepast zijn in de Deltagoot.



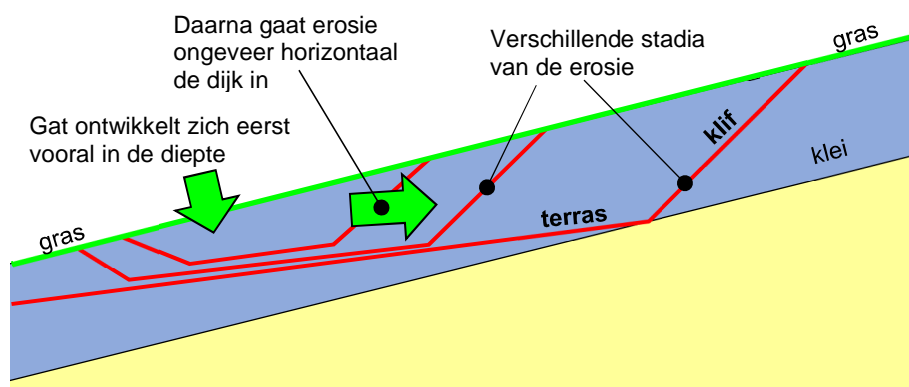
Figuur 1.2, Golfbelasting op het kleitalud in de Deltagoot.

2 Aanpak van het onderzoek

2.1 Aanpak

Voor de aanpak van dit onderzoek is dezelfde systematiek gebruikt als die van Mourik (2020) en Klein Breteler (2021). Het numerieke rekenmodel OpenFOAM is gebruikt om de golfklapdruk op de geërodeerde klei te berekenen. Door de waterstand en de golfhoogte te variëren in de berekeningen, kan deze invloed op de golfklapdruk gekwantificeerd worden. Samen met de relatie tussen de berekende golfklapdruk en de gemeten erosiesnelheid in de Deltagoot is het mogelijk om dit vervolgens te vertalen naar de invloed van de waterstand en golfhoogte op de erosiesnelheid.

Zoals geconstateerd is tijdens de proeven in de Deltagoot, verloopt het erosieproces in eerste instantie heel traag (gering erosievolume per uur) en gaat vervolgens na het bereiken van een bepaalde erosiediepte veel sneller. Dit komt vooral door de invloed van het gras.



Figuur 2.1 Schematische weergave van het erosieproces

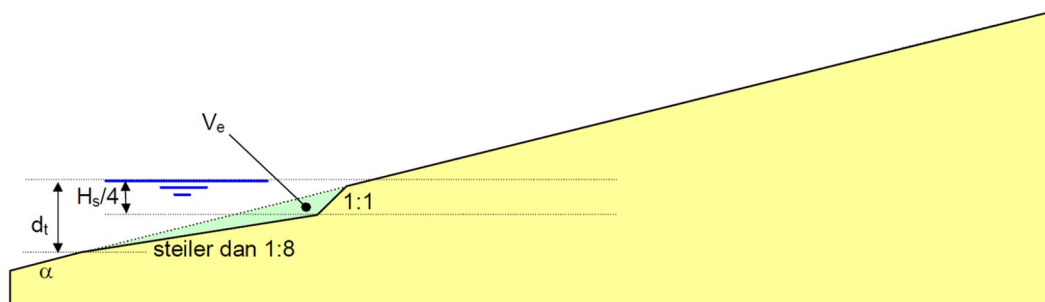
In Figuur 2.1 is schematisch weergegeven hoe het erosieproces verloopt. Het start met het ontwikkelen van een gat in het gras. Zodra het erosiegat voldoende is gegroeid, ontwikkelt zich een klif waar de zwaarste hydraulische belasting op aangrijpt. Daar slaan de golven tegenaan en dat geeft de grootste bijdrage aan de erosie. Door de toenemende erosie schuift de klif steeds verder naar achteren en neemt de diepte van het erosiegat toe.

Dit maakt dat er twee hoofdfases in het erosieproces zijn:

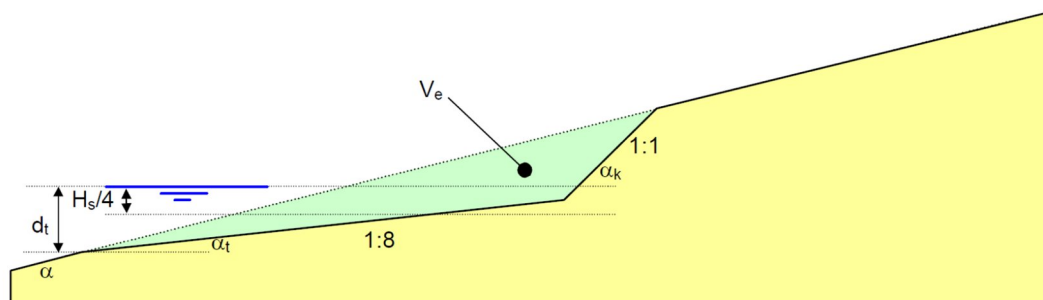
1. Erosie van het gras totdat er een kuil is ontstaan en een klif waartegen de golven beuken.
2. Een erosieproces waarbij er een steile klif is die met name onderaan de klif erodeert en het gras ondermijnt.

De OpenFOAM berekeningen zijn bedoeld voor de tweede fase van het erosieproces.

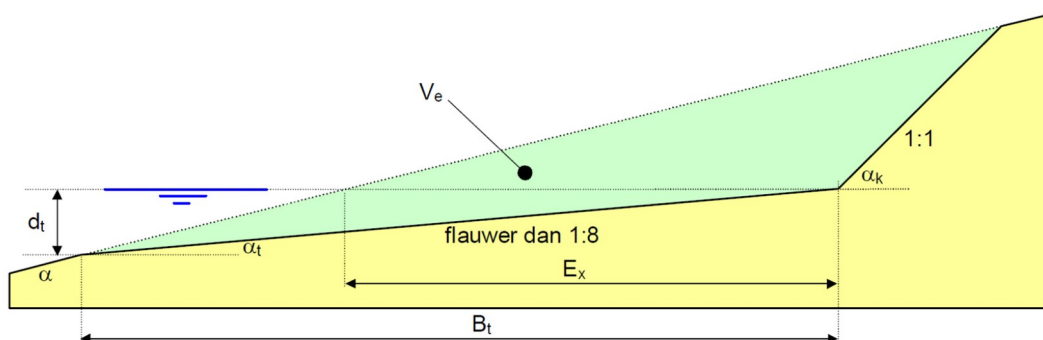
Daarnaast is door Klein Breteler e.a. (2012) onderscheid gemaakt in 5 deelfases ten aanzien van de vorm van het erosieprofiel. De eerste drie deelfases zijn gegeven in Figuur 2.2 t/m Figuur 2.4. In deelstap 4 en 5 wordt respectievelijk de buiten- en binnenkruinlijn bereikt. In het ontwerp is het doel dat de kleilaag voldoende dik is zodat het doorbreken van de kleilaag en het bereiken van de kruin (fase 4) tegelijk optreedt.



Figuur 2.2, Vorm van het erosieprofiel in deelfase 1



Figuur 2.3, Vorm van het erosieprofiel in deelfase 2



Figuur 2.4, Vorm van het erosieprofiel in deelfase 3

Gezien het feit dat er in de Deltagoot slechts een beperkt aantal proeven uitgevoerd kon worden, is ervoor gekozen om met het numerieke rekenmodel OpenFOAM de invloed van de waterstand en de golfhoogte op de resultaten te berekenen. Hierbij wordt uitgegaan van de hypothese van Kruse (Klein Breteler e.a. 2012), die zegt dat de piekdruk in de golfklappen tegen de erosieklijf bepalend is voor de erosiesnelheid. Door dus de invloed van de waterstand en golfhoogte op de piekdruk in de golfklappen te berekenen met OpenFOAM, kan daardoor ook de invloed hiervan op de erosiesnelheid gekwantificeerd worden.

Er is in dit onderzoek van uitgegaan dat OpenFOAM in een bepaalde range van belastingen, die niet te veel afwijken van de proeven in de Deltagoot, de trend in de golfklapdruk tegen de klei voldoende nauwkeurig kan berekenen.

De druk die golven uitoefenen tijdens een golfklap op de klei wordt gezien als de primaire belasting die erosie van de klei veroorzaakt. Tijdens proeven met een kleibekleding is duidelijk vastgesteld dat de erosie ontstaat waar de golfklappen neerkomen, en niet in de golfloop- of golfneerloopzone (Klein Breteler e.a., 2012, en Mourik, 2020).

Mede op grond van deze constatering heeft Kruse zijn hypothese geformuleerd dat de erosie voornamelijk gerelateerd is aan de piekdrukken tijdens golfklappen op het kleitalud. Deze

hypothese is door Kruse verder uitgewerkt in het rapport van Klein Breteler, Capel, Kruse, Mourik en Kaste (2012).

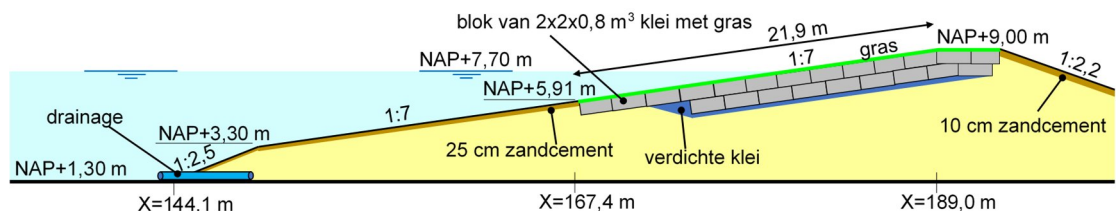
Concreet zijn de volgende stappen doorlopen:

1. De gemeten erosieprofielen, die gemeten zijn in de Deltagoot na de relevante proeven, zijn als invoer gebruikt voor de OpenFOAM berekeningen. Vervolgens is de golfklapdruk op de klei berekend. De grootste piekdruk per golf, die optreedt tegen de klif, is gebruikt in de verdere analyse. De significante waarde (gemiddelde van de hoogste éénderde deel van piekdrukken in de golven) is aangehouden als de maatgevende waarde.
2. Met de berekende golfklapdruk tegen de klif en de gemeten erosiesnelheid in de Deltagoot is de relatie gelegd tussen deze druk en erosiesnelheid.
3. Voor twee erosieprofielen is berekend wat de invloed is van de waterstand en de golfhoogte op de berekende golfklapdruk tegen de klif.
4. De relatie tussen de druk en de erosiesnelheid uit stap 2 is tenslotte gebruikt om de invloed van de waterstand en golfhoogte op de golfklapdruk uit stap 3 om te rekenen naar een invloed van de waterstand en golfhoogte op de erosiesnelheid.

2.2 Deltagootproeven

Uitgebreide informatie over de gebruikte Deltagootproeven voor deze analyse is beschreven door Van Steijn en Klein Breteler (2021). In deze paragraaf is een korte samenvatting gegeven van de tweede serie proeven, die uitgevoerd is met klei met gras van de Dollarddijk en van de Friese dijk bij Blija. De huidige OpenFOAM-berekeningen zijn uitgevoerd met de berekende erosieprofielen van de Dollarddijk.

In de Deltagoot is de kleibekleding met gras van de Dollarddijk beproefd op een flauw talud met helling van 1:7, zoals te zien is in Figuur 2.5.



Figuur 2.5 Tweede modelopstelling in de Deltagoot aan de halzijde met klei en gras van de Dollarddijk (Nap+7,70 m komt in de Deltagoot overeen met een niveau van +6,40 m boven de gootbodem)

De klei is in grote blokken van $2 \times 2 \text{ m}^2$ en circa 80 cm dik van de dijk gehaald en getransporteerd naar de Deltagoot. Hiervoor zijn stalen bakken zonder bodem in het dijktalud gedrukt (zie Figuur 2.6) en is rondom de klei weggegraven. Vervolgens is een stalen bodemplaat eronder geschoven, zoals te zien is in Figuur 2.7.

