



Vlaanderen
is wetenschap

17_091.1
WL rapporten

Dender – stuwsluiscomplex Denderleeuw

Bodembescherming nieuwe stuwen

DEPARTEMENT
**MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN**

waterbouwkundiglaboratorium.be

Dender – stuwsluiscomplex Denderleeuw

Bodembescherming nieuwe stuwen

Verelst, K.; Visser, K.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 2019
D/2019/3241/106

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Verelst, K.; Visser, K.P.; Mostaert, F. (2019). Dender – stuwsluiscapex Denderleeuw: Bodembescherming nieuwe stuwen. Versie 5.0. WL Rapporten, 17_091_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

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

Documentidentificatie

Opdrachtgever:	De Vlaamse Waterweg nv Afdeling Bovenschelde	Ref.:	WL2019R17_091_1
Keywords (3-5):	Weir, energy dissipation, physical model, erosion protection		
Tekst (p.):	74	Bijlagen (p.):	23
Vertrouwelijk:	☒ Nee	☒ Online beschikbaar	

Auteur(s)	Verelst, K.
-----------	-------------

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Visser, K.P.	Getekend door: Klaas Visser (Signature) Getekend op: 2019-06-05 08:31:04 +01:00 Reden: Ik keur dit document goed <i>Klaas Visser</i>
Projectleider:	Verelst, K.	Getekend door: Kristof Verelst (Signature) Getekend op: 2019-06-05 08:32:47 +01:00 Reden: Ik keur dit document goed <i>Kristof Verelst</i>

Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Mostaert, F.	Getekend door: Frank Mostaert (Signature) Getekend op: 2019-06-05 08:34:50 +01:00 Reden: Ik keur dit document goed <i>Frank Mostaert</i>
-----------------	--------------	---



Abstract

In het kader van de vernieuwing van het stuwsluiscomplex te Denderleeuw wordt door de Vlaamse Waterweg nv afdeling Bovenschelde aan het Waterbouwkundig Laboratorium gevraagd om de dimensionering van de bodembescherming opwaarts en afwaarts van de nieuwe stuwen uit te voeren.

Vooreerst zijn schaalmodelproeven uitgevoerd naar de benodigde energiedissipatie afwaarts van de balgstuwen. Voor drie verschillende hydraulische condities is nagegaan of maatregelen zoals de verdieping van het bodempeil of het toepassen van een woelkom afwaarts van de nieuwe stuwen ervoor kunnen zorgen dat de watersprong zich altijd juist afwaarts van de vallende straal voordoet. Bij de proeven met woelkom werd tevens de invloed van dissipatieblokken onderzocht. Bij deze proeven is op verschillende plaatsen afwaarts van de stuwen steeds de stroomsnelheid aan de bodem opgemeten en is het stromingspatroon afwaarts van de stuwen gevisualiseerd met behulp van camera's. Uit de schaalmodelproeven werd besloten dat voor de meest extreme conditie een verlaging van het bodempeil afwaarts tot +4.06 mTAW of een woelkom met lengte 14.9 m en bodempeil op +4.50 mTAW nodig zijn om ervoor te zorgen dat de watersprong zich altijd juist afwaarts van de vallende straal voordoet.

Algemeen kan uit de schaalmodelproeven besloten worden dat de verhouding tussen de afwaartse waterdiepte en het overstortdebiet over de stuwen bepalend is voor noodzaak en/of het effect van energiedissiperende maatregelen. Om die reden zijn na het uitvoeren van de schaalmodelproeven numerieke simulaties uitgevoerd met het MIKE11-model van de Dender voor wassen met een aantal maatgevende terugkeerperiodes. Uit deze simulaties volgt dat de meest extreme conditie uit de schaalmodelproeven in praktijk niet voorkomt en dat bij debieten groter dan 10-20 m³/s het afwaarts streefpeil niet meer gehandhaafd kan worden. Hierdoor voldoet het huidige bodempeil van +5.50 mTAW om ervoor te zorgen dat de watersprong zich voordoet juist afwaarts van de vallende straal en is geen woelkom of bodemverlaging nodig. Toch wordt geadviseerd om het afwaartse bodempeil over minimaal een lengte van 35 m te verlagen naar het bodempeil +5.21 mTAW, gelijk aan het bodempeil van de afwaartse vaargeul. Dit maakt het ontwerp van de stuwen namelijk robuuster met oog op eventuele toekomstige rivierverruiming in het afwaartse pand of wijzigingen aan de voor de numerieke modellering toegepaste stuwregeling.

Om te weerstaan aan de hoge stroomsnelheden juist afwaarts van de stuwen bij het ontstaan van een watersprong moet de bodembescherming afwaarts over een voldoende afstand voorzien worden. Aangezien door de opdrachtgever nog overwogen kan worden om het huidig afwaarts bodempeil van +5.50 mTAW te behouden of dit te verlagen tot een peil van +5.21 mTAW is de dimensionering van de bodembescherming afwaarts van de nieuwe stuwen uitgevoerd voor deze beide bodempeilen. Voor deze beide afwaartse bodempeilen en een opwaarts bodempeil van +6.37 mTAW zijn de stroomsnelheden aan de bodem bepaald op basis van de uitgevoerde schaalmodelproeven voor de normale toestand en op basis van de waterstanden en debieten berekend met het MIKE11-model van WL voor een aantal wascondities. Daarna is de dimensionering van zowel de bodembescherming opwaarts en afwaarts van de nieuwe stuwen uitgevoerd.

Inhoudstafel

Abstract	III
Inhoudstafel.....	V
Lijst van de tabellen.....	VII
Lijst van de figuren	IX
1 Inleiding	11
2 Schaalmodelproeven met betrekking tot energiedissipatie afwaarts nieuwe stuwen.....	15
2.1 Algemeen.....	15
2.2 Hydraulische condities.....	15
2.3 Ontwerp schaalmodel	21
2.4 Beproefde configuraties	22
2.5 Uitgevoerde schaalmodelproeven	27
2.6 Metingen en verwerking meetresultaten	30
3 Resultaten schaalmodelproeven	33
3.1 Algemeen.....	33
3.2 Conditie 2.....	35
3.2.1 Bodemverlaging afwaarts.....	35
3.2.2 Woelkom met bodempeil op +4.50 mTAW	37
3.2.3 Woelkom met bodempeil op +5.30 mTAW	40
3.3 Conditie 1.....	42
3.3.1 Bodemverlaging afwaarts.....	42
3.3.2 Woelkom met bodempeil op +4.50 mTAW	43
3.3.3 Woelkom met bodempeil op +5.30 mTAW	45
3.4 Conditie 3.....	47
3.5 Samenvatting resultaten	49
4 Bepaling scenario bodembescherming	51
5 Dimensionering bodembescherming	55
5.1 Hydraulische belasting op de bodem	55
5.1.1 Algemeen.....	55
5.1.2 Normale toestand.....	57
5.1.3 Wasconditie	58
5.2 Methodologie bepaling type bodembescherming.....	60

5.2.1	Breuksteenbekleding.....	60
5.2.2	Gepenetreerde breuksteen	62
5.2.3	Bodembescherming uit beton.....	64
5.3	Dimensionering bodembescherming	67
6	Conclusies	69
6.1	Energiedissipatie afwaarts van de nieuwe stuwen	69
6.2	Dimensionering van de bodembescherming opwaarts en afwaarts van de nieuwe stuwen.	71
7	Referenties	74
Bijlage 1: Resultaten schaalmodelproeven		B1
	Overzicht uitgevoerde proeven.....	B1
	Opname stromingspatroon	B2
	Ligging waterlijn.....	B7
	Meting stroomsnelheid	B11
	Lengte watersprong.....	B19
Bijlage 2: Tabellen dimensionering bodembescherming		B20
	Hydraulische belasting bij was	B20
	Bepaling breuksteensortering	B23

Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Waterpeilen en debieten beschouwd in Visser et al. (2016).....	16
Tabel 2 – Resultaten berekening watersprong voor bodempeil afwaarts op +5.50 mTAW en op +5.21 mTAW.....	19
Tabel 3 – Overzicht condities voor uitvoeren schaalmodelproeven.....	20
Tabel 4 – Resultaat berekening lengte en bodempeil woelkom, hoogte einddrempel en afmetingen en aantal dissipatieblokken voor de drie beschouwd condities.	25
Tabel 5 – Overzicht uitgevoerde proeven	27
Tabel 6 – Locatie snelheidsmetingen	30
Tabel 7 – Stroomsnelheden afwaarts nieuwe stuwen, Froudegetal van de stroming en lengte watersprong voor proeven met bodemverlaging voor conditie 2.	36
Tabel 8 – Stroomsnelheden afwaarts nieuwe stuwen, Froudegetal van de stroming en lengte watersprong voor proeven met woelkom met bodempeil op +4.50 mTAW voor conditie 2.	38
Tabel 9 – Stroomsnelheden afwaarts nieuwe stuwen, Froudegetal van de stroming en lengte watersprong voor proeven met woelkom met bodempeil op +5.30 mTAW voor conditie 2.	41
Tabel 10 – Stroomsnelheden afwaarts nieuwe stuwen, Froudegetal van de stroming en lengte watersprong voor proeven met bodemverlaging afwaarts voor conditie 1.....	42
Tabel 11 – Stroomsnelheden afwaarts nieuwe stuwen, Froudegetal van de stroming en lengte watersprong voor proeven met woelkom met bodempeil op +4.50 mTAW voor conditie 1.	44
Tabel 12 – Stroomsnelheden afwaarts nieuwe stuwen, Froudegetal van de stroming en lengte watersprong voor proeven met woelkom met bodempeil op +5.30 mTAW voor conditie 1.	45
Tabel 13 – Stroomsnelheden afwaarts nieuwe stuwen, Froudegetal van de stroming en lengte watersprong voor proef met bodemverlaging afwaarts, proef met woelkom met bodempeil op +4.50 mTAW en proef met woelkom met bodempeil op +5.30 mTAW voor conditie 3.....	48
Tabel 14 – Controledefinities nieuwe stuwen Denderleeuw in Mike11-model.....	51
Tabel 15 – Afstand tot as van stuwen, breedte en bodempeil van de gedefinieerde raaien	56
Tabel 16 – Stroomsnelheid aan de bodem voor raai 3a, 3b, 4a, 4b, 5 en 6 in de normale toestand.	57
Tabel 17 – Maximale waarde van de sectiegemiddelde stroomsnelheden voor gedefinieerde raaien bij wascondities.	59
Tabel 18 – Beschouwde breuksteensorteringen	61
Tabel 19 – Breuksteensortering voor grouting.	63
Tabel 20 – Resultaten bepaling breuksteensortering voor raai 4a, 4b, 5 en 6 in de normale toestand.....	67
Tabel 21 – Resultaten bepaling breuksteensortering voor raaien 1, 2a, 2b, 4, 5, 6, 7, 8, 9 en 10 bij wascondities	67
Tabel 22 – Dikte beton (in m) voor raai 4 in de normale toestand.	68
Tabel 23 – Dikte beton (in m) voor raai 4 bij wascondities.	68
Tabel 24 – Resultaat dimensionering bodembescherming.....	68

