



**Vlaanderen**  
is wetenschap

15\_073\_1  
WL rapporten

## Gereduceerd getijdegebied Doelpolder

Schaalmodelproeven  
gecombineerde in- en uitwateringsconstructie

DEPARTEMENT  
MOBILITEIT &  
OPENBARE  
WERKEN

[waterbouwkundiglaboratorium.be](http://waterbouwkundiglaboratorium.be)

# Gereduceerd getijdegebied Doelpolder

## Schaalmodelproeven gecombineerde in- en uitwateringsconstructie

Vercruysse, J.; Visser, K.P.; Peeters, P.; Mostaert, F.



#### Juridische kennisgeving

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

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

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

#### Copyright en wijze van citeren

© Vlaamse overheid, Departement Mobiliteit en Openbare Werken, Waterbouwkundig Laboratorium 2016  
D/2016/3241/287

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

**Vercruyse, J.; Visser, K.P.; Peeters, P.; Mostaert, F.** (2016). Gereduceerd getijdegebied Doelpolder: Schaalmodelproeven gecombineerde in- en uitwateringsconstructie. Versie 4.0. WL Rapporten, 15\_073\_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

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

#### Documentidentificatie


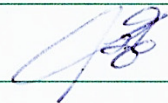
Opdrachtgever:	Afdeling ZeeSchelde WenZ NV	Ref.:	WL2016R15_073_1
Keywords (3-5):	Sigmaplan, Controlled Reduced Tide (CRT), Inlet sluice, Stilling basin		
Tekst (p.):	37	Bijlagen (p.):	19
Vertrouwelijk:	<input checked="" type="checkbox"/> Nee	<input checked="" type="checkbox"/> Online beschikbaar	

Auteur(s):	Vercruyse, J.
------------	---------------

#### Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Visser, K. P.	
Projectleider:	Vercruyse, J.	

#### Goedkeuring

Coördinator onderzoeksgroep:	Peeters, P.	
Afdelingshoofd:	Mostaert, F.	



## Abstract

In kader van het ontwerp van de gecombineerde in- en uitwateringsconstructie voor het GGG Doelpolder vraagt afdeling Zeeschelde van Waterwegen en Zeekanaal NV (W&Z) advies aan het Waterbouwkundig Laboratorium (WL). Het WL heeft in 2014-2015 voor deze constructie reeds een desktop revisie uitgevoerd. Uit deze revisie volgde dat het aanbevolen was om bijkomende numerieke of fysische simulaties uit te voeren. Dit rapport behandelt de op het WL uitgevoerde fysische schaalmodelproeven voor de gecombineerde in- en uitwateringsconstructie van het GGG Doelpolder.

Hiervoor werd in een stroomgoot van WL een schaalmodel op schaal 1/15 gebouwd. Enkel inwatering werd bestudeerd omdat hierbij het grootste verval optreedt over de constructie. Tijdens de proeven werden waterpeilen op- en afwaarts, het debiet en bodem nabije snelheden aan begin en einde van de zone met een bodembescherming opgemeten. Ook werd door middel van 4 camera's het stromingspatroon in de constructie vastgelegd. In totaal zijn drie woelkom geometrieën beproefd. De eerste geometrie is overgenomen uit de door het studiebureau aangereikte plannen. In de tweede beproefde geometrie is de bodem van de woelkom en de zone na de woelkom met 0.40 m verhoogd. Bij de derde geometrie is, aanvullend op de bodemverhoging, de constructie ingekort met 4.0 m. De proeven werden uitgevoerd met stationaire stromingscondities. De proeven zijn steeds uitgevoerd voor een Scheldepeil TAW + 7.0 m, TAW + 8.0 m en TAW + 9.0 m en een reeks polderpeilen met een stapgrootte 0.5 m.

Uit de resultaten volgt dat voor de voorkomende reeks van rivier- en polderpeilen een goede energiedissipatie optreedt in de woelkom bij elk van de drie beproefde geometrieën.



# Inhoudstafel

Abstract .....	III
Inhoudstafel.....	V
Lijst van de tabellen.....	VII
Lijst van de figuren .....	VIII
1 Inleiding .....	1
2 Gegevens .....	3
2.1 Geometrie.....	3
2.1.1 Geometrie 1 - Desktop ontwerp.....	3
2.1.2 Geometrie 2 – Verhoogde bodem.....	5
2.1.3 Geometrie 3 – Verhoogde bodem en ingekorte constructie .....	5
2.2 Waterpeilen.....	6
2.2.1 Rivierpeil (opwaarts).....	6
2.2.2 Polderpeil (afwaarts) .....	6
3 Schaalmodel .....	9
3.1 Geometrie schaalmodel .....	9
3.2 Froude verschaling .....	11
3.3 Meetinstrumenten .....	11
4 QH relatie.....	15
5 Proevenreeks Geometrie 1.....	18
5.1 Rivierpeil TAW + 9.0 m .....	18
5.2 Overige peilen.....	21
5.3 Conclusies .....	23
6 Proevenreeks Geometrie 2.....	24
6.1 Rivierpeil TAW + 9.0 m .....	24
6.2 Overige peilen.....	27
6.3 Conclusies .....	28
7 Proevenreeks geometrie 3 .....	29
7.1 Rivierpeil TAW + 9.0 m .....	29
7.2 Overige peilen.....	32
7.3 Conclusies .....	33
8 Conclusies .....	34



9	Referenties .....	36
	Bijlage A .....	B1
	Rivierpeil TAW + 9.0 m .....	B2
	Rivierpeil TAW + 8.0 m .....	B9
	Rivierpeil TAW + 7.0 m .....	B15

## Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Karakteristieke rivierpeilen Doelpolder .....	6
Tabel 2 – Minimum voorkomend polderpeil.....	8
Tabel 3 – Bepalen van schaalfactor o.b.v. hoogte model .....	9
Tabel 4 – Vergelijking dimensies in situ en model (bij schaalfactor 15).....	10
Tabel 5 – Schaalfactoren .....	11
Tabel 6 – Figuren opnames stromingspatroon Geometrie 1, Geometrie 2 en Geometrie 3.....	B1

# Lijst van de figuren

Figuur 1 – Principeschets van een Gereduceerd GetijdeGebied.....	1
Figuur 2 – Principeschets gecombineerde in- en uitwateringsconstructie .....	1
Figuur 3 – Langsdoorsnede en planzicht aangepast ontwerp gecombineerde in- en uitwateringsconstructie GGG Doelpolder.....	4
Figuur 4 – Wijzigingen Geometrie 2 (volle lijn) ten opzichte van Geometrie 1 (stippellijn) .....	5
Figuur 5 – Doorsnede en bovenaanzicht Geometrie 3 (volle lijn) ten opzichte van Geometrie 1 (stippellijn) .	5
Figuur 6 – Verloop synthetische storm .....	7
Figuur 7 – Polderpeil in functie van rivierpeil voor GGG Doelpolder voor één getijcyclus.....	7
Figuur 8 – Polderpeil in functie van rivierpeil voor GGG Doelpolder .....	8
Figuur 9 – Geometrie schaalmodel .....	10
Figuur 10 – Opwaartse golvenmeter met manuele meetnaald .....	12
Figuur 11 – Toevoerleiding hellend kanaal.....	13
Figuur 12 – Locatie snelheidsmetingen ten opzichte van val.....	13
Figuur 13 – Cameraopstelling.....	14
Figuur 14 –Schaalmodel tussenwanden in plexiglas en backlight achterzijde.....	14
Figuur 15 – Vergelijking overlaatformule vs. formule stroming onder druk.....	16
Figuur 16 – Debiet in functie van polderpeil voor rivierpeil TAW + 4.0 m tot TAW + 9.0 m.....	17
Figuur 17 – Geometrie 1 - Opname stromingspatroon – rivierpeil TAW + 9.0 m .....	18
Figuur 18 – Geometrie 1 – Bodem nabije snelheid in functie van polderpeil – rivierpeil TAW + 9.0 m .....	19
Figuur 19 - Geometrie 1 – rivierpeil TAW + 9.0 m - Opname stromingspatroon bij een polderpeil.....	20
Figuur 20 – Geometrie 1 - Opname stromingspatroon bij verschillende rivierpeilen en een extreem laag polderpeil.....	21
Figuur 21 – Geometrie 1 - Opname stromingspatroon bij verschillende rivierpeilen en min. voorkomend polderpeil.....	21
Figuur 22 – Geometrie 1 – bodem nabije snelheid in functie van polderpeil – overige rivierpeilen.....	22
Figuur 23 – Wijziging Geometrie 2 (volle lijn) ten opzichte van Geometrie 1 (stippellijn) .....	24
Figuur 24 –Geometrie 2 – opname stromingspatroon - rivierpeil TAW + 9.0 m.....	25
Figuur 25 – Geometrie 2 – Bodem nabije snelheid in functie van polderpeil - rivierpeil TAW + 9.0 m.....	26
Figuur 26 – Geometrie 2 - Opname stromingspatroon bij een rivierpeil TAW +7.0 m en TAW + 8.0 m en een extreem laag polderpeil.....	27
Figuur 27 – Geometrie 2 - Opname stromingspatroon bij een rivierpeil TAW +7.0 m en TAW + 8.0 m en het min. voorkomend polderpeil.....	27
Figuur 28 – Geometrie 2 – bodem nabije snelheid in functie van polderpeil – rivierpeil TAW + 7.0 m (links) en TAW + 8.0 m (rechts).....	28

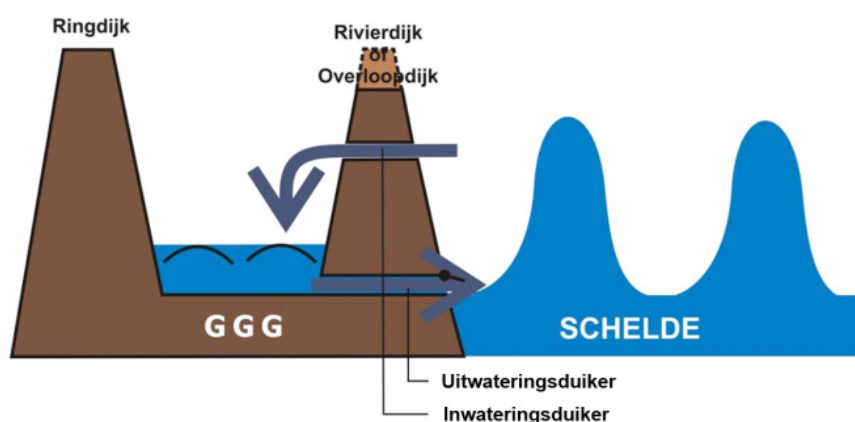
Figuur 29 – Wijziging Geometrie 3 (volle lijn) ten opzichte van Geometrie 1 (stippellijn) .....	29
Figuur 30 – Geometrie 3 – Opname stromingspatroon – rivierpeil TAW + 9.0 m .....	30
Figuur 31 – Geometrie 3 – Bodem nabije snelheid in functie van polderpeil – rivierpeil TAW + 9.0 m .....	31
Figuur 32 – Geometrie 3 – Opname stromingspatroon bij verschillende rivierpeilen en een extreem laag polderpeil.....	32
Figuur 33 – Geometrie 3 – Opname stromingspatroon bij verschillende rivierpeilen en min. voorkomend polderpeil.....	32
Figuur 34 – Geometrie 3 – bodem nabije snelheid in functie van polderpeil – rivierpeil TAW + 7.0 m (links) en TAW + 8.0 m (rechts).....	33
Figuur 35 – Rivierpeil TAW + 9.0 m, Polderpeil TAW + 2.0 m .....	B2
Figuur 36 – Rivierpeil TAW + 9.0 m, Polderpeil TAW + 3.0 m .....	B3
Figuur 37 – Rivierpeil TAW + 9.0 m, Polderpeil TAW + 4.0 m .....	B4
Figuur 38 – Rivierpeil TAW + 9.0 m, Polderpeil TAW + 5.0 m .....	B5
Figuur 39 – Rivierpeil TAW + 9.0 m, Polderpeil TAW + 6.0 m .....	B6
Figuur 40 – Rivierpeil TAW + 9.0 m, Polderpeil TAW + 7.0 m .....	B7
Figuur 41 – Rivierpeil TAW + 9.0 m, Polderpeil TAW + 7.0 m .....	B8
Figuur 42 – Rivierpeil TAW + 8.0 m, Polderpeil TAW + 2.0 m .....	B9
Figuur 43 – Rivierpeil TAW + 8.0 m, Polderpeil TAW + 3.0 m .....	B10
Figuur 44 – Rivierpeil TAW + 8.0 m, Polderpeil TAW + 4.0 m .....	B11
Figuur 45 – Rivierpeil TAW + 8.0 m, Polderpeil TAW + 5.0 m .....	B12
Figuur 46 – Rivierpeil TAW + 8.0 m, Polderpeil TAW + 6.0 m .....	B13
Figuur 47 – Rivierpeil TAW + 8.0 m, Polderpeil TAW + 7.0 m .....	B14
Figuur 48 – Rivierpeil TAW + 7.0 m, Polderpeil TAW + 2.0 m .....	B15
Figuur 49 – Rivierpeil TAW + 7.0 m, Polderpeil TAW + 3.0 m .....	B16
Figuur 50 – Rivierpeil TAW + 7.0 m, Polderpeil TAW + 4.0 m .....	B17
Figuur 51 – Rivierpeil TAW + 7.0 m, Polderpeil TAW + 5.0 m .....	B18
Figuur 52 – Rivierpeil TAW + 7.0 m, Polderpeil TAW + 5.0 m .....	B19



# 1 Inleiding

In het kader van het geactualiseerde Sigmaplan worden in opdracht van de afdeling Zeeschelde van Waterwegen en Zeekanaal NV (W&Z) Gereduceerd GetijdeGebieden (GGG) aangelegd langsheen de Schelde en haar getijderivieren. De meeste van deze GGG's worden aangelegd in een Gecontroleerd OverstromingsGebied (GOG). Bij het GGG Doelpolder is dit niet het geval. Het werkingsprincipe van een GGG is voorgesteld in Figuur 1. Bij hoogwater stroomt het water via een inwateringsduiker het gebied binnen, bij laagwater wordt het gebied via een uitwateringsduiker geleidigd.

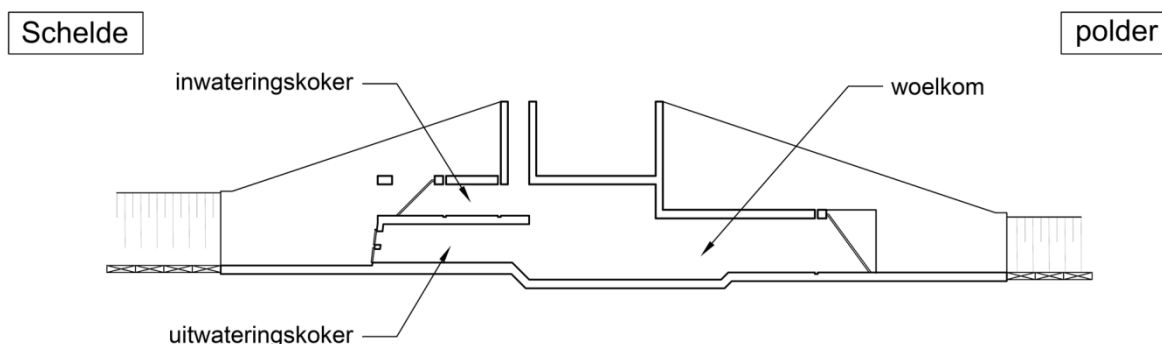
Figuur 1 – Principeschets van een Gereduceerd GetijdeGebied



In 2006 werd als pilootproject het GOG/GGG Lippenbroek in gebruik genomen. In 2016 zal vermoedelijk het GOG/GGG Kruikeke in werking gesteld worden. De in- en uitwatering in deze twee gebieden geschiedt door middel van 2 afzonderlijke constructies (een inwateringsduiker en een uitwateringsduiker).

Voor de nieuwe GGG's zal de in- en uitwatering gecentraliseerd worden in 1 gecombineerde in- en uitwateringsconstructie. Deze constructie bestaat aan rivierzijde uit een inwateringskoker bovenop een uitwateringskoker. Aan polderzijde wordt een woelkom voorzien. Een principeschets van een dergelijke gecombineerde in- en uitwateringsconstructie is voorgesteld in Figuur 2.

Figuur 2 – Principeschets gecombineerde in- en uitwateringsconstructie



Voor de gecombineerde in- en uitwateringsconstructies heeft W&Z aan WL gevraagd om fysisch modelonderzoek uit te voeren met als doel meer inzicht te krijgen in de specifieke werking van deze constructies. Hiervoor heeft het WL in 2011 een fysisch schaalmodel ontworpen en gebouwd waarmee het

mogelijk is om de hydraulische performantie af te toetsen van de ontwerpen van de in- en uitwateringsconstructies voor de verschillende GGG's. Doordat bij inwatering van het GGG het energieverschil tussen rivier en polder veel groter is dan bij uitwatering zijn de proeven beperkt tot inwatering.

In het voorjaar van 2012 werd de in- en uitwateringsconstructie van het GOG/GGG Bergenmeersen als eerste getoetst in het schaalmodel (Vercruyssen *et al.*, 2012). In het najaar van 2012 werden de in- en uitwateringsconstructies van de GOG/GGG's Zennegat en Grote Vijver aan de Dijlemondning getoetst (Vercruyssen *et al.* 2013). In 2013 werd de in- en uitwateringsconstructie van het GOG/GGG Vlassenbroek beproefd (Vercruyssen *et al.*, 2014) en werd de benodigde erosiebescherming gedimensioneerd (Verelst *et al.*, 2014). De constructie van de Bunt werd aangepast op basis van de kennis opgedaan uit de proeven van Vlassenbroek. Het bijgewerkte ontwerp van De Bunt werd vervolgens gecontroleerd door middel van schaalmodelproeven eind 2013 (Vercruyssen, Verelst, Peeters, *et al.*, 2014). Ondertussen is dit schaalmodel niet meer beschikbaar.

Het GGG Doelpolder is gelegen naast de kerncentrale van Doel. Dit betreft het meest afwaarts gelegen GGG gebied. De oppervlakte bedraagt ca. 300 ha. In tegenstelling tot de andere gebieden heeft het GGG Doelpolder geen GOG functie. De dimensionering van het aantal benodigd in- en uitwateringskokers en de vloerpeilen werd door WL uitgevoerd (Coen *et al.*, 2013, 2014; Peeters *et al.*, 2012). Op basis van deze dimensionering werd een configuratie met 11 hooggelegen inwateringskoker met een vloerpeil TAW + 3.3 m en 11 laaggelegen uitwateringskokers met een vloerpeil TAW + 0.00 m gekozen. De gecombineerde in- en uitwateringsconstructie van Doelpolder verschilt ten opzichte van de overige gecombineerde in- en uitwateringsconstructies door het lagere vloerpeil van de inwateringskoker (TAW + 3.3 m ten opzichte van ca. TAW + 4.0 m) en het hogere maatgevend rivierpeil (TAW + 9.0 m ten opzichte van ca. TAW + 7.0 m). Hierdoor bedraagt de inwateringshoogte boven het vloerpeil voor de gecombineerde in- en uitwateringsconstructie van Doelpolder 5.7 m ten opzichte van ca. 3.0 m voor de overige constructies.

De inrichting van het GGG Doelpolder en het ontwerp van de gecombineerde in- en uitwateringsconstructie werd uitbesteed aan het studiebureau Arcadis. In 2014-2015 heeft WL reeds een desktop revisie uitgevoerd van de voorgestelde geometrie op basis van literatuur formules en ervaringen van eerdere beproefde constructies (Vercruyssen *et al.*, 2015). Uit dit advies volgde dat de voorgestelde geometrie gekenmerkt werd door een onzekerheid omwille van het niet beschikbaar zijn van relevante literatuur formules en omdat de hydraulische condities afwijken ten opzichte van de eerder door WL op een schaalmodel beproefde constructies. Hierom werd aanbevolen om numerieke of fysische simulaties uit te voeren. Op vraag van W&Z heeft WL een schaalmodelstudie opgestart waarbij de desktop ontworpen geometrie beproefd wordt.

Deze schaalmodelstudie wordt beschreven in onderhavig rapport. De geometrie van de gecombineerde in- en uitwateringsconstructie van het GGG Doelpolder en de te hanteren combinatie van rivier- en polderpeilen wordt gegeven in hoofdstuk 2. De voor de proeven verschaalde geometrie en de set-up van het schaalmodel wordt behandeld in hoofdstuk 3. Een vergelijking van de opgemeten relatie tussen de opwaartse waterhoogte en het debiet (de zgn. QH-relatie) met drie theoretische rekenmethodes wordt gegeven in hoofdstuk 4. In een eerste set proeven werd de desktop ontworpen geometrie beproefd op het schaalmodel, zie hoofdstuk 5. Uit de resultaten volgde dat er nog wat marge was waarop besloten werd om aanvullende proeven uit te voeren waarbij zowel het bodempeil van de woelkom als het bodempeil van de zone afwaarts van de woelkom met 0.4 m verhoogd werden, zie hoofdstuk 6. In een laatste set proeven werd de lengte van de constructie met 4 m ingekort, zie hoofdstuk 7. Het besluit wordt geformuleerd in hoofdstuk 8.

## 2 Gegevens

De beproefde geometrieën worden besproken in paragraaf 2.1. De maatgevende combinaties van rivier- en polderpeilen worden in paragraaf 2.2 gegeven.

### 2.1 Geometrie

De eerste beproefde geometrie is overgenomen uit de door het studie bureau doorgestuurde plannen, zie paragraaf 2.1.1. De twee beproefde optimalisaties worden besproken in paragraaf 2.1.2 respectievelijk paragraaf 2.1.3.

#### 2.1.1 Geometrie 1 - Desktop ontwerp

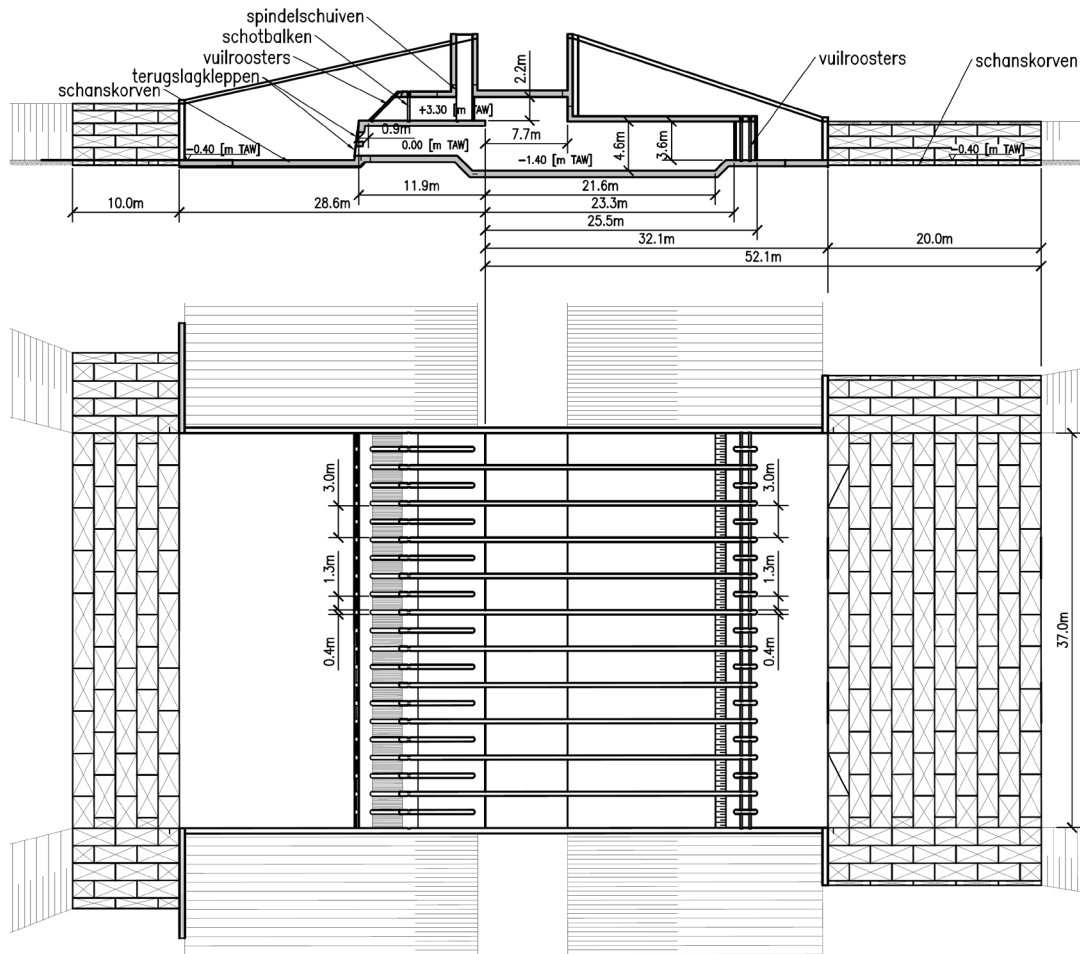
Voor de bouw van het schaalmodel heeft Arcadis op 18/12/2015 onderstaande plannen overgemaakt aan WL:

- Arcadis. (2015c). ZEESCHELDE L.O. - BEVEREN GGG Doelpolder Kunstwerk Grondplan deel 1 25/09/2015
- Arcadis. (2015a). ZEESCHELDE L.O. - BEVEREN GGG Doelpolder Kunstwerk Constructie Bovenaanzicht deel 2. 25/09/2015
- Arcadis. (2015b). ZEESCHELDE L.O. - BEVEREN GGG Doelpolder Kunstwerk Constructie snedes deel 3 25/09/2015

Op basis van deze plannen wordt in Figuur 3 een bovenaanzicht en dwarsdoorsnede gegeven.



Figuur 3 – Langsdoorsnede en planzicht aangepast ontwerp gecombineerde in- en uitwateringsconstructie GGG Doelpolder



(op basis van Arcadis (2014e; f))

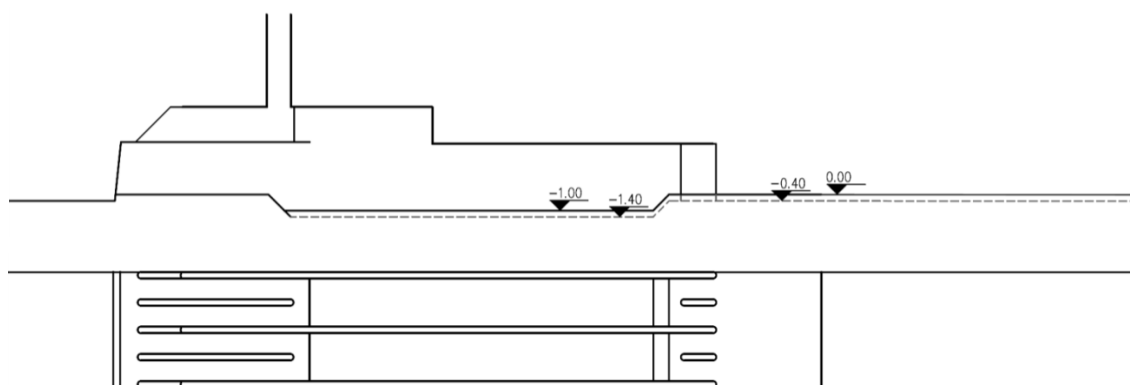
Bij stroming van rivier naar polder stroomt het water doorheen 11 inwateringskokers met vloerpeil TAW + 3.3 m en een breedte van 3.0 m. Elk van deze inwateringskokers wordt gescheiden door een tussenmuur met breedte 0.4 m. De tussenmuur is nodig voor het beperken van de breedte van de schotbalken en de spindelschuiten. Opwaarts in de inwateringskoker worden vuilroosters geplaatst voor het tegenhouden van drijvend vuil. Na deze vuilroosters worden schotbalkspanningen voorzien. Het inwateringspeil kan afgeregeld worden door het plaatsen van schotbalken in deze spanningen. Voorafgaand aan een extreem stormtij kan elke inwateringskoker gesloten worden door middel van een spindelschuij. De tussenmuur eindigt op 1.5 m voor het einde van de inwateringskoker.