Voor de onderste laag kleiblokken is na het inbouwen in de Deltagoot de graslaag verwijderd.

Het resulterende kleitalud met gras is te zien in Figuur 2.8.



Figuur 2.6 Drukken van de zijwanden van de mal in het taludoppervlak.



Figuur 2.7 Ontgraven van de gedrukte mal (links) en het eronder schuiven van de bodemplaat (rechts)



Figuur 2.8, Grastalud in de Deltagoot (linker helft: Blija; rechterhelft: Dollarddijk).

Het uitgevoerde proevenprogramma en de gemeten erosie aan de zijde van de Dollarddijk zijn gegeven in Tabel 2.1. In deze tabel zijn de volgende symbolen gebruikt:

h = waterdiepte (m)

H_{m0} = significante golfhoogte van de inkomende golven (m)

T_p = golfperiode bij de piek van het spectrum (s)

$S_{op} = H_{m0}/(gT_p^2/(2\pi)) = \text{golfsteilheid (-)}$

proef	h (m)	H _{m0} (m)	T _p (s)	S _{op} (-)	Duur (uur)	Cumulatieve duur (uur)	Erosiediepte (m)	Erosievolume (m ³ /m)
B2_01	6,40	1,95	5,63	0,04	0,25	0,25	0,00	0,00
B2_02	6,40	2,00	5,53	0,04	1,00	1,25	0,02	0,06
B2_03	6,40	1,99	5,53	0,04	1,00	2,25	-	-
B2_04	6,40	1,99	5,53	0,04	1,00	3,25	0,04	0,15
B2_05	6,40	2,02	5,55	0,04	0,58	3,83	0,05	0,39
B2_06	6,40	1,95	5,52	0,04	3,00	6,83	0,67	1,58
B2_07	6,40	2,00	5,55	0,04	0,75	7,58	0,64	2,39
B2_08	6,40	2,00	5,53	0,04	1,00	8,58	0,73	3,97
B2_09	6,40	1,00	3,90	0,04	1,50	10,08	0,74	4,16
B2_10	6,40	1,51	4,74	0,04	1,50	11,58	0,80	5,18
B2_11	6,40	2,03	5,53	0,04	1,10	12,68	0,92	9,77
B2_12	6,40	2,01	5,49	0,04	2,00	14,68	1,13	16,24
B2_13	6,40	2,01	5,49	0,04	2,00	16,68	1,35	20,11
B2_14	6,40	2,04	5,49	0,04	2,00	18,68	1,40	23,64
B2_15	6,40	2,05	5,51	0,04	5,00	23,68	1,49	28,01
B2_16	6,40	2,04	5,50	0,04	6,00	29,68	1,56	30,01
B2_17	6,40	2,04	5,51	0,04	5,00	34,68	1,64	32,26

Tabel 2.1 Proevenprogramma en gemeten erosiediepte (loodrecht op het talud) en erosievolume



Figuur 2.9 Erosiekuil na proef B2_06 (na totaal 6,83 uur golven)

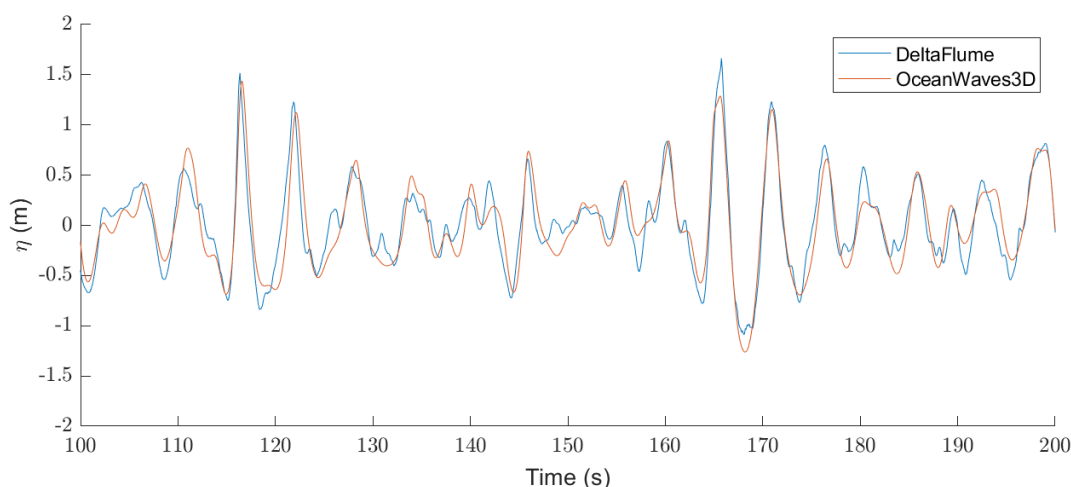
3 Resultaten van de OpenFOAM berekeningen

3.1 OpenFOAM

Voor het berekenen van de hydraulische belasting op de klei tijdens brekende golven is gebruik gemaakt van twee numerieke modellen:

1. OceanWave3D (versie 1.1): voor de golftransformatie vanaf het golfschot tot op ca 90 m daar vandaan (120 m van de dijk).
2. OpenFOAM (versie v1812, met [library waves2Foam](#)): voor de golftransmissie door de goot vanaf 100 m van de dijk en het breken van de golven op de dijk, inclusief de golfklap, de golfloop en de golfneerloop.

Er is een overgangsgedebied van deze numerieke modellen tussen 40 en 90 m van het golfschot (tussen 100 en 50 m van de dijk) in de vorm van een relaxatie-zone (Jacobsen et al 2011, en Jacobsen et al 2018). Voor beide modellen geldt dat er gerekend wordt in een tweedimensionaal domein (horizontaal haaks op de dijk en verticaal).



Figuur 3.1 Met OceanWave3D berekende golven bij het golfschot en de overeenkomstige golven in de Deltagoot (proef K1_12 van Klein Breteler, 2021)

OceanWave3D is een numeriek model dat het voortplanten van niet-lineaire golven op een variabele diepte berekent in het tijdsdomein, zie Figuur 3.1. Het is gebaseerd op het oplossen van de 3D-Laplace vergelijking met een eindige elementenmethode. Het beschouwt de bewegende vloeistof als een potentiaalstroming. Het genereren van de golven aan de zeezijde wordt gerealiseerd met een methode die de beweging van het golfschot simuleert, waarvoor dezelfde beweging als het golfschot in de Deltagoot is gekozen.

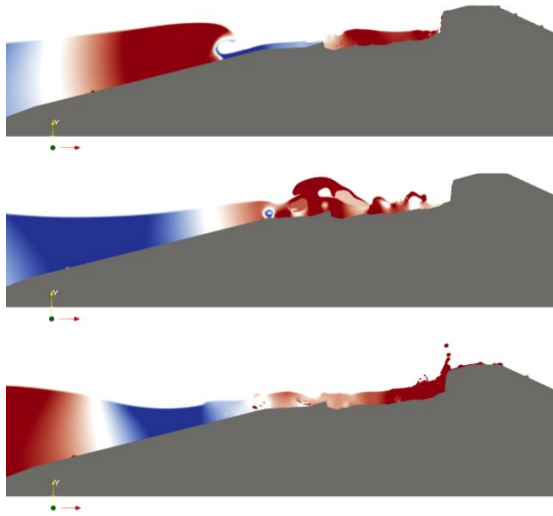
Achtergronden van dit numerieke model zijn beschreven door Bingham et al (2007) en Engsig-Karup et al (2008).

OpenFOAM is een numeriek model van het type CFD (Computational Fluid Dynamics). Het wordt hier gebruikt om de brekende golven op het dijktalud te berekenen. Het gaat daarbij vooral om de druk (stijghoogte) op de klei als gevolg van golfklappen.

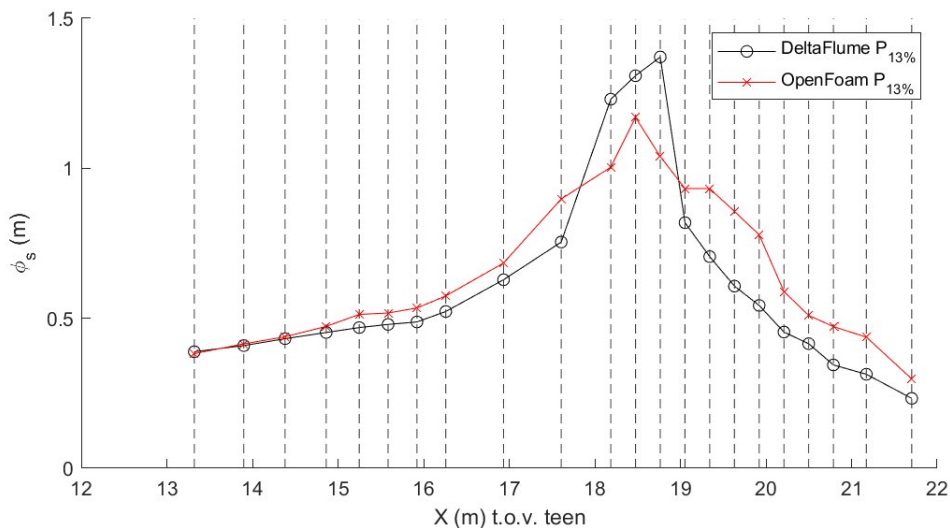
OpenFOAM berekent het breken van de golven door de Navier-Stokes formules op te lossen met gebruikmaking van een Reynolds gemiddelde, waarbij tevens gewerkt wordt met een 'Volume of Fluid'-methode. Dat laatste houdt in dat de cellen in het rekendomein een bepaalde vullingsgraad hebben. De cellen boven de waterlijn zijn leeg, de cellen onder de waterlijn zijn geheel gevuld, en rond de waterlijn zijn ze deels gevuld. De methode is zo opgezet dat er geen

gesloten waterlijn hoeft te zijn, maar dat ook rondvliegend water gemodelleerd kan worden. Dit is te zien in Figuur 3.2, dat drie momenten in een brekende golf toont.

Er wordt gebruik gemaakt van het turbulentiemodel van Larsen & Fuhrman (2018) (Stabilised K-omega SST turbulence model). Het rekt met onsamendrukbaar water, maar er zijn wel grote luchtbelllen van minstens 4 cm in het water als de waterbeweging daar aanleiding toe geeft.



Figuur 3.2 Drie momenten tijdens het breken van een golf op de dijk met een erosiekuil op het boventalud.