Tabel 25 – Resultaat dimensionering bodembescherming opwaarts en afwaarts van de nieuwe stuwen....	71
Tabel 26 – Overzicht uitgevoerde proeven	B1
Tabel 27 – Meetgegevens stroomsnelheid	B11
Tabel 28 – Coördinaten locaties en bepaling lengte watersprong.....	B19
Tabel 29 – Berekening sectiegemiddelde stroomsnelheid in gedefinieerde raaien voor was november 2010	B20
Tabel 30 – Berekening sectiegemiddelde stroomsnelheid in gedefinieerde raaien voor was T10 en T100.	B21
Tabel 31 – Berekening sectiegemiddelde stroomsnelheid in gedefinieerde raaien voor was T500 en T1000	B22
Tabel 32 – Breuksteensortering voor raaien 4a, 4b, 5 en 6 in de normale toestand.....	B23
Tabel 33 – Bepaling breuksteensortering voor gedefinieerde raaien voor wascondities.....	B23

Lijst van de figuren

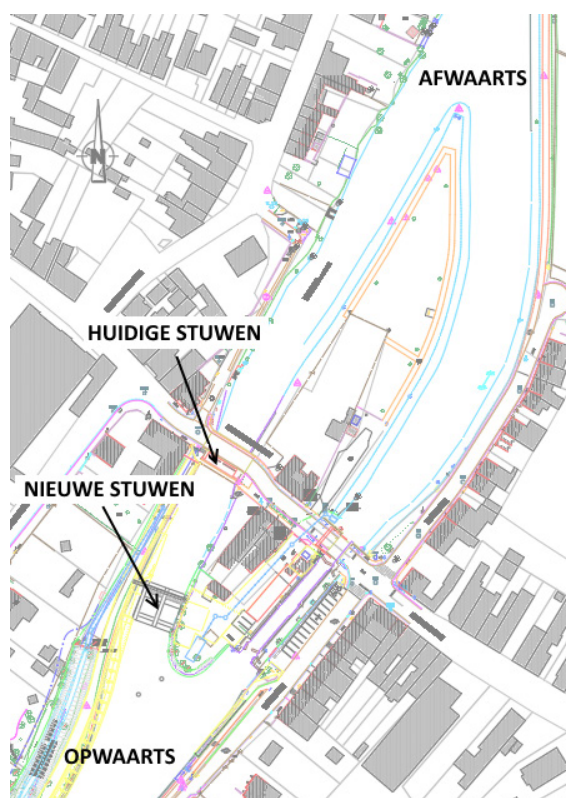
Figuur 1 – Inplanting nieuwe stuwen	11
Figuur 2 – Drie typen watersprong bij beluchte vrije niet verdrongen overlaat.....	12
Figuur 3 - Vier stromingstypen in geval van een ‘vertical drop structure’	13
Figuur 4 – Verklaring parameters vrije en verdrongen watersprong.....	17
Figuur 5 – Inbouw schaalmodel in kleine stroomgoot	21
Figuur 6 – Principeschets watersprong en woelkom	22
Figuur 7 – Lengte van de watersprong op een horizontale vloer in functie van het Froudegetal voor sprong	23
Figuur 8 – Woelkom met dissipatieblokken (USBR type III; Peterka (1984)	24
Figuur 9 – Configuraties met bodemverlaging afwaarts nieuwe stuwen	28
Figuur 10 – Configuraties met woelkom afwaarts nieuwe stuwen.....	29
Figuur 11 – Locatie snelheidsmetingen tijdens schaalmodelproeven.	30
Figuur 12 – Voorbeeld resultaat verwerking foto’s schaalmodelproeven voor proef P07	32
Figuur 13 – Locatie punten voor bepaling lengte watersprong.	34
Figuur 14 – Ligging waterlijn voor proeven met bodemverlaging afwaarts voor conditie 2.	35
Figuur 15 – Ligging waterlijn voor proeven met woelkom met bodempeil op +4.50 mTAW voor conditie 2.38	
Figuur 16 – Ligging waterlijn voor proeven met woelkom met bodempeil op +5.30 mTAW voor conditie 2	40
Figuur 17 – Ligging waterlijn voor proeven met bodemverlaging afwaarts voor conditie 1.	42
Figuur 18 – Ligging waterlijn voor proeven met woelkom met bodempeil op +4.50 mTAW voor conditie 1.44	
Figuur 19 – Ligging waterlijn voor proeven met woelkom met bodempeil op +5.30 mTAW voor conditie 1.45	
Figuur 20 – Ligging waterlijn voor proeven met bodemverlaging afwaarts, proeven met woelkom met bodempeil op +4.50 mTAW en proeven met woelkom met bodempeil op +5.30 mTAW voor conditie 3. ...	47
Figuur 21 – Waterstand en debiet uit MIKE11-model met nieuwe stuwen te Denderleeuw in wascondities	52
Figuur 22 – Locatie raaien voor bepaling hydraulische belasting op de bodem.....	55
Figuur 23 – Locatie raaien 4, 5, 6 en 7.....	56
Figuur 24 – Verband tussen maximaal toegelaten stroomsnelheid en breuksteendiameter voor (met beton) gepenetreerde breuksteen.....	63
Figuur 25 – Locatie zones uit Tabel 25	72
Figuur 26 – Opname stromingspatroon proeven P01, P02, P03,P04 en P05.....	B2
Figuur 27 – Opname stromingspatroon P06, P07, P08, P09, P10 en P11	B3
Figuur 28 – Opname stromingspatroon P12, P13, P14, P15, P16 en P17	B4
Figuur 29 – Opname stromingspatroon P18, P19, P20, P21, P22 en P23	B5
Figuur 30 – Opname stromingspatroon P24, P25, P26, P27, P28 en P29	B6

Figuur 31 – Ligging waterlijn proef P01, P02, P03, P04, P05, P06, P07 en P08	B7
Figuur 32 – Ligging waterlijn proef P09, P10, P11, P12, P13, P14, P15, P16 en P17	B8
Figuur 33 – Ligging waterlijn proef P18, P19, P20, P21, P22,P23, P24, P25 en P26.....	B9
Figuur 34 – Ligging waterlijn proef P27, P28 en P29.....	B10
Figuur 35 – Stroomsnelheid proef P01, P02, P03 en P04.....	B12
Figuur 36 – Stroomsnelheid proef P05, P06, P07 en P08.....	B13
Figuur 37 – Stroomsnelheid proef P09, P10, P11 en P12.....	B14
Figuur 38 – Stroomsnelheid proef P13, P14, P15 en P16.....	B15
Figuur 39 – Stroomsnelheid proef P17, P18, P19 en P20.....	B16
Figuur 40 – Stroomsnelheid proef P21, P22, P23 en P24.....	B17
Figuur 41 – Stroomsnelheid proef P25, P26, P27, P28 en P29.....	B18
Figuur 42 – Locaties voor bepaling lengte watersprong	B19

1 Inleiding

Voor de vernieuwing van het stuwsluiscomplex te Denderleeuw werkt het studiebureau Arcadis in opdracht van De Vlaamse Waterweg nv afdeling Bovenschelde (aBS) aan het voorontwerp van de nieuwe stuwen te Denderleeuw. In dit voorontwerp worden de nieuwe stuwen van het type balgstuwen ingeplant in de huidige stuwgeul ca. 55 m opwaarts van de huidige stuwen. De vernieuwing van de bestaande sluis wordt als 'Design and Build'-project op de markt gezet.