Op het einde van de inwateringskoker valt het water over een hoogte 4.7 m in een lokaal verdiepte woelkom (met vloerpeil op TAW – 1.4 m). De lokale verdieping van de woelkom eindigt op 21.6 m na de val waarna de bodem door middel van een schuine drempel (hoek 45°) met 1.0 m verhoogd wordt (tot een vloerpeil TAW – 0.40 m). Net na deze overgang (op 23.3 m) wordt de koker in twee gesplitst door middel van een 0.4 m brede tussenmuur. In deze tussenmuur bevinden zich schotbalkspanningen voor het afsluiten van de kokers bij werken en verticale vuilroosters. Het plafond en de tussenmuur eindigen op 25.5 m na de val. De betonnen vloer eindigt op 32.1 m na de val. Hierna is nog een zone met bodembescherming voorzien tot 52.1 m na de val.

### 2.1.2 Geometrie 2 – Verhoogde bodem

Na het bespreken van de resultaten van Geometrie 1 werd in overleg met de opdrachtgever afgesproken om voor Geometrie 2 de bodem van de woelkom met 0.40 m te verhogen. Bij het verhogen van het bodempeil van de woelkom dient ofwel de hoogte van de einddrempel gereduceerd te worden ofwel het bodempeil afwaarts van de woelkom verhoogd te worden. De einddrempel richt de hoge bodemnabije snelheid op het einde van de woelkom weg van de bodem. Uit de eerste set proeven volgde dat de beproefde einddrempel met een hoek 45° en een hoogte 1.0 m effectief was. Hierop werd besloten om de einddrempel te behouden voor Geometrie 2 en zowel **het bodempeil van de woelkom als het afwaarts bodempeil** te verhogen. De verhoging is gelimiteerd tot 0.40 m omdat het afwaarts bodempeil niet hoger mag komen dan het bodempeil van de uitwateringskoker op TAW + 0.00 m. Het bodempeil van de woelkom komt hierbij op TAW – 1.00 m en het bodempeil aan polderzijde op TAW + 0.00 m. Een doorsnede en bovenaanzicht van Geometrie 2 wordt gegeven in Figuur 4. Bemerkt dat in deze tekening, ter vergelijking, ook Geometrie 1 in stippellijn wordt gegeven.

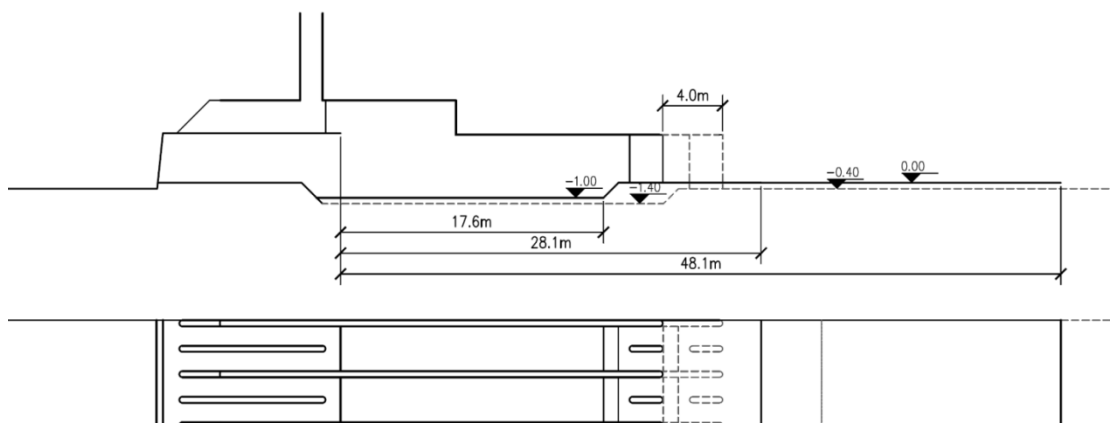
Figuur 4 – Wijzigingen Geometrie 2 (volle lijn) ten opzichte van Geometrie 1 (stippellijn)



### 2.1.3 Geometrie 3 – Verhoogde bodem en ingekorte constructie

Voor Geometrie 3 wordt de constructie met verhoogde bodem (Geometrie 2) ingekort. Op basis van een visuele analyse van de stromingspatronen die optreden bij Geometrie 2, wordt besloten om proeven te doen bij een inkorting van de constructie van 4 m. Een doorsnede en bovenaanzicht van Geometrie 3 wordt gegeven in Figuur 5. Bemerkt hierin dat in deze tekening, ter vergelijking, ook Geometrie 1 in stippellijn wordt gegeven.

Figuur 5 – Doorsnede en bovenaanzicht Geometrie 3 (volle lijn) ten opzichte van Geometrie 1 (stippellijn)



## 2.2 Waterpeilen

De voor de proeven toegepaste reeks van rivierpeilen respectievelijk polderpeilen wordt gegeven in paragraaf 2.2.1 respectievelijk 2.2.2. Bemerkt dat deze paragrafen overgenomen zijn uit Vercruyssen *et al.* (2015) en aangevuld werden met bijkomende MIKE11 simulaties voor stormen met een kleinere terugkeerperiode.

### 2.2.1 Rivierpeil (opwaarts)

De karakteristieke rivierpeilen voor het GGG Doelpolder, gegeven in Tabel 1, worden overgenomen uit Coen *et al.* (2014).

Tabel 1 – Karakteristieke rivierpeilen Doelpolder

	[m TAW]	ten opzichte van vloerpeil inwateringskoker [m]
vloerpeil inwateringskoker	3.30	0.00
gemiddeld hoogwater doodtij	4.53	1.23
gemiddeld hoogwater	5.12	1.82
gemiddeld hoogwater springtij	5.53	2.23
extreem hoogwater springtij	6.28	2.98

(Coen *et al.*, 2014)

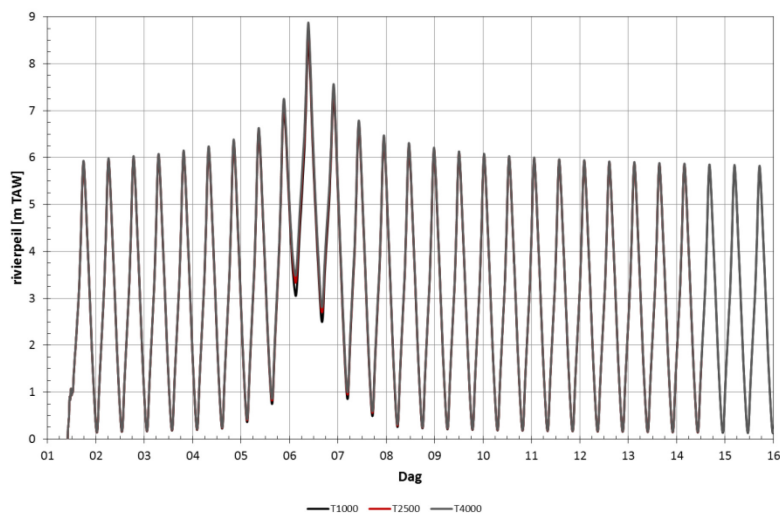
Naast de karakteristieke rivierpeilen dient de constructie ook bestand te zijn tegen uitzonderlijke stormcondities. In Peeters *et al.* (2009) wordt voor de dijken afwaarts te Antwerpen een maatgevende waterstand TAW + 9.00 m vermeld. Tenzij gegarandeerd kan worden dat de constructie afgesloten wordt voor het optreden van (uitzonderlijke) stormcondities dient de constructie gedimensioneerd te worden tot een rivierpeil TAW + 9.00 m. Merk op dat in tegenstelling tot de andere reeds gereviseerde constructies Doelpolder geen GOG werking heeft. In tegenstelling tot GGG's ingebed in een GOG, zal in het GGG Doelpolder bij storm het verval over de constructie niet snel reduceren door het uitblijven van vulling via de overlopdijken.

### 2.2.2 Polderpeil (afwaarts)

Een traditioneel woelkom ontwerp wordt uitgevoerd voor één maatgevend opwaarts waterpeil en één maatgevend afwaarts waterpeil. Voor deze conditie zal de energiedissipatie optimaal zijn. Naast een uitgebreide reeks van rivierpeilen varieert bij de in- en uitwateringsconstructies ook het polderpeil (het polderpeil stijgt namelijk naarmate het GGG vult). Op basis van numerieke simulaties van de werking van het gebied met het programma MIKE11 (Coen *et al.*, 2014) worden de voorkomende polderpeilen in functie van het rivierpeil gegeven. De MIKE11 simulaties zijn uitgevoerd voor synthetische stormen met een terugkeerperiode van 25, 50, 100, 500, 1000, 2500 en 4000 jaar. De simulatie werd opgesteld voor een configuratie met 11 inwateringskoker met een bodempeil op TAW + 3.30 m en 11 uitwateringskokers met een bodempeil op TAW 0.00 m. De gegevens zijn ter beschikking gesteld met een tijdstap van 10 min.

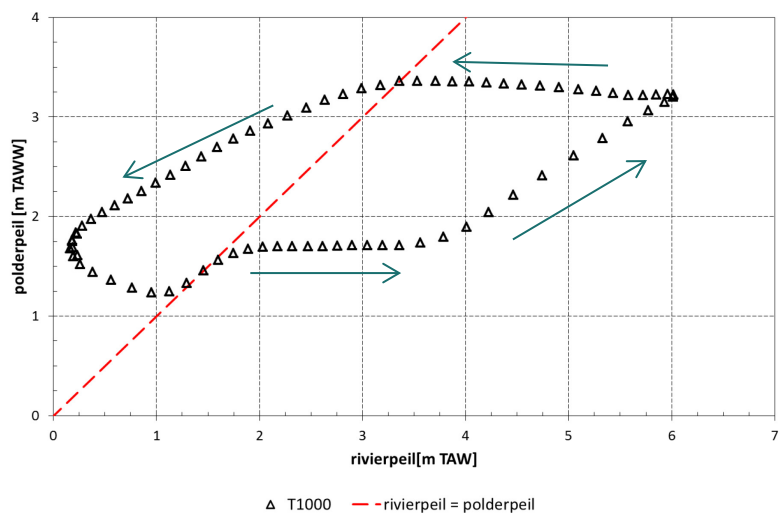
Het rivierpeil in functie van de tijd voor enkele synthetische stormen wordt gegeven in Figuur 6.

Figuur 6 – Verloop synthetische storm



Ter illustratie wordt in Figuur 7 voor één getijcyclus het polderpeil in functie van het rivierpeil gegeven. In Figuur 8 wordt vervolgens een zelfde grafiek opgesteld voor de volledige tijdreeks en de zeven synthetische stormen.

Figuur 7 – Polderpeil voor GGG Doelpolder in functie van rivierpeil voor één getijcyclus

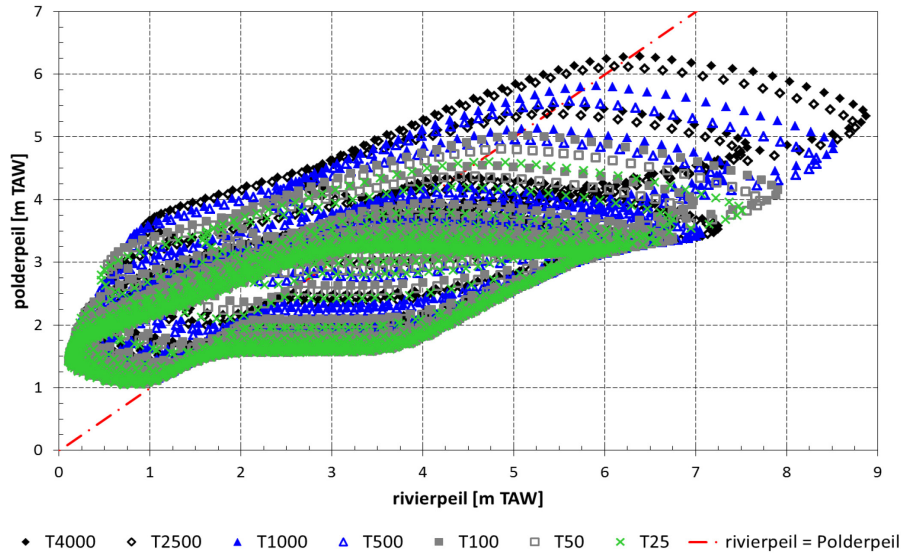


op basis van simulaties (Coen *et al.*, 2014)

Bij waterpeilen hoger als TAW + 3.3 m komt het rivierpeil boven de inwateringsdrempel en begint het GGG Doelpolder te vullen. Dit is in Figuur 7 te zien door de stijging van het polderpeil vanaf een rivierpeil ca. TAW + 3.5 m. Deze stijging zet zich door tot het hoogwater bereikt wordt bij een rivierpeil TAW + 6.0 m. Vervolgens stijgt het polderpeil langzaam verder terwijl het rivierpeil afneemt. Dit zet zich door tot het rivierpeil gelijk komt met het polderpeil of het drempelpeil van de inwatering (kruising simulatie met de rechte “rivierpeil = polderpeil “ bij een rivierpeil TAW + 3.3 m in Figuur 7). Hierna begint het polderpeil af te nemen tot het moment dat het rivier- en polderpeil weer gelijk zijn. Dit komt in Figuur 7 voor bij een peil ca. TAW + 1.3 m. Vanaf dit moment worden de uitwateringskokers terug afgesloten doordat de druk van het rivierwater de terugslagkleppen dicht duwt. Voor het gesimuleerde polderpeil wordt een peil in een knooppunt net afwaarts van de constructie gebruikt. De stijging van het polderpeil met 0.5 m tussen een rivierpeil TAW + 1.3 m en TAW + 2.0 m valt te verklaren doordat het gegeven polderpeil ter hoogte van de

constructie berekend wordt en het GGG verder draineert via het grachtenstelsel. Deze cyclus wordt terug herhaald vanaf het rivierpeil boven TAW + 3.3 m uitkomt.

Figuur 8 – Polderpeil voor GGG Doelpolder in functie van rivierpeil bij verschillende stormretourperioden



op basis van simulaties (Coen *et al.*, 2014)

Merk op dat de simulaties voor de verschillende stormtijcondities onderling goed samenvallen. Ten opzichte van de enkele getijcyclus gegeven in Figuur 7 valt op dat bij hoge rivierpeilen de polder niet meer ledigt tot een peil van ca. TAW + 1.5 m. De oorzaak hiervan is dat het laagwater dat optreedt voor de maximale piek van het hoogwater (zie Figuur 6) van dezelfde grootteorde is als het vloerpeil van de inwateringskoker. De tijdsperiode waarbij het polderpeil hoger is dan het rivierpeil is gedurende dit laagwater beperkt en het gebied begint snel terug te vullen.

Het minimum voorkomend polderpeil neemt toe bij een stijgend rivierpeil. Dit zorgt ervoor dat de woelkom niet gedimensioneerd moet worden bij het maximum rivierpeil en het laagst mogelijk polderpeil. Het minimum voorkomend polderpeil in functie van het rivierpeil is daarom afgeleid uit Figuur 8 en wordt gegeven in Tabel 2. Hierbij wordt opgemerkt dat bij de uitvoering van de proeven in deze schaalmodelstudie niet enkel rekening werd gehouden met de ondergrenzen uit Tabel 2, maar met de volledige reeks van voorkomende polderpeilen bij een gegeven rivierpeil.

Tabel 2 – Minimum voorkomend polderpeil

rivierpeil [m TAW]	min voorkomend polderpeil [m TAW ]
4	1.83
5	2.56
6	3.15
7	3.40
8	4.10
9	5.40

op basis van simulaties (Coen *et al.*, 2014)

## 3 Schaalmodel

De geometrie van het schaalmodel wordt besproken in paragraaf 3.1. De voor het opschalen van de resultaten toegepaste verscaling wordt gegeven in 3.2. De uitgevoerde metingen worden opgelijst in paragraaf 3.3.

### 3.1 Geometrie schaalmodel

Het schaalmodel zal ingebouwd worden in de kleine stroomgoot van WL. Het hellend kanaal wordt hierbij ingezet als een klassieke stroomgoot met horizontale bodem. Het opwaartse waterpeil wordt geregeld door het toegevoegd debiet en het afwaartse waterpeil wordt geregeld door middel van een kantelstuw. Het hellend kanaal heeft een lengte 34.80 m, een hoogte 0.755 m en een breedte 0.560 m.

Ten aanzien van de schaal wordt gezocht naar de grootst mogelijke schaal die zowel vanuit de geometrische dimensies van het hellend kanaal als op basis van de debietcapaciteit van de modelinstallatie mogelijk is. De grootst mogelijke schaal geeft namelijk meer mogelijkheden voor het bemeten van stroomsnelheden en vermindert de schaaleffecten. De hoogte van het hellend kanaal blijkt maatgevend voor de bepaling van de maximale schaal. Op basis van de hoogte van het hellend kanaal wordt een schaalfactor 15 berekend, zie Tabel 3.

Tabel 3 – Bepalen van schaalfactor o.b.v. hoogte model

in situ	rivierpeil	TAW + 9.00 m
	Bodempeil woelkom	TAW – 1.40 m
	hoogte	10.40 m
model	hoogte goot	0.755 m
	reserve op waterhoogte	0.050 m
	reserve op eventuele bodemplaat model	0.012 m
	beschikbare hoogte	0.693 m
$\text{schaal} \left( \frac{\text{hoogte in situ}}{\text{beschikbare hoogte model}} \right)$		15.007 $\approx$ 15

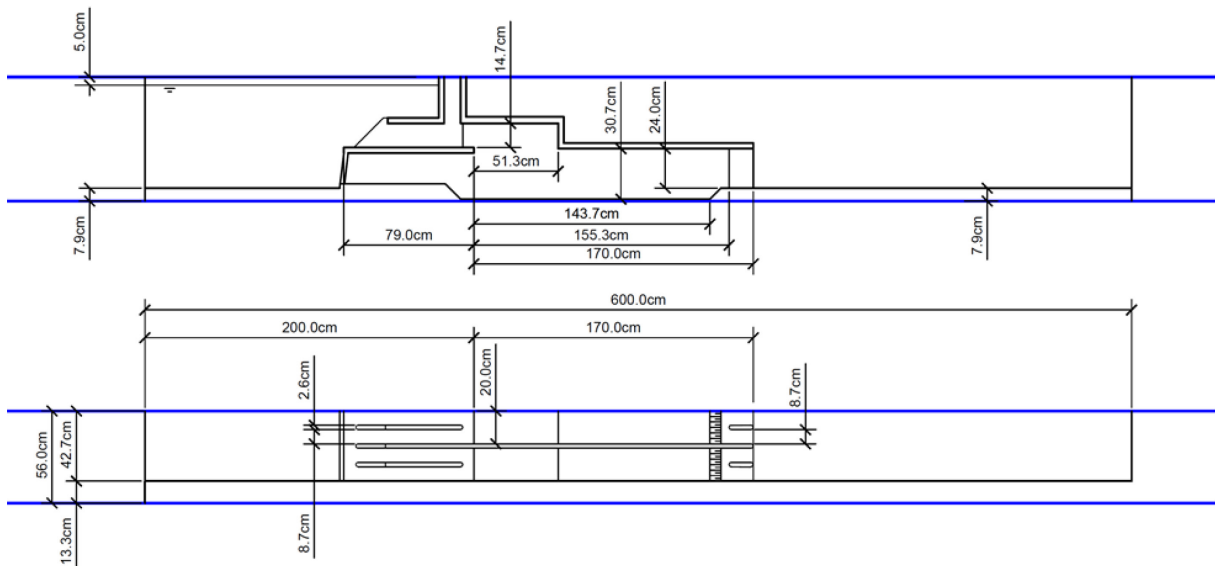
Een vergelijking tussen de dimensies in situ en in model bij een schaalfactor 15 wordt gegeven in Tabel 4.

Tabel 4 – Vergelijking dimensies in situ en model (bij schaalfactor 15)

	in situ [m]	model [m]
inwateringshoogte (= max. peil rivier – vloerpeil inwateringskoker)	5.70	0.380
valhoogte (= vloerpeil inwateringskoker – bodempeil woelkom)	4.70	0.313
breedte koker	3.00	0.200
breedte ter hoogte van schotbalk	1.30	0.087
lengte vloer inwateringskoker	11.90	0.793
lengte vanaf val tot einde koker GGG zijde	25.50	1.700

Om de invloed van wandruwheden op het stromingspatroon aan GGG zijde enerzijds in te schatten en anderzijds te verminderen wordt gekozen om niet één maar twee kokers in te bouwen. De totale modelbreedte bedraagt hierdoor 0.427 m (2 x kokerbreedte + tussenmuur). De stroomgoot heeft een breedte 0.56 m en dient dus lokaal met 0.134 m ingesnoerd te worden. De geometrie van het schaalmodel wordt gegeven in Figuur 9.

Figuur 9 – Geometrie schaalmodel



## 3.2 Froude verschaling

Voor de verschaling van de tijd, snelheid en het debiet zijn de Froude schaalwetten toegepast. Tabel 5 geeft een overzicht van de – op basis van de Froude schaalwetten afgeleide – van toepassing zijnde schaalfactoren voor dit onderzoek.

Tabel 5 – Schaalfactoren

schaal	schaafactor	waarde
waterhoogte, lengte, breedte	$\alpha_L$	15.00
snelheid	$\alpha_V = \alpha_L^{0.5}$	3.87
debiet	$\alpha_Q = \alpha_V \cdot \alpha_L^2 = \alpha_L^{2.5}$	871.42
debiet per m breedte	$\alpha_q = \alpha_V \cdot \alpha_L^1 = \alpha_L^{1.5}$	58.09

Met betrekking tot de verschaling wordt het volgende opgemerkt:

- De in deze studie gebruikte Froude verschaling maakt dat enerzijds de oppervlaktespanning van het water en anderzijds de grootte van de luchtbellen niet correct verschaald zijn. Dit maakt dat het niet mogelijk is om het gedrag van de luchtbellen in het schaalmodel om te rekenen naar natuurwaarden (Novak et al., 2010). Hierbij dient rekening gehouden te worden bij de interpretatie van het gedrag van luchtbellen in het schaalmodel, bijvoorbeeld voor het bepalen van de lengte van een watersprong. Om het gedrag van luchtbellen te verschalen zou bij het ontwerp een verschaling op basis van het getal van Weber uitgevoerd moeten worden. Dit is, bij gebruik van dezelfde vloeistoffen (lucht en water) in model en prototype, echter niet mogelijk in combinatie met een geometrische verschaling op basis van Froude (Chanson et al., 2004; Chanson, 2007).
- De wrijvingsverliezen zijn niet verschaald. De bodem van de in- en uitwateringsconstructie bestaat in de woelkom uit beton en vervolgens uit een bodembescherming. In het schaalmodel is de bodem van deze beide zones uitgevoerd in hetzelfde materiaal. Aangezien het de bedoeling is dat de watersprong zich onmiddellijk na de val voordoet wordt de invloed van de toegenomen bodemruwheid van de bodembescherming beperkt geacht.

Tenzij expliciet vermeld zijn de in dit rapport gegeven waarden altijd omgerekend naar eenheden natuur.