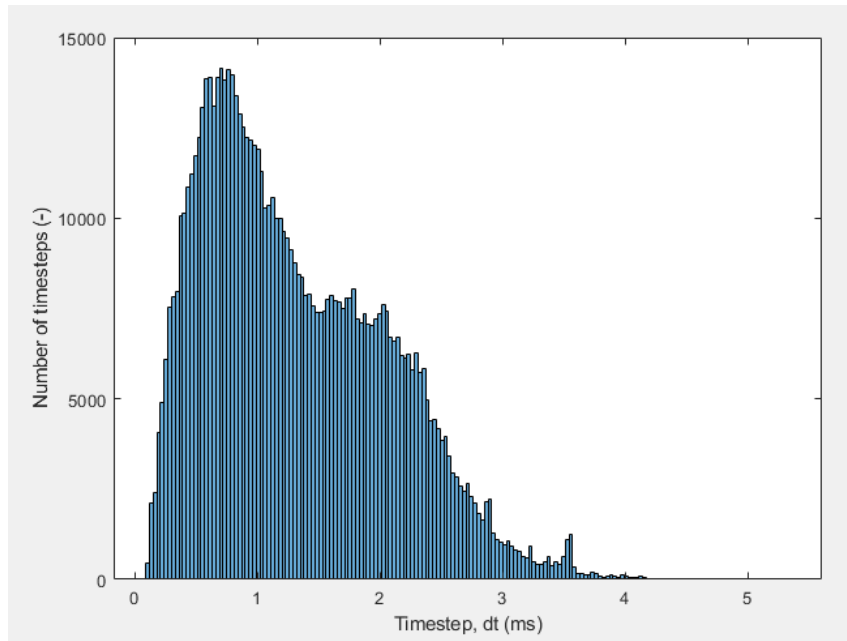
Figuur 3.3 Vergelijking tussen gemeten stijghoogtes op een talud van 1:3,6 in de Deltagoot en berekende stijghoogtes met OpenFOAM

De waterbeweging zoals berekend met OpenFOAM is geverifieerd aan de hand van Deltagootproeven met een asfalttalud met helling van 1:3,6 (Smale en Jacobsen, 2020). Deze dijk was uitgerust met een groot aantal drukopnemers in het talud waarmee gedurende de proeven de golfdruk op het talud is gemeten (Klein Breteler 2018). Door Klein Breteler (2021) zijn deze proeven gebruikt om te controleren of de golfdruk op het talud met OpenFOAM goed wordt berekend (brekende golven op 1:4 talud). Daarbij zijn dezelfde instellingen gebruikt als voor de huidige berekeningen. Een voorbeeld van de gemeten en berekende drukken is gegeven in Figuur 3.3, namelijk proef T03 met $H_{m0} = 1,03$ m, $T_p = 4,12$ s en waterdiepte van 5,5 m. Van elke golf is de hoogste druk op elke locatie bepaald en vervolgens is van alle golven het gemiddelde van de hoogste één derde deel van de drukken in deze figuur weergegeven. Hierin is te zien dat de orde van grootte van de berekende drukken vrij goed klopt met de

metingen in de Deltagoot. De topwaarde (piekdruk, weergegeven als stijghoogte), die in dit onderzoek gebruikt is, verschilt slechts 15%.

Vanwege de opzet van het huidige onderzoek, waarin de rekenresultaten alleen onderling worden vergeleken, zijn beperkte afwijkingen tussen de werkelijkheid en de rekenresultaten geen bezwaar.

Alle berekeningen zijn uitgevoerd met een celgrootte van $8 \times 8 \text{ cm}^2$, die verfijnd is bij de klei naar $4 \times 4 \text{ cm}^2$. De tijdstap in de berekeningen is in de golfklappen wat kleiner gekozen dan in de rest van de golfcyclus. De tijdstapgrootte varieerde doorgaans tussen 0,2 ms en 3 ms (0,3 tot 5 kHz), zie Figuur 3.4.



Figuur 3.4 Toegepaste tijd stapgrootte in de berekeningen

Zeer kortdurende of zeer lokaal optredende drukpieken zijn eerst uit de resultaten gefilterd, omdat deze het gevolg kunnen zijn van spetters die geen substantiële erosie kunnen veroorzaken. Er is gebruik gemaakt van een voortschrijdend gemiddelde in de tijd over 0,025 s en in de plaats over 12 cm (3 cellen). Er is hiervoor gekozen omdat het de ongewenste piekjes uit het signaal verwijdert, maar de echte golfklappen niet beïnvloedt. Steeds is de grootste druk per locatie per golf geselecteerd.

3.2 Uitgevoerde berekeningen en resultaten

3.2.1 Narekenen van de proeven uit de Deltagoot

Als eerste zijn de relevante proeven uit de Deltagoot nagerekend met OpenFOAM om daarmee de significante stijghoogte (piekdruk) tegen de klei ter plaatse van de klif te verkrijgen. Samen met de gemeten erosiesnelheid is hieruit de relatie bepaald tussen de significante waarde van de grootste stijghoogte per golf op de klif en de erosiesnelheid. De rekenresultaten zijn samengevat in Tabel 3.1.

Gekozen is voor de proeven B2_06 t/m B2_13, omdat er in de proeven B2_01 t/m B2_05 nog een onvoldoende diepe erosiekuil is (fase 1 en overgang naar fase 2). Vanaf proef B2_14 is de erosie in de kruin gekomen en daarom niet meer representatief voor de erosie van een kleitalud.

proef	Metingen in de Deltagoot							Berekend met OpenFOAM		
	h (m)	H _{m0} (m)	T _p (s)	Duur (uur)	Erosie-diepte (m)	Erosie-volume (m ³ /m)	Erosie-snelheid $\partial V_e/\partial t$ (m ³ /m/s)	H _{m0} (m)	T _p (s)	ϕ_s (m)
B2_06	6,40	1,95	5,52	3,00	0,03	0,39	0,40	2,13	5,58	1,50
B2_07	6,40	2,00	5,55	0,75	0,03	0,40	1,08	2,12	5,58	1,23
B2_08	6,40	2,00	5,53	1,00	0,04	0,44	1,58	2,08	5,59	1,46
B2_09	6,40	1,00	3,90	1,50	0,04	0,43	0,13	1,10	4,00	0,53
B2_10	6,40	1,51	4,74	1,50	0,04	0,50	0,68	1,63	4,89	1,15
B2_11	6,40	2,03	5,53	1,10	0,04	0,57	4,17	2,18	5,59	2,16
B2_12	6,40	2,01	5,49	2,00	0,20	0,75	3,24	2,14	5,59	2,17
B2_13	6,40	2,01	5,49	2,00	0,21	0,86	1,94	2,19	5,62	1,90

Tabel 3.1 Doorgerkende proeven met gemeten erosiediepte en erosievolume en de met OpenFOAM berekende stijghoogtepiek tegen de klif

In deze tabel zijn de volgende symbolen gebruikt:

h = waterdiepte (m)

H_{m0} = significante golfhoogte bij de teen van de dijk (m)

T_p = golfperiode bij de piek van het spectrum (s)

$\partial V_e/\partial t$ = erosiesnelheid gedefinieerd als het volume per uur per meter dijk lengte dat geërodeerd is tijdens de proef (m³/m/uur)

ϕ_s = met OpenFOAM berekende significante stijghoogte tegen de klif door de golfklappen (m)

In appendix A zijn de figuren te zien met steeds op het onderste deel de erosiekuil die gebruikt is in de berekening en in het bovenste een figuur met op de verticale as de berekende waarde van de piekdruk (weergegeven als stijghoogte) en op de horizontale as de locatie. Dit is op elke locatie de hoogste waarde in elke golf, en vervolgens het gemiddelde van het hoogste eenderde deel. Zo is voor iedere locatie de significante waarde van de piekdruk bepaald, die omgerekend is naar een stijghoogte:

- Locaties boven SWL: $\phi = \frac{p}{\rho g}$ (1.1)

- Locaties onder SWL: $\phi = \frac{p}{\rho g} + z$ (1.2)

Met:

ϕ = stijghoogte op het kleioppervlak (m)

z = niveau van het kleioppervlak ten opzichte van de stilwaterlijn (m)

p = druk als gevolg van de golven (Pa)

g = versnelling van de zwaartekracht (m/s²)

In de berekeningen met OpenFOAM waren de golfcondities niet exact hetzelfde als tijdens de proeven in de Deltagoot. Hiermee is rekening gehouden bij de analyse van de resultaten, zie hoofdstuk 4.

3.2.2 Berekeningen met diverse waterstanden en golfcondities

Voor het bepalen van de relatie tussen de stijghoogte (piekdruk) tegen de klif en de waterstand en golfhoogte is een serie berekeningen uitgevoerd met het erosieprofiel na proef B2_08 en B2_10. Deze erosieprofielen zijn gekozen omdat ze halverwege het meest relevante deel van het erosieproces zitten. Al deze berekeningen zijn uitgevoerd met een wat lagere

bodemligging, om ervoor te zorgen dat bij grote golven of lagere waterstand de golven niet breken op het voorland.

De resultaten van deze berekeningen zijn weergegeven in Tabel 3.2. In deze tabel is h de waterstand ten opzichte van het bodemniveau in de Deltagoot (referentieniveau RN), terwijl deze berekeningen zijn uitgevoerd met een bodemniveau op 2,25 m hieronder (RN-2,25 m). Dit is gedaan om te zorgen dat bij grotere golfhoogte of lagere waterstand de golven niet gaan breken door de beperkte waterdiepte.

ID	h (m)	H_{m0} (m)	T_p (s)	ϕ_s (m)
B2_08_h01	6,40	1,69	4,71	0,83
B2_08_h02	6,40	2,01	5,26	1,10
B2_08_h03	6,40	2,24	5,52	1,19
B2_08_h04	6,40	2,50	5,77	1,53
B2_08_h05	6,40	2,63	6,25	1,57
B2_08_w01	4,90	2,23	5,56	1,53
B2_08_w02	5,40	2,16	5,54	1,89
B2_08_w03	5,90	2,26	5,56	1,50
B2_08_w05	6,90	2,20	5,56	1,05
B2_10_h01	6,40	1,71	4,56	1,05
B2_10_h02	6,40	1,98	5,23	1,26
B2_10_h03	6,40	2,26	5,55	1,22
B2_10_h05	6,40	2,64	6,25	2,11
B2_10_w01	4,90	2,23	5,56	1,06
B2_10_w02	5,40	2,15	5,42	1,91
B2_10_w03	5,90	2,30	5,56	1,94
B2_10_w05	6,90	2,20	5,56	2,14

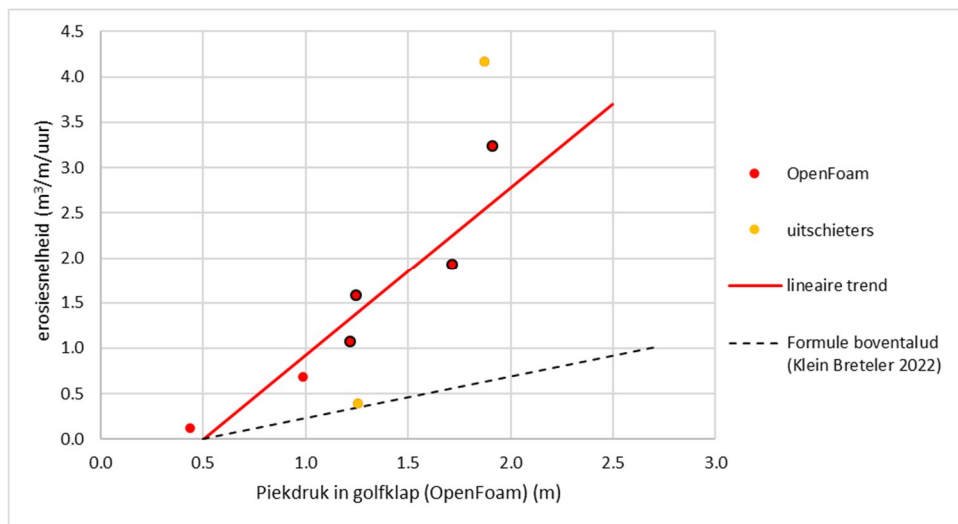
Tabel 3.2 Resultaten van de berekeningen met OpenFOAM met diverse waterstanden en golfcondities

In de figuren van de resultaten in appendix A is te zien dat de maximale significante stijghoogte niet altijd op de klif optreedt. Soms is de waterstand daarvoor te hoog en komt de grootste belasting boven de erosiekuil terecht. In Tabel 3.2 is steeds de grootste waarde tegen de klif gegeven, omdat bij de klif de meeste erosie optreedt. Op het nog onbeschadigde talud zal namelijk eerste fase 1 van het erosieproces gaan optreden, waarbij de erosie nog vrij traag verloopt.

4 Analyse van de resultaten

4.1 Relatie tussen de stijghoogte tegen de klif en de erosiesnelheid

Door de proeven in de Deltagoot na te rekenen met OpenFOAM is het mogelijk om de relatie te leggen tussen de gemeten erosiesnelheid van de klei in de Deltagoot en de berekende stijghoogte (piekdruk) tegen de klif uit de OpenFOAM berekeningen. Deze relatie is te zien in Figuur 4.1, waar de resultaten van de berekeningen (significante waarde van maximale stijghoogte per golf) zijn uitgezet tegen de gemeten erosiesnelheid (erosievolume per uur per meter dijk).