Figuur 1 – Inplanting nieuwe stuwen



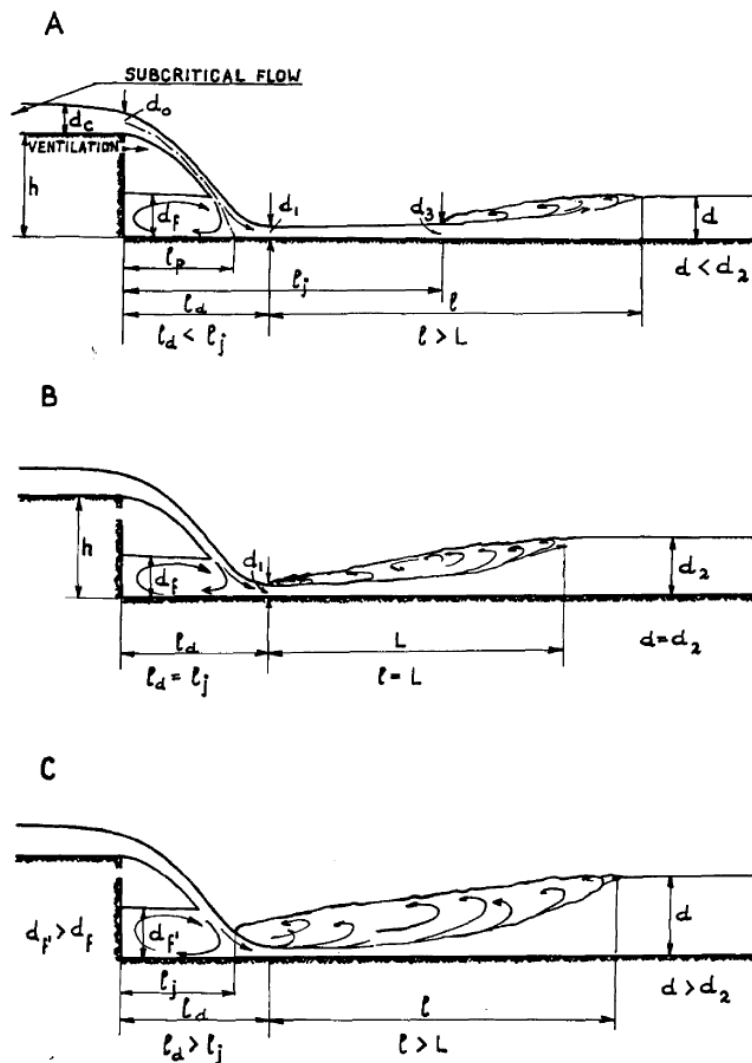
In het kader hiervan wordt door aBS aan het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) gevraagd om de dimensionering van de bodembescherming opwaarts en afwaarts van de nieuwe stuwen uit te voeren. De dimensionering van de bodembescherming op- en afwaarts van de nieuwe sluis behoort tot de Design and Build van de stuwsluis en behoort bijgevolg niet tot het onderwerp van deze studie.

Vooraleer de dimensionering van de erosiebescherming opwaarts en afwaarts van de nieuwe stuwen uit te voeren wordt de hydraulische belasting op de bodem bepaald. De hydraulische belasting bestaat uit de bodemnabije stroming ten gevolge van de werking van de stuwen. De nieuwe stuwen betreffen balgstuwen, waardoor er enkel stroming door overstorting over de stuwen mogelijk is. Afwaarts van Denderleeuw komt het stuwsluiscomplex te Terafene te vervallen. Hierdoor wordt het waterpeil van het afwaarts pand in de toekomst verlaagd met 0.56 m naar +7.61 mTAW en wordt het totale verval over de stuwen te Denderleeuw bij streefpeil in het opwaarts en afwaarts pand gelijk aan 2.76 m. Het huidig bodempeil afwaarts van de nieuwe stuwen bedraagt +5.50 mTAW. In de toekomst wordt het afwaarts bodempeil van de stuwgeul mogelijks verlaagd. Het bodempeil van de afwaartse vaargeul wordt voorzien op een minimale diepte van +5.21 mTAW. Een logische verlaging van het bodempeil van de afwaartse

stuwgeul zou mogelijks een bodempeil gelijk aan dit van de vaargeul zijn. Bij de dimensionering van de bodembescherming wordt rekening gehouden met het verlaagde afwaarts waterpeil en wordt zowel het huidige bodempeil +5.50 mTAW afwaarts van de nieuwe stuwen beschouwd als een bodempeil verlaagd tot +5.21 mTAW.

De stroming over een balgstuw is vergelijkbaar met de stroming afwaarts van een 'vertical drop structure' (zie Figuur 2). Hoewel de aanstroomcondities voor een stuw, met een aanstroomvlak onder een hoek, niet direct overeenkomen met deze uit Figuur 2 geven de rekenmethodes voor een 'vertical drop structure' een goede benadering voor overstort bij stuwen.

Figuur 2 – Drie typen watersprong bij beluchte vrije niet verdrongen overlaat (Rand, 1955)



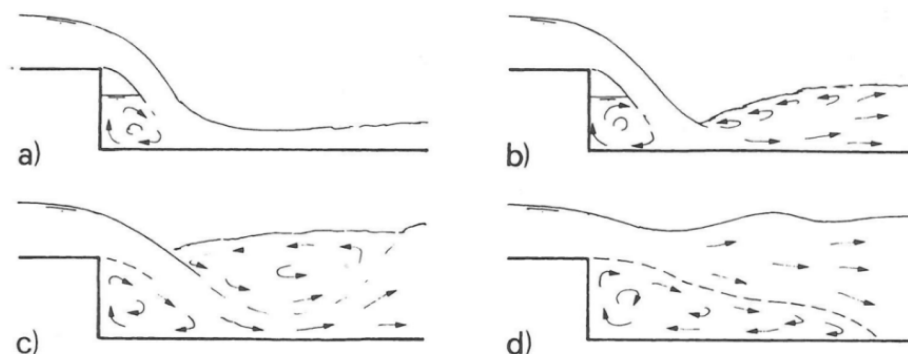
A: wegschietende vrije watersprong; B: vrije watersprong; C: verdrongen watersprong

h: valhoogte [m]; l_d : vallengte [m]; l_j : afstand tussen overstortpunt en begin watersprong [m]; d_1 : waterdiepte voor sprong [m]; d_2 : waterdiepte na sprong [m]; d: waterdiepte afwaarts; L: lengte vrije watersprong [m]

Afhankelijk van de verhouding tussen de afwaartse waterdiepte (d) en de berekende corresponderende waterdiepte d_2 na sprong (zie Figuur 2), definiëren de rekenregels voor een ‘vertical drop structure’ de volgende 4 verschillende stromingstypes (zie Figuur 3, situatie A-C worden ook weergegeven in Figuur 2):

- A. Het afwaarts waterpeil is lager dan de berekenende waterdiepte na sprong ($d < d_2$): De superkritische stroming na de val wordt niet meteen door middel van een watersprong omgezet naar subkritische stroming. Meer naar afwaarts ($l_j > l_d$) zal een watersprong ontstaan nadat de energie van de superkritische stroming afneemt ten gevolge van het verwijden van de doorstroomsectie en/of ten gevolge van wrijvingsverlies. Superkritische stroming gaat gepaard met hoge stroomsnelheden aan de bodem en turbulente stroming. Omwille van die reden dient deze situatie vermeden te worden in praktijk.
- B. Het afwaarts waterpeil is gelijk aan de berekenende evenwichtsdiepte ($d = d_2$). In deze toestand doet de watersprong zich juist afwaarts van de vallende straal voor. Het begin van de watersprong is gelijk aan lengte l_d ($l_j = l_d$).
- C. Het afwaarts waterpeil is hoger dan de berekenende evenwichtsdiepte na sprong ($d > d_2$): In deze toestand doet zich een verdronken watersprong voor. Bij een stijgend afwaarts waterpeil neemt ook de lengte van de vallende straal toe ($l_d > l_j$).
- D. Op een gegeven moment wijzigt de verdronken sprong naar een oppervlakte jet. Hierbij verdwijnt de neer boven de vallende straal. Deze situatie doet zich waarschijnlijk enkel voor bij was.

Figuur 3 - Vier stromingstypen in geval van een ‘vertical drop structure’ (Vischer & Hager, 1995)



In Visser et al. (2016) werd aan de hand van de rekenmethodes voor een ‘vertical drop structure’ reeds besloten dat de lagere waterdiepte ten gevolge van deze waterpeilverlaging afwaarts van de nieuwe stuwen onder maatgevende condities aanleiding kan geven tot het ontstaan van een vrije watersprong met een voorliggende zone met superkritische stroomsnelheden (een zogenaamde wegschietende watersprong). Deze situatie van een wegschietende watersprong wordt best voorkomen aangezien in een zone met schietend water zeer hoge stroomsnelheden voorkomen, wat leidt tot een verhoogd risico op erosie van de bodem. De locatie van de watersprong afwaarts van de stuwen is in deze toestand ook niet stabiel, waardoor een relatief grote zone met bodembescherming nodig is. Om de hydraulische belasting op de bodem te bepalen is daarom eerst een schaalmodelonderzoek uitgevoerd naar de locatie van de watersprong. Hierbij is ook nagegaan of er maatregelen zoals een verlaging van het bodempeil afwaarts of een woelkom nodig zijn om ervoor te zorgen dat de watersprong zich voordoet onmiddellijk afwaarts van de vallende straal. Daarbij is ook de stroomsnelheid op verschillende plaatsen aan de bodem opgemeten afwaarts van de nieuwe stuwen. Een beschrijving van het schaalmodel, de uitgevoerde proeven en de verwerking van de metingen in het schaalmodel is beschreven in hoofdstuk 2. De resultaten van de schaalmodelproeven worden in detail besproken in hoofdstuk 3.

Gebruik makend van de resultaten van de schaalmodelproeven en van numeriek simulaties voor de maatgevende wasafvoer voor bepaalde terugkeerperiodes, wordt in hoofdstuk 4 het scenario van de bodembescherming bepaald. Daarna is voor dit scenario de dimensionering van de bodembescherming opwaarts en afwaarts van de nieuwe stuwen uitgevoerd. De resultaten hiervan zijn beschreven in hoofdstuk 5.