## 3.3 Meetinstrumenten

De op- en afwaartse waterpeilen worden opgemeten door middel van golvenmeters (producent WL). De golvenmeters zijn opwaarts respectievelijk afwaarts van de vernauwde modelsectie geplaatst. Voor de uitvoering van een proevenreeks worden de golvenmeters geverifieerd door middel van een naast geplaatste manuele meetnaald, zie Figuur 10. Door de relatief beperkte afmetingen van het kanaal waarin het model geplaatst is zal het water een dynamische energiehoogte hebben. Om hier rekening mee te houden wordt de opgemeten piëzometrische waterhoogte vermeerderd met de uit de sectiegemiddelde snelheid berekende dynamische waterhoogte:

$$P_{rivier} = P_{piezometrisch} + h_{dynamisch}$$

Met:

- $P_{rivier}$  Rivierpeil [m TAW]
- $P_{piezometrisch}$  Opgemeten waterpeil [m TAW]



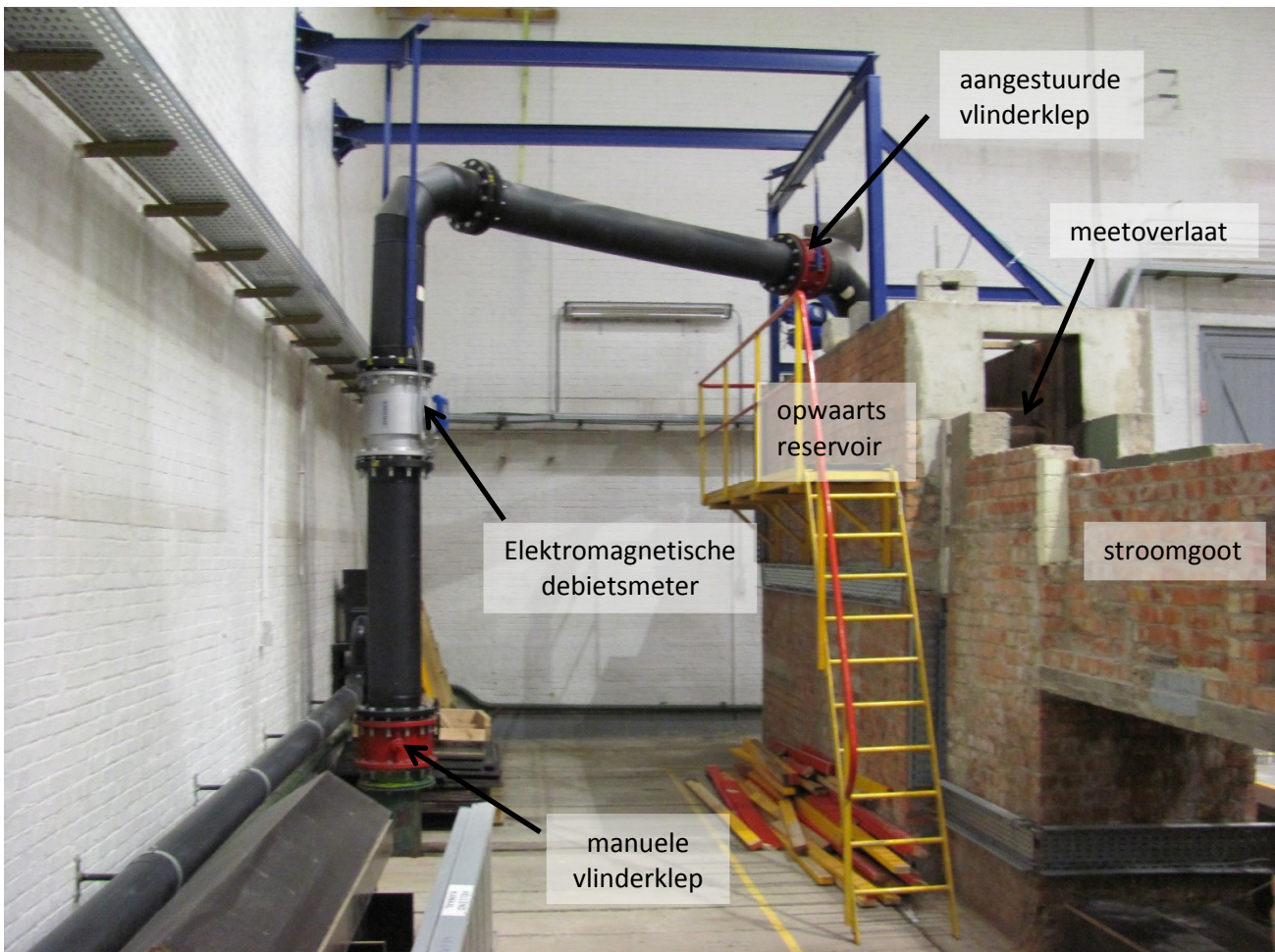
• $h_{\text{dynamisch}}$	Dynamische waterhoogte = $V^2/2g$	[m]
• $V$	Sectiegemiddelde snelheid = $Q/(B_{\text{goot}} \times h_{\text{goot}})$	[m/s]
• $Q$	Opgemeten debiet	[m <sup>3</sup> /s]
• $B_{\text{goot}}$	Breedte goot (verschaald)	[m]
• $h_{\text{goot}}$	Waterhoogte in goot (verschaald)	[m]
• $g$	Graviteitsconstante = 9.81 m/s <sup>2</sup>	[m/s <sup>2</sup> ]

Figuur 10 – Opwaartse golvenmeter met manuele meetnaald



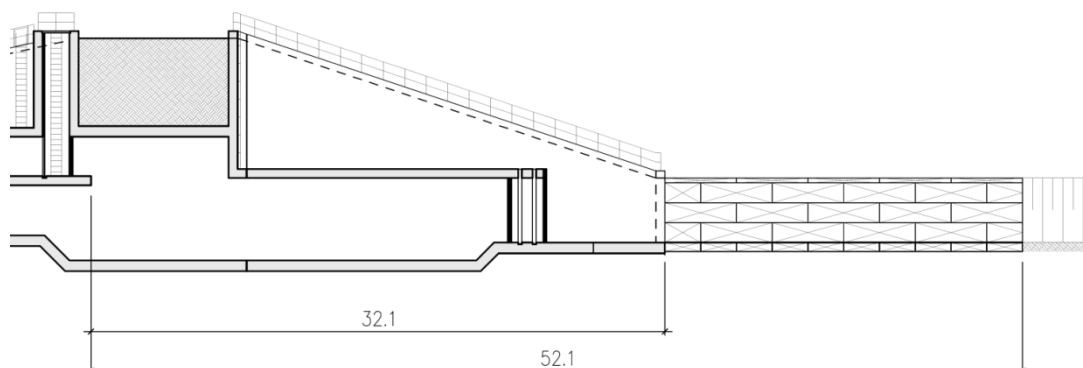
Het debiet wordt opgemeten door middel van een elektromagnetische debietmeter (type: aquaflex K, producent Khrono) gemonteerd op de toevoerleiding van het hellend kanaal. Op de toevoerleiding staan een manuele vlinderklep (1.8 m opwaarts van de debietmeter) en een vanuit de sturingscomputer aangestuurde vlinderklep (net voor de toevoer in het opwaarts reservoir van waaruit de stroomgoot gevoed wordt), zie Figuur 11. Doordat dit type vlinderklep niet precies in te stellen is wordt met 1 vlinderklep gesmoord waarna met de andere het debiet afgeregeld wordt. Het gebruiken van een vlinderklep op een korte afstand opwaarts van de debietmeter kan leiden tot een (geringe) verstoring van de meting. In kader van de optimalisatie van de culvert input in de numerieke TELEMAC modellen plant WL onder project 16\_063 in oktober 2016 bijkomende metingen in het schaalmodel ter bepaling van de QH relatie met behulp van een meetoverlaat. Deze meetoverlaat werd niet tijdig gerenoveerd voor project 15\_073. Bemerkt dat voor de proeven een opwaarts rivierpeil opgelegd wordt in plaats van een debiet. Een afwijking op het debiet heeft geen invloed op het toetsen van de constructie.

Figuur 11 – Toevoerleiding hellend kanaal



De snelheid wordt opgemeten door middel van een elektromagnetische puntsnelheidsmeting (type P-EMS E30; producent Deltares). Dit toestel meet de X en Y component van de snelheid in het horizontaal vlak. De onderzijde van de probe wordt op 0.015 m (modeleenheid) boven de bodem geplaatst en de dikte van het meetvolume bedraagt ca. 0.010 m (modeleenheid). De opgemeten snelheid bedraagt dus een gemiddelde tussen 0.075 m en 0.225 m boven de bodem. De snelheidsmetingen worden in het center van de goot op het begin en einde van de voorziene zone met bodembescherming uitgevoerd. De locatie van het begin en einde van de bodembescherming en dus ook de snelheidsmetingen wordt voor Geometrie 1 en Geometrie 2 gegeven in Figuur 12. Voor Geometrie 3 werd, analoog met de verkorting van de constructie, de locatie van de snelheidsmetingen 4.0 m naar de val toegeschoven.

Figuur 12 – Locatie snelheidsmetingen ten opzichte van val



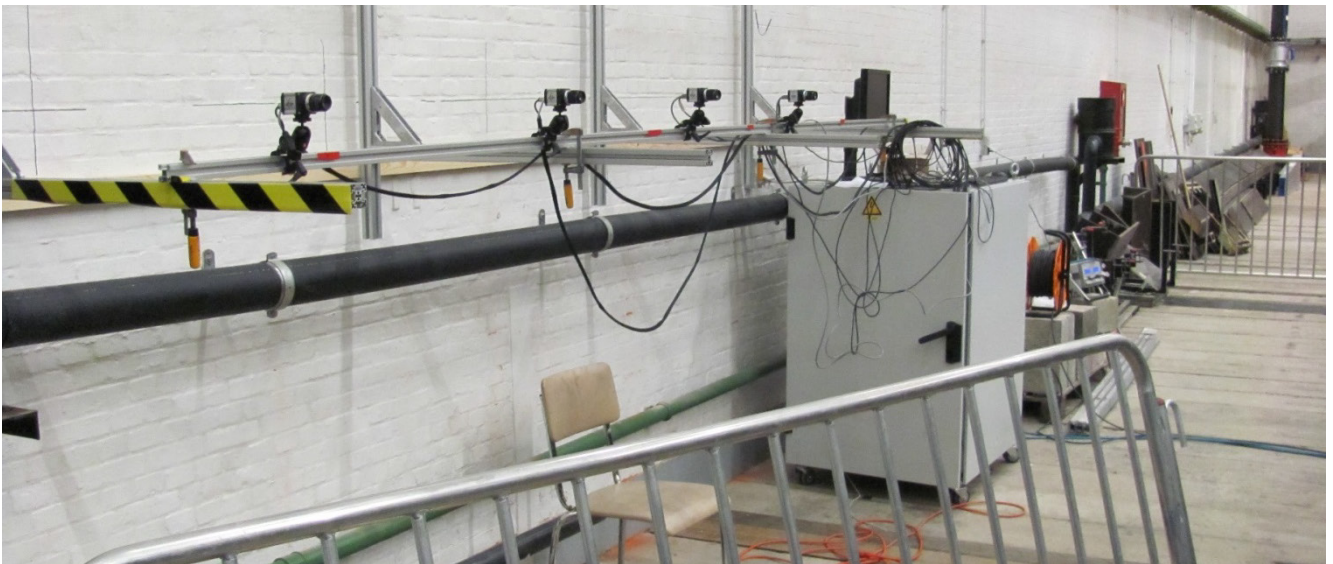
De metingen worden geregistreerd door middel van een data acquisitie systeem tegen een frequentie van 50 Hz. De metingen duurden 180 s en de gerapporteerde waarden zijn de gemiddelden.

Om het stromingspatroon in de constructie te visualiseren wordt gebruik gemaakt van 4 UEye ethernet camera's met elk een resolutie 1280 x 1024, zie Figuur 13. Het opnemen wordt gestart door middel van een uit de data acquisitie uitgezonden signaal. De camera's worden op 2.85 m (modeleenheid) van de glazen wand geplaatst en hebben elk een beeldbreedte 0.80 m (modeleenheid) en beeldhoogte 0.64 m (modeleenheid). De pixels hebben een grootte 0.7 mm x 0.7 mm (modeleenheid). Door middel van referentiepunten met gekende coördinaten worden de 4 beelden samengevoegd. Om de opname kwaliteit te bevorderen zijn de tussenwanden uitgevoerd in plexiglas en wordt aan de overzijde van de stroomgoot een backlight voorzien, zie Figuur 14. Om de stroming in verdronken toestand te visualiseren wordt kleurstof (KMnO<sub>4</sub>) geïnjecteerd. De camera's nemen 33 opnames per secondes. Wanneer geen kleurstof toegepast wordt bedraagt de opname tijd 3 s bij het toepassen van de kleurstof neemt dit toe tot 15 s.

---

Figuur 13 – Cameraopstelling

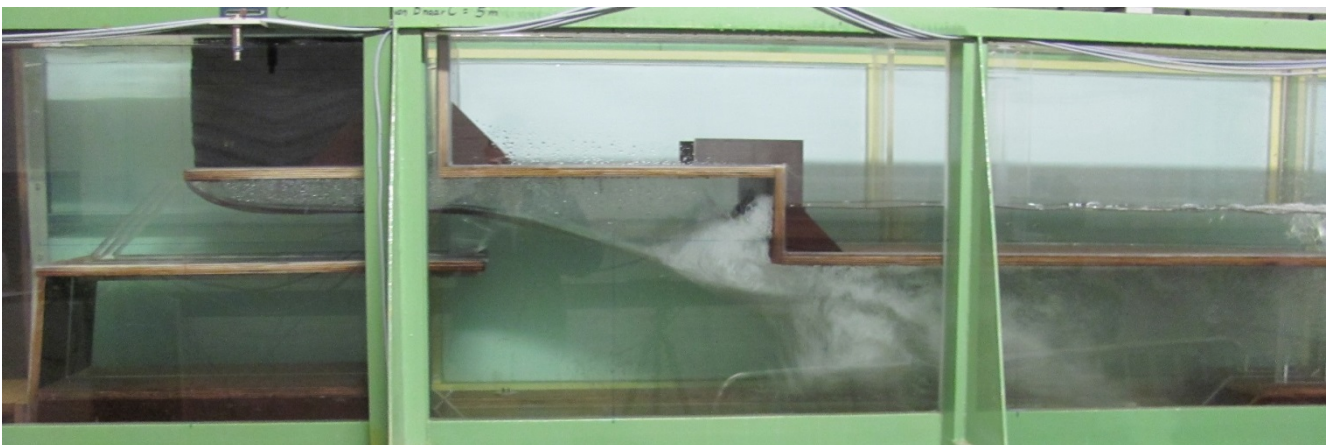
---



---

Figuur 14 –Schaalmodel tussenwanden in plexiglas en backlight achterzijde

---



## 4 QH relatie

In deze paragraaf wordt de opgemeten relatie tussen de opwaartse waterhoogte en het debiet (de zgn. QH-relatie) vergeleken met drie theoretische rekenmethodes. Hierbij wordt opgemerkt dat deze paragraaf is overgenomen uit Vercruyssen *et al.* (2015) en vervolgens is aangevuld met de resultaten van de onderhavige schaalmodelmetingen en de QH relatie afgeleid uit het MIKE11 model voor het dimensioneren van het benodigd aantal in- en uitwateringskokers voor het GGG Doelpolder.

Uit het eerder uitgevoerde schaalmodelonderzoek (Vercruyssen *et al.*, 2012, 2013; Vercruyssen, Verelst, Peeters, *et al.*, 2014; Vercruyssen, Verelst, Taverniers, *et al.*, 2014) volgt dat voor de stromingscondities waarbij het instromende water het plafond van de inwateringskoker niet raakt en het polderpeil lager is dan het vloerpeil van de inwateringskoker het debiet op een goede wijze berekend wordt door middel van een overlaatformule:

$$q = a \cdot h^{1.5}$$

Met:

- q	Debiet per eenheidsbreedte	[m <sup>2</sup> /s]
- a	Coëfficiënt ≈ 1.55	[m <sup>0.5</sup> /s]
- h	rivierpeil boven drempelpeil inwatering	[m]

De coëfficiënt a is afhankelijk van de verhouding rivierpeil ten opzichte van drempelpeil en de lengte van de inwateringskoker. Op basis van het uitgevoerde schaalmodelonderzoek wordt een coëfficiënt 1.55 als een representatieve waarde beschouwd voor stroming zonder schotbalken.

Merk op dat:

- deze waarde bepaald werd voor schaalmodelproeven met een geleidelijke instroming, zonder tussenmuren en zonder vuilroosters.
- door het versnellen van het water boven de inwateringskoker zal de piëzometrische lijn zakken. Hierdoor raakt de inwateringskoker pas verdrongen bij een rivierpeil hoger dan het plafondpeil van de inwateringskoker. Op basis van een vergelijking met schaalmodelresultaten voor Bergenmeersen werd in het advies ingeschat dat de inwateringskoker pas verdrongen raakt bij een rivierpeil ca. TAW + 6.80 m. Het rivierpeil is hierbij 1.3 m hoger dan het plafondpeil van de inwateringskoker op TAW + 5.70 m.

Voor het berekenen van het instromend debiet wordt door Arcadis een formule voor stroming onder druk toegepast:

$$q = \mu \cdot h_{inlaat} \cdot \sqrt{2gh}$$

Met:

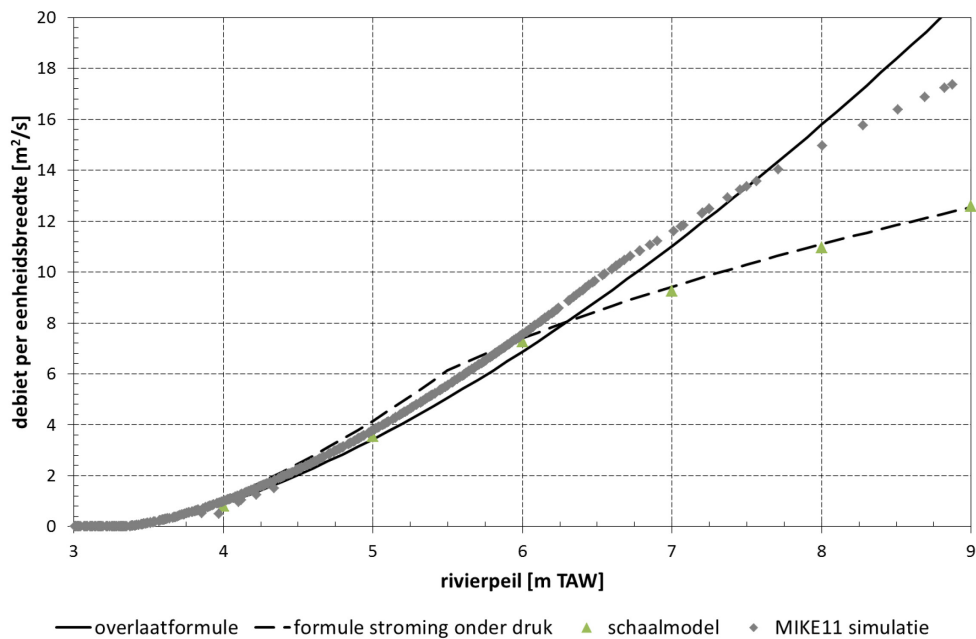
- q	Debiet per eenheidsbreedte	[m <sup>2</sup> /s]
- μ	Afvoercoëfficiënt = 0.6	[m <sup>0.5</sup> /s]
- $h_{inlaat}$	De kleinste van volgende waarden: Rivierpeil – vloerpeil inwateringskoker Plafondpeil – vloerpeil inwateringskoker = 2.2 m	[m] [m]
- g	Valversnelling = 9.81	[m/s <sup>2</sup> ]
- h	Verval	[m]

Het verval wordt berekend als volgt:

- Rivierpeil lager dan plafondpeil inwatering:  $h = \frac{P_{rivier} - P_{drempel}}{2}$
- Rivierpeil hoger dan plafondpeil inwatering:  $h = P_{rivier} - \frac{P_{plafond} - P_{drempel}}{2}$

Een vergelijking tussen het debiet volgens uit de bovenstaande formuleringen met het debiet opgemeten in het schaalmodel en het debiet afgeleid uit de MIKE11 simulatie wordt gegeven in Figuur 15. Merk op dat het debiet in deze figuur wordt uitgedrukt op basis van de kleinste breedte: de kokers worden gescheiden door een tussenmuur met breedte 0.40 m. Het debiet wordt dus berekend op basis van een kokerbreedte 2.60 m in plaats van 3.00 m.

Figuur 15 – Vergelijking overlaatformule vs. formule stroming onder druk

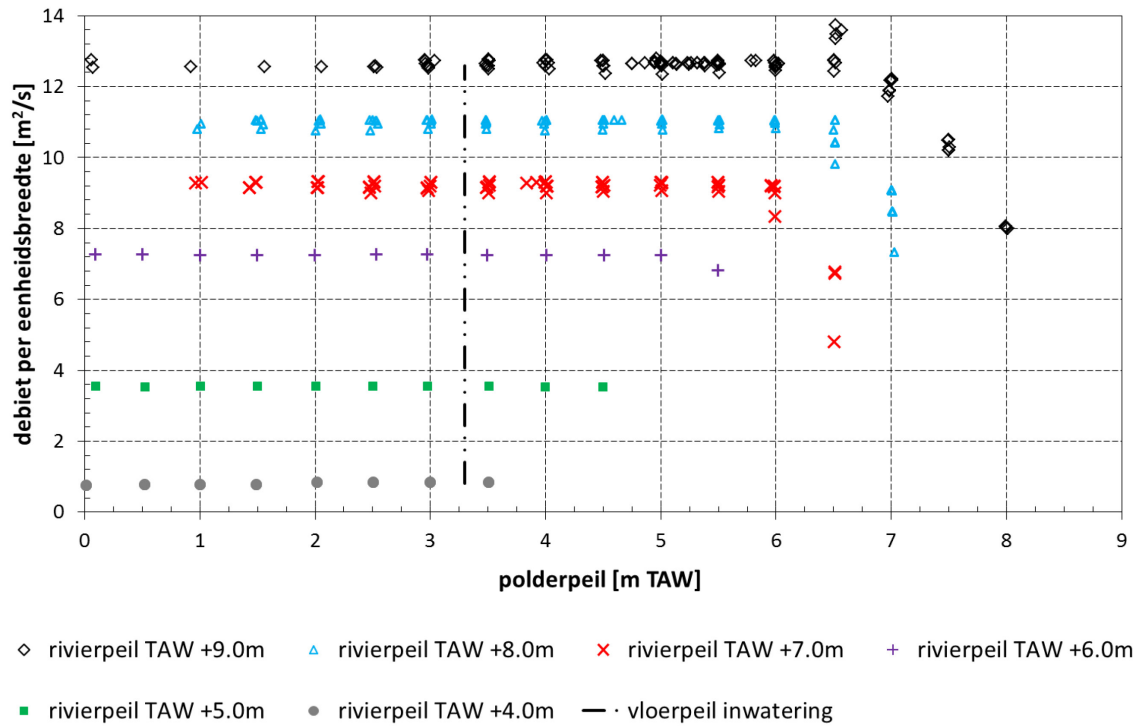


Merk op dat tot een rivierpeil TAW + 6.0 m de debiet-waterhoogte relatie opgemeten in het schaalmodel een goede gelijkens vertoont met de overlaatformule en het debiet afgeleid uit de MIKE11 simulatie. Ook de overeenkomst met de formule voor stroming onder druk is redelijk. Na een rivierpeil TAW + 6.0 m neemt het debiet quasi lineair toe met de waterhoogte. Het debiet valt hierbij samen met de door Arcadis voorgestelde formule voor stroming onder druk. Bij hogere peilen overschatten de overlaatformule en de MIKE11 simulatie de schaalmodelmetingen en neemt de afwijking toe bij een toename van het debiet. Bij een rivierpeil TAW + 9.0 m is het debiet afgeleid uit de MIKE11 simulatie 40 % hoger dan het debiet opgemeten in het schaalmodel.

Bemerk dat bij een overschatting van het inkomend debiet door de MIKE11 simulatie de polder sneller gevuld zal zijn. Het minimum polderpeil bij een gegeven rivierpeil volgens uit de MIKE11 simulaties in paragraaf 2.2.2 zou hierbij een overschatting zijn. Aanbevolen wordt om de MIKE11 simulaties te herhalen met een debietcoëfficiënt gebaseerd op de schaalmodelmetingen.

Voorgaande debiet waterhoogte relaties zijn van toepassing bij voldoende lage polderpeilen. In Figuur 16 wordt voor de beproefde rivierpeilen het debiet gegeven in functie van het polderpeil. Bemerk in deze figuur dat het debiet begint af te nemen bij polderpeilen die merkkelijk hoger zijn dan het vloerpeil van de inwateringskoker (TAW + 3.3 m). Bij een rivierpeil TAW + 9.0 m neemt het debiet pas af bij polderpeilen hoger dan TAW + 6.5 m.

Figuur 16 – Debiet in functie van polderpeil voor rivierpeil TAW + 4.0 m tot TAW + 9.0 m



In kader van de optimalisatie van de culvert input in de numerieke TELEMAC modellen van de Zeeschelde plant WL onder project 16\_063 in oktober 2016 bijkomende metingen uit te voeren in het schaalmodel. Hierbij wordt de debiet waterhoogte opgemeten, zonder en met schotbalken in de inwateringskoker. Ook zal een proef uitgevoerd worden met vuilroosters.

## 5 Proevenreeks Geometrie 1

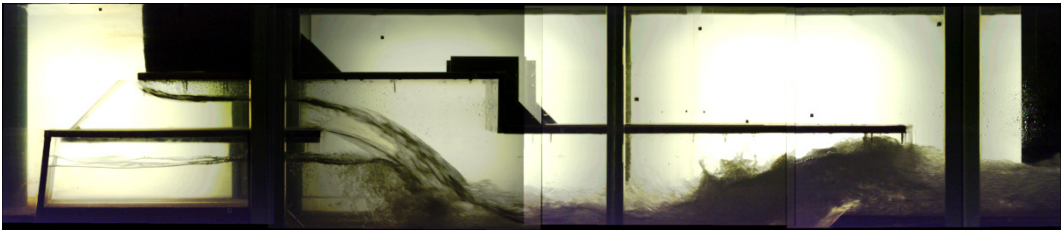
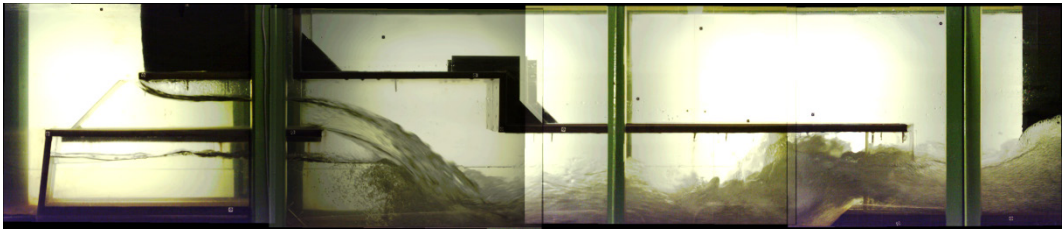
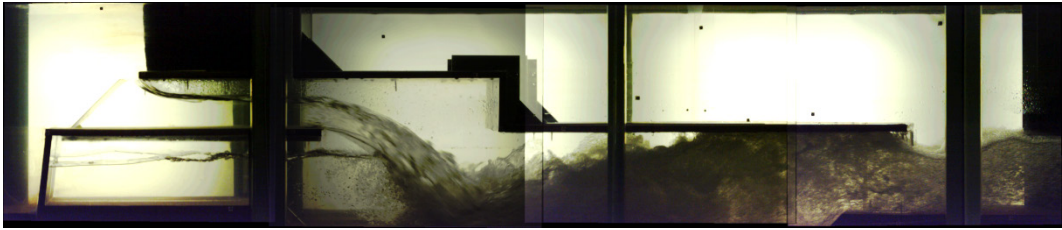
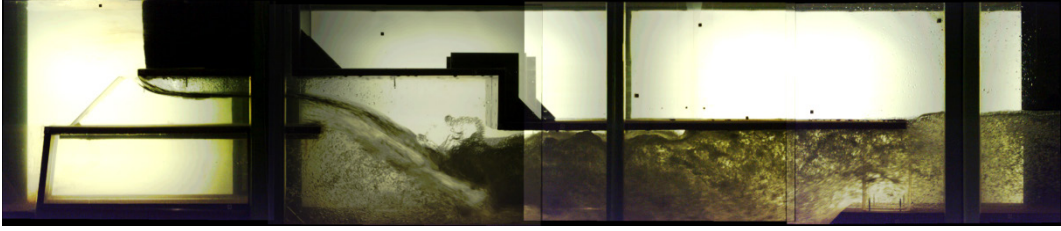
De eerste proeven werden uitgevoerd voor de geometrie uit de ontwerpplannen, zie paragraaf 2.1.1. Voor deze geometrie zijn proeven uitgevoerd bij rivierpeilen TAW + 4.0 m tot TAW + 9.0 m met een stapgrootte 1.0 m. Bij elk van deze opwaartse waterpeilen werd een reeks van polderpeilen beproefd met een stapgrootte 0.5 m.

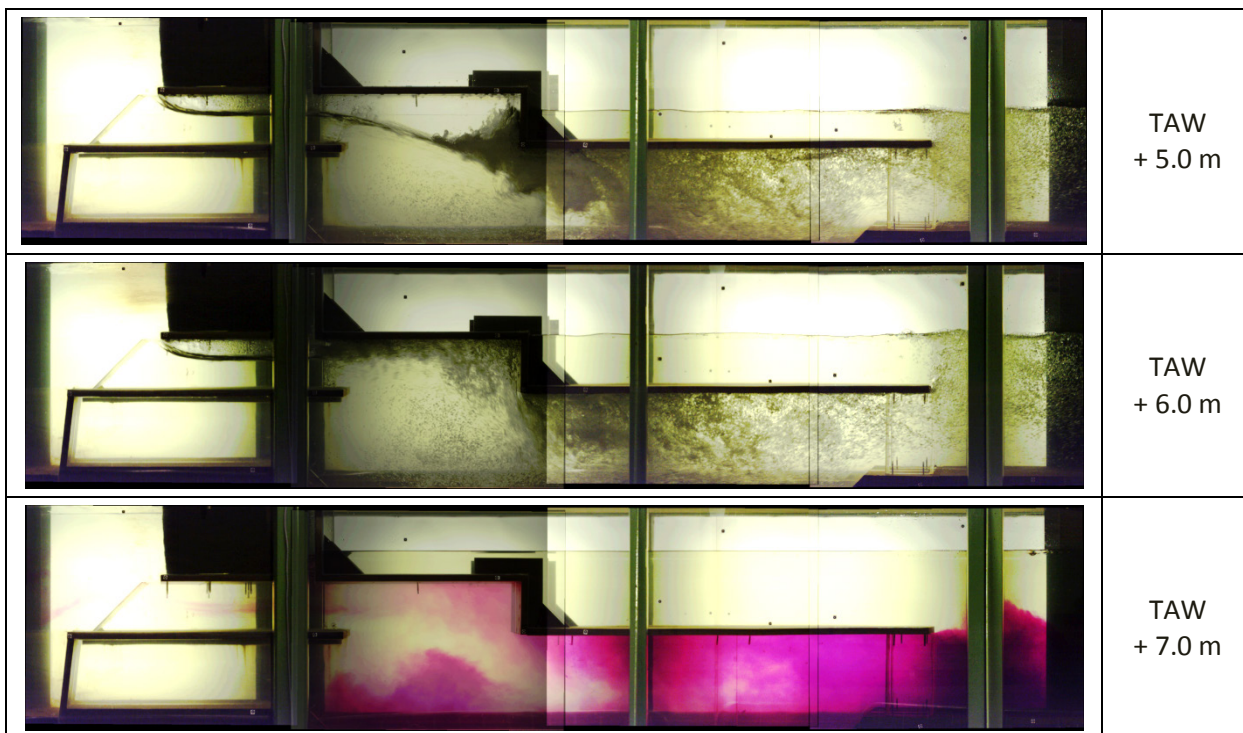
De resultaten voor het maximale rivierpeil, TAW + 9.0 m, worden besproken in paragraaf 5.1. De resultaten voor de metingen met de overige rivierpeilen worden besproken in paragraaf 5.2. De conclusies worden samengevat in paragraaf 5.3. Opnames van het stromingspatroon voor een rivierpeil TAW + 9.0 m, TAW + 8.0 m en TAW + 7.0 m en een reeks polderpeilen worden gegeven in Bijlage A.