Figuur 4.1, Gemeten erosiesnelheid als functie van de met OpenFOAM berekende significante stijghoogte tegen de klif (punten met een zwart randje hebben een grotere nauwkeurigheid dan die zonder zwart randje)

In deze figuur is te zien dat wanneer de berekende piekdruk groter is, ook de gemeten erosiesnelheid groter is, hoewel er een vrij grote spreiding aanwezig is. Niet alle berekeningen zijn echter even nauwkeurig. Bij sommige proeven is zowel een berekening gemaakt met het erosieprofiel aan het begin van de proef als aan het eind van de proef (de paren B2_06&B2_07, B2_07&B2_08, B2_11&B2_12 en B2_12&B2_13, zie Tabel 3.1). In dat geval zal de gemiddelde waarden van de berekende significante piekdruk een betere weergave zijn van de werkelijke belasting. Deze punten zijn in de figuur met een zwart randje om het rode punt weergegeven. Hieruit blijkt dat de grootste uitschieters inderdaad de wat minder nauwkeurige berekeningen zijn (de oranje punten).

Als de grootste uitschieters naar boven en naar beneden worden weggelaten (oranje punten), zien we de volgende relatie tussen de piekdruk en de erosiesnelheid:

$$\frac{\delta V_e}{\delta t} = 1,85(\phi_s - 0,5) \quad (1.3)$$

Er is hier gekozen voor een rechte lijn omdat door Klein Breteler (2022) ook een rechte lijn is gebruikt voor een vergelijkbaar onderzoek naar de erosiesnelheid van een kleibekleding met gras met golven van $H_{m0} = 2$ m. Dat onderzoek kent drie verschillen ten opzichte van het huidige onderzoek: de taludhelling was veel steiler (1:4 en 1:5), er was alleen een kleibekleding met gras op het boventalud en deze klei was van betere kwaliteit. Desondanks is het zinnig om deze twee onderzoeken onderling te vergelijken. Door ook nu een rechte lijn aan te houden voor het verband tussen ϕ_s en de erosiesnelheid, sluiten deze onderzoeken goed op elkaar

aan. De lijn van Klein Breteler (2022), die gebaseerd is op proeven met alleen een kleibekleding met gras op het boventalud van de Lauwersmeerdijk en van Blija, is ook in de figuur getekend (stippellijn). Duidelijk is te zien dat deze lijn iets lager ligt. Niet getekend is het resultaat met de klei van Holwerd, dat een nog lager liggende lijn heeft (nog langzamer erodeerde). Naar verwachting is het steile verloop van de lijn in het huidige onderzoek het gevolg van het feit dat de Dollardklei vrij makkelijk erodeerde (zie Van Steijn e.a. 2021).

4.2 Invloed van de waterstand op de erosiesnelheid

Bij twee representatieve erosieprofielen is de invloed van de waterstand op de grootte van de stijghoogte in de golfklap tegen de klif (ϕ_s) berekend met OpenFOAM. Omdat het met name om de waterstand ten opzichte van de locatie van de klif gaat, is de volgende dimensieloze parameter gebruikt:

$$\frac{h - z_{klif}}{H_{m0}} \quad (1.4)$$

Met:

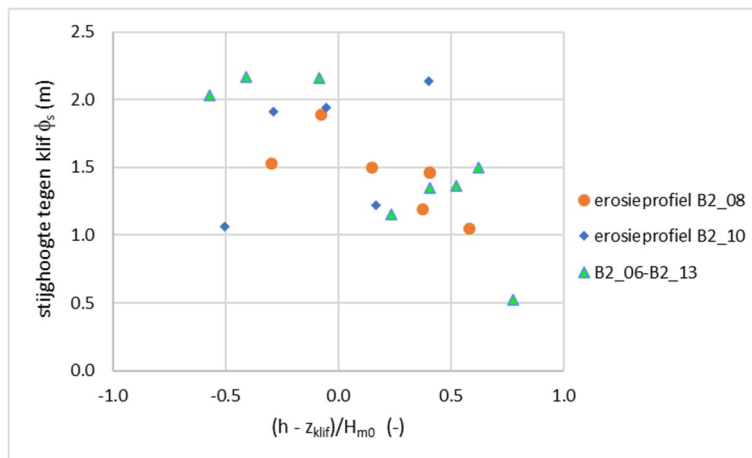
h = waterniveau (m)

z_{klif} = niveau van de bovenrand van de klif (m)

H_{m0} = significante golfhoogte in de OpenFOAM berekeningen (m)

Hier is gebruik gemaakt van de bovenrand van de klif, omdat deze bepalend is of de golven nog een golfklap geven tegen de klif bij relatief hoge waterstanden. Het is de verwachting dat er bij een zeer lage waterstand ten opzichte van het klifniveau, een relatief kleine waarde van ϕ_s wordt berekend. Anderzijds is het de verwachting dat een zeer hoge waterstand, ruim boven het niveau van de klif, ook een relatief lage waarde van ϕ_s geeft.

De resultaten van de berekeningen zijn gegeven in Figuur 4.2.



Figuur 4.2, Relatie tussen de waterstand ten opzichte van de klif en de met OpenFOAM berekende stijghoogte tegen de klif

In deze figuur valt het op dat er een erg grote spreiding is in de rekenresultaten. Er is in de puntenwolk wel een tendens te zien dat een hogere waterstand een lagere waarde van ϕ_s geeft, maar erg duidelijk is deze trend niet. Een afnemende trend bij lagere waterstanden is niet te zien. Kennelijk is er geen scherpe grens te trekken vanaf welke waterstand de golfklappen niet meer op de klif terechtkomen.

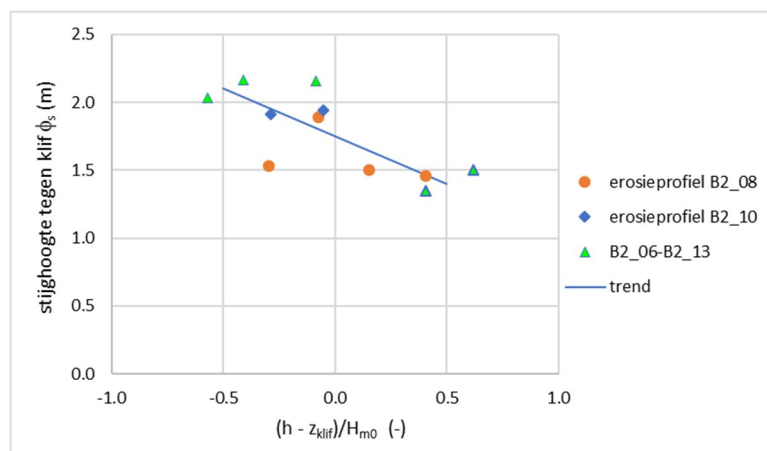
Om toch een relatie te kunnen vaststellen, zijn de proeven geselecteerd waarbij de grootste stijghoogte is vastgesteld ter plaatse van de klif. Deze rekenresultaten lijken qua resultaat het beste op de berekeningen uit de vorige paragraaf. In Figuur 4.3 zijn deze punten te zien.

Deze berekeningen laten zien dat er binnen het bereik van deze variatie in waterstand er een licht dalende trend is bij het stijgen van de waterstand ten opzichte van de kliflocatie:

$$\phi_s = 1,75 - 0,70 \cdot \frac{h - z_{klif}}{H_{m0}} \quad (1.5)$$

Deze trend is ook te verwachten in de erosiesnelheid. Toch wordt hier in de formules geen rekening mee gehouden, want het is de verwachting dat de waterstand in werkelijkheid heel geleidelijk verandert en de kliflocatie ruim de tijd heeft om mee schuiven. Bij het stijgen van de waterstand door het getij en het toenemen van de stormopzet, neemt ook de erosie toe en zal de klif dus naar boven migreren. Daardoor is het te verwachten dat de erosiesnelheid in de praktijk nauwelijks beïnvloed wordt door de waterstand.

Anderzijds zal de klif tijdens de storm naar boven migreren en gaat de waterstand na het bereiken van de hoogste waarde weer zakken. Vanaf dat moment zal de afstand tussen de waterstand en de kliflocatie steeds groter worden (de waarde van $(h - z_{klif})/H_{m0}$ wordt steeds negatiever). Dat zal naar verwachting een afname van de piekdruk ϕ_s geven, maar deze is in deze set berekeningen niet gekwantificeerd. Door hier geen rekening mee te houden, verkrijgen we een conservatief (veilig) resultaat.



Figuur 4.3, Relatie tussen de waterstand ten opzichte van de klif en de met OpenFOAM berekende stijghoogte tegen de klif voor de geselecteerde berekeningen

4.3 Invloed van de golfhoogte op de erosiesnelheid

Voor het berekenen van de invloed van de golfhoogte op de erosiesnelheid zijn de berekende stijghoogtes eerst omgerekend naar erosiesnelheden met behulp van formule (1.3). Het resultaat is te zien in Figuur 4.4.

In deze figuur zijn de punten te zien die berekend zijn met OpenFOAM (oranje en blauw), die de trend tonen in het verband tussen de erosiesnelheid en de significante golfhoogte. Bovendien zijn de metingen uit de Deltagoot gegeven (driehoeken) met de drie verschillende golfhoogtes die daar zijn toegepast. De driehoek bij $H_{m0} = 2,0$ m is de gemiddelde erosiesnelheid gedurende de proeven B2_06 t/m B2_08 en B2_11 t/m B2_13.

Door al deze punten is vervolgens de rode lijn gefit. Deze lijn is getekend met de door Van Steijn e.a. (2021) aangepaste formule van Mourik (2020):

- Als $H_{m0} > 0,4$ m:

$$\frac{\partial V_e}{\partial t} = c_e \cdot \left[1,32 - 0,079 \cdot \frac{V_e}{H_{m0}^2} \right] \cdot \left[4,1 \cdot \tan \alpha \right] \cdot \left[\min \left(3,6 ; \frac{0,0061}{s_{op}^{1,5}} \right) \right] \cdot \left[1,7 \cdot (H_{m0} - 0,4)^2 \right] \quad (1.6)$$

- Als $H_{m0} \leq 0.4$ m:

$$\frac{\partial V_e}{\partial t} = 0 \quad (1.7)$$

Met:

$\partial V_e / \partial t$ = erosiesnelheid = toename erosievolume per strekkende meter dijk per uur ($m^3/m/h$)

V_e = erosievolume per strekkende meter dijk (m^3/m)

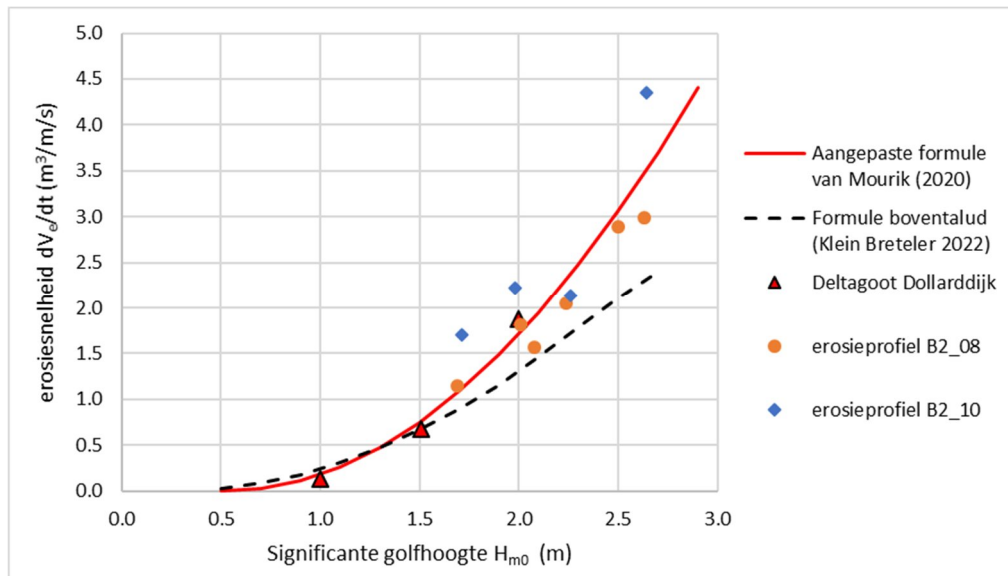
c_e = erosiecoëfficiënt (-)