Hoofdstuk 6 vat de conclusies van dit rapport samen.

Met betrekking tot de schaalmodelproeven wordt opgemerkt dat, indien niet expliciet vermeld, alle afmetingen en peilen in dit rapport afmetingen en peilen op prototypeschaal betreffen, met andere woorden de niet verschaalde waarden.

2 Schaalmodelproeven met betrekking tot energiedissipatie afwaarts nieuwe stuwen

2.1 Algemeen

Zoals reeds vermeld in hoofdstuk 1 is het de doel van de schaalmodelproeven nagaan of een bodemverlaging of andere maatregelen zoals een woelkom afwaarts van de nieuwe stuwen nodig zijn om ervoor te zorgen dat de watersprong zich onder maatgevende omstandigheden altijd juist afwaarts van de vallende straal voordoet.

In paragraaf 2.2 worden de hydraulische condities beschreven, die gebruikt zijn voor het ontwerp van het schaalmodel. Het schaalmodel van de nieuwe stuwen wordt besproken in paragraaf 2.3. Paragraaf 2.4 beschrijft de verschillende configuraties die tijdens de schaalmodelproeven beproefd zijn. Een overzicht van de uitgevoerde schaalmodelproeven is gegeven in paragraaf 2.5, terwijl paragraaf 2.6 een overzicht geeft van de metingen die op het schaalmodel zijn uitgevoerd en de wijze waarop deze verwerkt zijn. De resultaten van de proeven zelf worden in hoofdstuk 3 van dit rapport besproken.

2.2 Hydraulische condities

Het streefpeil in het opwaarts pand bedraagt +10.37 mTAW. Na afschaffing van het stuwsluiscomplex te Teralfene bedraagt het streefpeil in het afwaarts pand +7.61 mTAW.

In het kader van de inpassing van de nieuwe stuwen ten opzichte van de vaargeul werden in Visser et al. (2016) reeds hydraulische condities afgeleid voor de bepaling van een minimale vrijwaringszone afwaarts van de stuwen. Hierbij werd ook een positie van de nieuwe stuwen beschouwd aan het afwaarts uiteinde van de stuwgeul, dewelke uiteindelijk niet weerhouden is. Voor de bepaling van de minimale vrijwaringszone werd op een conservatieve wijze de theoretische lengte van de watersprong berekend onder maatgevende condities voor twee 'extreme' debieten afgeleid uit een histogram van metingen uitgevoerd tussen 2008 en 2015. Deze debieten betroffen een sterk verhoogd debiet (50 m³/s) in dagdagelijks omstandigheden, wat slechts 1 % van de tijd overschreden wordt, en het maximale debiet (115 m³/s) gemeten tijdens de was van november 2010. Voor elk van deze debieten werden enkele maatgevende waterstanden beschouwd. Op deze wijze werden vier hydraulische condities afgeleid, waarvoor de berekening van de lengte van de watersprong is uitgevoerd. Voor de eerste twee condities werd uitgegaan van het behoud van het opwaarts en afwaarts streefpeil bij elk van de twee beschouwde debieten. Bij conditie 2 wordt opgemerkt dat dit een fictieve situatie betreft, aangezien bij was mag verondersteld worden dat in werkelijkheid zowel het opwaarts als het afwaartse waterpeil zullen stijgen. Bij conditie 4 werden, ter vergelijking, dan ook de waterstanden toegepast zoals werkelijk gemeten tijdens de was van november 2010. Voor conditie 3 werd tenslotte een afwaartse waterstand gekozen tussen de waterstand van conditie 4 en het streefpeil om de invloed van het afwaartse waterpeil op de lengte van de theoretische berekende watersprong te kunnen nagaan. Tabel 1 geeft een overzicht van de vier condities zoals toegepast in Visser et al. (2016).

Tabel 1 – Waterpeilen en debieten beschouwd in Visser et al. (2016).

	Waterpeil opwaarts	Waterpeil afwaarts	Debiet	Conditie
Normale toestand	+10.37 mTAW	+7.61 mTAW	50 m ³ /s	1
Wasregime	+10.37 mTAW	+7.61 mTAW	115 m ³ /s	2
	+10.88 mTAW	+9.50 mTAW	115 m ³ /s	3
	+10.88 mTAW	+10.38 mTAW	115 m ³ /s	4

De condities, die in Visser et al. (2016) beschouwd zijn, hadden als doel om op conservatieve wijze de meest extreme lengte van de watersprong te bepalen met het oog op het vaststellen van een vrijwaringszone voor scheepvaart aan afwaartse zijde van de stuw. Deze randvoorwaarden richten zich dus niet op het ontwerpen van de bodembescherming en houden dan ook geen rekening met theoretische wascondities met terugkeerperiodes van bijvoorbeeld 100 of 1000 jaar. Aangezien in de onderhavige schaalmodelstudie alleen de condities gesimuleerd worden waarbij de stuwkleppen niet volledig neer zijn gelaten, worden in deze studie enkel condities 1 tot en met 3 Tabel 1 beschouwd.

Voor de drie beschouwde condities wordt gecontroleerd welk stromingspatroon zich zal voordoen afwaarts van de stuwen aan de hand van empirisch bepaalde formules. Hierbij wordt eerst de lengte van de overstortende straal bepaald aan de hand van volgende formules voor een “vertical drop structure” (zie Figuur 4):

$$\frac{L_d}{h} = 4.30 \left(\frac{dc}{h} \right)^{0.81} \quad (\text{Rand, 1955})$$

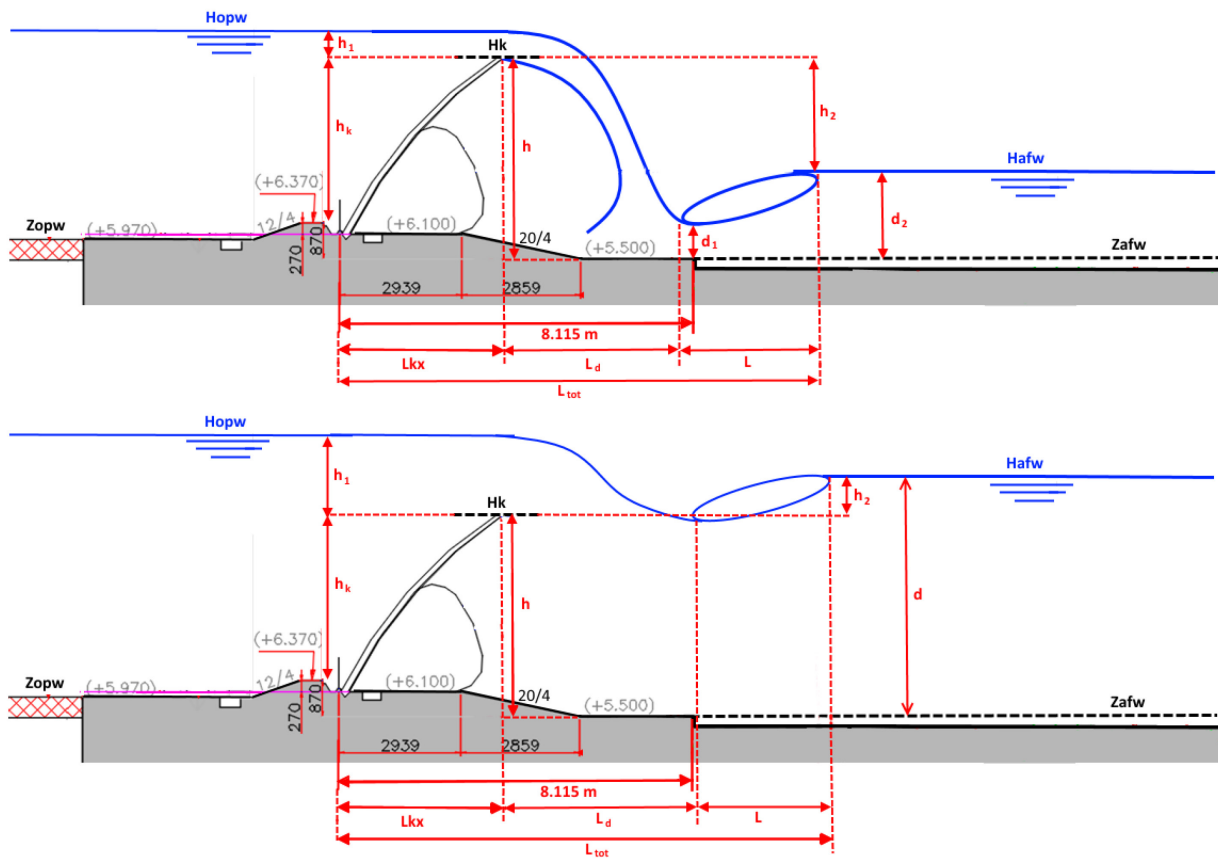
$$\frac{L_d}{h} = 2.171 \left(\frac{dc}{h} \right)^{0.525} \quad (\text{Chanson, 2002})$$

Met:

– L_d	Lengte vallende straal	[m]
– d_c	Kritische waterhoogte ($= \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$)	[m]
– q	Debiet per eenheidsbreedte ($=Q/B_s$)	[m ² /s]
– Q	Debiet	[m ³ /s]
– B_s	Breedte stuwen	[m]
– g	Valversnelling ($= 9.81 \text{ m/s}^2$)	[m/s ²]
– h	Valhoogte	[m]

Uit op het WL uitgevoerde schaalmodelproeven voor een vertical drop structure (Vercruysse *et al.*, 2015) blijkt echter dat de lengte van de vallende straal wordt overschat met de formule van Rand. Hiervoor werd geen verklaring gevonden. Om die reden wordt in deze paragraaf alleen de formule van Chanson toegepast voor de berekening van de lengte van de vallende straal. Bemerkt dat deze formule van toepassing is voor een vrije watersprong. Bij het verdronken raken van de watersprong zal de lengte van de vallende straal toenemen.