### 5.1 Rivierpeil TAW + 9.0 m

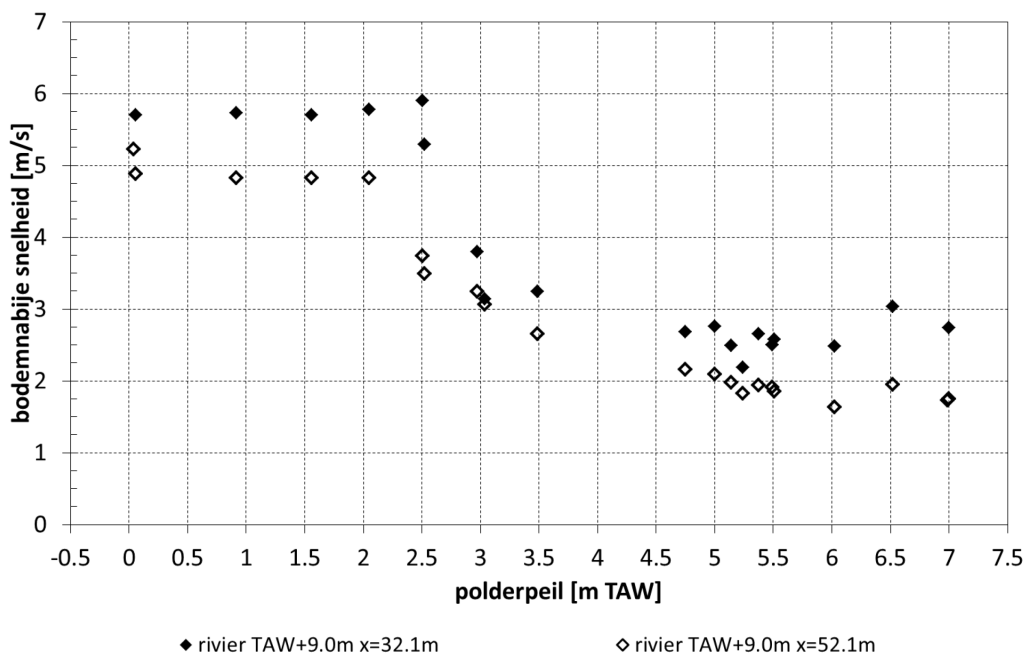
Voor een rivierpeil TAW + 9.0 m wordt in Figuur 17 een opname van het stromingspatroon gegeven voor een reeks toenemende polderpeilen. De bodemnabije snelheid wordt opgemeten op het begin (32.1 m na de val) en het einde van de zone met bodembescherming (52.1 m na de val). Figuur 18 geeft voor een rivierpeil TAW + 9.0 m de bodemnabije snelheid in functie van het polderpeil.

Figuur 17 – Geometrie 1 - Opname stromingspatroon – rivierpeil TAW + 9.0 m

	Extreem laag polderpeil (< TAW + 2.0 m)
	TAW + 2.5 m
	TAW + 3.0 m
	TAW + 4.0 m



Figuur 18 – Geometrie 1 – Bodemnabije snelheid in functie van polderpeil – rivierpeil TAW + 9.0 m



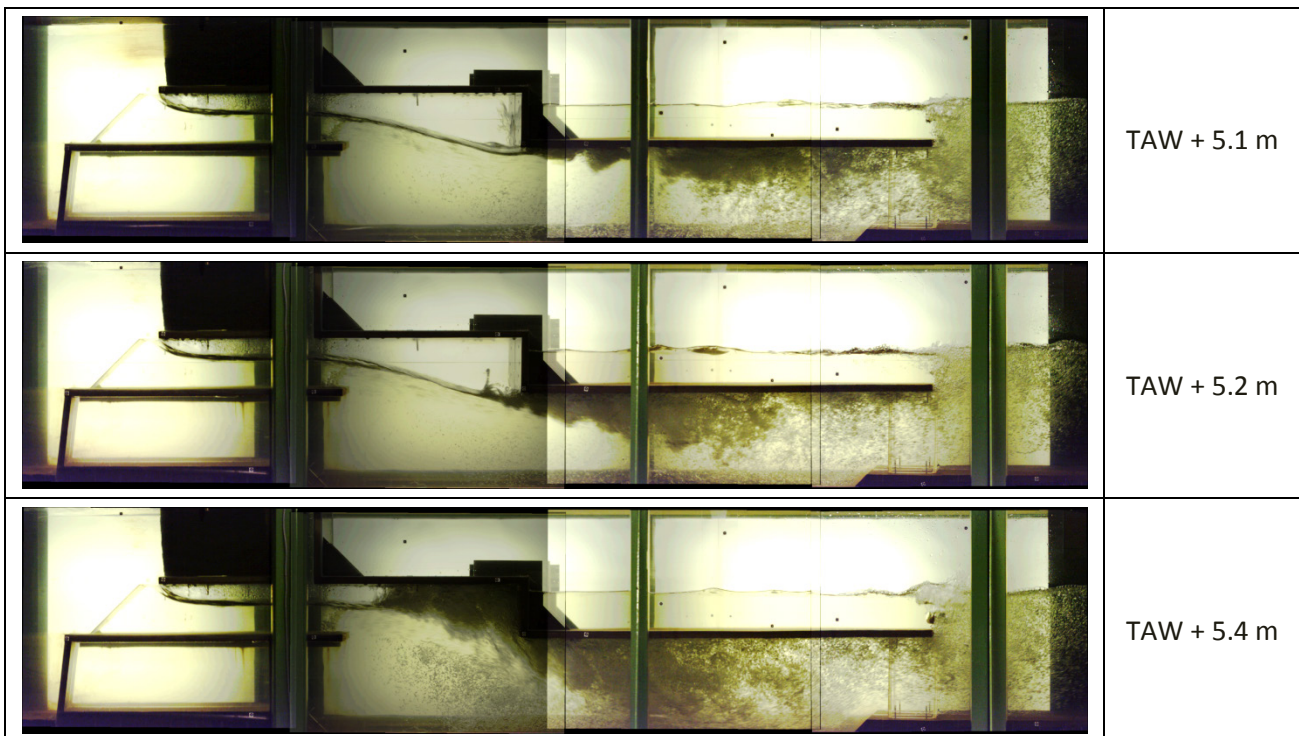
Uit Figuur 17 en Figuur 18 volgt:

- Bij polderpeilen lager dan TAW + 2.50 m ontstaat geen watersprong in de woelkom en is de stroming uit de woelkom nog superkritisch (5 à 6 m/s). Bij afwaartse waterpeilen lager dan TAW + 2.0 m is de stroomsnelheid onafhankelijk van het polderpeil. De verklaring hiervoor is dat de kracht van de superkritische stroming uit de woelkom (verminderd met de wrijvingsverliezen op 52.1 m na de val) nog groter is dan de tegenkracht van het polderpeil. Bij een polderpeil TAW + 2.5 m wordt de verlaging van de bodemnabije snelheid op 52.1 m na de val verklaart doordat een watersprong ontstaat tussen 32.1 m en 52.1 m na de val.



- Vanaf een polderpeil TAW + 3.0 m wordt een watersprong opgemerkt in de woelkom. Bij dit polderpeil is ook de stroming op 32.1 m na de val subkritisch en bedraagt de bodemnabije stroomsnelheid 3.8 m/s.
- Vanaf een polderpeil TAW + 4.5 m is het plafond van de uitwateringskoker verdronken.
- Vanaf een polderpeil TAW + 5.0 m wijzigt de verdronken watersprong in een oppervlakte jet die bij een verdere stijging van het polderpeil in contact komt het plafond van de uitwateringskoker. Het stromingspatroon bij een polderpeil TAW + 5.1 m, TAW + 5.2 m en TAW + 5.4 m wordt gegeven in Figuur 19.
- Vanaf een polderpeil TAW + 7.0 m is de constructie volledig verdronken en begint ook het debiet af te nemen (zie Figuur 16).
- Bij de proeven voor Vlassenbroek en De Bunt met een lokaal verdiepte woelkom werd boven het begin van de zone met bodembescherming terugstroming vastgesteld. Deze terugstroming wordt veroorzaakt doordat de einddrempel de bodemnabije snelheid op het einde van de woelkom naar het wateroppervlak toe richt. De aanwezigheid van het plafond boven de einddrempel bij Doelpolder zorgt ervoor dat de uitstroming terug horizontaal gericht wordt. Het ontbreken van een zone met terugstroming afwaarts de drempel is te zien in de opname van het stromingspatroon met kleurstof bij een polderpeil TAW + 7.0 m.
- Uit paragraaf 2.2.2 volgt dat bij een rivierpeil TAW + 9.0 m het minimum voorkomend polderpeil, door de vulling van het gebied, TAW + 5.4 m bedraagt. De maximale bodemnabije snelheid aan het begin en het einde van de zone met bodembescherming bij polderpeilen hoger als TAW + 5.4 m bedraagt 3.0 m/s respectievelijk 1.9 m/s. Aangezien uit hoofdstuk 4 volgde dat vanaf een rivierpeil TAW + 6.0 m het debiet uit de MIKE11 simulaties hoger is dan het opgemeten debiet zijn de polderpeilen uit de MIKE11 simulaties een overschatting. De marge tot het peil waarop een vrije sprong begint te ontstaan in de woelkom, TAW + 3.0 m, is wel voldoende ruim.

Figuur 19 - Geometrie 1 – rivierpeil TAW + 9.0 m - Opname stromingspatroon bij een polderpeil

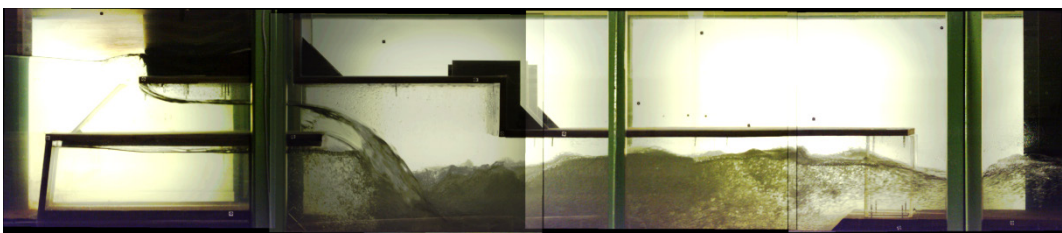



TAW + 5.1 m, TAW + 5.2 m en TAW + 5.4 m



## 5.2 Overige peilen

Het stromingspatroon bij rivierpeilen TAW + 7.0 m en TAW + 8.0 m en een extreem laag polderpeil wordt gegeven in Figuur 20. Daarnaast toont Figuur 21 het stromingspatroon bij dezelfde rivierpeilen maar nu in geval van (een benadering van) het minimum polderpeil zoals bepaald met behulp van de MIKE11 simulaties (zie ondergrenzen in Tabel 2). In Figuur 22 wordt vervolgens voor de beproefde rivierpeilen de bodem nabije snelheid op 32.1 m en 52.1 m na de val in functie van het polderpeil gegeven.

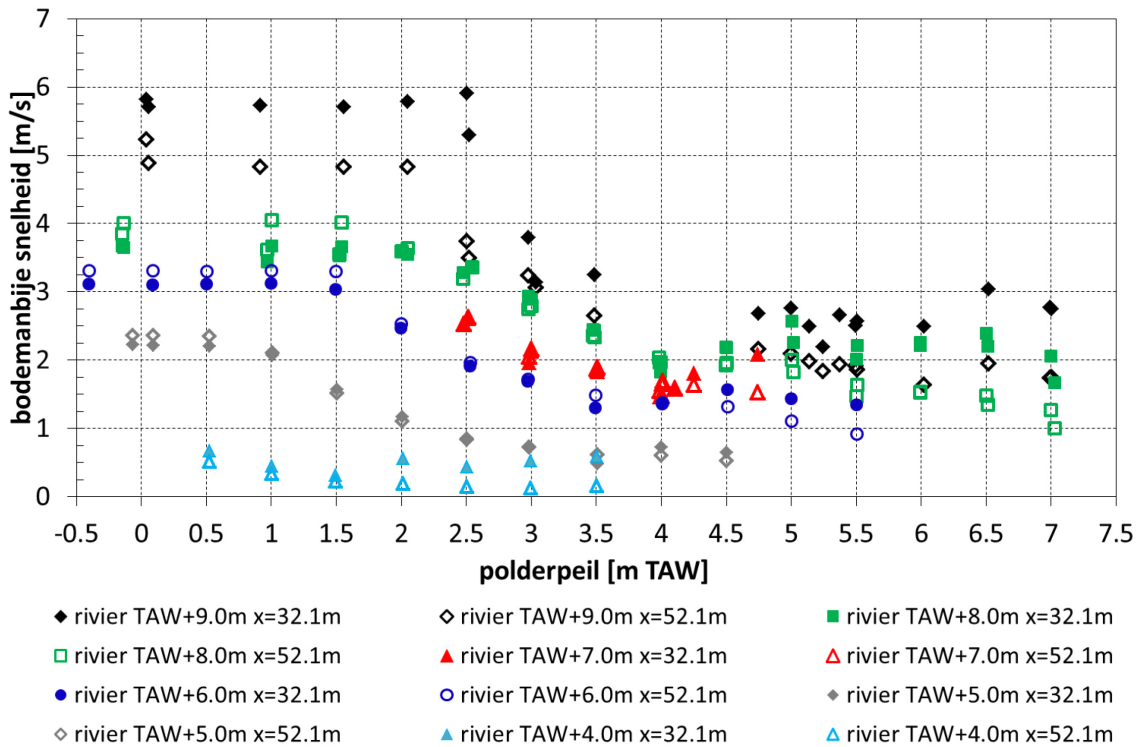
Figuur 20 – Geometrie 1 - Opname stromingspatroon bij verschillende rivierpeilen en een extreem laag polderpeil

rivierpeil		extreem laag polderpeil
TAW + 7.0 m		< TAW + 2.0 m
TAW + 8.0 m		< TAW + 1.5 m

Figuur 21 – Geometrie 1 - Opname stromingspatroon bij verschillende rivierpeilen en min. voorkomend polderpeil

rivierpeil		min. polderpeil MIKE 11	polderpeil opname
TAW + 7.0 m		TAW + 3.4 m	TAW + 3.0 m
TAW + 8.0 m		TAW + 4.1 m	TAW + 4.0 m

Figuur 22 – Geometrie 1 – bodem nabije snelheid in functie van polderpeil – overige rivierpeilen



Uit Figuur 20 tot en met Figuur 22 volgt:

- Bij een rivierpeil TAW + 8.0 m en lager treedt onafhankelijk van het peil in de polder een watersprong in de woelkom op. De stroming na de woelkom is hierbij subkritisch. Bij lage polderpeilen zal in het schaalmodel op het einde van de vernauwde modelsectie de kritische waterhoogte optreden. Hierbij stelt zich een afwaarts bepaalde verhanglijn in die onafhankelijk is van het polderpeil. Deze situatie wordt in de figuren gekenmerkt door het constant blijven van de snelheid en de hogere snelheid op 52.1 m na de val ten opzichte van 32.1 m na de val. Dit is verschillend met het stromingspatroon bij TAW + 9.0 m waar de stroming uit de woelkom bij lage polderpeilen superkritisch is.
- Bij hogere polderpeilen (voor een rivierpeil TAW + 8.0 m is dit vanaf een polderpeil TAW + 2.0 m) is de bodem nabije snelheid op 32.1 m na de val en 52.1 m na de val quasi gelijk en neemt de snelheid af bij een toename van het polderpeil. Hierbij treedt een vrije en vervolgens een verdrongen watersprong op in de woelkom. Dit is gelijkaardig met de stroming bij een rivierpeil TAW + 9.0 m.
- Bij de overgang van een verdrongen watersprong naar een oppervlakte jet neemt de bodem nabije snelheid terug toe (voor een rivierpeil TAW + 8.0 m is dit bij een polderpeil TAW + 4.5 m). Dit is gelijkaardig met de stroming bij een rivierpeil TAW + 9.0 m.
- Uit de MIKE11 simulaties volgt voor een rivierpeil TAW + 8.0 m respectievelijk TAW + 7.0 m een minimum polderpeil, door vulling van het gebied, van TAW + 4.10 m respectievelijk TAW + 3.40 m. Uitgaande van deze minimale polderpeilen door vulling, bedraagt de maximale bodem nabije snelheid voor een rivierpeil TAW + 8.0 m 2.6 m/s aan het begin van de bodembescherming en 2.0 m/s aan het einde van de zone met bodembescherming. De maximale voorkomende bodem nabije snelheid voor een rivierpeil TAW + 7.0 m bedraagt 2.4 m/s aan het begin en einde van de bodembescherming.

## 5.3 Conclusies

Uit de schaalmodelproeven voor Geometrie 1 (geometrie volgens de huidige ontwerpplannen) volgt dat bij rivierpeilen lager dan TAW + 8.0 m onafhankelijk van het polderpeil steeds een watersprong optreedt in de woelkom. In het geval van een rivierpeil TAW + 9.0 m ontstaat er in de woelkom geen watersprong bij polderpeilen lager dan TAW + 3.0 m waardoor er ter plaatse van de meetpunten (en daarmee de locatie van de afwaartse bodembescherming achter de constructie) superkritische stroomsnelheden (circa 6 m/s) optreden. Het optreden van superkritische stroming ter plaatse van de afwaartse bodembescherming achter de betonnen constructie dient met oog op erosie te worden voorkomen.

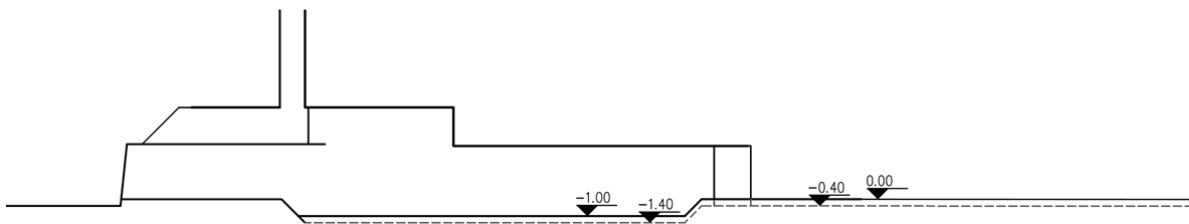
Uit de MIKE11 simulaties van de vulling van het gebied volgt dat bij een rivierpeil TAW + 9.0 m het minimum polderpeil TAW + 5.4 m bedraagt wat ruim hoger is dan TAW + 3.0 m het minimum polderpeil waarbij een sprong in de woelkom optreedt. De maximale bodemnabije snelheid aan het begin respectievelijk het einde van de zone met bodembescherming bij polderpeilen hoger als TAW + 5.4 m bedraagt 3.0 m/s respectievelijk 1.9 m/s. Hierbij wordt wel opmerkt dat uit de analyse van de relatie tussen debiet en opwaartse waterstand bleek dat de minimum polderpeilen zoals berekend door middel van de MIKE11-simulaties de vulling in het GGG overschat zijn. Het verschil tussen de 'kritieke' waarde voor het polderpeil (TAW + 3.0 m) en het optredende minimale polderpeil volgens de modelberekeningen (TAW + 5.4 m) is voldoende ruim om te concluderen dat bij de beproefde geometrie (Geometrie 1) en de maatgevende hydraulische randvoorwaarden altijd een watersprong in de woelkom zal optreden.

Op basis hiervan wordt besloten dat Geometrie 1 voldoet.

## 6 Proevenreeks Geometrie 2

Tijdens de bespreking van de resultaten van Geometrie 1 met de opdrachtgever en het studiebureau (dd. 19/05/2016) werd besloten om proeven uit te voeren op een geometrie waarvan de bodem van de woelkom en de bodem aan polderzijde met 0.40 m werd verhoogd. Zie Figuur 23 en paragraaf 2.1.2.

Figuur 23 – Wijziging Geometrie 2 (volle lijn) ten opzichte van Geometrie 1 (stippellijn)

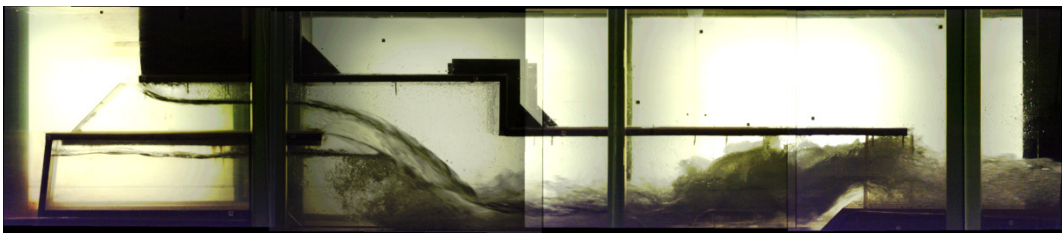

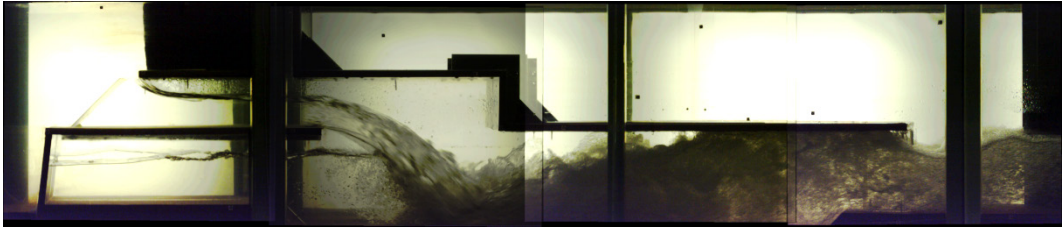
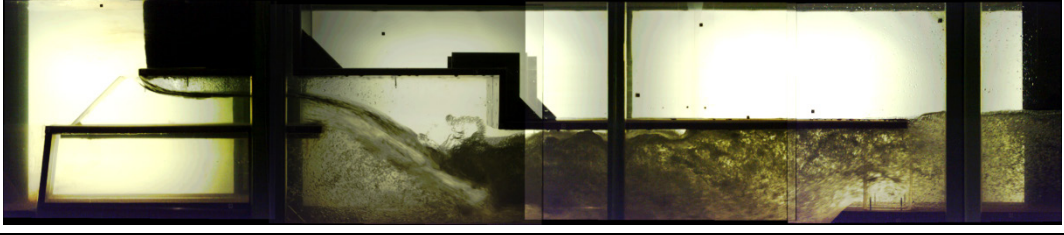
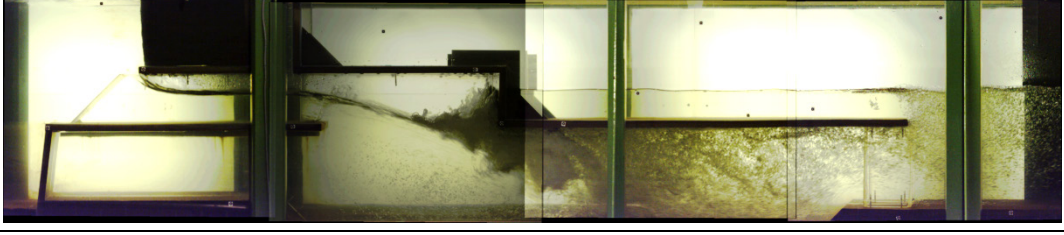
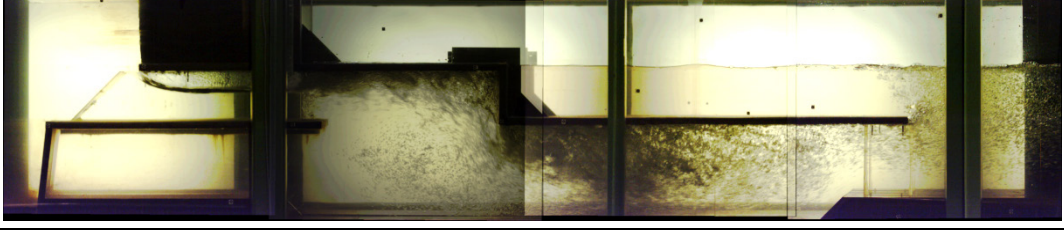



Met deze geometrie zijn proeven uitgevoerd bij rivierpeilen van TAW + 7.0 m, TAW + 8.0 m en TAW + 9.0 m en een reeks van polderpeilen met een stapgrootte 0.5 m. De resultaten voor het maximale rivierpeil, TAW + 9.0 m, worden besproken in paragraaf 6.1. De resultaten voor de metingen met de overige rivierpeilen worden besproken in paragraaf 6.2. De conclusies worden samengevat in paragraaf 6.3. Opnames van het stromingspatroon voor een rivierpeil TAW + 7.0 m, TAW + 8.0 m en TAW + 9.0 m en een reeks polderpeilen worden gegeven in Bijlage A.

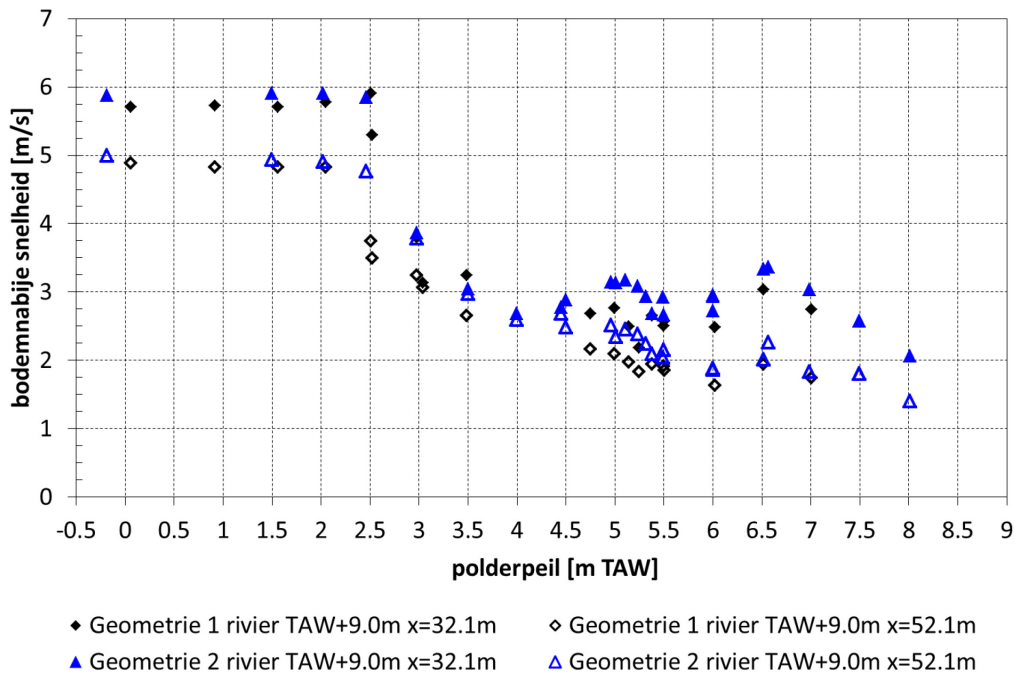
### 6.1 Rivierpeil TAW + 9.0 m

Voor een opwaarts rivierpeil TAW + 9.0 m wordt in Figuur 24 een opname van het stromingspatroon gegeven voor een reeks toenemende polderpeilen. De bodem nabije snelheid wordt opgemeten op het begin (32.1 m na de val) en einde van de zone met bodembescherming, (52.1 m na de val). Figuur 25 geeft voor een rivierpeil TAW + 9.0 m de bodem nabije snelheid in functie van het polderpeil. Ter vergelijking worden in deze figuur ook resultaten getoond voor Geometrie 1.