H_{m0} = significante golfhoogte gebaseerd op het golfspectrum (m)

$s_{op} = H_{m0} / (gT_p^2 / (2\pi))$ = golfsteilheid gebaseerd op de significante golfhoogte en piekperiode bij de teen van de dijk (-)

T_p = golfperiode bij de piek van spectrum (s)

α = taludhelling dijk ($^\circ$)



Figuur 4.4, Relatie tussen de significante golfhoogte en de erosiesnelheid

De rode lijn in Figuur 4.4 is getekend met de volgende parameterwaarden in de formule:

- $c_e = 0,95$
- $V_e = 6$ à 9 m^3/m (schatting, met wat grotere V_e bij een grotere golfhoogte omdat er dan waarschijnlijk meer erosie is tijdens de hydraulische belasting; deze waarde heeft betrekkelijk weinig invloed op de ligging van de lijn)
- $s_{op} = 0,047$ (gemiddelde van de OpenFOAM berekeningen)
- $\tan\alpha = 1/7$

De zwarte gestippelde lijn in de figuur is getekend met de formule van Klein Breteler (2022) voor kleibekleding met gras op het boventalud van Waddenzeedijken. Dat deze lijn iets lager ligt, komt omdat de klei van iets betere kwaliteit was en omdat de golfklapzone beschermd werd door een harde bekleding. In de formule is een taludhelling van 1:7 gebruikt, terwijl de formule daar eigenlijk niet geschikt voor is.

Uit bovenstaande analyse blijkt dat de door Van Steijn e.a. (2021) aangepaste formule van Mourik (2020) goed aansluit op de huidige OpenFOAM berekeningen en derhalve gebruikt kan worden voor het ontwerp van de Brede Groene Dijk.

Daarnaast geven de punten ten opzichte van de lijn ook een indruk van de onzekerheid omtrent de formule. Deze onzekerheid kan in de vorm van een spreiding in de modelcoëfficiënt worden meegenomen in de probabilistische berekeningen. Omdat er probabilistische berekeningen gaan worden uitgevoerd met deze formule, is het niet aan te bevelen om een veilige waarde

aan te houden ten opzichte van de punten, maar moet er een gemiddelde en spreiding in de berekeningen gebruikt worden.

De spreiding van de punten ten opzichte van de lijn is $\sigma = 0,22$ (bij $\mu = 1,0$).

Dat de blauwe punten gemiddeld iets hoger liggen dan de oranje punten is ook een vorm van spreiding. Dit wordt veroorzaakt door de vorm van het erosieprofiel dat gebruikt is in de OpenFoam berekeningen. Door kleine verschillen in de vorm ontstaan er ook kleine verschillen in de rekenresultaten.

5 Conclusies

In de Deltagoot van Deltares is in 2021 de erosiesnelheid bepaald van klei uit de kleirijperij, van de huidige Dollarddijk en van de Groene dijk bij Blija in Friesland. Als vervolg op dat onderzoek zijn in de onderhavige rapportage berekeningen beschreven met het numerieke rekenmodel OpenFOAM. Het aantal proeven in de Deltagoot was namelijk vrij beperkt, maar door daarbij ook numerieke berekeningen uit te voeren, is het toepassingsbereik van de proefresultaten verbreed.

Met OpenFOAM is de invloed berekend van de waterstand en de golfhoogte op de grootte van de erosiesnelheid. Het is gebleken dat wanneer de waterstand relatief hoog is ten opzichte van de erosiekuil, de erosiesnelheid afneemt met toenemende waterstand. Aanbevolen wordt echter deze afname niet te verdisconteren in de formules, omdat in werkelijkheid de waterstand tijdens extreme storm zo langzaam stijgt dat de erosiekuil met de waterstandstijging naar boven migreert en daardoor steeds in de golfklapzone blijft.

Daarnaast is er een afname van de erosiesnelheid te verwachten bij afnemende waterstand na de top van de storm, zeker als de klif al een heel eind richting de kruin is gemigreerd. Die afname is echter niet gekwantificeerd met de huidige berekeningen. Door hier geen rekening mee te houden in de formules, wordt er een conservatief (veilig) resultaat verkregen.

Verder is vastgesteld dat de door Van Steijn e.a. (2021) aangepaste formule van Mourik (2020) goed aansluit op de huidige OpenFOAM berekeningen en derhalve gebruikt kan worden voor het ontwerp van de Brede Groene Dijk:

- Als $H_{m0} > 0.4$ m:

$$\frac{\partial V_e}{\partial t} = c_e \cdot \left[1,32 - 0,079 \cdot \frac{V_e}{H_{m0}^2} \right] \cdot [4,1 \cdot \tan \alpha] \cdot \left[\min \left(3,6 ; \frac{0,0061}{S_{op}^{1,5}} \right) \right] \cdot [1,7 \cdot (H_{m0} - 0,4)^2] \quad (1.8)$$

- Als $H_{m0} \leq 0.4$ m:

$$\frac{\partial V_e}{\partial t} = 0 \quad (1.9)$$

Met:

$\partial V_e / \partial t$ = erosiesnelheid = toename erosievolume per strekkende meter dijk per uur ($m^3/m/h$)

V_e = erosievolume per strekkende meter dijk (m^3/m)

c_e = erosiecoëfficiënt (-)

H_{m0} = significante golfhoogte gebaseerd op het golfspectrum (m)

$s_{op} = H_{m0} / (g T_p^2 / (2\pi))$ = golfsteilheid gebaseerd op de significante golfhoogte en piekperiode bij de teen van de dijk (-)

T_p = golfperiode bij de piek van spectrum (s)

α = taludhelling dijk ($^\circ$)

Bij een erosiecoëfficiënt $c_e = 0,95$ sluit de formule goed aan op de metingen in de Deltagoot en de berekeningen met OpenFOAM voor de klei van de huidige Dollarddijk. Door Van Steijn (2021) was echter al vastgesteld dat deze klei een slechtere kwaliteit heeft dan wat mogelijk is met de klei uit de kleirijperij. Daarom kan voor het ontwerp van de Brede Groene Dijk waarschijnlijk gerekend worden met een iets kleinere waarde van de erosiecoëfficiënt. Mede kijkend naar de gemeten erosiesnelheid bij de andere onderzochte kleisoorten, is in overleg gekozen voor een waarde van 0,8.

Referenties

- Bingham, H.B., and H. Zhang (2007)
On the accuracy of finite difference solutions for nonlinear water waves
J. Eng. Math. 58 (2007) 211–228]
- Engsig-Karup, A.P., H.B. Bingham and O. Lindberg (2008)
An efficient flexible-order model for 3D nonlinear water waves
Journal of Computational Physics 228 (2009) 2100–2118
- Jacobsen, N.G., D.R. Fuhrman and J. Fredsøe (2011)
A wave generation toolbox for the open-source CFD library: OpenFOAM
International Journal For Numerical Methods In Fluids, DOI: 10.1002/flid.2726, 2011
- Jacobsen, N.G., M.R.A. van Gent, A. Capel and M. Borsboom (2018)
Numerical prediction of integrated wave loads on crest walls on top of rubble mound structures
Coastal Engineering 142 (2018) 110–124
- Klein Breteler, M., A. Capel, G.A.M. Kruse, G.C. Mourik en D. Kaste (2012)
Erosie van een dijk na bezwijken van de steenzetting door golven
SBW reststerkte; analyse Deltagootproeven
Deltares, rapport 1204200-008, 18 mei 2012
- Klein Breteler, M. (2018)
Stabiliteit van oud asfalt tijdens golfbelasting
Meetrapport van Deltagootonderzoek met asfalt van Lauwersmeerdijk
Deltares, rapport 11200296-009, 7 maart 2018
- Klein Breteler, M. (2021)
Erosie van kleibekleding met gras op boventalud van Waddenzeedijken
Meetverslag Deltagootproeven
Deltares, rapport 11204841-006, 27 augustus 2021
- Klein Breteler (2022)
Erosie van kleibekleding met gras op boventalud van Waddenzeedijken
Analyse van de Deltagootproeven en berekeningen met OpenFoam
Deltares, rapport 11204841-006, 14 januari 2022
- Larsen, B.E., and D. R. Fuhrman (2018)
On the over-production of turbulence beneath surface waves in RANS models
Journal of Fluid Mechanics, 2018
- Mourik, G.C. (2020)
Prediction of the erosion velocity of a slope of clay due to wave attack
WTI-2017 Product 5.21
Deltares, report 1209437-017, 20 July 2020
- Smale, A.J., and N.G. Jacobsen (2020)
Validation of OceanWave3D and OpenFOAM, Wave runup on slopes
Deltares, report 11203719-007, February 13, 2020

Steijn, P. van, en M. Klein Breteler (2021)
Onderzoek Geschiktheid Deltaklei in kader van demonstratieproject Brede Groene Dijk
Stap 9: Meting erosiebestendigheid deltaklei met Deltagootproeven
Deltares, rapport 11206194-002, 5 oktober 2021

TAW (1996). Technisch rapport klei voor dijken. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, mei 1996.