Figuur 4 – Verklaring parameters vrije en verdronken watersprong



Boven: vrije watersprong; onder: verdronken watersprong

Daarna wordt de waterdiepte vòòr de watersprong d_1 en de waterdiepte na sprong d_2 berekend aan de hand van de volgende formules:

$$\frac{d_1}{h} = 0.54 \cdot \left(\frac{dc}{h}\right)^{1.275} \quad (\text{Rand, 1955})$$

$$\frac{d_1}{h} = 0.625 \cdot \left(\frac{dc}{h}\right)^{1.326} \quad (\text{Chanson, 2002})$$

$$\frac{d_2}{h} = 1.66 \cdot \left(\frac{dc}{h}\right)^{0.81} \quad (\text{Rand, 1955})$$

$$\frac{d_2}{h} = 1.565 \cdot \left(\frac{dc}{h}\right)^{0.809} \quad (\text{Chanson, 2002})$$

$$d_2 = d_1 \cdot \frac{\left(\sqrt{1+8 \cdot Fr_1^2} - 1\right)}{2} \quad (\text{Bélanger, 1828})$$

Met:

– d_1	Waterdiepte vòòr watersprong	[m]
– d_2	Waterdiepte na watersprong	[m]
– h	Valhoogte	[m]
– d_c	Kritische waterhoogte ($d_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$)	[m]
– q	Debiet per eenheidsbreedte ($q=Q/B_s$)	[m ² /s]
– Q	Debiet	[m ³ /s]

– B_s	Breedte stuwen	[m]
– g	Valversnelling (= 9.81 m/s ²)	[m/s ²]
– h	Valhoogte	[m]
– Fr_1	Froudegetal vòòr sprong ($Fr_1 = \frac{q/d_1}{\sqrt{g d_1}}$)	[-]

De lengte van de watersprong wordt als volgt berekend, rekening houdend met de verdrinkingsgraad S_j :

1. Verdrongen watersprong ($S_j > 0$):

$$\frac{L_s}{d_2} = 6.1 + 4.9 \cdot S_j \quad (\text{Vischer \& Hager, 1995})$$

2. Vrije watersprong ($S_j < 0$):

$$L_{Rand} = 6 \cdot (d_2 - d_1) \quad (\text{Rand, 1955})$$

$$\frac{L_{Hager}}{d_1} = 10 \cdot \alpha_j \cdot \tanh\left(\frac{Fr_1 - 1}{\alpha_j}\right) \quad (\text{Vischer \& Hager, 1995})$$

Met:

– L_s	Lengte verdrongen watersprong	[m]
– L_{Rand}	Lengte vrije watersprong berekend met Rand, (1955)	[m]
– L_{Hager}	Lengte vrije watersprong berekend met Hager <i>et al.</i> , (1990)	[m]
– S_j	Verdrinkingsgraad ($S_j = \frac{d}{d_2} - 1$)	[-]
– d_1	Waterdiepte vòòr watersprong	[m]
– d_2	Waterdiepte na watersprong	[m]
– Fr_1	Froudegetal vòòr sprong ($Fr_1 = \frac{q/d_1}{\sqrt{g d_1}}$)	[-]
– q	Debiet per eenheidsbreedte ($q = Q/B_s$)	[m ² /s]
– g	Valversnelling (= 9.81 m/s ²)	[m/s ²]
– α_j	Coëfficiënt (= 22)	[-]

Bij een positieve waarde van de verdrinkingsgraad S_j , is de watersprong verdrongen. Bij een negatieve waarde van de verdrinkingsgraad doet zich een vrije watersprong voor, eventueel voorafgegaan door een zone met schietend water. Op het overgangsgebied tussen deze twee toestanden ($S_j = 1$) doet zich de situatie voor waarbij de watersprong zich juist afwaarts van de vallende straal bevindt. Bij deze toestand is de afwaartse waterdiepte d gelijk aan de waterhoogte na sprong d_2 (stroomtype B in Figuur 2 en Figuur 3). Het bodempeil (bij een vlakke bodem zonder woelkom) dat nodig is om dit te realiseren (Z_d) wordt dan berekend als het waterpeil afwaarts H_{afw} verminderd met de waterdiepte na sprong d_2 . Dit is een benadering, aangezien bij een verlaging van het bodempeil ook de hoogte waarover de vallende straal valt vergroot. Dit beïnvloedt ook de positie van de watersprong.

Tabel 2 geeft voor conditie 1, conditie 2 en conditie 3 de resultaten van de berekening van de watersprong aan de hand van de bovenstaande formuleringen. De berekening is zowel uitgevoerd voor het huidig afwaarts bodempeil +5.50 mTAW als voor een bodempeil dat verlaagd is tot het bodempeil van de vaargeul (+5.21 mTAW). De waarden voor het kruinpeil van de nieuwe stuwen H_k en de lengte L_{kx} zijn hierbij overgenomen uit Visser et al. (2016).

Tabel 2 – Resultaten berekening watersprong voor bodempeil afwaarts op +5.50 mTAW en op +5.21 mTAW.

Parameter	Symbool	Eenheid	Bodempeil afwaarts +5.50 mTAW			Bodempeil afwaarts +5.21 mTAW		
			Conditie 1	Conditie 2	Conditie 3	Conditie 1	Conditie 2	Conditie 3
Waterpeil opwaarts	H_{opw}	mTAW	+10.37	+10.37	+10.88	+10.37	+10.37	+10.88
Waterpeil afwaarts	H_{afw}	mTAW	+7.61	+7.61	+9.50	+7.61	+7.61	+9.50
Kruinpeil stuwklep	H_k	mTAW	+8.86	+7.70	+8.23	+8.86	+7.70	+8.23
Bodempeil afwaarts	Z_{afw}	mTAW	+5.50	+5.50	+5.50	+5.21	+5.21	+5.21
Waterhoogte opwaarts boven klep.	h_1	m	1.51	2.67	2.65	1.51	2.67	2.65
Waterhoogte afwaarts boven klep.	h_2	m	-1.25	-0.09	1.27	-1.25	-0.09	1.27
Klephoogte	h_k	m	2.76	1.60	2.13	2.76	1.60	2.13
Debiet	Q	m ³ /s	50	115	115	50	115	115
Debiet per eenheidsbreedte	q	m ² /s	3.57	8.21	8.21	3.57	8.21	8.21
Kritische waterdiepte	d_c	m	1.09	1.90	1.90	1.09	1.90	1.90
Valhoogte	h	m	3.36	2.20	2.73	3.65	2.49	3.02
Parameter d_c/h	d_c/h	-	0.32	0.86	0.70	0.30	0.76	0.63
Waterdiepte afwaarts	d	m	2.11	2.11	4.00	2.40	2.40	4.29
Horizontale lengte stuw	L_{kx}	m	4.99	5.47	5.29	4.99	5.47	5.29
Lengte vallende straal	L_d	m	4.04	4.43	4.90	4.04	4.43	4.90
Waterdiepte voor sprong	d_1	m	0.43	0.99	0.93	0.42	0.95	0.90
Froudegetal voor sprong	Fr_1	-	4.01	2.68	2.93	4.15	2.82	3.05
Waterdiepte na sprong	d_2	m	2.24	3.25	3.38	2.28	3.32	3.45
Verdrinkingsgraad	S_j	-	-0.06	-0.35	0.18	0.05	-0.28	0.24
Lengte verdrongen watersprong	L_s	m	n.v.t.	n.v.t.	23.7	14.5	n.v.t.	25.2
Lengte vrije watersprong	$L_{(Rand)}$	m	10.9	13.6	n.v.t.	n.v.t.	14.2	n.v.t.
	$L_{(Hager)}$	m	12.9	16.5	n.v.t.	n.v.t.	17.3	n.v.t.
Benodigd bodempeil afwaarts om schietend water te voorkomen	Z_d	mTAW	+5.36	+4.36	+6.11	+5.33	+4.28	+6.05

Uit Tabel 2 volgt dat zich bij het huidige bodempeil afwaarts (+5.50 mTAW) enkel in conditie 3 een verdrongen watersprong voordoet ($S_j > 0$). Bij conditie 1 en conditie 2 ontstaan vrije watersprongen. Bij een verlaging van het bodempeil afwaarts naar +5.21 mTAW wordt voor conditie 1 en conditie 3 een verdrongen watersprong berekend en voor conditie 2 een vrije watersprong. Dit vertaalt zich ook in het bodempeil (Z_d) dat afwaarts nodig is om ervoor te zorgen dat de watersprong zich juist na de vallende straal voordoet. Bij het huidige bodempeil is dit bij conditie 3 een bodempeil dat hoger is dan +5.50 mTAW en bij conditie 1 en conditie 2 een lager bodempeil. Bij een bodempeil dat verlaagd is naar +5.21 mTAW is het benodigde bodempeil bij conditie 1 en conditie 3 hoger dan dit peil en enkel bij conditie 2 lager. Uit deze berekening volgt dat minimaal een bodempeil +4.28 mTAW (benodigde waterdiepte: 3.32 m) nodig is om ervoor te zorgen dat de watersprong zich bij alle condities juist na de vallende straal voordoet. Daarnaast volgt uit de tabel dat de lengte van de watersprong varieert tussen 10.9 m en 25.2 m.