Figuur 24 – Geometrie 2 – opname stromingspatroon - rivierpeil TAW + 9.0 m

	Extreem laag polderpeil < TAW + 2.0 m
	TAW + 2.5 m
	TAW + 3.0 m
	TAW + 4.0 m
	TAW + 5.0 m
	TAW + 6.0 m
	TAW + 7.0 m

Figuur 25 – Geometrie 2 – Bodem nabije snelheid in functie van polderpeil - rivierpeil TAW + 9.0 m



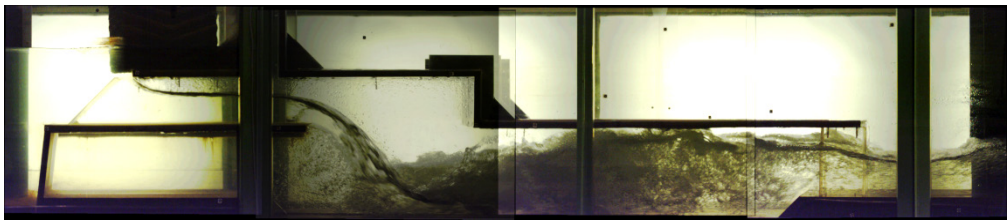
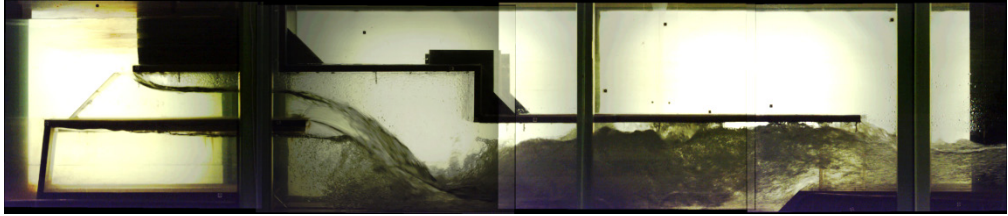
Uit Figuur 24 en Figuur 25 volgt:

- De stromingspatronen en het verloop van de opgemeten bodem nabije snelheid zijn voor Geometrie 2 sterk gelijkend met Geometrie 1.
- Het ontstaan van een watersprong boven de zone met bodembescherming gebeurt zoals verwacht bij een iets hoger polderpeil als het geval is bij Geometrie 1. De toename van het benodigd polderpeil valt af te leiden doordat bij een polderpeil TAW + 2.50 m de bodem nabije snelheid op het einde van de bodembescherming als is afgenomen bij Geometrie 1 maar nog niet bij Geometrie 2. De variatie van het polderpeil met 0.50 m is echter te grof om deze toename te kwantificeren.
- Vanaf een polderpeil TAW + 4.5 m en hoger is de bodem nabije snelheid voor Geometrie 2 ca. 0.5 m/s hoger dan voor Geometrie 1.
- De inlaatkoker is volledig verdrongen vanaf een polderpeil TAW + 6.50 m. Vanaf dit polderpeil neemt ook het debiet (zie Figuur 16) en daarmee de snelheid ter plaatse van de meetpunten af.
- Uit de MIKE11 simulaties van het gebied volgt dat bij een rivierpeil TAW + 9.0 m het minimum polderpeil door vulling van het gebied TAW + 5.4 m bedraagt, zie paragraaf 2.2.2. De maximale voorkomende bodem nabije snelheid aan het begin respectievelijk het einde van de bodembescherming bedraagt 3.3 m/s respectievelijk 2.2 m/s. Ten opzichte van Geometrie 1 is de maximale voorkomende bodem nabije snelheid op het begin en einde van de zone met bodembescherming beperkt toegenomen met 0.3 m/s. Aangezien uit hoofdstuk 4 volgde dat vanaf een rivierpeil TAW + 6.00 m het debiet uit de MIKE11 simulaties hoger is dan het opgemeten debiet zijn de uit de MIKE11 simulaties volgende polderpeilen een overschatting. De marge tussen het minimum voorkomend polderpeil (TAW + 5.4 m) en het minimum polderpeil waarbij een sprong ontstaat in de woelkom (TAW + 3.0 m) is wel ruim.



## 6.2 Overige peilen

Het stromingspatroon bij een rivierpeil TAW + 7.0 m en TAW + 8.0 m en een extreem laag polderpeil wordt gegeven in Figuur 26. Daarnaast voor dezelfde twee rivierpeilen het stromingspatroon bij het minimum voorkomend polderpeil volgend uit de MIKE11 simulaties gegeven in Figuur 27. In Figuur 28 wordt vervolgens de bodemnabije snelheid op 32.1 m en 52.1 m na de val in functie van het polderpeil gegeven.

Figuur 26 – Geometrie 2 - Opname stromingspatroon bij een rivierpeil TAW +7.0 m en TAW + 8.0 m en een extreem laag polderpeil

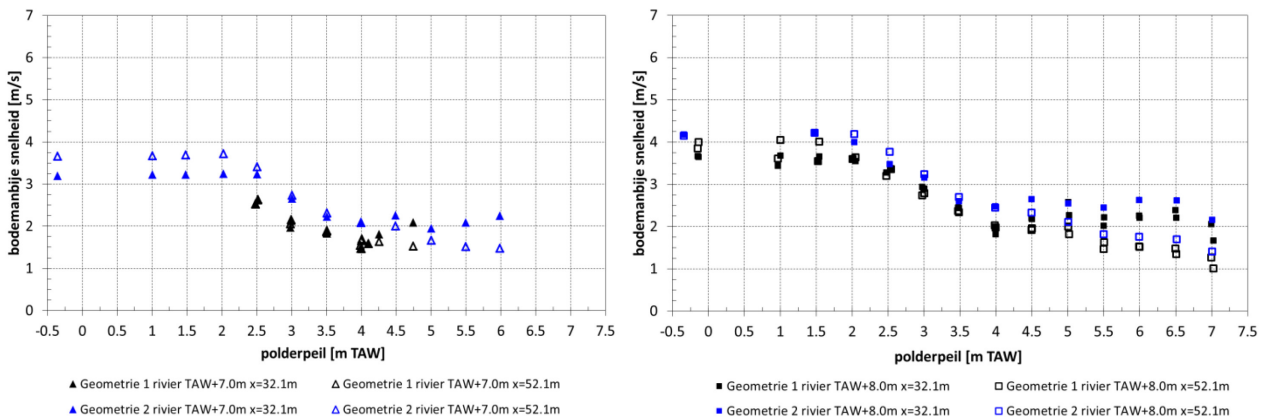
rivierpeil		extreem laag polderpeil
TAW + 7.0 m		< TAW + 2.0 m
TAW + 8.0 m		< TAW + 1.5 m

Figuur 27 – Geometrie 2 - Opname stromingspatroon bij een rivierpeil TAW +7.0 m en TAW + 8.0 m en het min. voorkomend polderpeil

rivierpeil		min. polderpeil MIKE 11	polderpeil opname
TAW + 7.0 m		TAW + 3.4 m	TAW + 3.0 m
TAW + 8.0 m		TAW + 4.1 m	TAW + 4.0 m



Figuur 28 – Geometrie 2 – bodem nabije snelheid in functie van polderpeil – rivierpeil TAW + 7.0 m (links) en TAW + 8.0 m (rechts)



Het verloop van de stroomsnelheid in functie van het polderpeil is voor een rivierpeil TAW + 7.0 m en TAW + 8.0 m vrijwel analoog tussen Geometrie 1 en Geometrie 2. De opgemeten stroomsnelheden bij Geometrie 2 zijn ca. 0.5 m/s hoger dan bij Geometrie 1. Ook bij lage polderpeilen ontstaat een watersprong in de woelkom en is de stroming boven de bodembescherming subkritisch. Uit de MIKE11 simulaties volgt voor een rivierpeil TAW + 8.0 m respectievelijk TAW + 7.0 m een minimum polderpeil, door vulling van het gebied, van TAW + 4.10 m en respectievelijk TAW + 3.40 m. Uitgaande van deze minimale polderpeilen bedraagt de maximale bodem nabije snelheid voor een rivierpeil TAW + 8.0 m 2.6 m/s aan het begin van de bodembescherming en 2.4 m/s aan het einde van de zone met bodembescherming. De maximale bodem nabije snelheid voor een rivierpeil TAW + 7.0 m bedraagt 2.3 m/s aan het begin en einde van de zone met bodembescherming.

### 6.3 Conclusies

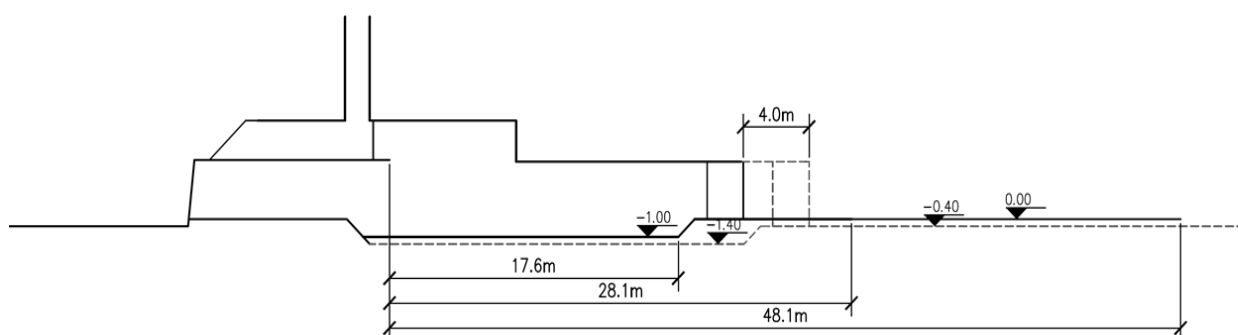
De stromingspatronen en het verloop van de opgemeten bodem nabije snelheid zijn voor Geometrie 2 vergelijkbaar met Geometrie 1. Bij een rivierpeil TAW + 8.0 m en lager ontstaat onafhankelijk van het polderpeil een watersprong in de woelkom. Het benodigd polderpeil om een sprong in de woelkom te laten ontstaan bij een rivierpeil TAW + 9.0 m is zoals verwacht beperkt groter dan bij Geometrie 1. De toename is echter kleiner dan de voor de proeven gehanteerde stapgrootte van het polderpeil (0.5 m) en dus niet te kwantificeren. Wanneer rekening gehouden wordt met het minimum voorkomend polderpeil op basis van de MIKE11 simulaties bedraagt de maximale voorkomende bodem nabije snelheid aan het begin respectievelijk het einde van de voorziene zone met bodembescherming 3.3 m/s respectievelijk 2.2 m/s. Ten opzichte van Geometrie 1 is de maximale voorkomende bodem nabije snelheid op het begin en einde van de zone met bodembescherming beperkt toegenomen met 0.3 m/s

Op basis hiervan wordt besloten dat ook woelkom Geometrie 2 voldoet.

## 7 Proevenreeks geometrie 3

Uit de proeven van Geometrie 2 volgde dat deze voldeed. Op het overleg met de opdrachtgever en Arcadis (dd. 19/05/2016) werd afgesproken om als een volgende stap op het verhogen van de bodem van woelkom en bodembescherming na te gaan of de constructie bijkomend nog ingekort kan worden. Op basis van visuele waarnemingen van het stromingspatroon in de woelkom werd besloten om voor Geometrie 3 de constructie met 4.0 m in te korten, zie ook paragraaf 2.1.3. De wijzigingen van Geometrie 3 ten opzichte van Geometrie 1 worden gegeven in Figuur 29. Bemerkt hierbij dat ook de zone met bodembescherming 4.0 m naar opwaarts geschoven wordt.

Figuur 29 – Wijziging Geometrie 3 (volle lijn) ten opzichte van Geometrie 1 (stippellijn)



Conform de aanpak bij Geometrie 1 en Geometrie 2 werden ook voor Geometrie 3 proeven uitgevoerd bij rivierpeilen TAW + 7.0 m, TAW + 8.0 m en TAW + 9.0 m en een reeks van polderpeilen met een stapgrootte 0.5 m. De resultaten voor het maximale rivierpeil, TAW + 9.0 m, worden besproken in paragraaf 7.1. De resultaten voor de metingen met de overige rivierpeilen worden besproken in paragraaf 7.2. De conclusies worden samengevat in paragraaf 7.3. Opnames van het stromingspatroon voor een rivierpeil TAW + 7.0 m, TAW + 8.0 m en TAW + 9.0 m en een reeks polderpeilen worden gegeven in Bijlage A.

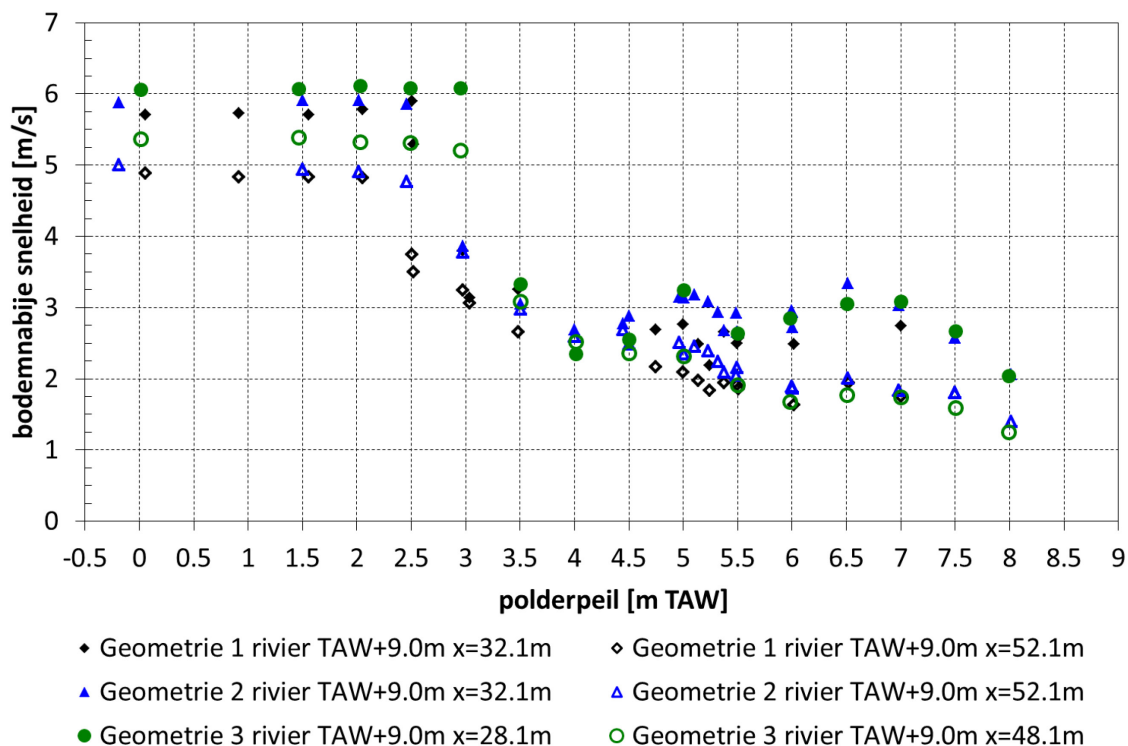
### 7.1 Rivierpeil TAW + 9.0 m

Voor een opwaarts rivierpeil TAW + 9.0 m wordt in Figuur 30 een opname van het stromingspatroon gegeven voor een reeks toenemende polderpeilen. De bodem nabije snelheid wordt opgemeten op het begin (28.1 m na de val) en het einde van de zone met bodembescherming, (48.1 m na de val). Figuur 31 geeft voor een rivierpeil TAW + 9.0 m de bodem nabije snelheid in functie van het polderpeil. Ter vergelijking worden in deze figuur ook resultaten getoond voor Geometrie 1.

Figuur 30 – Geometrie 3 – Opname stromingspatroon – rivierpeil TAW + 9.0 m

	<p>Extreem laag polderpeil &lt; TAW + 3.0 m</p>
	<p>TAW + 4.0 m</p>
	<p>TAW + 5.0 m</p>
	<p>TAW + 6.0 m</p>
	<p>TAW + 7.0 m</p>

Figuur 31 – Geometrie 3 – Bodem nabije snelheid in functie van polderpeil – rivierpeil TAW + 9.0 m



De stromingspatronen en het verloop van de opgemeten bodem nabije snelheid zijn voor Geometrie 3 vergelijkbaar met Geometrie 1 en Geometrie 2. Het ontstaan van een watersprong boven de zone met bodembescherming gebeurt bij een hoger polderpeil dan bij Geometrie 1 en Geometrie 2. Dit valt af te leiden uit de opname van het stromingspatroon en de overgang van superkritische snelheden naar subkritische snelheden boven de bodembescherming. Door de variatie van het polderpeil met 0.5 m is de toename niet exact te kwantificeren. Bij polderpeilen boven TAW + 3.5 m zijn de bodem nabije stroomsnelheden nagenoeg gelijk met Geometrie 2 en tot ca. 0.5 m/s hoger dan bij Geometrie 1.

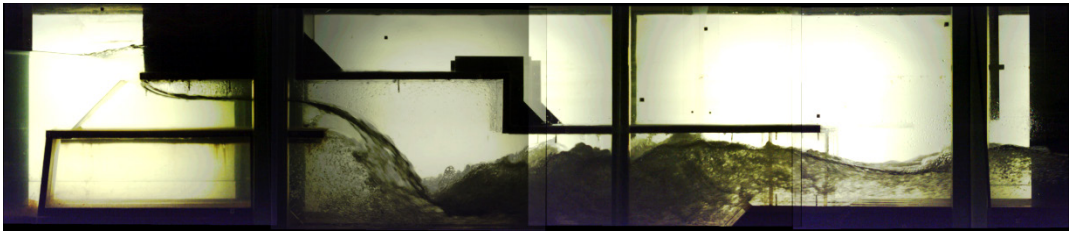
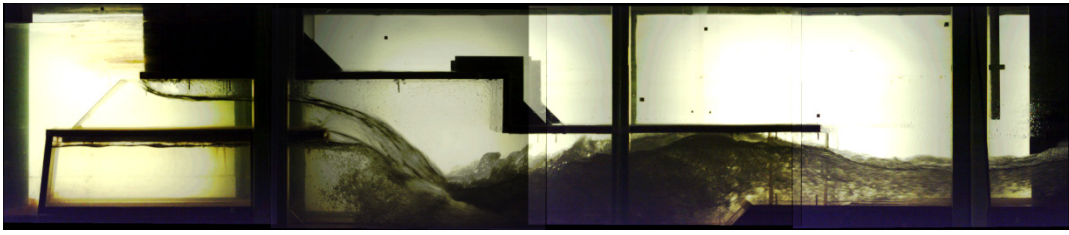
Een stromingssituatie waarbij de vallende straal de bodem raakt afwaarts van de einddrempel werd niet opgemerkt.

Uit de MIKE11 simulaties van het gebied volgt dat bij een rivierpeil TAW + 9.0 m het minimum polderpeil, door vulling van het gebied, TAW + 5.4 m bedraagt, zie paragraaf 2.2.2. Uitgaande van deze minimale polderpeilen bedraagt de maximale bodem nabije snelheid aan het begin respectievelijk het einde van de zone met bodembescherming ca. 3.1 m/s respectievelijk ca. 1.9 m/s. De bodem nabije snelheid op het begin van de zone met bodembescherming is nagenoeg gelijk met Geometrie 1 (3.0 m/s) en beperkt lager dan bij Geometrie 2 (3.3 m/s). De bodem nabije snelheid op het einde van de zone met bodembescherming is gelijk met Geometrie 1 (1.9 m/s) en beperkt lager dan bij Geometrie 2 (ca. 2.2 m/s). Aangezien uit hoofdstuk 4 volgde dat vanaf een rivierpeil TAW + 6.0 m het debiet uit de MIKE11 simulaties hoger is dan het opgemeten debiet zijn de uit de MIKE11 simulaties volgende polderpeilen een overschatting. De marge tussen het minimum polderpeil (TAW + 5.4 m) en het minimum polderpeil waarbij een sprong ontstaat in de woelkom (TAW + 3.5 m) is wel voldoende ruim.

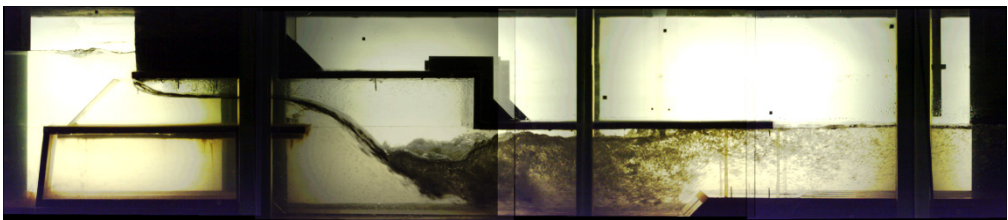
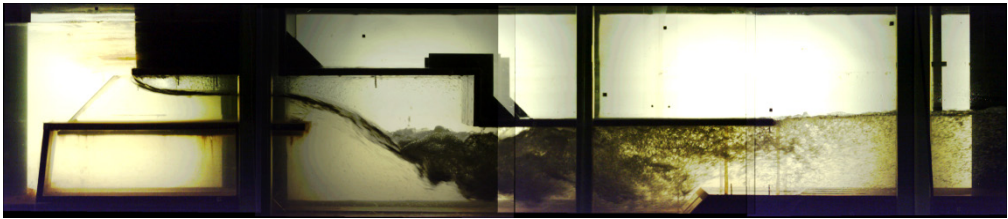
## 7.2 Overige peilen

Het stromingspatroon bij een rivierpeil TAW + 7.0 m en TAW + 8.0 m en een extreem laag polderpeil wordt gegeven in Figuur 32. Daarnaast voor dezelfde twee rivierpeilen het stromingspatroon bij het minimum polderpeil volgend uit de MIKE11 simulaties gegeven in Figuur 33. In Figuur 34 wordt vervolgens de bodemnabije snelheid op 32.1 m en 52.1 m na de val in functie van het polderpeil gegeven.

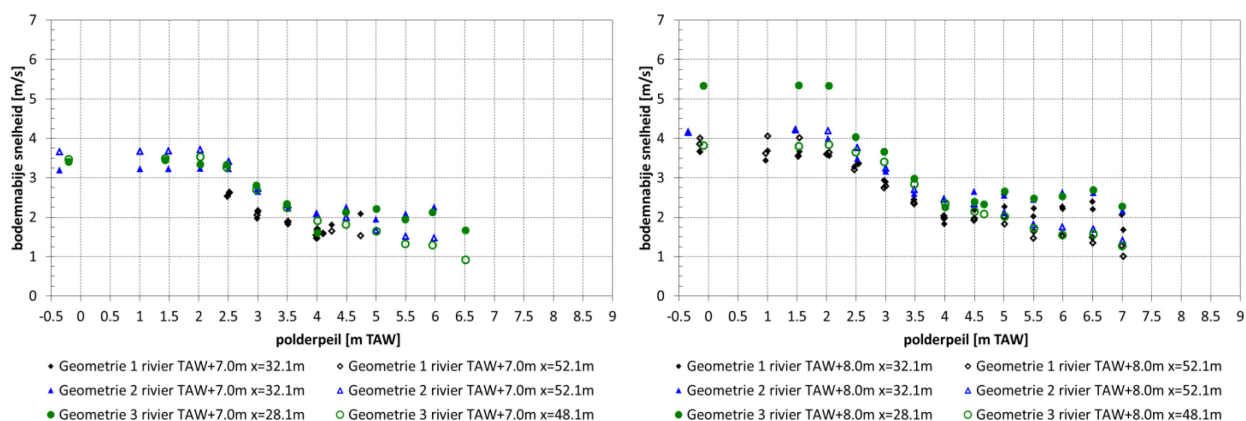
Figuur 32 – Geometrie 3 – Opname stromingspatroon bij verschillende rivierpeilen en een extreem laag polderpeil

		extreem laag polderpeil
TAW + 7.0 m		< TAW + 2.0 m
TAW + 8.0 m		< TAW + 1.5 m

Figuur 33 – Geometrie 3 – Opname stromingspatroon bij verschillende rivierpeilen en min. voorkomend polderpeil

rivierpeil		min. polderpeil MIKE11	polderpeil opname
TAW + 7.0 m		TAW + 3.4 m	TAW + 3.0 m
TAW + 8.0 m		TAW + 4.1 m	TAW + 4.0 m

Figuur 34 – Geometrie 3 – bodemnabije snelheid in functie van polderpeil – rivierpeil TAW + 7.0 m (links) en TAW + 8.0 m (rechts)



Het verloop van de stroomsnelheid in functie van het polderpeil is voor een rivierpeil TAW + 7.0 m gelijk met Geometrie 2. Voor een rivierpeil TAW + 8.0 m ontstaat bij extreem lage polderpeilen (< TAW + 2.5 m) wel energiedissipatie in de woelkom maar zijn de stroomsnelheden uit de woelkom nog superkritisch (> 4.4 m/s). Doordat nog een tweede watersprong ontstaat boven de zone met bodembescherming is de stroomsnelheid op het einde van de zone met bodembescherming terug subkritisch (< 4.4 m/s). Vanaf een polderpeil TAW + 2.5 m is ook de snelheid op 32.1 m na de val subkritisch. Uit de MIKE11 simulaties volgt voor een rivierpeil TAW + 8.0 m respectievelijk TAW + 7.0 m een minimum polderpeil, door vulling van het gebied, van TAW + 4.10 m respectievelijk TAW + 3.40 m. Bij een rivierpeil TAW + 8.0 m is er dus nog een marge van 1.6 m (TAW + 4.10 m – TAW + 2.5 m) op het benodigd polderpeil waarbij er voldoende energiedissipatie is in de woelkom.

## 7.3 Conclusies

Voor een rivierpeil TAW + 7.0 m zijn de resultaten voor Geometrie 2 en Geometrie 3 quasi gelijk. Bij een rivierpeil TAW + 9.0 m is een beperkt hoger polderpeil nodig voor het laten ontstaan van een watersprong in de woelkom: TAW + 3.5 m ten opzichte van TAW + 3.0 m. Voor een rivierpeil TAW + 8.0 m is een minimum polderpeil TAW + 2.5 m nodig om ervoor te zorgen dat er voldoende energiedissipatie is in de woelkom. Wanneer rekening gehouden wordt met het minimum voorkomend polderpeil op basis van de MIKE11 simulaties bedraagt de maximale voorkomende bodemnabije snelheid aan het begin respectievelijk het einde van de voorziene zone met bodembescherming 3.1 m/s respectievelijk 1.9 m/s. Een stromingssituatie waarbij de vallende straal de bodem raakt afwaarts van de einddrempel werd niet opgemerkt.