A Resultaten van de berekeningen met OpenFOAM

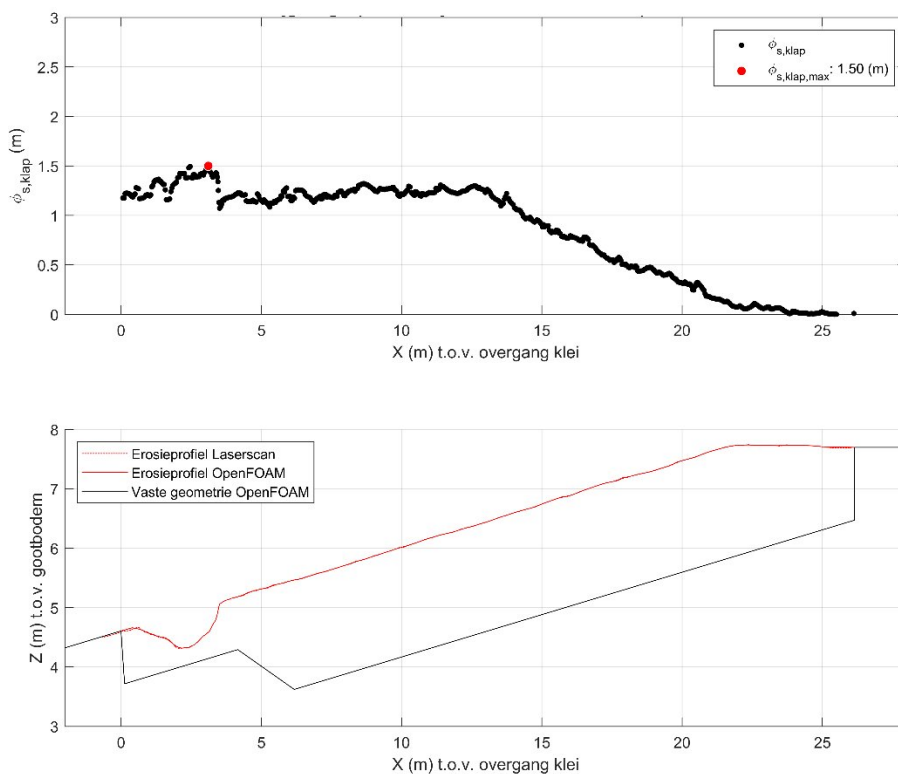


Fig. A-1, Resultaat berekeningen met OpenFOAM met erosieprofiel van proef B2_06

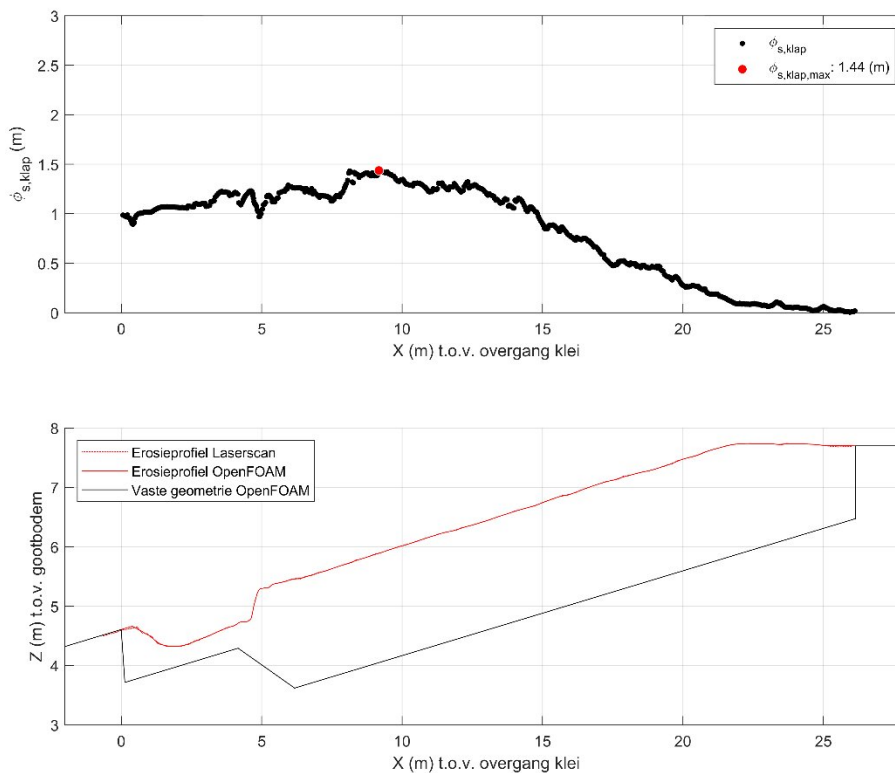


Fig. A-2, Resultaat berekeningen met OpenFOAM met erosieprofiel van proef B2_07

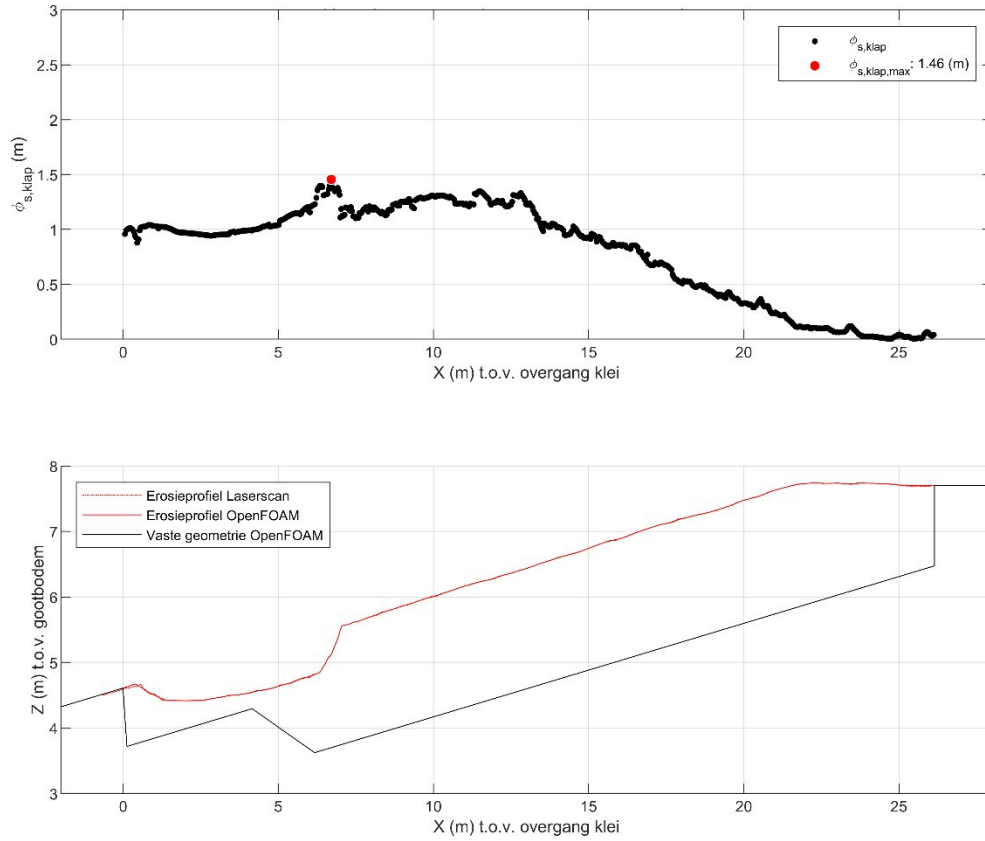


Fig. A-3, Resultaat berekeningen met OpenFOAM met erosieprofiel van proef B2_08

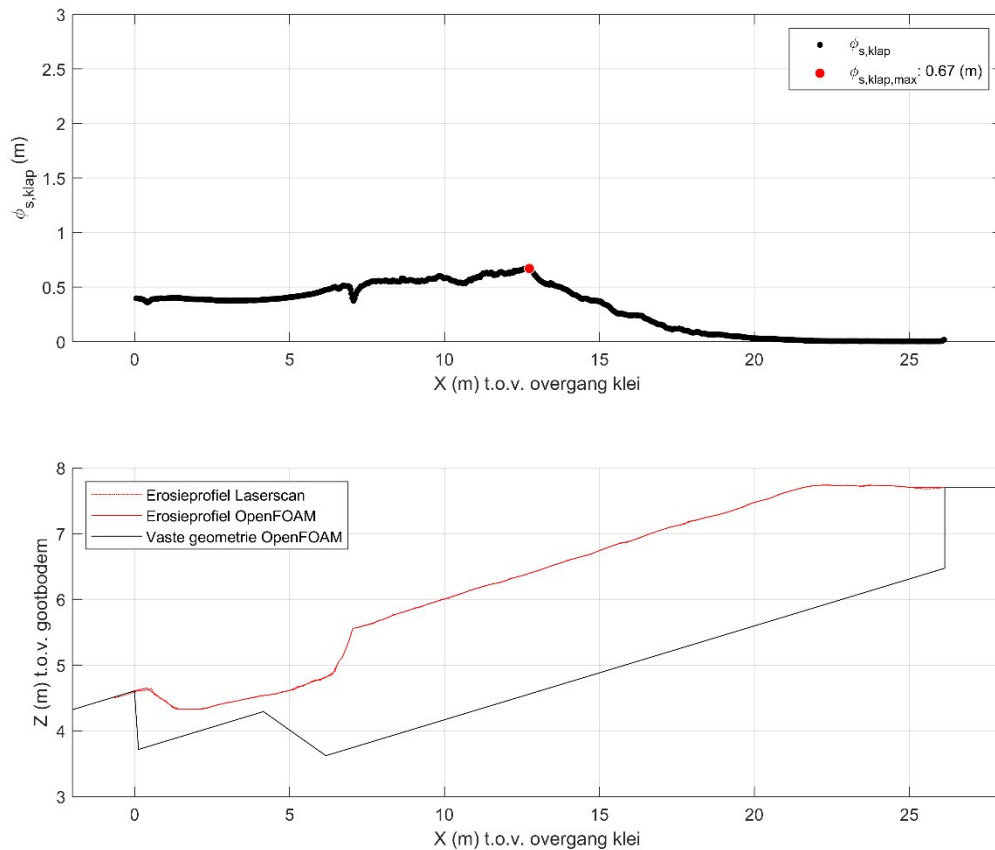


Fig. A-4, Resultaat berekeningen met OpenFOAM met erosieprofiel van proef B2_09

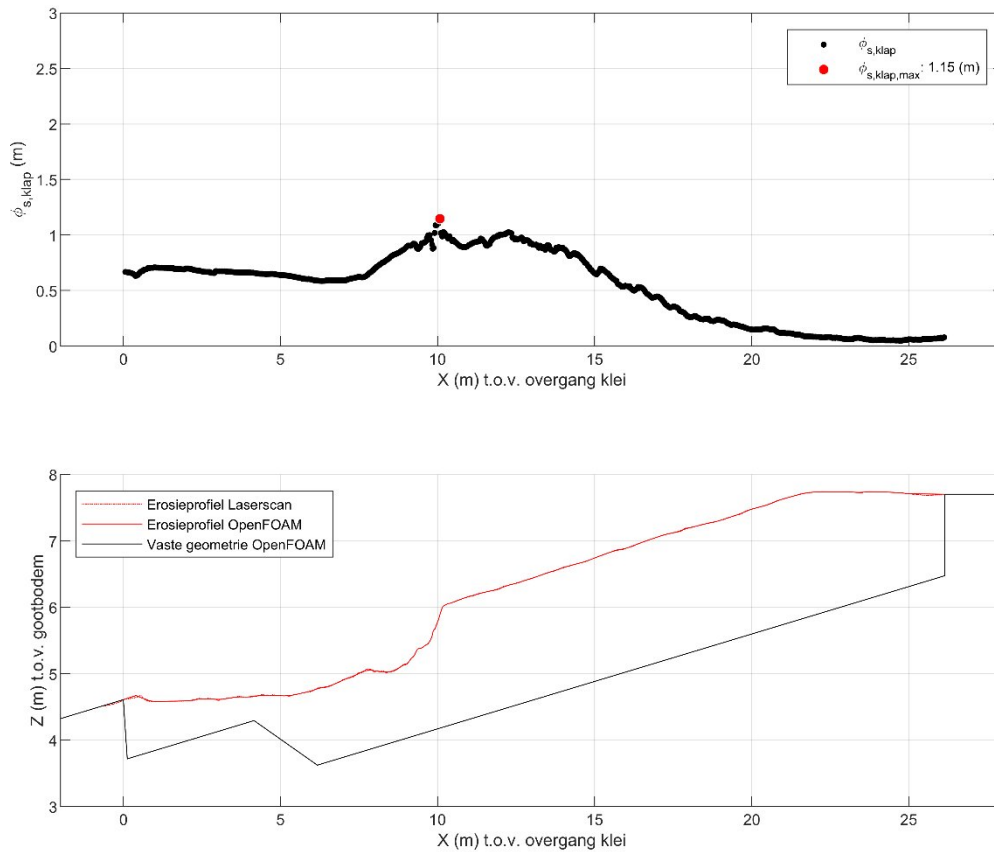