Bij conditie 1 en conditie 2 doet zich een vrije watersprong voor. Deze condities worden in eerste instantie beschouwd in het schaalmodelonderzoek. Daarnaast zal, ter vergelijking, ook conditie 3 beschouwd worden, alhoewel voor deze conditie een verdronken watersprong berekend wordt. Tabel 3 geeft een overzicht van de condities die voor het uitvoeren van de schaalmodelproeven beschouwd zijn.

Tabel 3 – Overzicht condities voor uitvoeren schaalmodelproeven

	Conditie	Waterpeil opwaarts H_{opw}	Waterpeil afwaarts H_{afw}	Debiet	Debiet per eenheidsbreedte	Kruinpeil stuw H_k	Lengte L_{kx}
Normale toestand	1	+10.37 mTAW	+7.61 mTAW	50 m ³ /s	3.57 m ³ /s/m	+8.86 mTAW	4.99 m
Wasregime	2	+10.37 mTAW	+7.61 mTAW	115 m ³ /s	8.21 m ³ /s/m	+7.70 mTAW	5.47 m
	3	+10.88 mTAW	+9.50 mTAW	115 m ³ /s	8.21 m ³ /s/m	+8.21 mTAW	5.29 m

De stroming over de nieuwe stuwen in deze condities gebeurt door overstorting. Bij 2 stuwen in gebruik kan de stroming over de stuwen als een tweedimensionaal stromingspatroon (onafhankelijk van de breedte van de stuwen) beschouwd worden. Aangezien er tussen de twee stuwen een muur aanwezig is en aangezien afwaarts van de nieuwe stuwen de sectie vergroot, zal er zich wel nog een beperkte uitspreiding van de stroming in de breedte voordoen. Bij stroming over één stuw echter zal zich afwaarts van de nieuwe stuwen een uitspreiding van de stroming in de breedte voordoen. Onmiddellijk afwaarts van de stuwen zelf is een stroming aanwezig die nog volgens de as van de stuwgeul gericht is. Voor het ontwerp van de schaalmodelproeven wordt de stroming over de stuwen als een tweedimensionale stroming beschouwd, i.e. waarbij zich geen variatie van de stroming over de breedte van de stuwen voordoet. Om die reden is in Tabel 3 ook het debiet per eenheidsbreedte vermeld.

Voor elk van deze condities wordt er initieel vanuit gegaan dat afvoer over beide stuwen mogelijk is. Omwille van de tweedimensionale benadering, kan elke conditie hierbij ook beschouwd worden als een voorbeeld van een noodsituatie waarbij slecht één stuw in werking is. Zo kan bijvoorbeeld conditie 2 aanzien worden als een voorbeeld van een noodsituatie waarbij slecht één stuw in werking is bij de hydraulische randvoorwaarden uit conditie 1. De op- en afwaartse waterstanden zijn namelijk gelijk bij beide condities, maar het debiet bij het wasregime is ongeveer tweemaal hoger als deze in de normale toestand (vergelijk 50 m³/s in normale toestand met $115 \text{ m}^3/\text{s} / 2 = 57.5 \text{ m}^3/\text{s}$ bij het wasregime). Daarnaast kan bijvoorbeeld conditie 1 aanzien worden als een noodsituatie waarbij een debiet van 25 m³/s door middel van één stuw wordt afgevoerd met behoud van de streefpeilen in opwaarts en afwaarts pand.

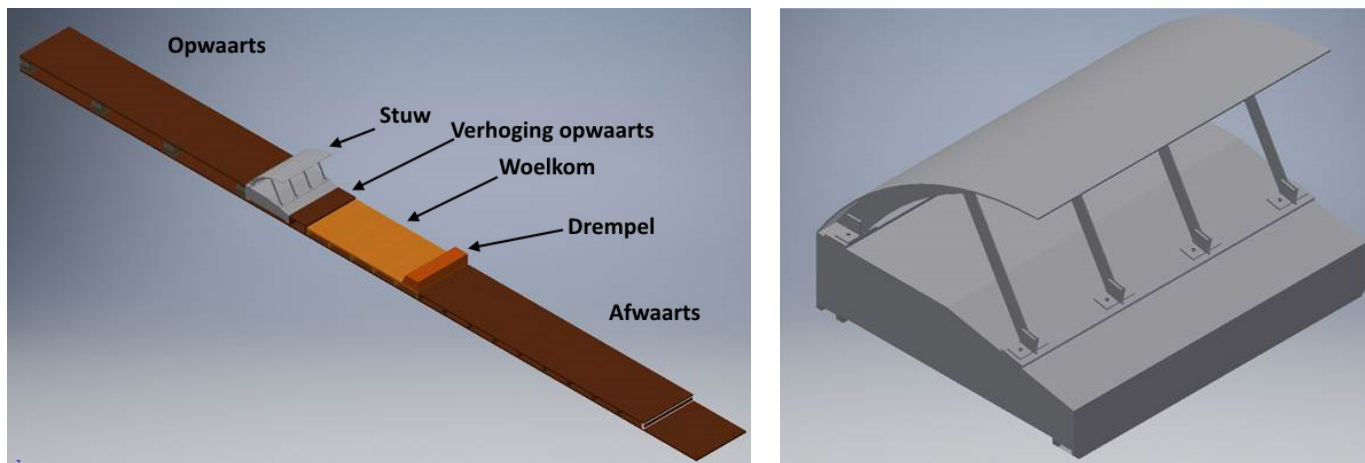
2.3 Ontwerp schaalmodel

Zoals vermeld in paragraaf 2.2 wordt voor het ontwerp van de schaalmodelproeven de stroming over de stuwen als een tweedimensionale stroming beschouwd. Bijgevolg kan het schaalmodel ingebouwd worden in de kleine stroomgoot van WL. Deze stroomgoot heeft een breedte van 0.56 m, een hoogte van 0.76 m en een lengte van 34.8 m. In deze stroomgoot kan een maximaal debiet van 126 l/s gehaald worden, of bij een breedte van 0.56 m een debiet gelijk aan $0.225 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$. Toepassen van een Froude-verschaling van het maximaal debiet van $8.21 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ uit Tabel 3 naar dit maximale debiet in het schaalmodel geeft een minimale waarde van de schaalfactor gelijk aan 12 ($8.21/12^{(3/2)} = 0.19 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$). Voor het ontwerp van het schaalmodel is daarom een schaalfactor 12 beschouwd.

De afstand tussen de hoogste waterstand in het schaalmodel en het laagste peil van de woelkom bedraagt 6.38 m. Bij een schaalfactor 12 komt dit in het schaalmodel overeen met een hoogte 0.53 m, wat 0.23 m lager is dan de hoogte van de kleine stroomgoot van WL. Dit is ruim voldoende.

Figuur 5 geeft een voorstelling van de inbouw van de stuwen en de woelkom in het schaalmodel. De stuw wordt modulair als één element opgebouwd (zie links gedeelte van Figuur 5). Voor de drie verschillende condities, dewelke elk overeenkomen met een verschillende positie van de stuw, wordt telkens een modulair element gemaakt en in het schaalmodel ingebouwd. Bij het beproeven van een nieuwe conditie wordt bijgevolg het vorige stuwelement uit het model gehaald, waarna het nieuwe stuwelement ingebouwd wordt. Ook de woelkom, drempel en het bodempeil afwaarts zijn als modulaire vervangbare elementen ingebouwd, zodat bij het beproeven van de verschillende condities relatief eenvoudig van één toestand naar de andere kan overgegaan worden.