Op basis hiervan wordt besloten dat ook woelkom Geometrie 3 voldoet.

## 8 Conclusies

In kader van het ontwerp van de gecombineerde in- en uitwateringsconstructie voor het GGG Doelpolder vraagt afdeling Zeeschelde van Waterwegen en Zeekanaal NV (W&Z; contactpersoon Dorien Verstraete) advies aan het Waterbouwkundig Laboratorium. Het WL heeft voor deze constructie reeds een desktop revisie uitgevoerd op basis van ontwerpformules en schaalmodelproeven uitgevoerd voor andere gecombineerde in- en uitwateringsconstructie (Vercruyssen *et al.*, 2015). Doordat de verhouding van de inwateringshoogte tot de valhoogte buiten de reeds bestudeerde range ligt, werd aanbevolen om numerieke of fysische simulaties uit te voeren. Dit rapport behandelt de op het WL uitgevoerde fysische schaalmodelproeven voor de gecombineerde in- en uitwateringsconstructie Doelpolder.

Hiervoor werd in een stroomgoot van WL een schaalmodel op schaal 1/15 gebouwd. Dit model bestaat uit twee kokers inclusief tussenschotten maar exclusief vuilroosters of schotbalken. In dit model werd het waterpeil op- en afwaarts, het debiet en de bodem nabije snelheid op het begin en einde van de zone met een bodembescherming opgemeten. Ook werd door middel van 4 camera's het stromingspatroon in de constructie vastgelegd.

In totaal werden drie woelkom geometrieën beproefd. De eerste geometrie werd overgenomen van de door het studie bureau aangereikte plannen. In de tweede beproefde geometrie werd de bodem van de woelkom en de zone na de woelkom met 0.40 m verhoogd. Bij de derde geometrie werd, volgend op de bodemverhoging, de constructie (lengte woelkom) ingekort met 4.0 m. De proeven werden uitgevoerd bij stationaire stromingscondities. De proeven werden steeds uitgevoerd bij rivierpeilen TAW + 7.0 m, TAW + 8.0 m en TAW + 9.0 m. Voor de eerste geometrie zijn ook rivierpeilen TAW + 4.0 m, TAW + 5.0 m en TAW + 6.0 m beproefd. Voor een gegeven rivierpeil werd een reeks polderpeilen met een stapgrootte 0.5 m beproefd.

De opgemeten relatie tussen de opwaartse waterhoogte en het debiet (de zgn. QH-relatie) werd vergeleken met drie theoretische rekenmethodes: 1) een overlaatformule opgesteld op basis van eerdere proeven, 2) een door Arcadis aangereikte duikerformule en 3) de uit het MIKE11 model van het gebied afgeleide relatie. Tot een rivierpeil TAW + 6.0 m vertoont de in het schaalmodel opgemeten debiet-waterhoogte relatie een goede gelijkens met de overlaatformule en het debiet afgeleid uit de MIKE11 simulatie. Ook de overeenkomst met de duikerformule is redelijk. Na een rivierpeil TAW + 6.0 m neemt het debiet quasi lineair toe met de waterhoogte. Het debiet valt hierbij samen met de door Arcadis voorgestelde formule voor stroming onder druk. Bij hogere peilen overschatten de overlaatformule en de MIKE11 simulatie de schaalmodelmetingen en neemt de afwijking toe bij een toename van het debiet.

Uit de schaalmodelproeven voor Geometrie 1 (geometrie volgens de huidige ontwerpplannen) volgt dat bij rivierpeilen lager dan TAW + 8.0 m onafhankelijk van het polderpeil steeds een watersprong optreedt in de woelkom. In het geval van een rivierpeil van TAW + 9.0 m ontstaat er in de woelkom geen watersprong bij polderpeilen lager dan TAW + 3.0 m waardoor er ter plaatse van de meetpunten (en daarmee de locatie van de afwaartse bodembescherming achter de constructie) superkritische stroomsnelheden (circa 6 m/s) optreden. Het optreden van superkritische stroming ter plaatse van de afwaartse bodembescherming achter de betonnen constructie dient met oog op erosie te worden voorkomen. Uit de MIKE11 simulaties van de vulling van het gebied volgt echter dat bij een rivierpeil TAW + 9.0 m het minimum polderpeil TAW + 5.40 m bedraagt, wat ruim hoger is dan het minimum polderpeil waarbij een sprong in de woelkom optreedt (TAW + 3.0 m). Geometrie 1 voldoet.

Hierop volgend werd Geometrie 2 beproefd waarbij de bodem van de woelkom en de zone na de woelkom met 0.40 m verhoogd werden ten opzichte van Geometrie 1. De stromingspatronen en het verloop van de opgemeten bodem nabije snelheid zijn voor Geometrie 2 vergelijkbaar met Geometrie 1. Bij een rivierpeil TAW + 8.0 m en lager ontstaat onafhankelijk van het polderpeil een watersprong in de woelkom. Het benodigd polderpeil om een sprong in de woelkom te laten ontstaan bij een rivierpeil TAW + 9.0 m is zoals verwacht beperkt groter dan bij Geometrie 1. Op basis hiervan wordt besloten dat ook (woelkom) Geometrie 2 voldoet.

Bij Geometrie 3 werd, volgend op de bodemverhoging, de constructie (lengte woelkom) ingekort met 4.0 m. Deze inkorting werd gekozen op basis van visuele waarnemingen van het stromingspatroon van Geometrie 2. Voor een rivierpeil TAW + 7.0 m zijn de resultaten voor Geometrie 2 en Geometrie 3 quasi gelijk. Bij een rivierpeil TAW + 9.0 m is een beperkt hoger benodigd polderpeil nodig voor het laten ontstaan van een watersprong in de woelkom: TAW + 3.5 m ten opzichte van TAW + 3.0 m. En voor een rivierpeil TAW + 8.0 m is een minimum polderpeil TAW + 2.5 m nodig om een voldoende energiedissipatie te voorzien in de woelkom. Op basis hiervan wordt besloten dat ook (woelkom) Geometrie 3 voldoet.

Op basis van het in deze studie uitgevoerde schaalmodelonderzoek worden nog volgende aanbevelingen gegeven:

- Alhoewel in de literatuur geadviseerd wordt om een vallende straal te beluchten zijn geen trillingen of onstabiele fenomenen opgemerkt bij het niet beluchten. Op basis hiervan wordt aanbevolen om voorlopig geen beluchting van de vallende straal te voorzien maar aan de hand van een evaluatie in praktijk na te gaan of (langdurige) onstabiele fenomenen voorkomen. Indien dit zo is kan besloten worden om de ruimte onder vallende straal alsnog te beluchten (bv. door een zog te creëren in de vallende straal).
- Het verdient aanbeveling om bij ingebruikname visueel na te gaan of aan polderzijde van de constructie geen watersprong optreedt. Voornamelijk wanneer door middel van schotbalken het inwateringspeil zo gedifferentieerd wordt dat er slechts enkele lage kokers zijn en de overige een hoog inwateringspeil hebben bestaat, door de tragere vulling van het gebied, het risico dat de stroomsnelheden merkkelijk hoger zijn dan hierboven gesimuleerd.
- Om dezelfde reden dient bij het afsluiten van het GGG voorafgaand aan stormcondities vermeden te worden dat omwille van tijdsgebrek slechts een gedeelte van de kokers gesloten wordt.
- Het verdient aanbeveling om de bodembescherming te inspecteren na een significante storm (indien de inwatering niet afgesloten werd).



## 9 Referenties

- Arcadis.** (2014a). ZEESCHELDE L.O. Inrichtingsstudie en technisch ontwerp GGG Doelpolder Kunstwerk Constructie bovenaanzicht deel 2 Draft dd. 17/12/2014
- Arcadis.** (2014b). ZEESCHELDE L.O. Inrichtingsstudie en technisch ontwerp GGG Doelpolder Kunstwerk Constructie snedes deel 3 Draft dd. 17/12/2014
- Arcadis.** (2015a). ZEESCHELDE L.O. - BEVEREN GGG Doelpolder Kunstwerk Constructie Bovenaanzicht deel 2. 25/09/2015
- Arcadis.** (2015b). ZEESCHELDE L.O. - BEVEREN GGG Doelpolder Kunstwerk Constructie snedes deel 3 25/09/2015
- Arcadis.** (2015c). ZEESCHELDE L.O. - BEVEREN GGG Doelpolder Kunstwerk Grondplan deel 1 25/09/2015
- Bodhaine, G.L.** (1968). Measurement of peak discharge at culverts by indirect methods. *Techniques of Water-Resources Investigations Reports*, 3-A3. USGS: [S.I.]
- Chanson, H.** (2007). Dynamic similarity and scale effects affecting air bubble entrainment in hydraulic jumps. *6th Int. Conf. Multiph. flow*
- Chanson, H.; AOKI, S.; Hoque, A.** (2004). Physical modelling and similitude of air bubble entrainment at vertical circular plunging jets. *Chem. Eng. Sci.* 59(4): 747–754
- Coen, L.; Boey, I.; Plancke, Y.; Verwaest, T.; Mostaert, F.** (2014). Dijkhoogtes Doelpolder: deelrapport 3. Aanvullende scenario-berekeningen met betrekking tot de GGG-werking en de veiligheid tegen overstromingen in het kader van de aanleg van het GGG Doelpolder. *WL Rapporten*, 12\_130. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen
- Coen, L.; Suzuki, T.; Altomare, C.; Plancke, Y.; Peeters, P.; Taverniers, E.; Verwaest, T.; Mostaert, F.** (2013). Dijkhoogtes Doelpolder: deelrapport 1. Aanvullende scenario-berekeningen met betrekking tot de veiligheid tegen overstromingen in het kader van de aanleg van het GGG Doelpolder. *WL Rapporten*, 12\_130. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen
- Novak, P.; Guinot, V.; Jeffrey, A.; Reeve, D.E.** (2010). Hydraulic modelling - an introduction: principles, methods and applications. Spon: Oxon. ISBN 978-0-419-25010-7
- Peeters, P.; Couck, J.; Mostaert, F.** (2012). Dijkhoogtes Doelpolder: deelrapport 2. Dijkdiagnose Zoetenberm. *WL Rapporten*, 12\_130. Afdeling Geotechniek: Antwerpen
- Peeters, P.; Taverniers, E.; Mostaert, F.** (2009). Studie ten behoeve van aanleg van overstromingsgebieden en natuurgebieden in het kader van het Sigmaplan: hydraulische randvoorwaarden voor toetsen op en ontwerpen naar veiligheid. *WL Rapporten*, 713\_15a. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen
- Vercruyssen, J.B.; Verelst, K.; Peeters, P.; Mostaert, F.** (2014). Sigmaplan – Gereduceerde Getijdegebieden – Schaalmodelproeven gecombineerde in- en uitwateringsconstructies: deelrapport 5. De Bunt. *WL Rapporten*, 00\_075. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen
- Vercruyssen, J.B.; Verelst, K.; Peeters, P.; Mostaert, F.** (2015). Sigmaplan – gereduceerde getijdegebieden: advies in- en uitwateringsconstructie Doelpolder. *WL Adviezen*, 14\_151. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen
- Vercruyssen, J.B.; Verelst, K.; Taverniers, E.; Peeters, P.; Mostaert, F.** (2012). Sigmaplan - gereduceerde getijdegebieden - schaalmodelproeven gecombineerde in- en uitwateringsconstructies: deelrapport 1. Bergenmeersen. *WL Rapporten*, 00\_075. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

**Vercruyse, J.B.; Verelst, K.; Taverniers, E.; Peeters, P.; Mostaert, F.** (2013). Sigmaplan – Gereduceerde Getijdegebieden – schaalmodelproeven gecombineerde in- en uitwateringsconstructies: deelrapport 2. Dijlemonding. *WL Rapporten*, 00\_075. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

**Vercruyse, J.B.; Verelst, K.; Taverniers, E.; Peeters, P.; Mostaert, F.** (2014). Sigmaplan – Gereduceerde Getijdegebieden – Schaalmodelproeven gecombineerde in- en uitwateringsconstructies: deelrapport 3. Vlassenbroek. *WL Rapporten*, 00\_075. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

**Verelst, K.; Vercruyse, J.B.; Taverniers, E.; Peeters, P.; Mostaert, F.** (2014). Sigmaplan – Gereduceerde Getijdegebieden – Schaalmodelproeven gecombineerde in- en uitwateringsconstructies: deelrapport 4. Dimensionering schanskorven gecombineerde in-en uitwateringsconstructie GOG/GGG Vlassenbroek. *WL Adviezen*, 00\_075. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen



## Bijlage A

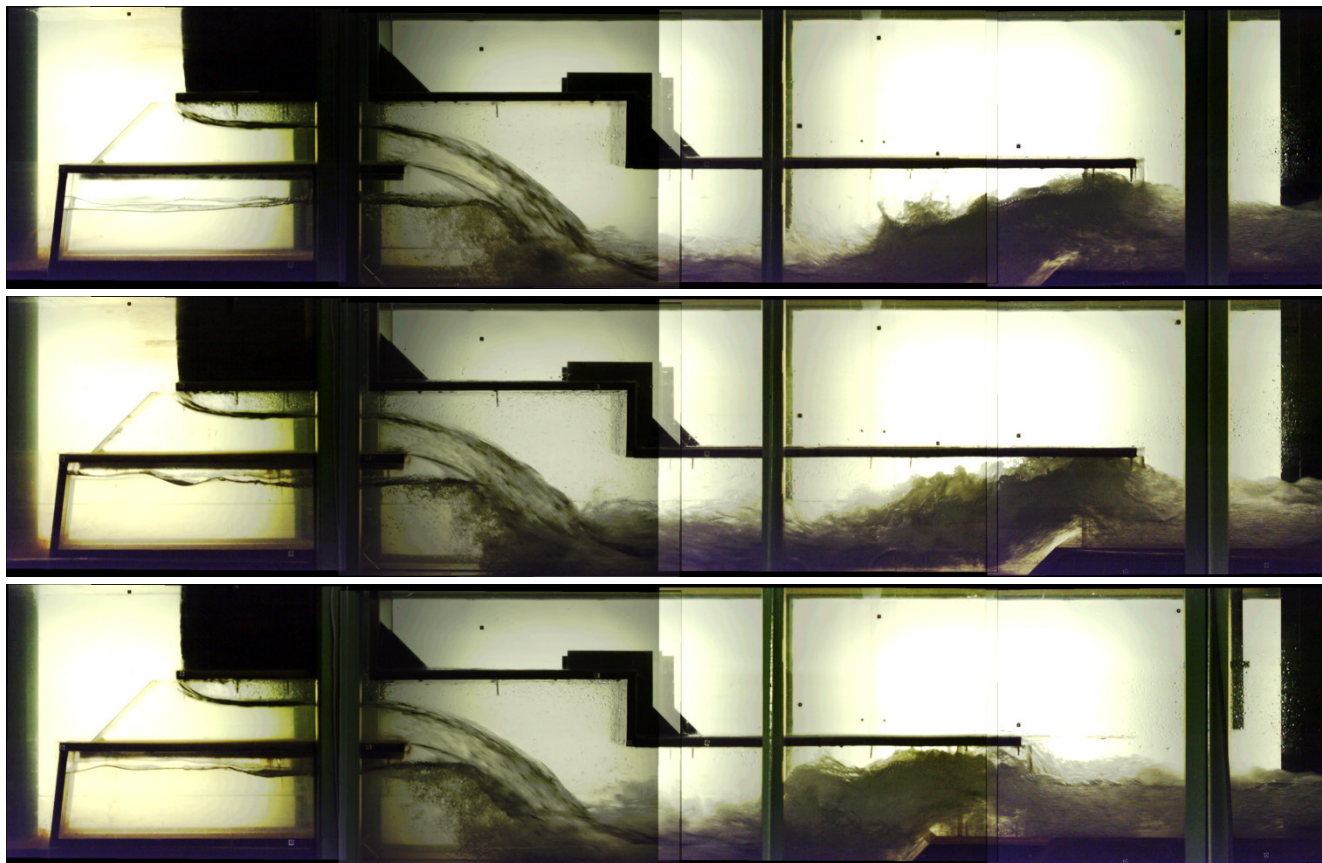
Deze bijlage bevat opnames van het stromingspatroon voor een rivierpeil TAW + 9.0m, TAW + 8.0 m en TAW + 7.0 m en een reeks polderpeilen. De getoonde figuren worden samengevat in Tabel 6. Per figuur wordt een opname gegeven van het stromingspatroon voor Geometrie 1 (boven), Geometrie 2 (midden) en Geometrie 3 (onder).

Tabel 6 – Figuren opnames stromingspatroon Geometrie 1, Geometrie 2 en Geometrie 3

polderpeil	rivierpeil		
	TAW + 9.0 m	TAW + 8.0 m	TAW + 7.0 m
TAW + 2.0 m	Figuur 35	Figuur 42	Figuur 48
TAW + 3.0 m	Figuur 36	Figuur 43	Figuur 49
TAW + 4.0 m	Figuur 37	Figuur 44	Figuur 50
TAW + 5.0 m	Figuur 38	Figuur 45	Figuur 51
TAW + 6.0 m	Figuur 39	Figuur 46	Figuur 52
TAW + 7.0 m	Figuur 40 & Figuur 41	Figuur 47	/

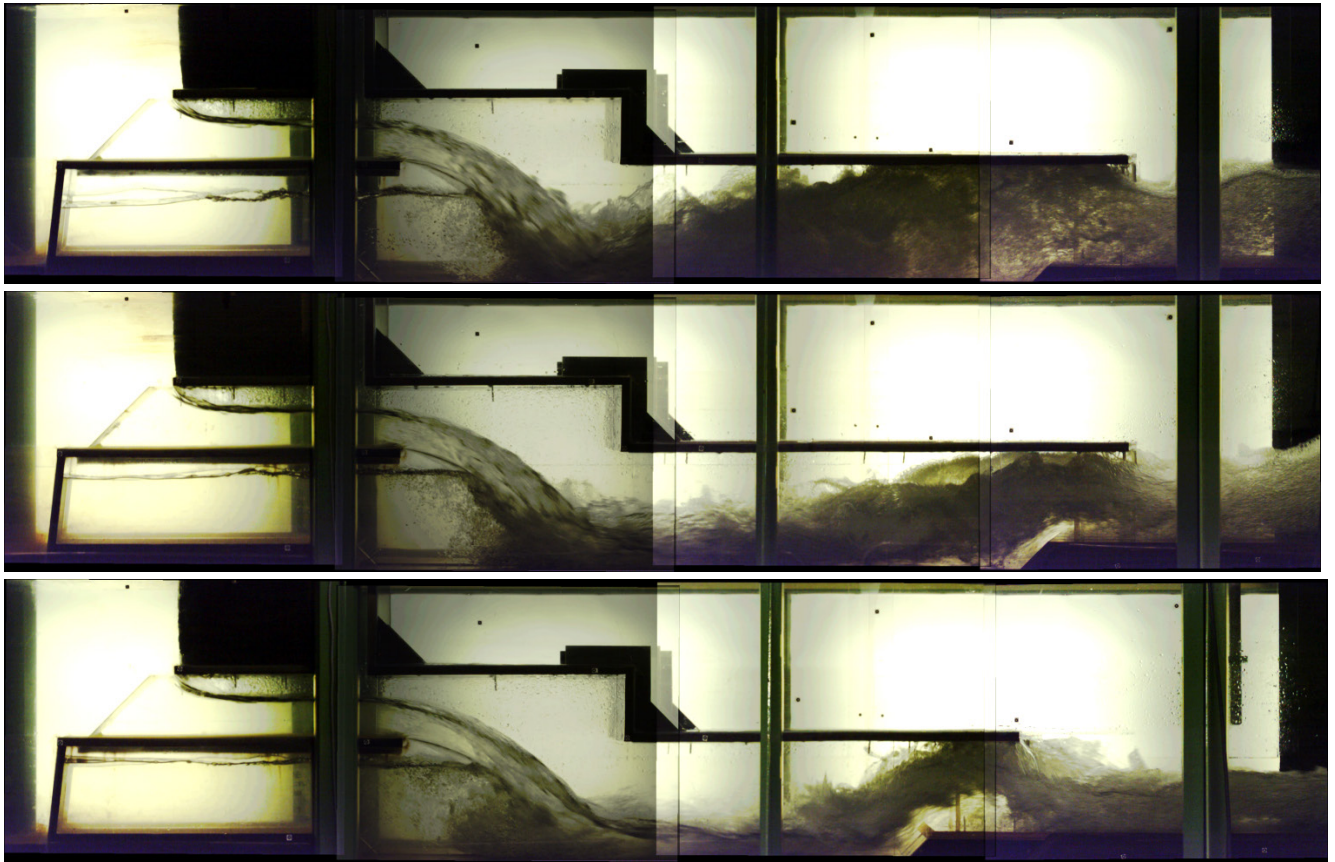
## Rivierpeil TAW + 9.0 m

Figuur 35 – Rivierpeil TAW + 9.0 m, Polderpeil TAW + 2.0 m



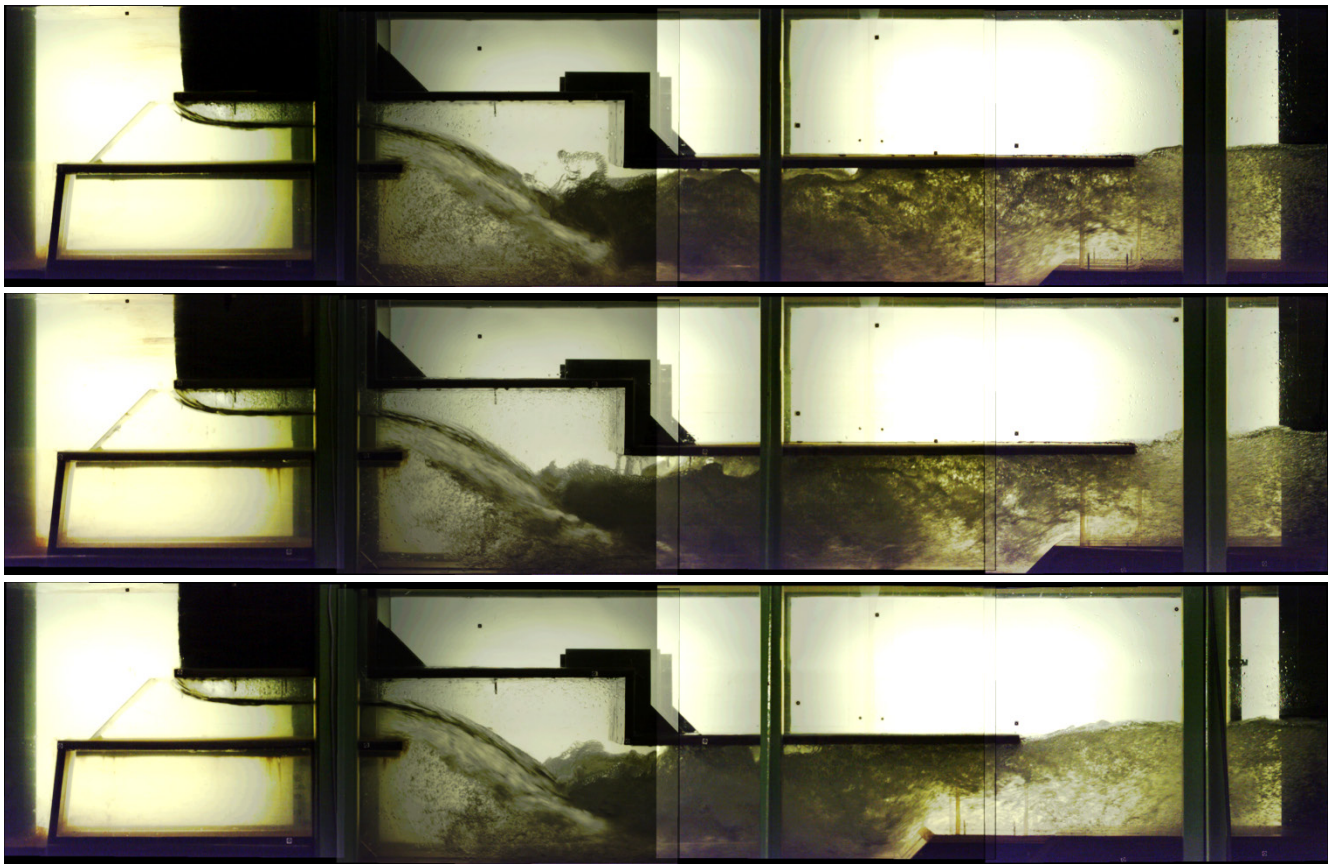
boven: Geometrie 1 / midden: Geometrie 2 / onder: Geometrie 3

Figuur 36 – Rivierpeil TAW + 9.0 m, Polderpeil TAW + 3.0 m



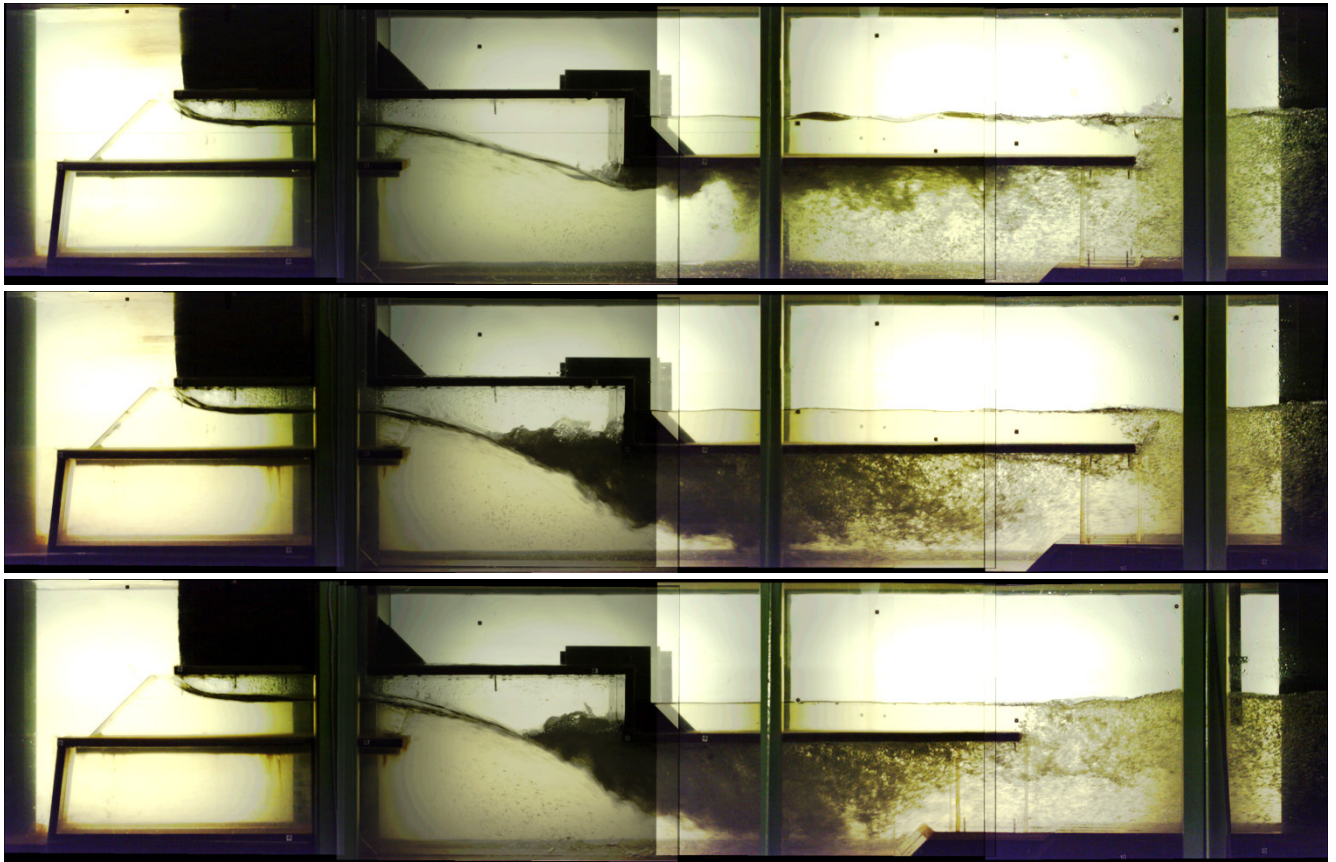
boven: Geometrie 1 / midden: Geometrie 2 / onder: Geometrie 3