Fig. A-5, Resultaat berekeningen met OpenFOAM met erosieprofiel van proef B2_10

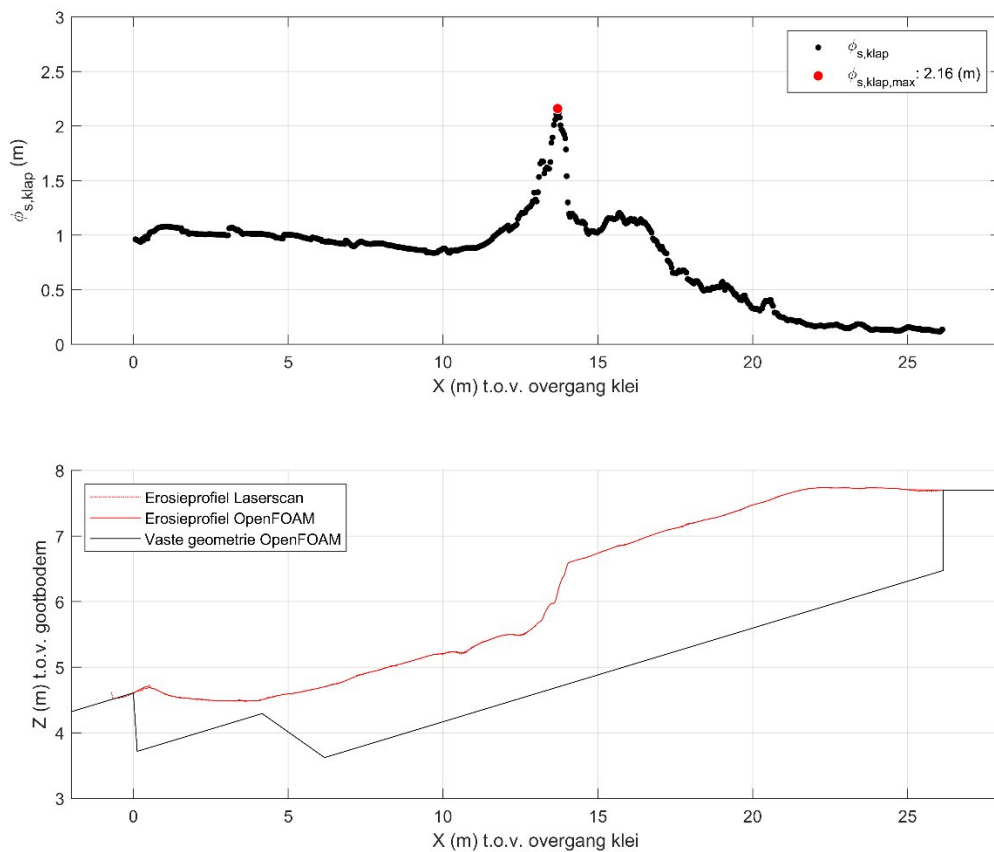


Fig. A-6, Resultaat berekeningen met OpenFOAM met erosieprofiel van proef B2_11

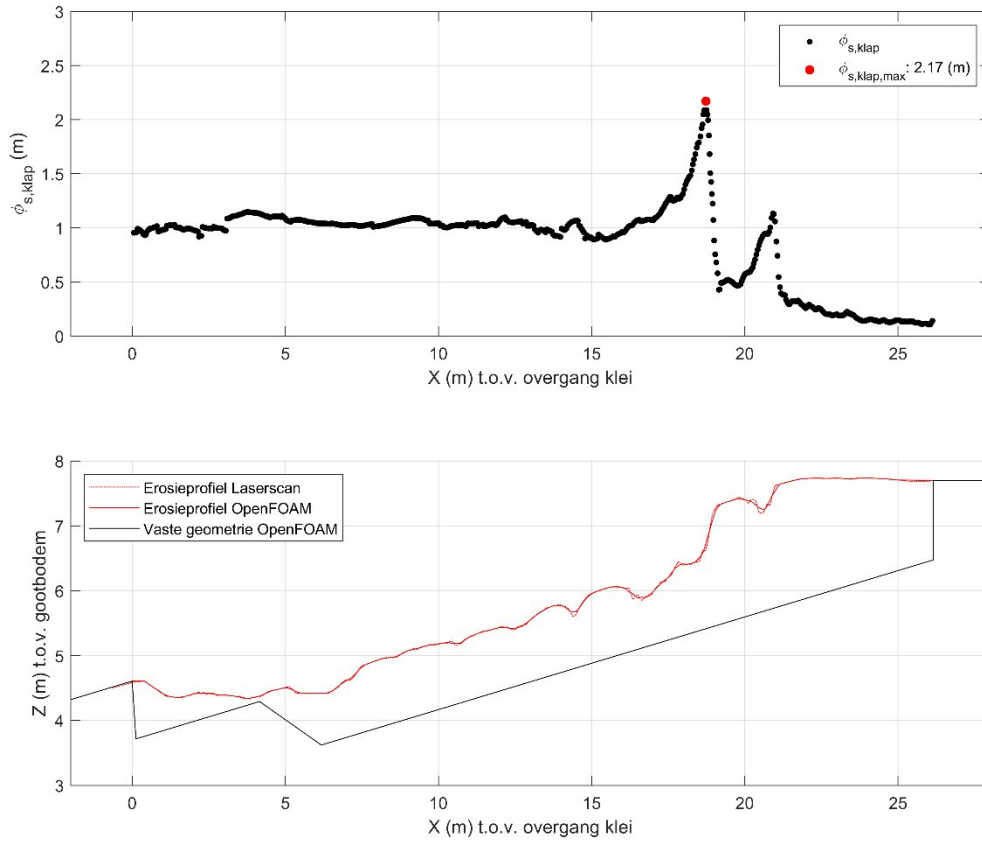


Fig. A-7, Resultaat berekeningen met OpenFOAM met erosieprofiel van proef B2_12

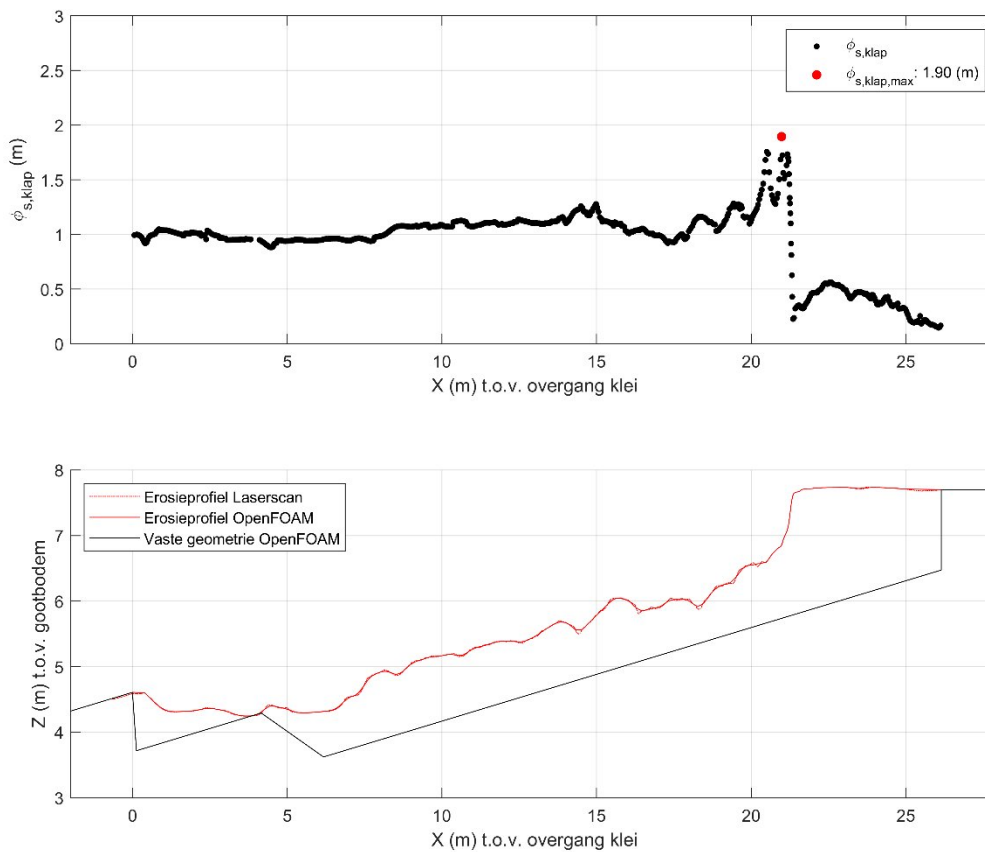


Fig. A-8, Resultaat berekeningen met OpenFOAM met erosieprofiel van proef B2_13

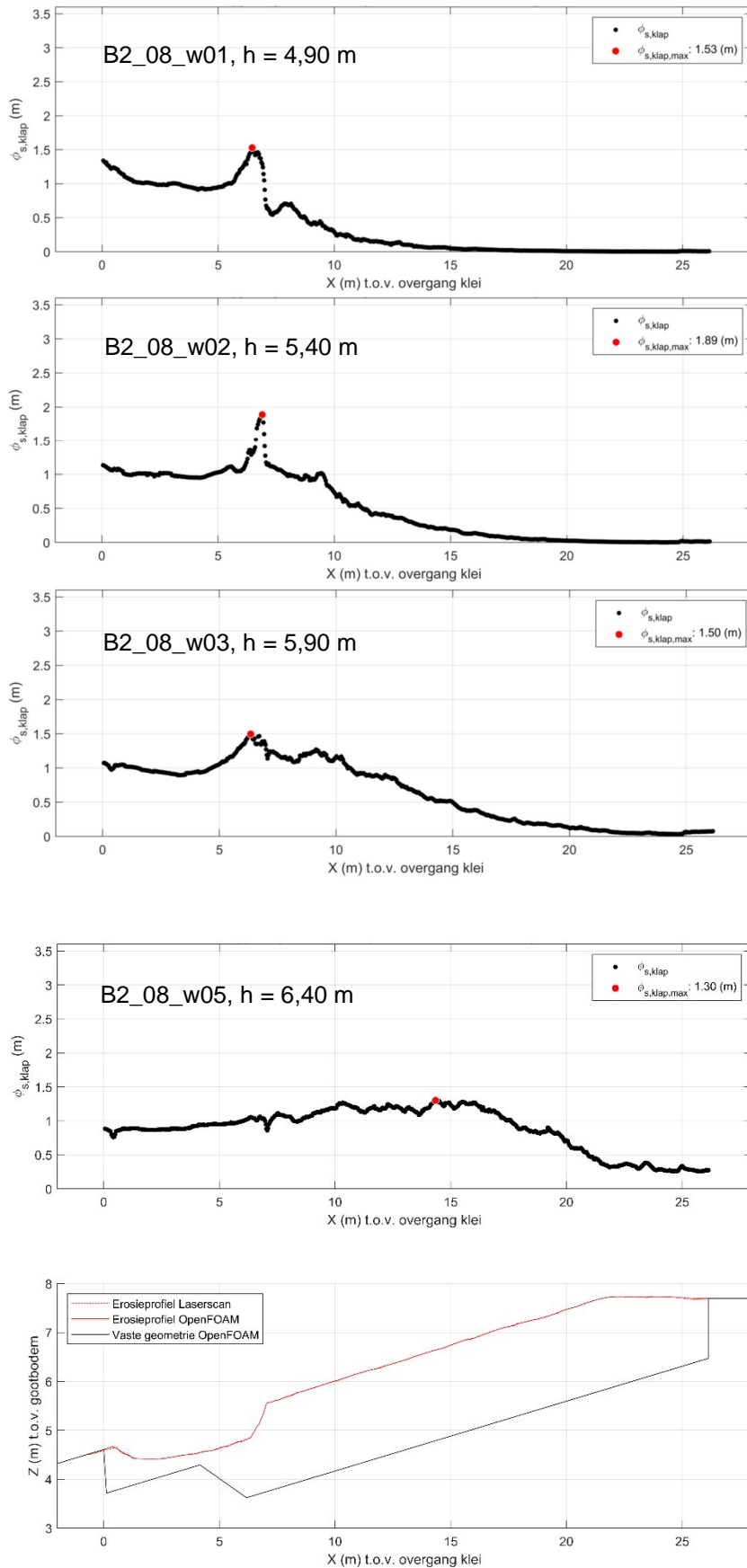


Fig. A-9, Resultaat van de OpenFOAM berekeningen met een waterstandvariatie met profiel van B2_08