Figuur 5 – Inbouw schaalmodel in kleine stroomgoot

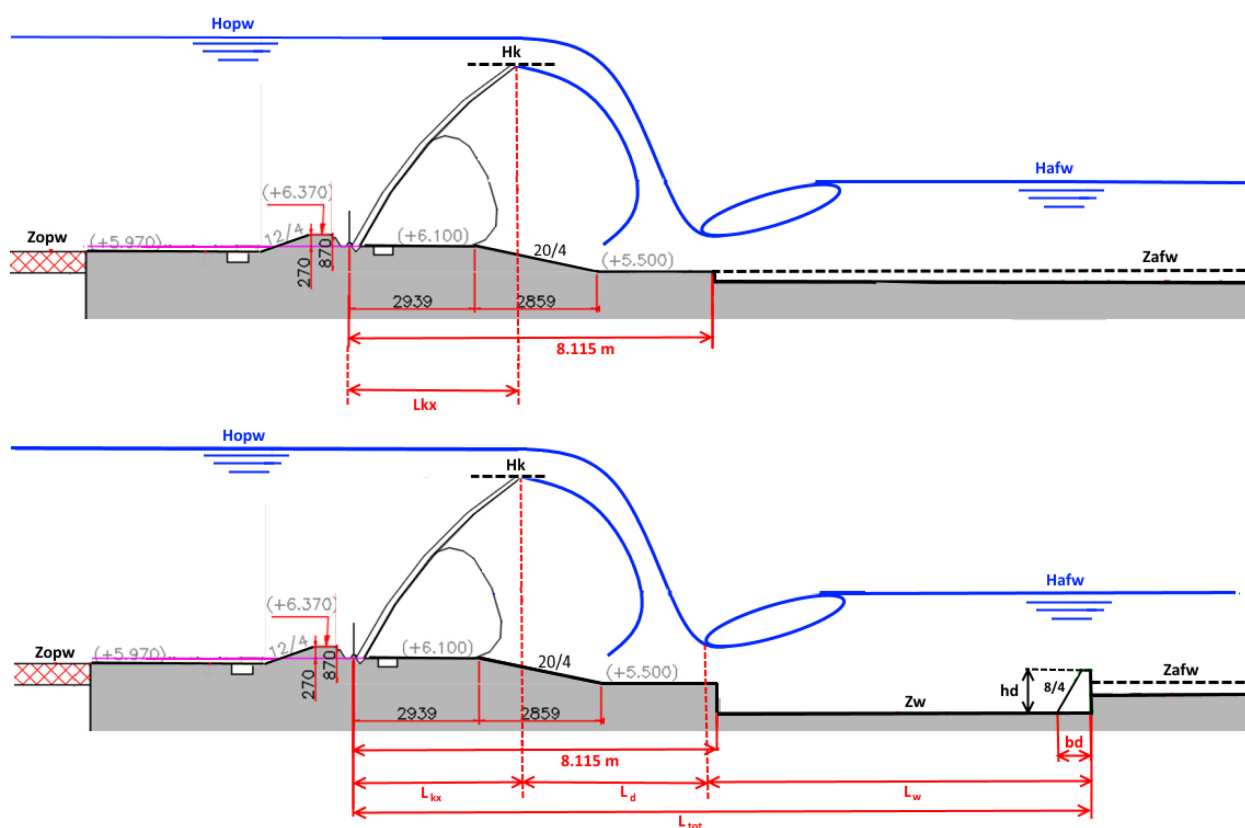


Links: Schaalmodel van stuw inclusief woelkom; rechts: detail van de stuwen

2.4 Beproefde configuraties

Het doel van de schaalmodelproeven is onderzoeken of er afwaarts van de nieuwe stuwen maatregelen nodig zijn om ervoor te zorgen dat de watersprong zich onmiddellijk na de stuwen voordoet. Hiervoor zullen twee type maatregelen worden onderzocht worden, namelijk een verlaging van het bodempeil en het toepassen van een woelkom. Een prinseschets van het stromingspatroon afwaarts van de nieuwe stuwen met een bodemverlaging of een woelkom is gegeven in Figuur 6. In deze figuur zijn ook de voor ontwerp belangrijke afmetingen aangeduid.

Figuur 6 – Prinseschets watersprong en woelkom



Boven: watersprong afwaarts van stuwen bij bodemverlaging; beneden: watersprong in woelkom

Het bodempeil van de Dender opwaarts van de nieuwe stuwen (aangeduid met Z_{opw} in Figuur 6) bedraagt +5.97 mTAW. Voor het uitvoeren van de schaalmodelproeven wordt het bodempeil opwaarts uit eenvoud gelijk genomen aan het peil van de scharnier van de stuw. Dit heeft geen invloed op de stroming over de stuw.

De eerste hierboven vermelde maatregel betreft een verlaging van het bodempeil afwaarts van de nieuwe stuwen (aangeduid met Z_{afw} in Figuur 6). Hierbij worden in het schaalmodel de volgende 3 bodempeilen beschouwd:

- Het huidig bodempeil +5.50 mTAW afwaarts van de nieuwe stuwen.
- Het verlaagd bodempeil van +5.21 mTAW, gelijk aan het bodempeil van de afwaartse vaargeul.
- Een bodempeil +4.28 mTAW. Dit bodempeil volgt uit de berekeningen in paragraaf 2.2 en is nodig om ervoor te zorgen dat de watersprong zich juist na de vallende straal voordoet.

De tweede maatregel betreft het voorzien van een woelkom. Om de dimensies van deze woelkom te bepalen wordt de hoogte van de einddrempel en de lengte van de woelkom berekend aan de hand van de resultaten van de watersprongberekening in paragraaf 2.2 en aan de hand van volgende formuleringen voor het dimensioneren van een woelkom zonder dissipatieblokken uit Peterka (1984) en Thompson and Kilgore (2006):

$$L_w = a d_2$$

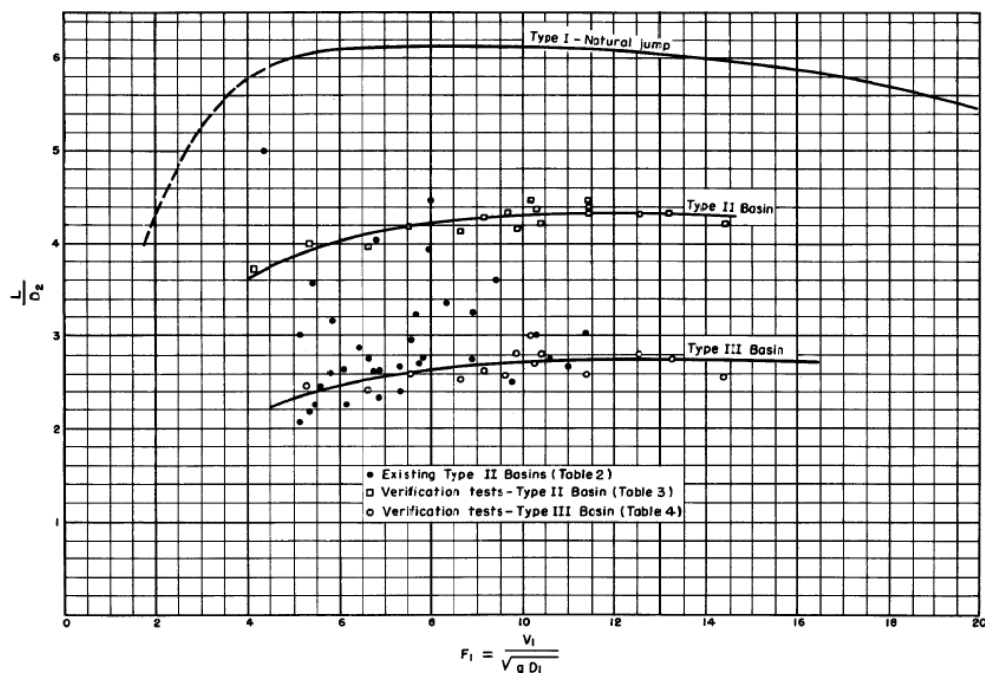
$$H_d = d_1 (0.0536 Fr_1 + 1.04)$$

Met:

– L_w	Lengte woelkom	[m]
– H_d	Hoogte einddrempel	[m]
– a	Coëfficiënt	[-]
– d_1	Waterhoogte vòòr sprong	[m]
– d_2	Waterhoogte na sprong	[m]
– Fr_1	Froudegetal vòòr sprong	[-]

De coëfficiënt a wordt afgelezen uit Figuur 7 uit Peterka (1984). De woelkom betreft een USBR Type II stilling basin. Hierbij wordt opgemerkt dat bij deze methode de lengte van de woelkom gelijk genomen wordt aan de lengte van de watersprong die in schaalmodelproeven uit het verleden is opgemeten.

Figuur 7 – Lengte van de watersprong op een horizontale vloer in functie van het Froudegetal voor sprong



Bron: Peterka (1984)

Om ervoor te zorgen dat de watersprong zich juist afwaarts van de vallende straal voordoet, moet afwaarts minimaal een waterdiepte aanwezig zijn die gelijk is aan de waterhoogte na sprong d_2 . Het maximale bodempeil van de woelkom wordt bijgevolg als volgt bepaald:

$$Z_w = H_{afw} - d_2$$

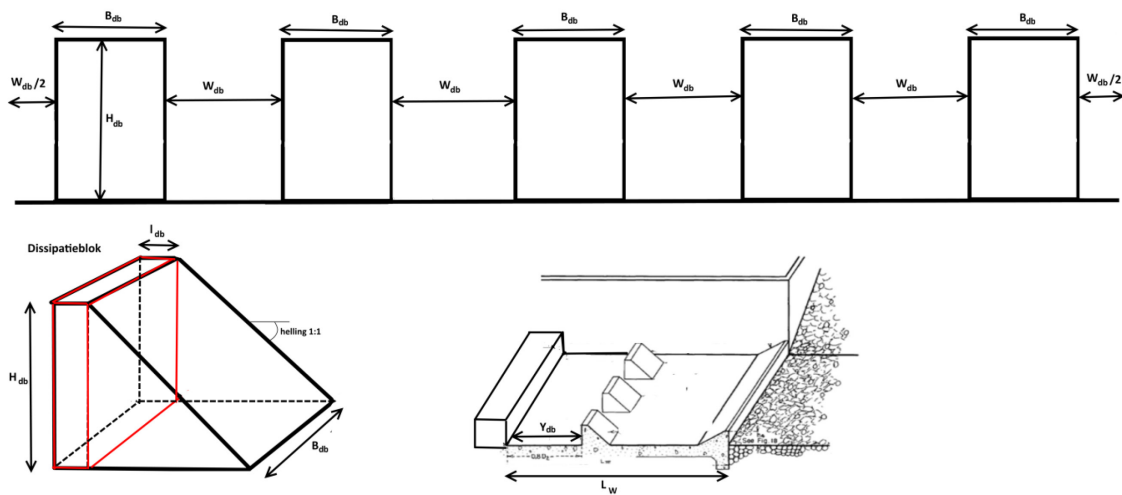
Met:

– Z_W	Bodempeil woelkom	[mTAW]
– H_{afw}	Waterpeil afwaarts	[mTAW]
– d_2	Waterhoogte na sprong	[m]

Door de toepassing van dissipatieblokken in de woelkom kan de lengte van de woelkom verkleind worden. Dit volgt uit het feit dat de coëfficiënt a in de bovenstaande vergelijking afgelezen wordt op de curve voor een USBR Type III stilling basin (zie Figuur 8) in plaats van een USBR Type II stilling basin (met enkel eindrempel).