Figuur 37 – Rivierpeil TAW + 9.0 m, Polderpeil TAW + 4.0 m



boven: Geometrie 1 / midden: Geometrie 2 / onder: Geometrie 3

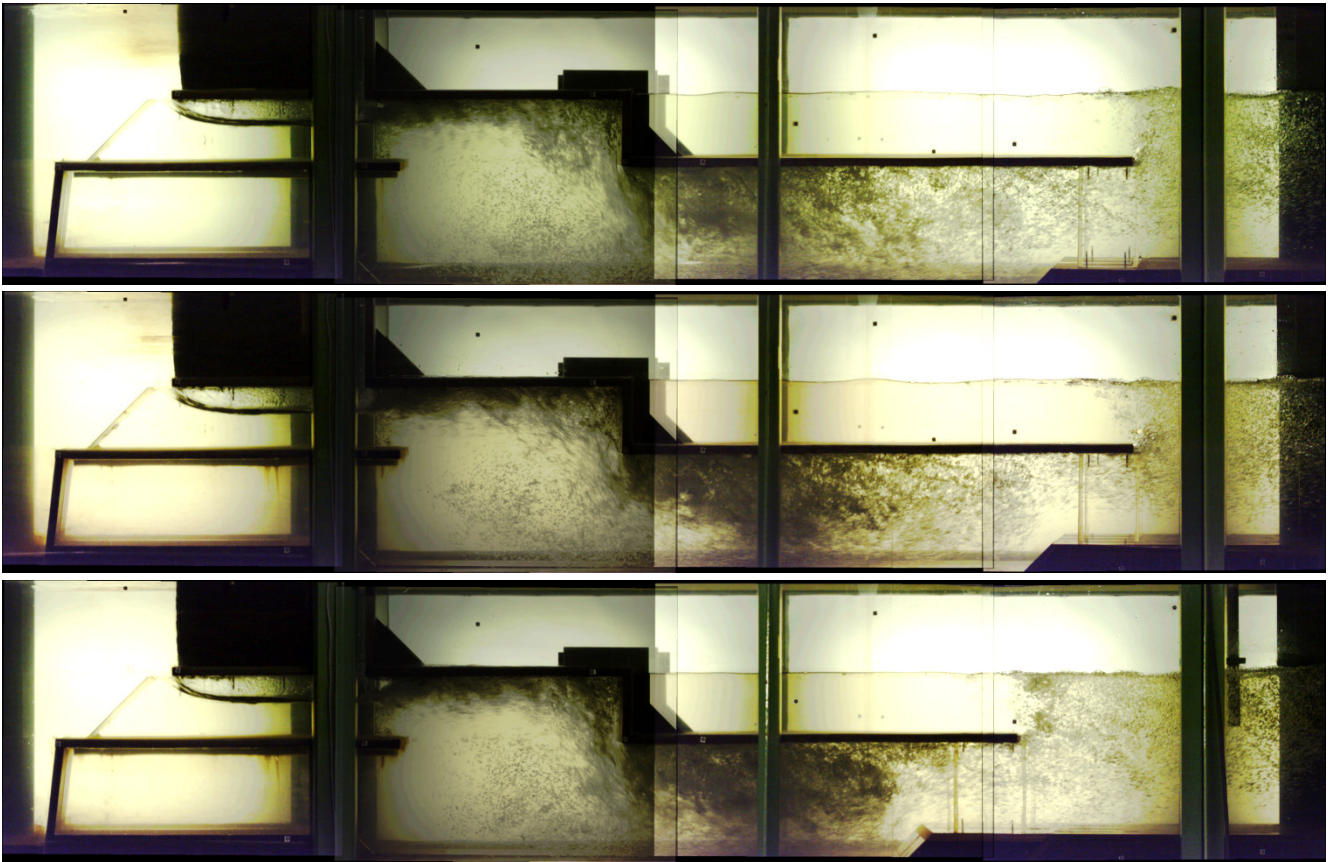
Figuur 38 – Rivierpeil TAW + 9.0 m, Polderpeil TAW + 5.0 m



boven: Geometrie 1 / midden: Geometrie 2 / onder: Geometrie 3

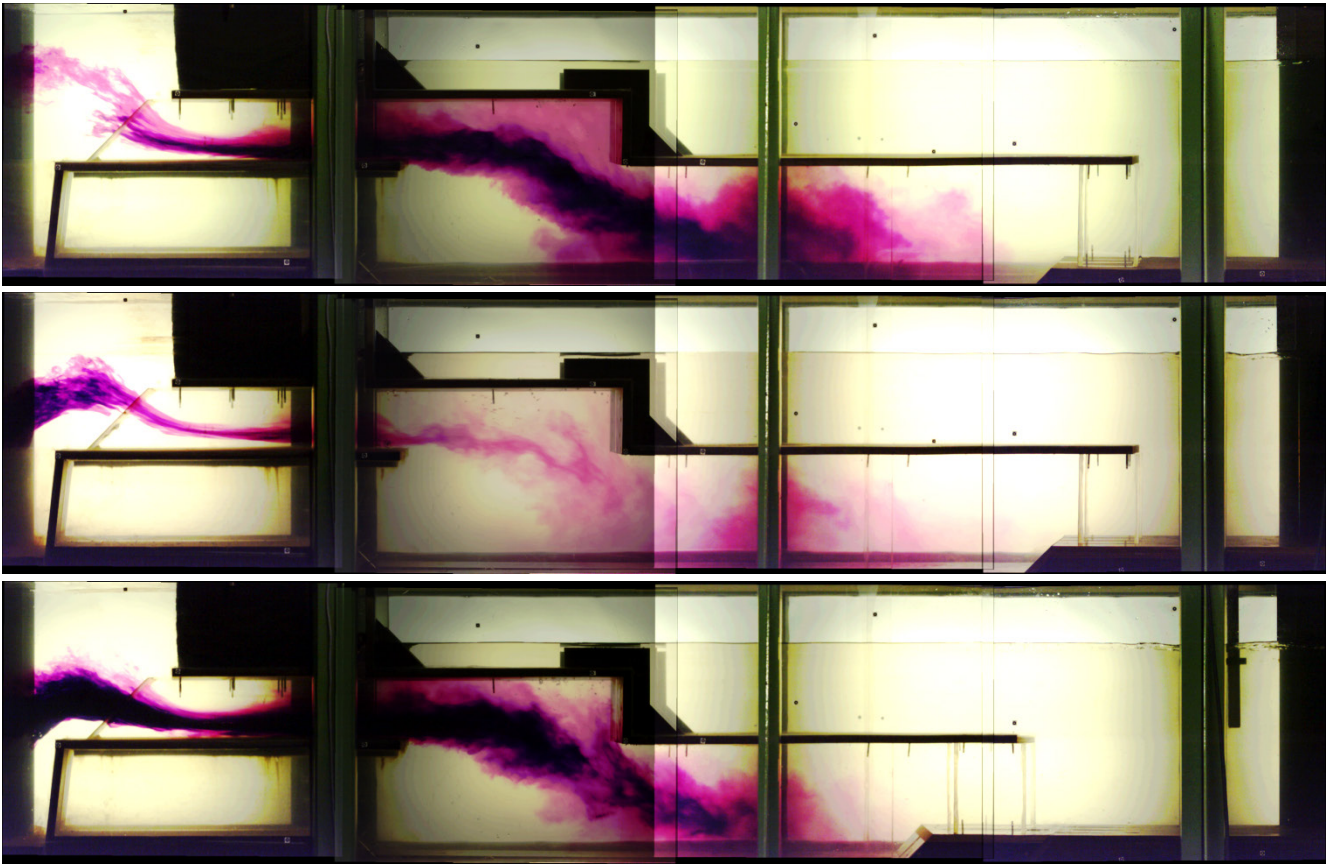


Figuur 39 – Rivierpeil TAW + 9.0 m, Polderpeil TAW + 6.0 m



boven: Geometrie 1 / midden: Geometrie 2 / onder: Geometrie 3

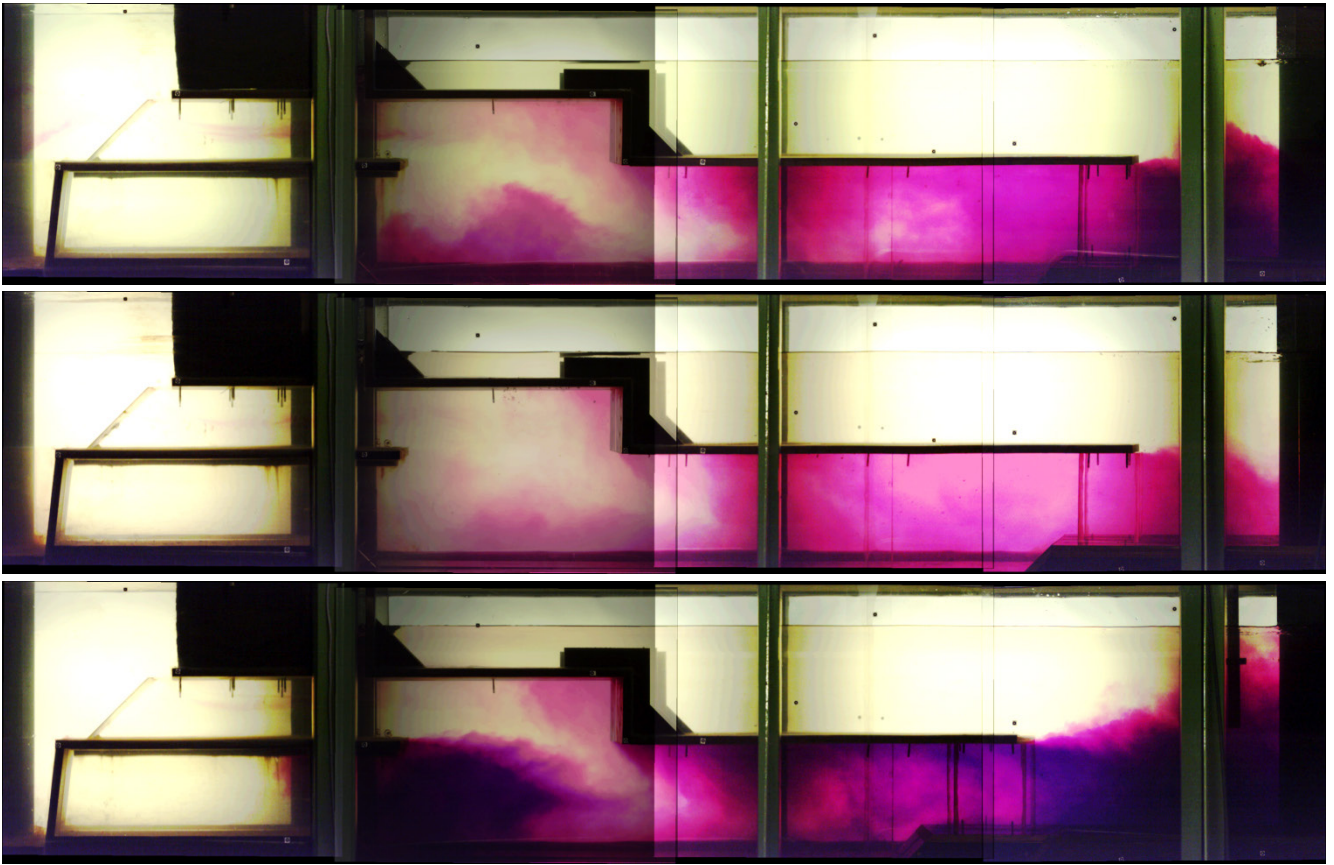
Figuur 40 – Rivierpeil TAW + 9.0 m, Polderpeil TAW + 7.0 m



boven: Geometrie 1 / midden: Geometrie 2 / onder: Geometrie 3

Figuur 41 – Rivierpeil TAW + 9.0 m, Polderpeil TAW + 7.0 m

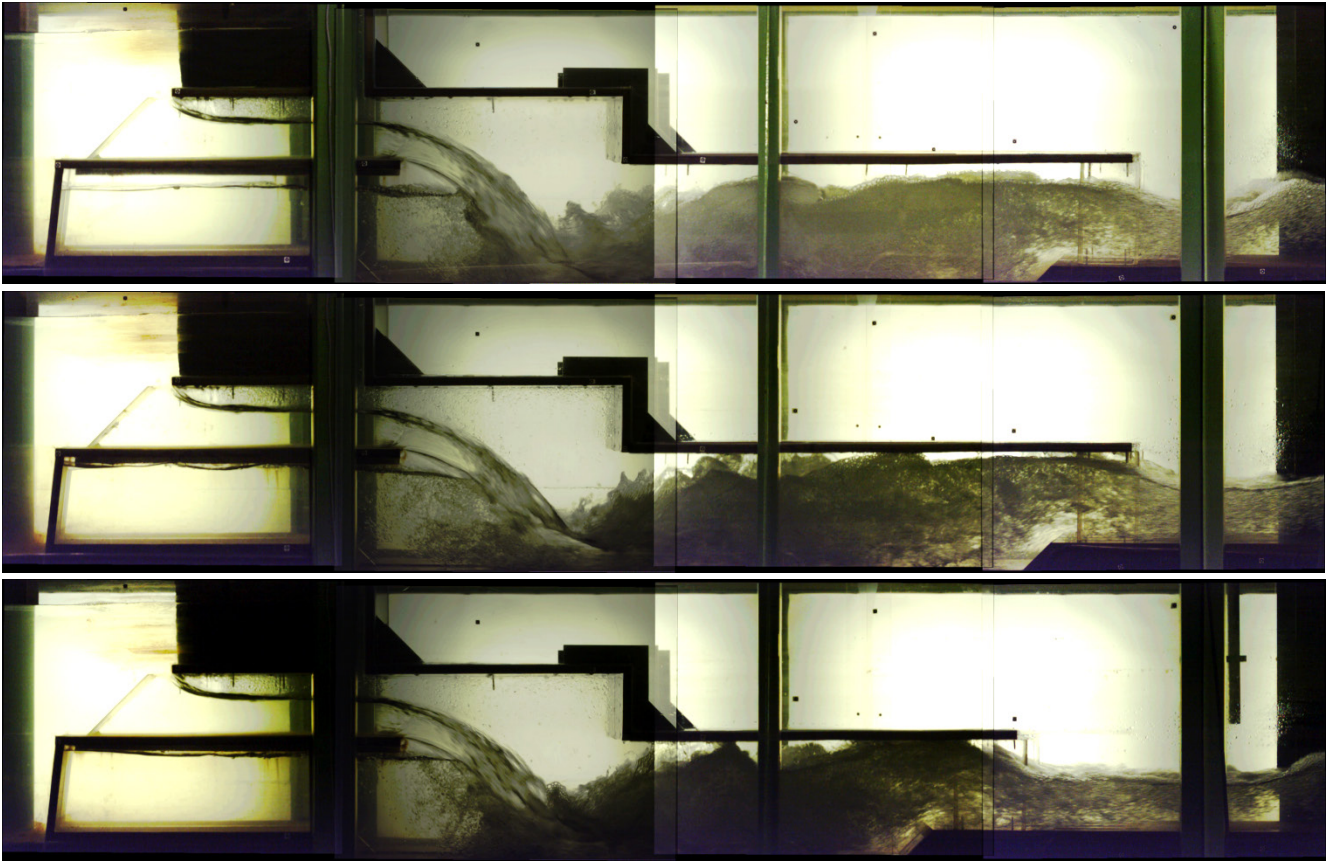
---



boven: Geometrie 1 / midden: Geometrie 2 / onder: Geometrie 3

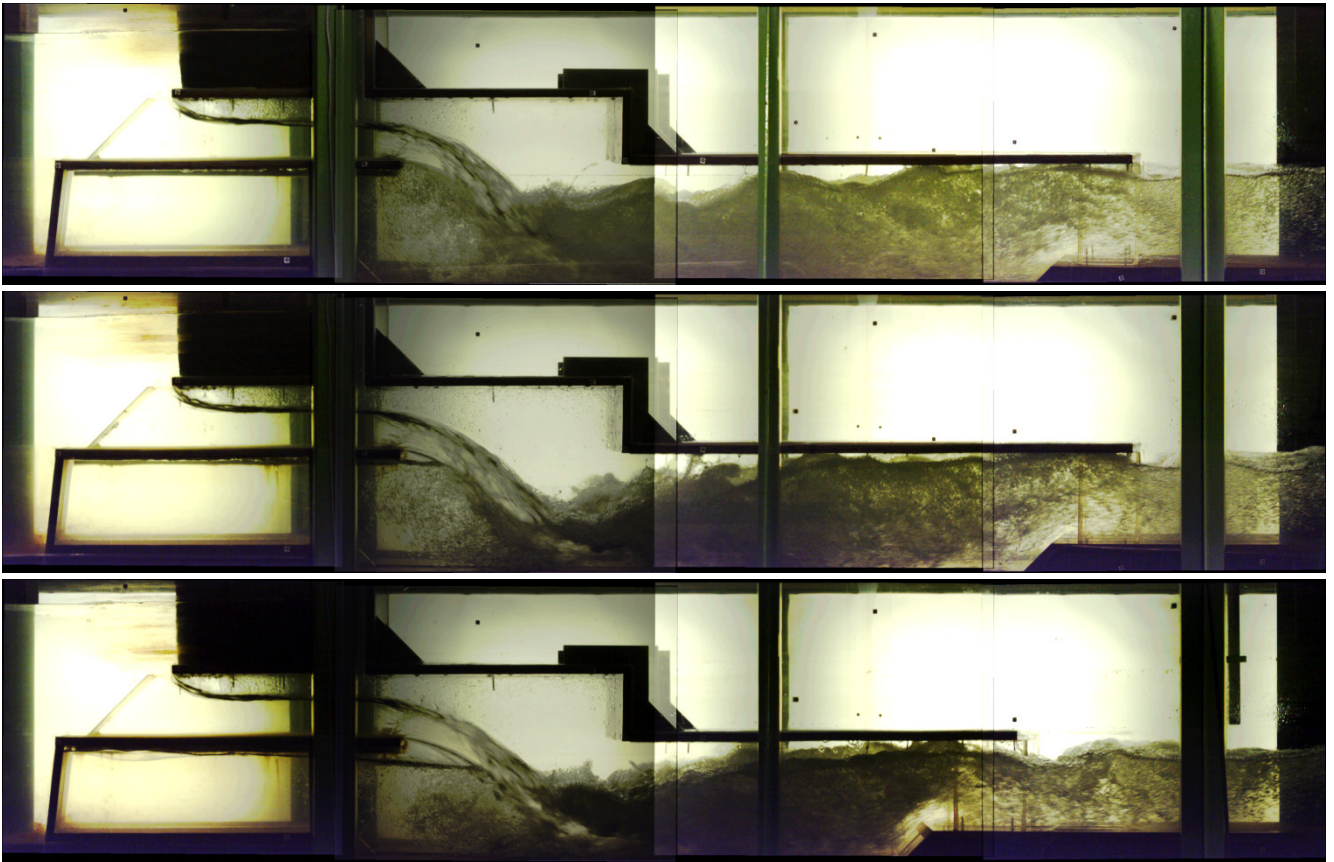
## Rivierpeil TAW + 8.0 m

Figuur 42 – Rivierpeil TAW + 8.0 m, Polderpeil TAW + 2.0 m



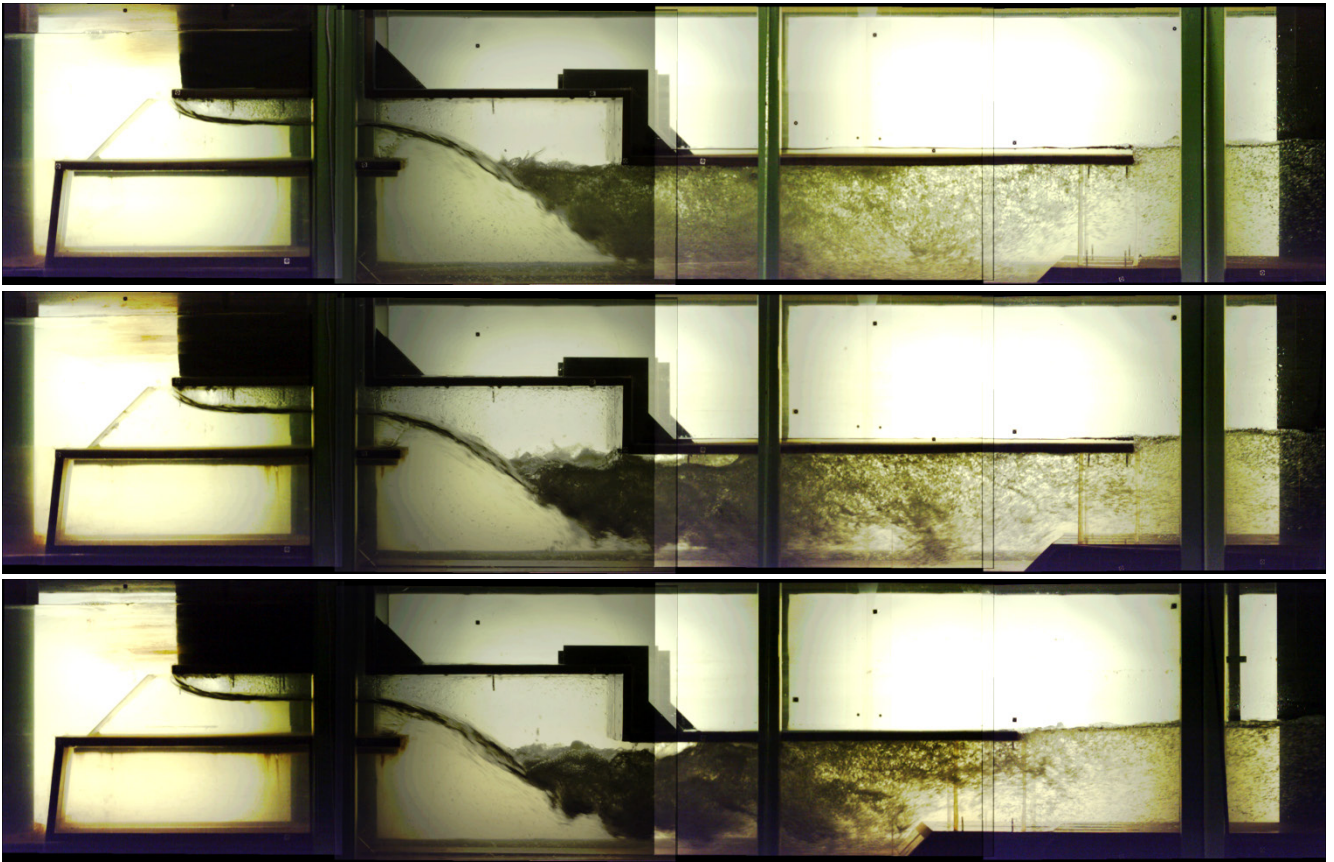
boven: Geometrie 1 / midden: Geometrie 2 / onder: Geometrie 3

Figuur 43 – Rivierpeil TAW + 8.0 m, Polderpeil TAW + 3.0 m



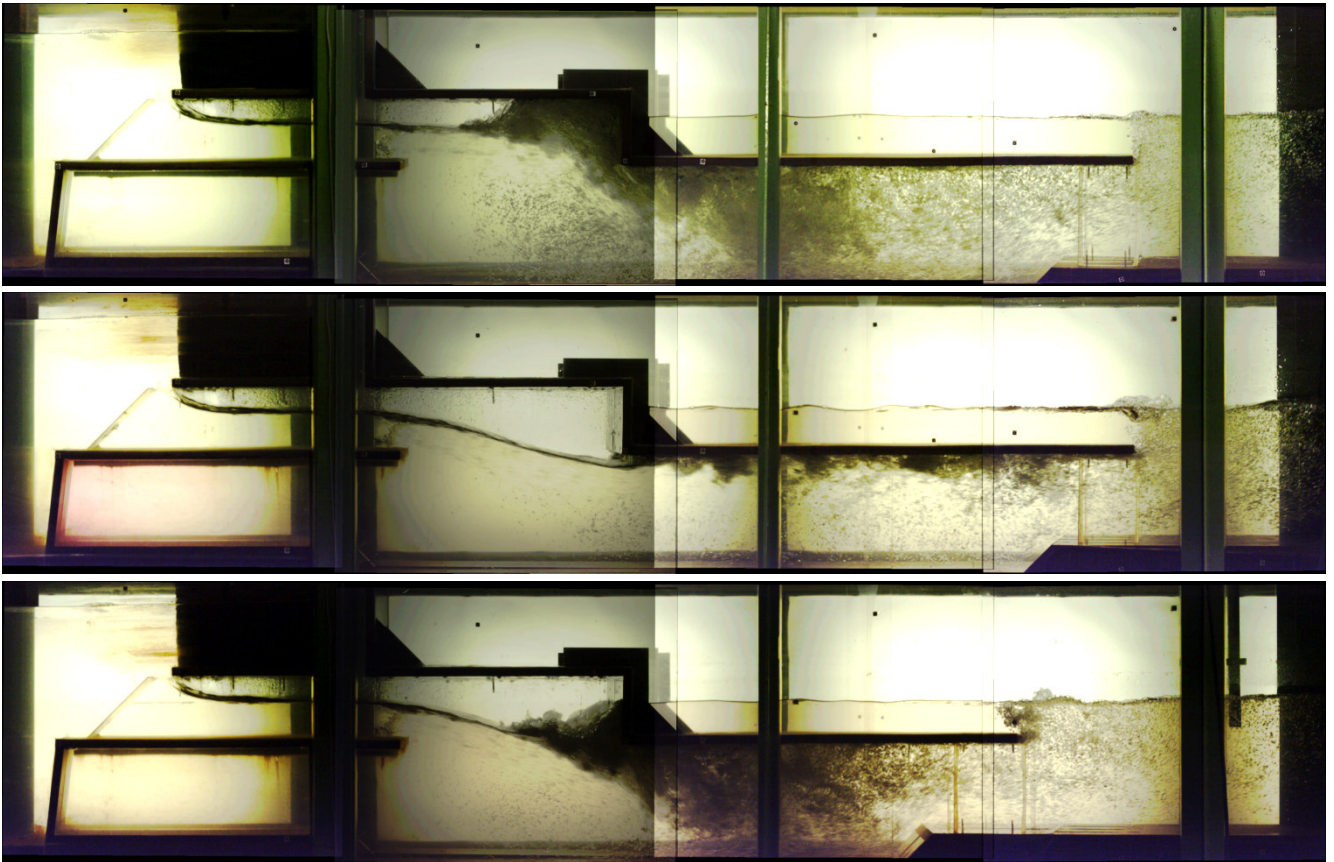
boven: Geometrie 1 / midden: Geometrie 2 / onder: Geometrie 3