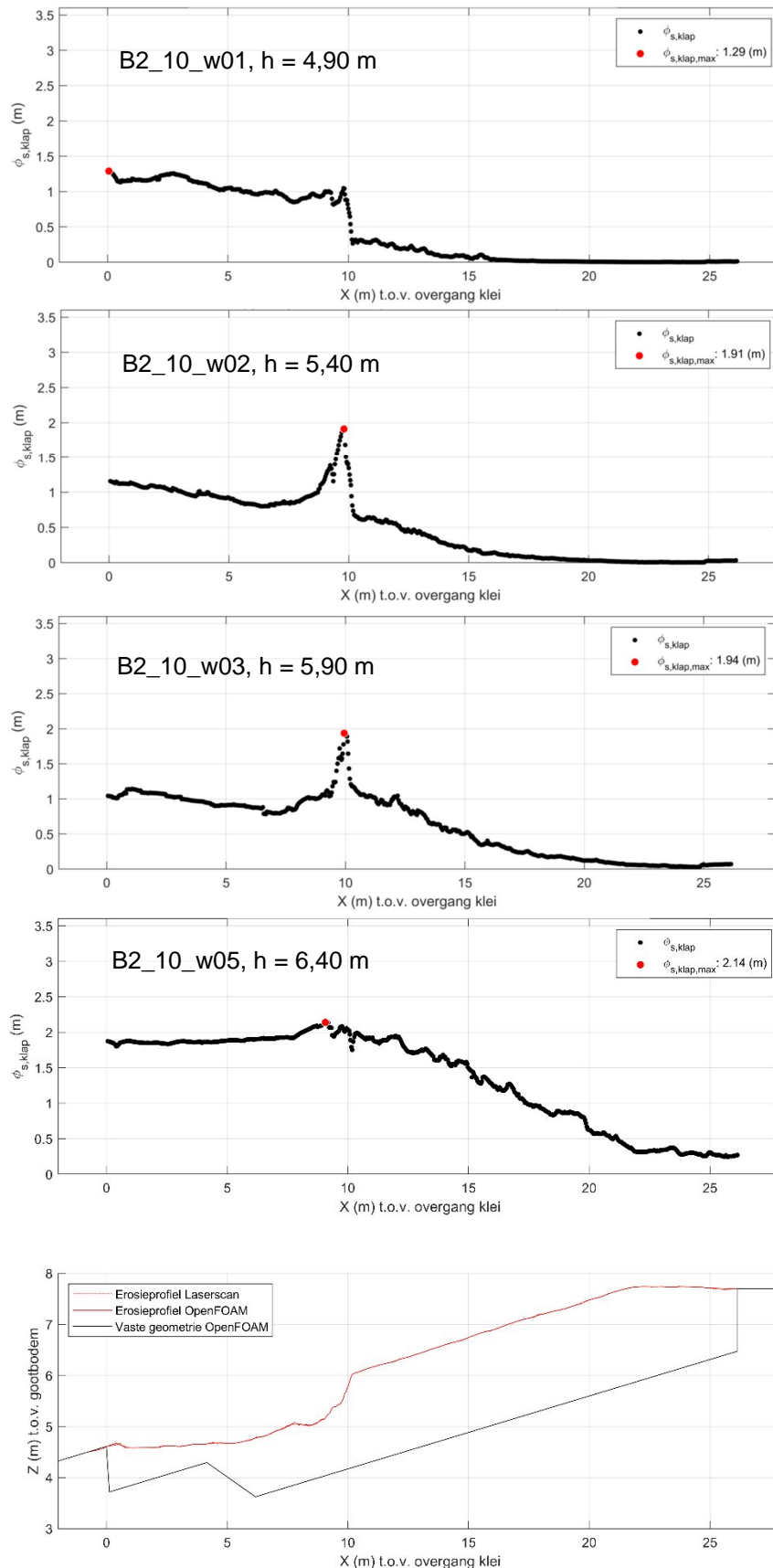


Fig. A-10, Resultaat van de OpenFOAM berekeningen met een waterstandvariatie met profiel van B2_10

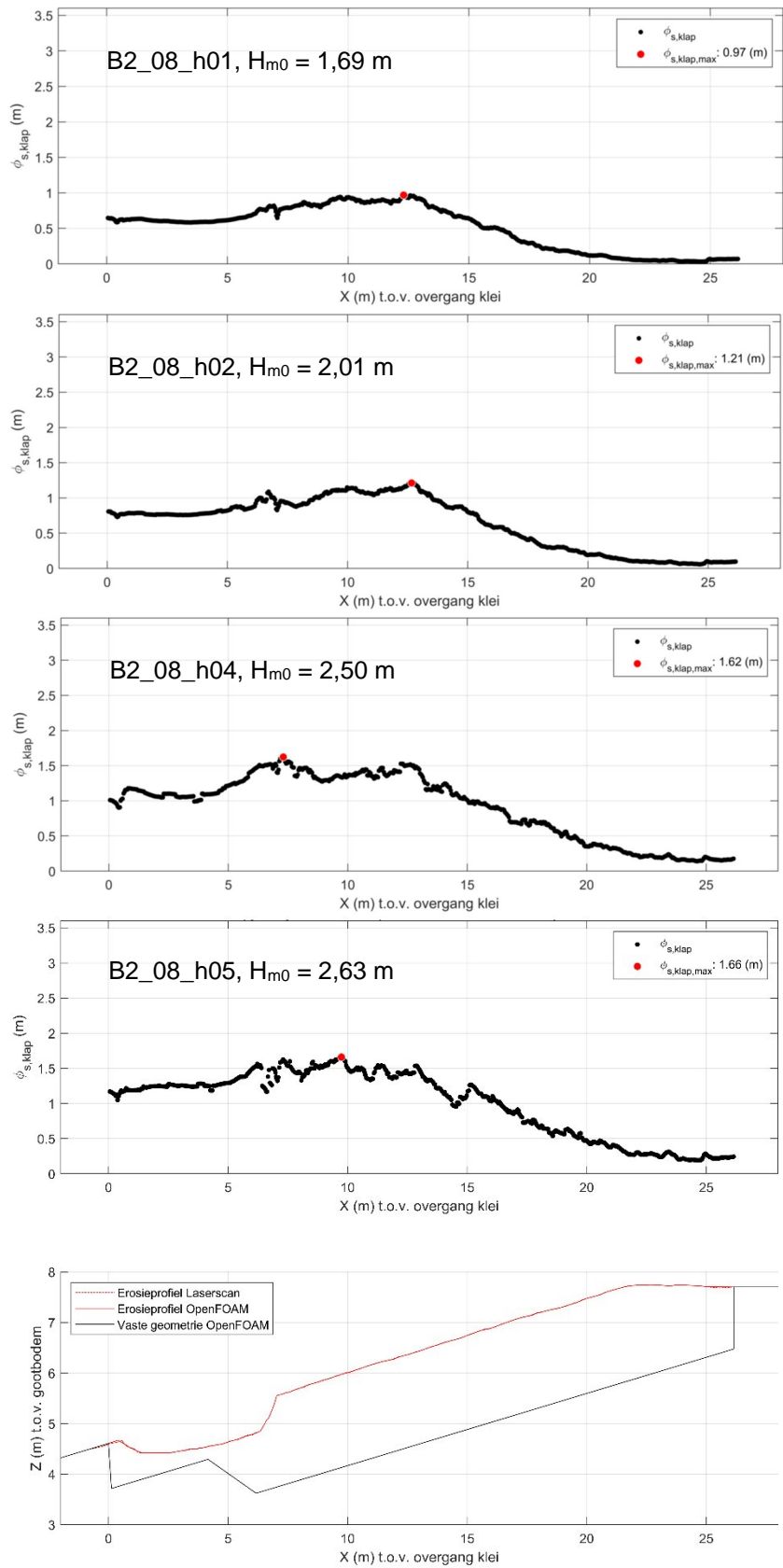


Fig. A-11, Resultaat van de OpenFOAM berekeningen met een golfhoogtevariatie met profiel van B2_08

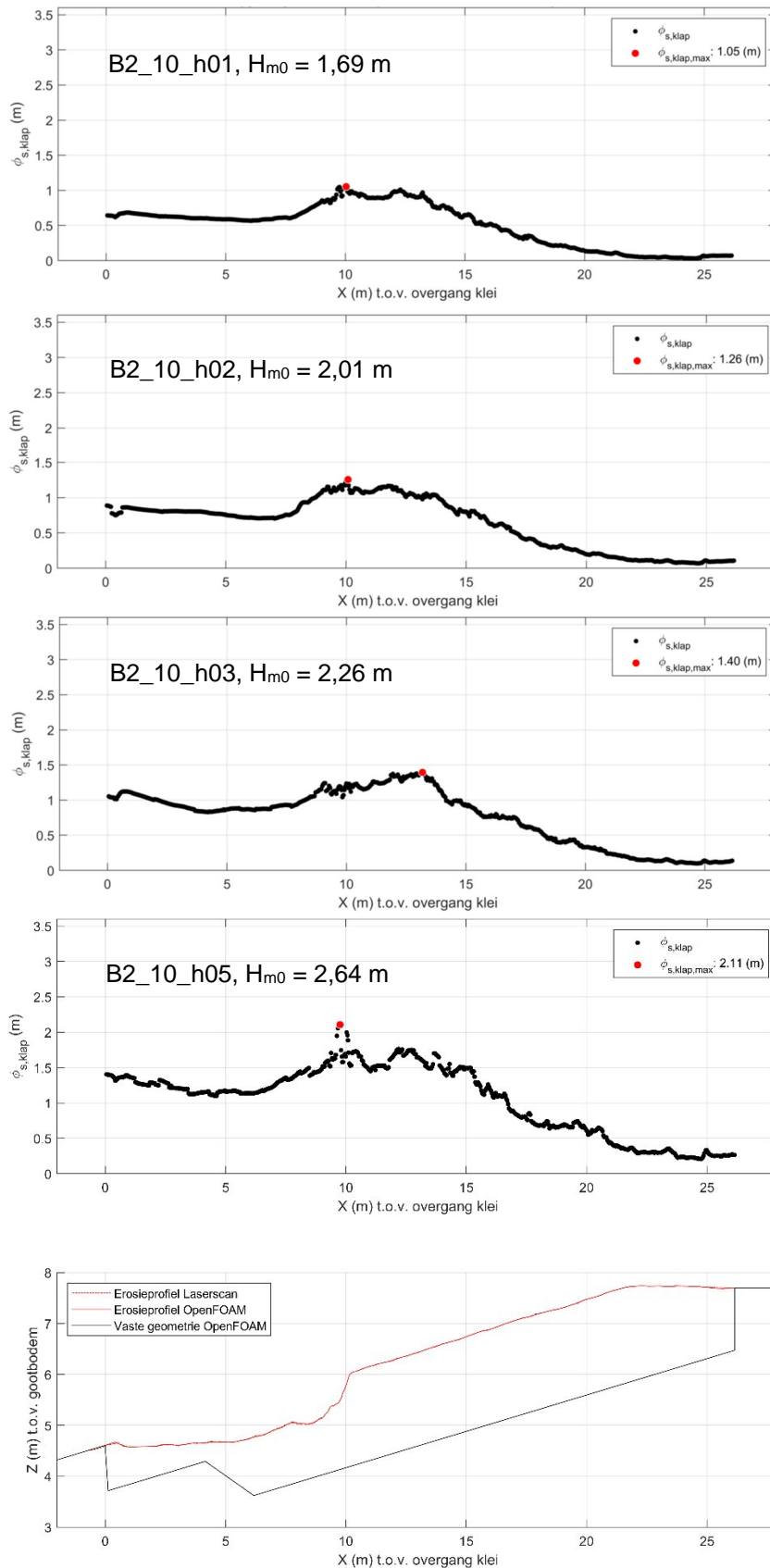


Fig. A-12, Resultaat van de OpenFOAM berekeningen met een golfhoogtevariatie met profiel van B2_10



Deltares

www.deltares.nl