Figuur 44 – Rivierpeil TAW + 8.0 m, Polderpeil TAW + 4.0 m



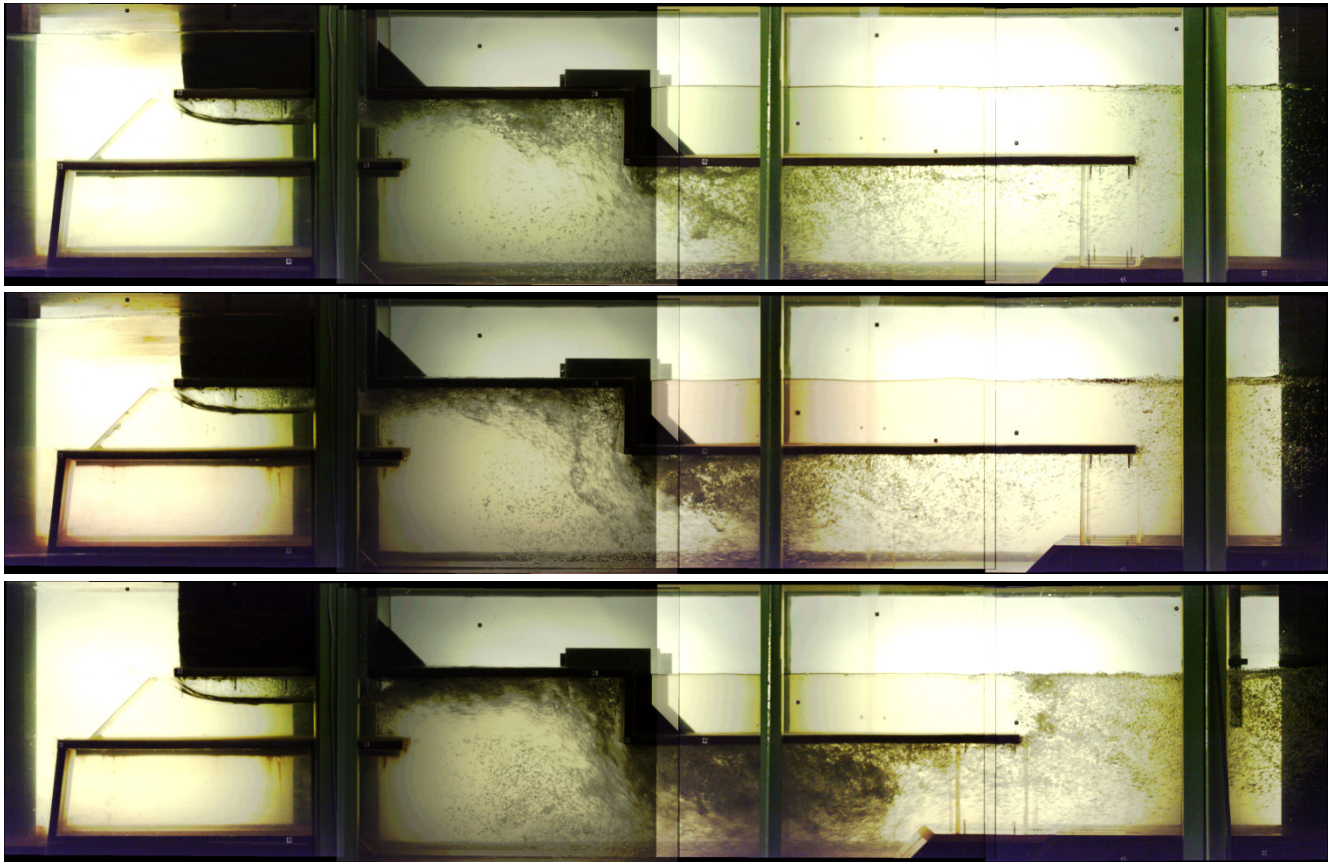
boven: Geometrie 1 / midden: Geometrie 2 / onder: Geometrie 3

Figuur 45 – Rivierpeil TAW + 8.0 m, Polderpeil TAW + 5.0 m



boven: Geometrie 1 / midden: Geometrie 2 / onder: Geometrie 3

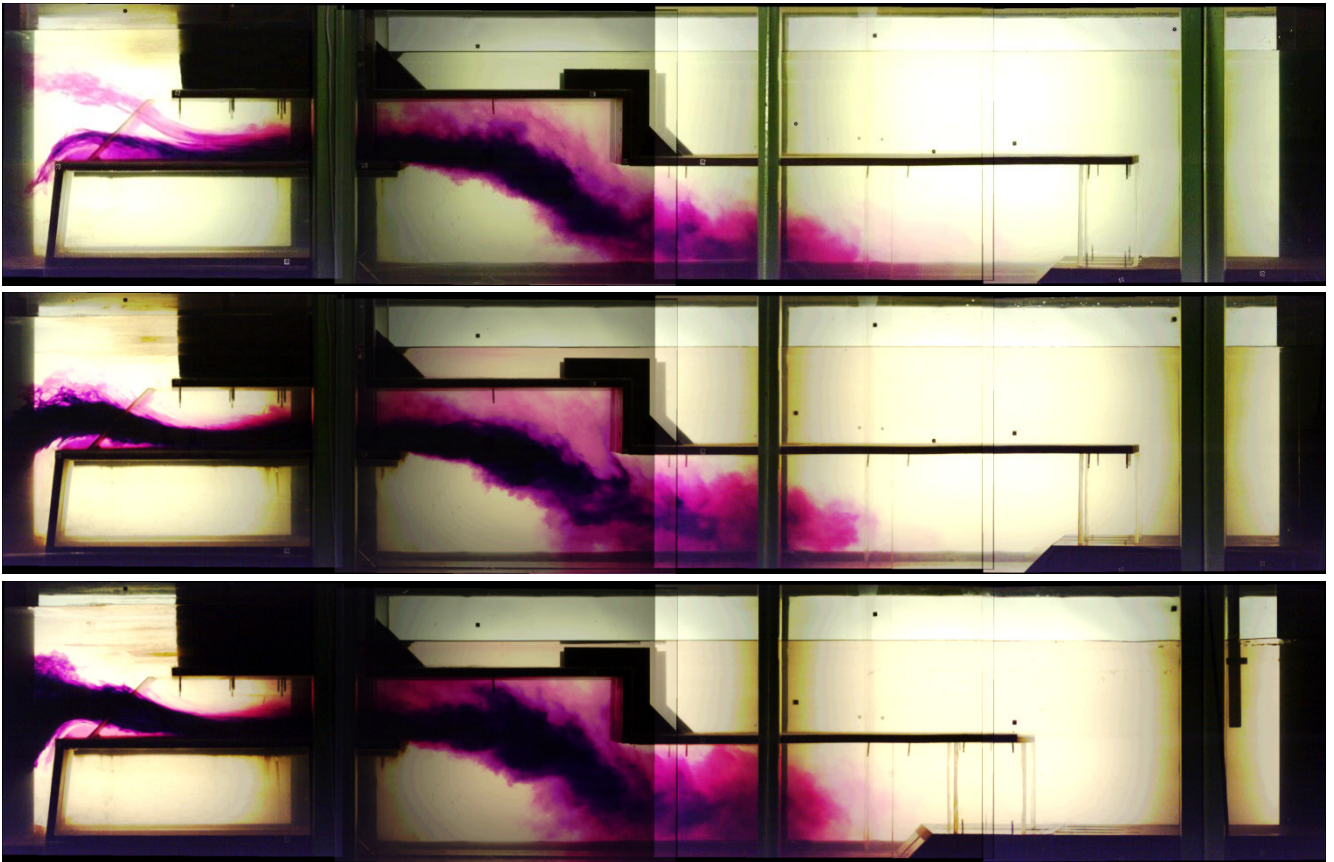
Figuur 46 – Rivierpeil TAW + 8.0 m, Polderpeil TAW + 6.0 m



boven: Geometrie 1 / midden: Geometrie 2 / onder: Geometrie 3



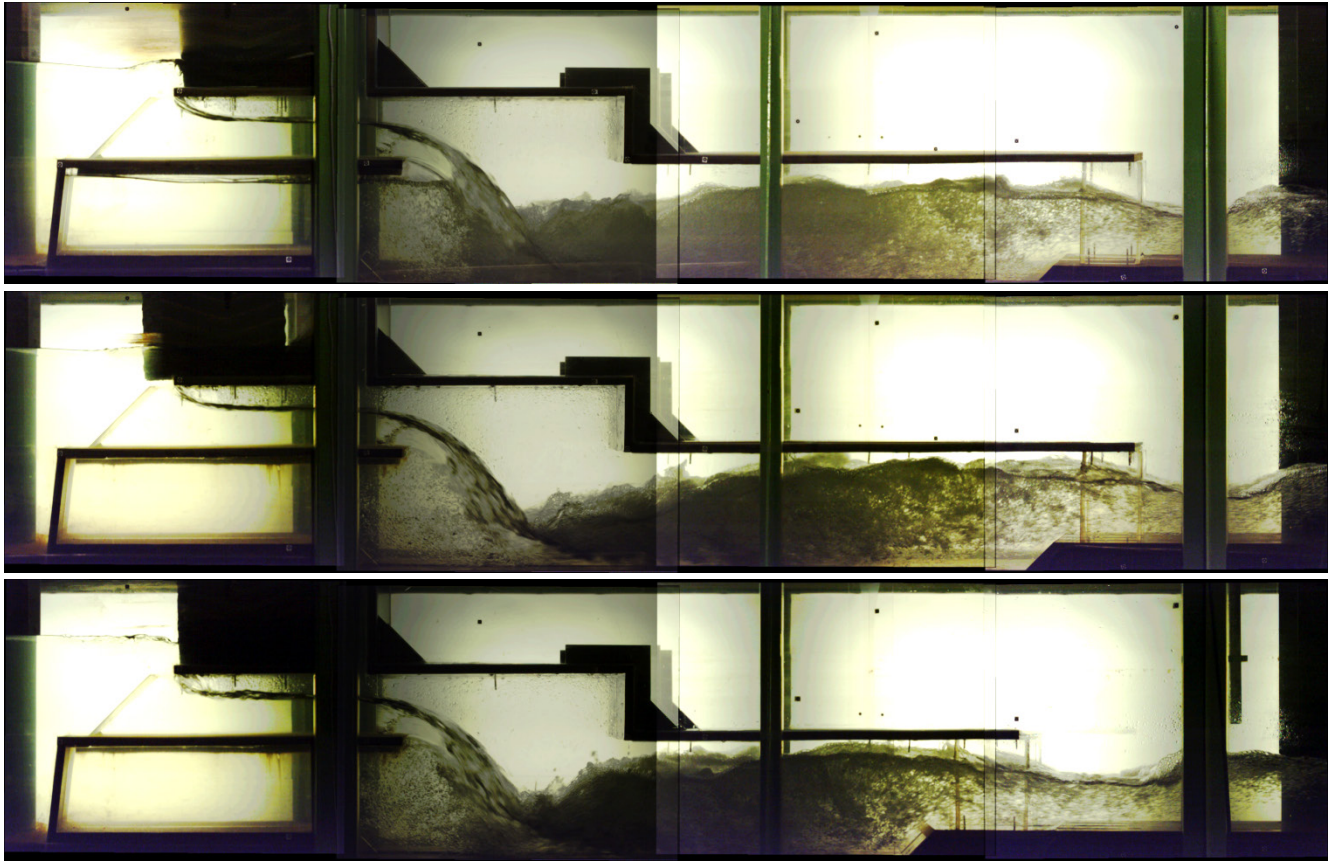
Figuur 47 – Rivierpeil TAW + 8.0 m, Polderpeil TAW + 7.0 m



boven: Geometrie 1 / midden: Geometrie 2 / onder: Geometrie 3

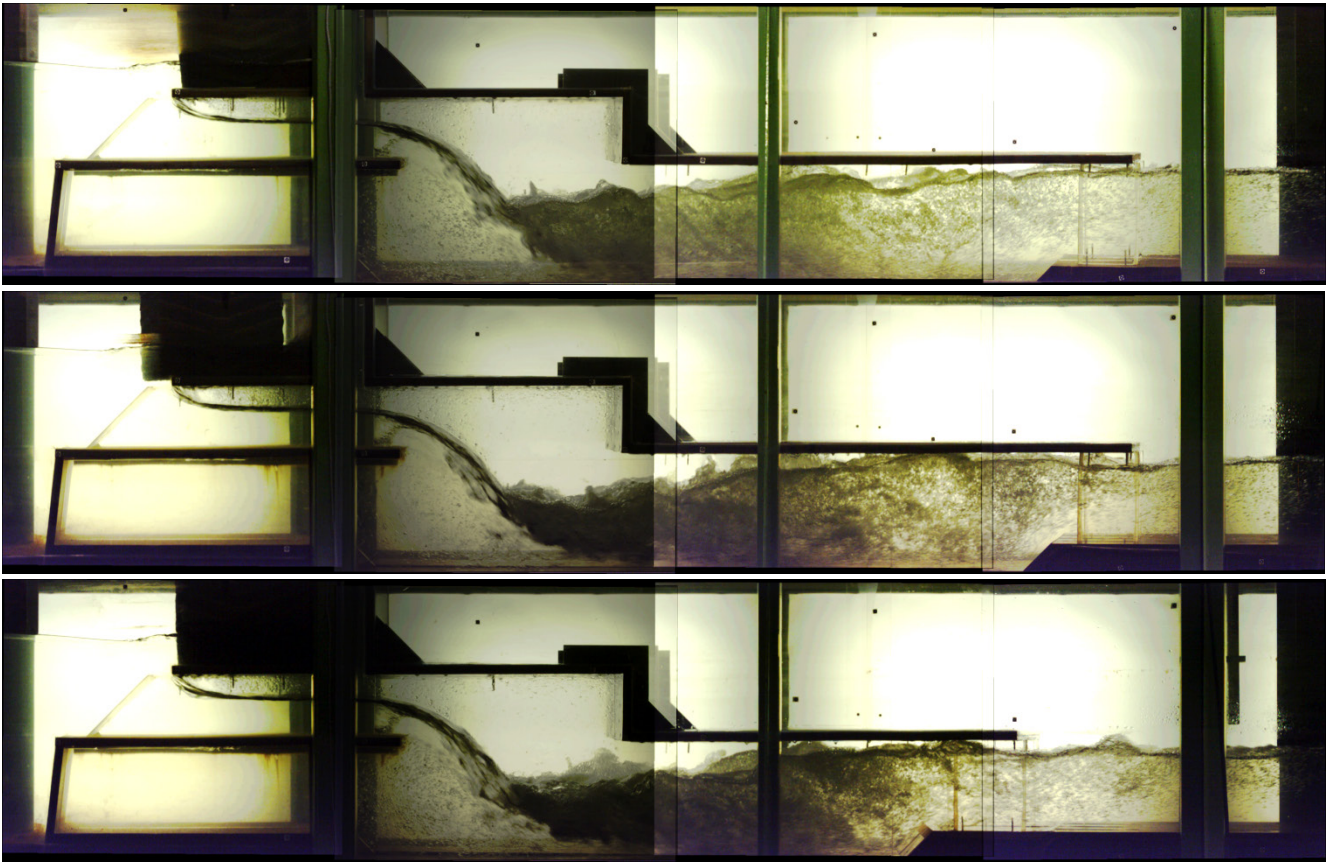
## Rivierpeil TAW + 7.0 m

Figuur 48 – Rivierpeil TAW + 7.0 m, Polderpeil TAW + 2.0 m



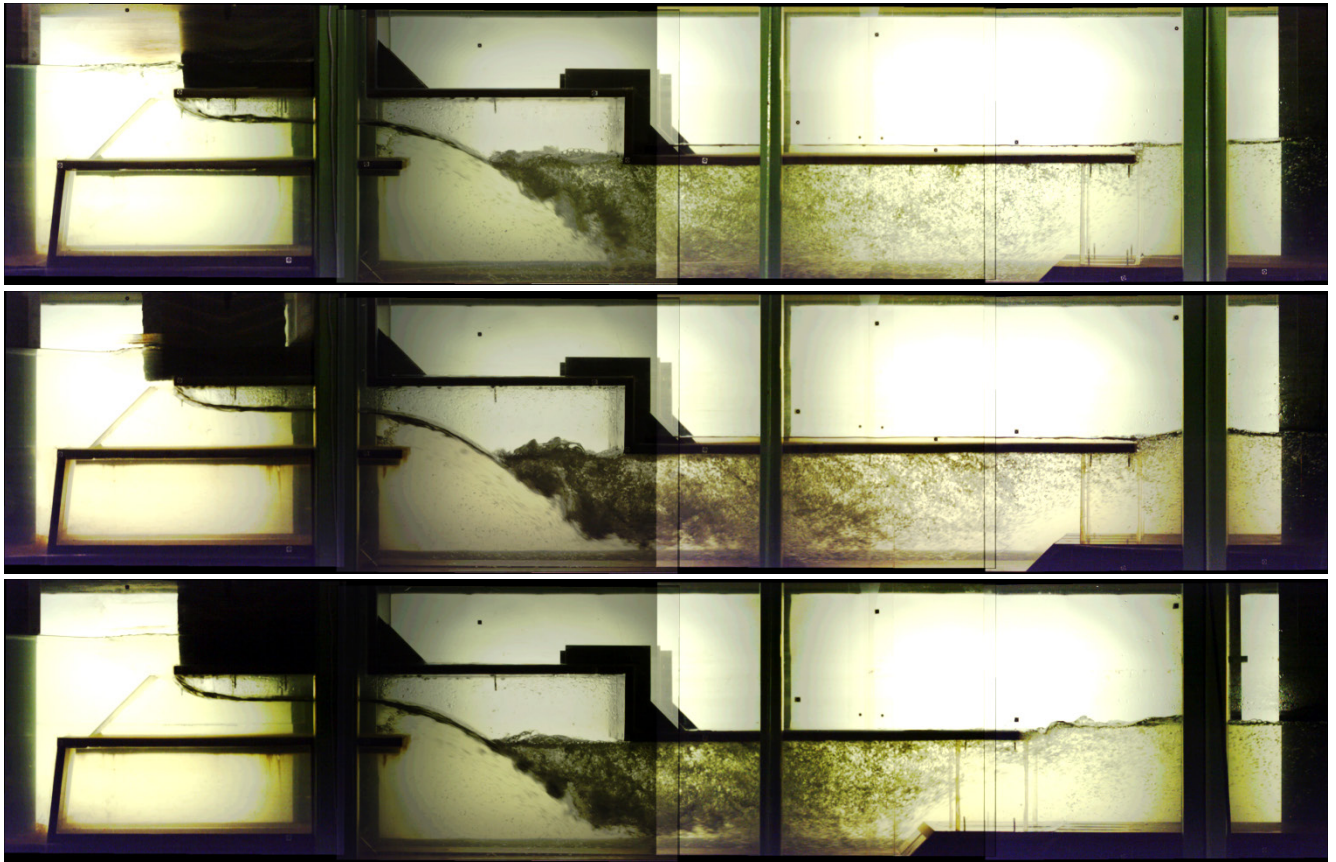
boven: Geometrie 1 / midden: Geometrie 2 / onder: Geometrie 3

Figuur 49 – Rivierpeil TAW + 7.0 m, Polderpeil TAW + 3.0 m



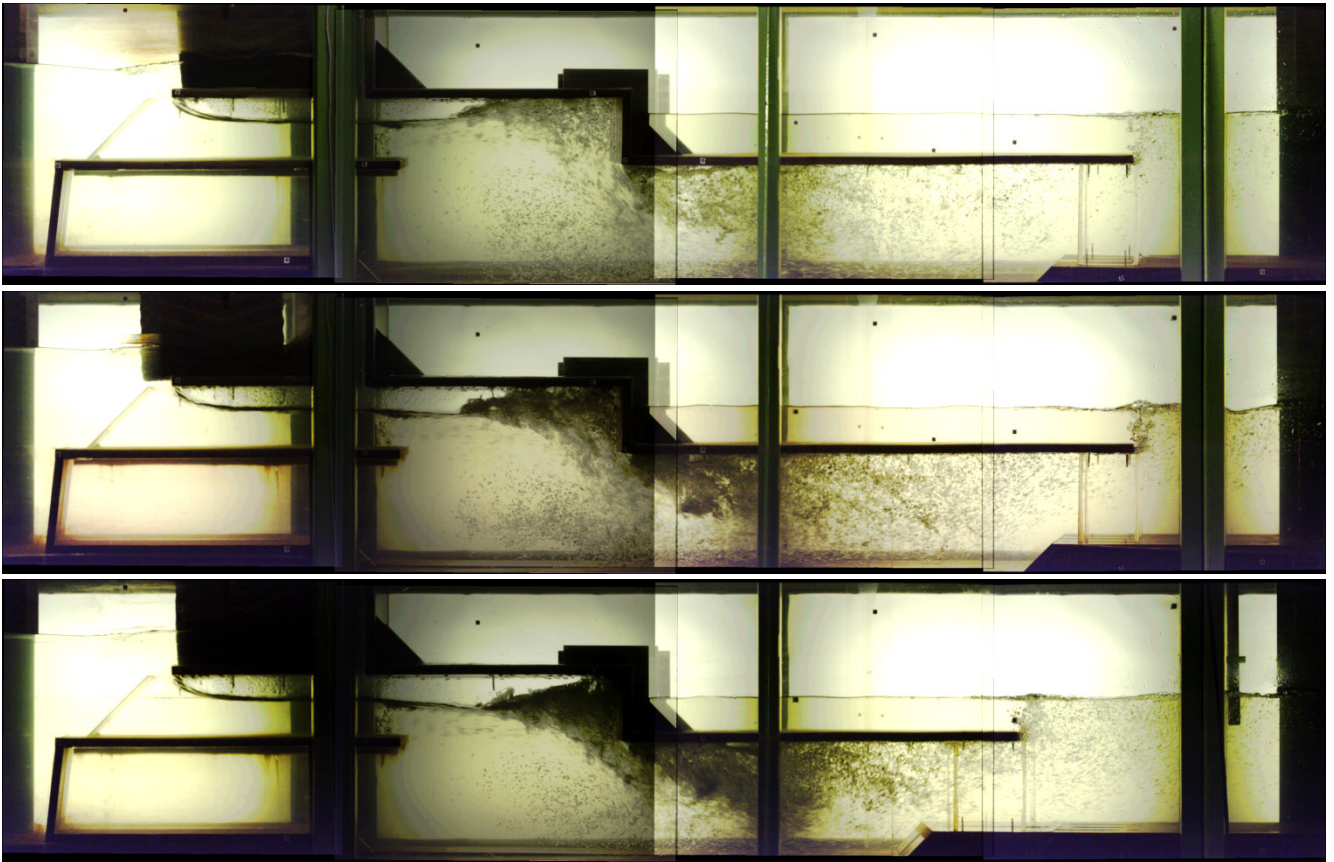
boven: Geometrie 1 / midden: Geometrie 2 / onder: Geometrie 3

Figuur 50 – Rivierpeil TAW + 7.0 m, Polderpeil TAW + 4.0 m



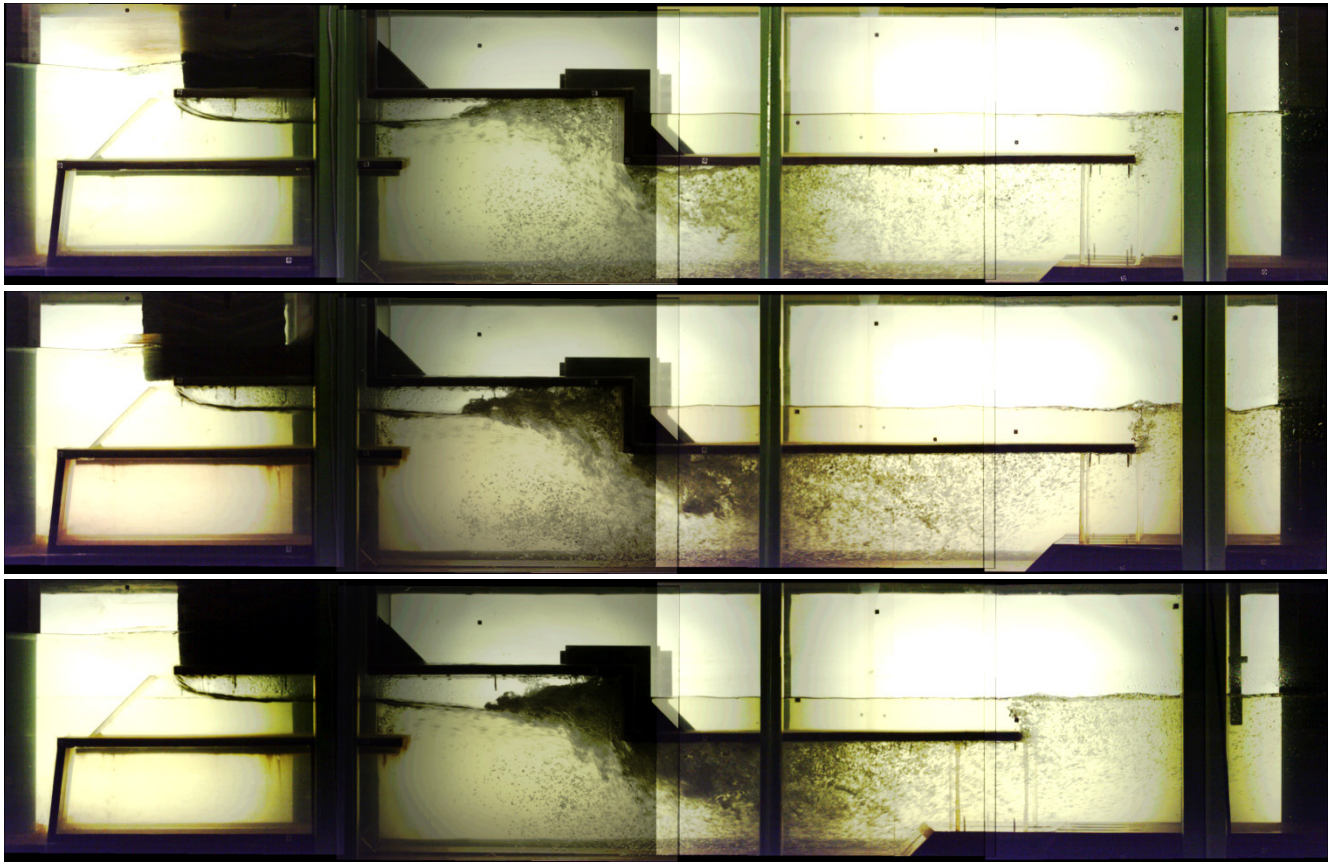
boven: Geometrie 1 / midden: Geometrie 2 / onder: Geometrie 3

Figuur 51 – Rivierpeil TAW + 7.0 m, Polderpeil TAW + 5.0 m



boven: Geometrie 1 / midden: Geometrie 2 / onder: Geometrie 3

Figuur 52 – Rivierpeil TAW + 7.0 m, Polderpeil TAW + 5.0 m



boven: Geometrie 1 / midden: Geometrie 2 / onder: Geometrie 3



DEPARTEMENT **MOBILITEIT & OPENBARE WERKEN**  
Waterbouwkundig Laboratorium

Berchemlei 115, 2140 Antwerpen

T +32 (0)3 224 60 35

F +32 (0)3 224 60 36

[waterbouwkundiglabo@vlaanderen.be](mailto:waterbouwkundiglabo@vlaanderen.be)

[www.waterbouwkundiglaboratorium.be](http://www.waterbouwkundiglaboratorium.be)