In Figuur 8 is ook de in dit rapport gebruikte naamgeving van de afmeting van de dissipatieblokken aangeduid. Peterka (1984) vermeldt dat voornamelijk het voorvlak van de dissipatieblokken van belang is voor de energiedissipatie en het ontstaan van de watersprong. Om die reden zullen in het schaalmodel dissipatieblokken ingebouwd worden die overeenkomen met de rode balk uit Figuur 8.

Figuur 8 – Woelkom met dissipatieblokken (USBR type III; Peterka (1984))



De afmetingen en het aantal dissipatieblokken worden bepaald aan de hand van de formulerings uit Thompson and Kilgore (2006):

$$H_{DB} = d_1 (0.168 Fr_1 + 0.58)$$

$$l_{DB} = 0.2 H_{DB}$$

$$N_{DB} = \frac{B_{WK}}{1.5 H_{DB}}$$

$$B_{DB} = W_{DB} = \frac{B_{WK}}{2 N_{DB}}$$

Met:

– H_{DB}	Hoogte dissipatieblok	[m]
– B_{DB}	Breedte dissipatieblok	[m]
– l_{DB}	Lengte bovenzijde dissipatieblok	[m]
– N_{DB}	Aantal dissipatieblokken	[-]
– W_{DB}	Tussenafstand dissipatieblokken	[m]
– d_1	Waterhoogte vòòr sprong	[m]
– Fr_1	Froudegetal vòòr sprong	[-]
– B_{WK}	Breedte woelkom (= breedte stuwgeul = 15.5 m)	[m]

Merk op dat de toepassing van dissipatieblokken mogelijk wel een nadelig effect kan hebben op de mortaliteit van vissen die bij afwaartse migratie over de stuwen zullen spoelen. Bij de auteurs van dit rapport zijn op dit ogenblik geen studies bekend, die de invloed hiervan hebben onderzocht, maar dit wordt wel best in overweging genomen in het uiteindelijke ontwerp.

Aan de hand van de resultaten van de watersprongberekening in Tabel 2 in paragraaf 2.2 zijn de afmetingen van de woelkom (zowel met als zonder dissipatieblokken) en het aantal en de afmetingen van de dissipatieblokken bepaald. Hierbij wordt opgemerkt dat in het schaalmodel afwaarts van de woelkom het bodempeil +5.50 mTAW wordt toegepast. Om die reden zijn deze berekeningen enkel uitgevoerd voor dit bodempeil afwaarts. Tabel 4 geeft het resultaat van deze berekening.

Tabel 4 – Resultaat berekening lengte en bodempeil woelkom, hoogte einddrempel en afmetingen en aantal dissipatieblokken voor de drie beschouwd condities.

Parameter	Symbool	Eenheid	Conditie 1		Conditie 2		Conditie 3	
			Eind-drempel	Dissipatie-blokken	Eind-drempel	Dissipatie-blokken	Eind-drempel	Dissipatie-blokken
Waterpeil afwaarts	H_{afw}	mTAW	+7.61	+7.61	+7.61	+7.61	+9.50	+9.50
Bodempeil afwaarts	Z_{afw}	mTAW	+5.50	+5.50	+5.50	+5.50	+5.50	+5.50
Breedte woelkom	B_{WK}	m	15.5	15.5	15.5	15.5	15.5	15.5
Waterhoogte voor sprong	d_1	m	0.43	0.43	0.99	0.99	0.93	0.93
Waterhoogte na sprong	d_2	m	2.24	2.24	3.25	3.25	3.38	3.38
Froudegetal voor sprong	Fr_1	-	4.01	4.01	2.68	2.68	2.93	2.93
Lengte L_{kx}	L_{kx}	m	4.99	4.99	5.47	5.47	5.29	5.29
Lengte vallende straal	L_d	m	4.0	4.0	4.4	4.4	4.9	4.9
Coefficient a	a	-	3.6	2.0	3.6	2.0	3.6	2.0
Lengte woelkom	L_W	m	8.1	4.9	11.7	7.2	12.2	7.4
Lengte L_{tot}	L_{tot}	m	17.1	14.0	21.6	17.1	22.4	17.6
Bodempeil woelkom	Z_w	mTAW	+5.36	+5.36	+4.36	+4.36	+6.11	+6.11
Hoogte einddrempel	H_d	m	0.54	0.54	1.17	1.17	1.11	1.11
Hoogte dissipatieblokken	H_{DB}	m	n.v.t.	0.54	n.v.t.	1.00	n.v.t.	0.98
Aantal dissipatieblokken	N_{DB}	-	n.v.t.	20	n.v.t.	11	n.v.t.	11
Breedte dissipatieblokken	B_{DB}	m	n.v.t.	0.39	n.v.t.	0.70	n.v.t.	0.70
Lengte bovenvlak dissipatieblokken	l_{DB}	m	n.v.t.	0.11	n.v.t.	0.20	n.v.t.	0.20
Tussenafstand dissipatieblokken	W_{DB}	m	n.v.t.	0.39	n.v.t.	0.70	n.v.t.	0.70

n.v.t. = niet van toepassing

Uit Tabel 4 volgt het volgende:

1. Bij conditie 3 wordt een (theoretisch) bodempeil van de woelkom berekend gelijk aan +6.11 mTAW. Dit is hoger dan het bodempeil afwaarts van de nieuwe stuwen, wat betekent dat geen woelkom nodig is. Bij conditie 1 wordt een bodempeil van de woelkom gelijk aan +5.36 mTAW berekend. Bij een bodempeil afwaarts van de nieuwe stuwen gelijk aan +5.21 mTAW betekent dit dat geen woelkom nodig is, bij een bodempeil afwaarts gelijk aan +5.50 mTAW is wel een woelkom nodig.
2. Bij aanwezigheid van dissipatieblokken in de woelkom wordt een lengte van de woelkom bekomen die 3.2 à 4.8 m korter is dan de lengte van de woelkom met enkel een einddrempel.
3. Rekening houdend met het feit dat voor conditie 3 geen woelkom nodig is, wordt de grootste lengte van de woelkom en de grootste hoogte van de einddrempel bekomen voor conditie 2. De lengte van de woelkom is bij deze conditie 3.1 à 4.5 m groter dan bij conditie 1, de hoogte van de einddrempel is 0.63 m hoger dan bij conditie 1.

Voor het ontwerp van de woelkom in het schaalmodel is op basis van Tabel 4 een lengte L_{tot} gelijk aan 23.0 m beschouwd en een einddrempel met een hoogte van 1.10 m. De waarde voor L_{tot} is iets groter dan de maximale waarde, die voor conditie 3 in Tabel 4 berekend werd. Voor conditie 3 was echter geen woelkom nodig om ervoor te zorgen dat de watersprong zich juist afwaarts van de vallende straal voordoet. Theoretisch was bijgevolg een lengte van de woelkom gelijk aan 21.9 m (berekend voor conditie 2 in Tabel 4) voldoende. Dit verschil in lengte is echter zeer beperkt en zal een kleine invloed hebben op de resultaten. Rekening houdend met de afmetingen uit Figuur 6, betekent een lengte L_{tot} gelijk aan 23.0 m dat de lengte van de woelkom L_w zelf gelijk is aan 14.9 m. Aan de hand van de berekende bodempeilen voor de woelkom worden voor het bodempeil van de woelkom Z_w twee peilen beschouwd, namelijk een peil +5.30 mTAW en een peil +4.50 mTAW. Het bodempeil afwaarts van de woelkom bedraagt +5.50 mTAW. Initieel is een woelkom met enkel einddrempel en afwezigheid van dissipatieblokken beschouwd. Bij een bodempeil van de woelkom gelijk aan +5.30 mTAW bevindt het bovenvlak van de einddrempel zich op +6.40 mTAW. Dit is slechts enkele centimeter hoger dan het drempelpeil van de nieuwe stuwen. Bijgevolg kan dit bodempeil van de woelkom beschouwd worden als het hoogst mogelijke bodempeil van de woelkom. Echter hierdoor verlaagt de waterdiepte in het afwaarts pand ter plaatse van deze drempel.

Wat de dissipatieblokken betreft worden voor de schaalmodelproeven dissipatieblokken met een hoogte $H_{DB} = 1.00$ m beschouwd, een breedte en tussenafstand $B_{DB} = W_{DB} = 0.70$ m en een lengte van het bovenvlak $l_{DB} = 0.20$ m.

2.5 Uitgevoerde schaalmodelproeven

Op basis van de resultaten uit paragraaf 2.2 wordt verwacht dat zeker voor conditie 2 een woelkom of bodemverlaging nodig is om ervoor te zorgen dat de watersprong zich juist afwaarts van de vallende straal voordoet. Bij conditie 3 doet de watersprong zich altijd voor juist afwaarts van de vallende straal en bij conditie 1 is dit afhankelijk van het bodempeil afwaarts. Bijgevolg is conditie 2 de meest bepalende conditie wat het ontstaan van een watersprong betreft. Om die reden is bij het uitvoeren van de proeven gestart met deze conditie. Tabel 5 geeft een overzicht van alle uitgevoerde proeven voor de drie condities en voor alle beschouwde configuraties afwaarts van de nieuwe stuwen (bodemverlaging of woelkom). Bij de tabel wordt opgemerkt dat voor elke conditie en voor elke configuratie van bodemverlaging afwaarts of aanwezigheid van woelkom minimaal twee proeven zijn uitgevoerd, namelijk één proef met het waterpeil afwaarts gelijk aan het streefpeil +7.61 mTAW en minimaal één proef met een waterpeil waarbij de watersprong zich juist afwaarts van de vallende straal voordoet. Dit laatste waterpeil is in het schaalmodel iteratief bepaald door het stelselmatig verhogen van het afwaarts waterpeil.

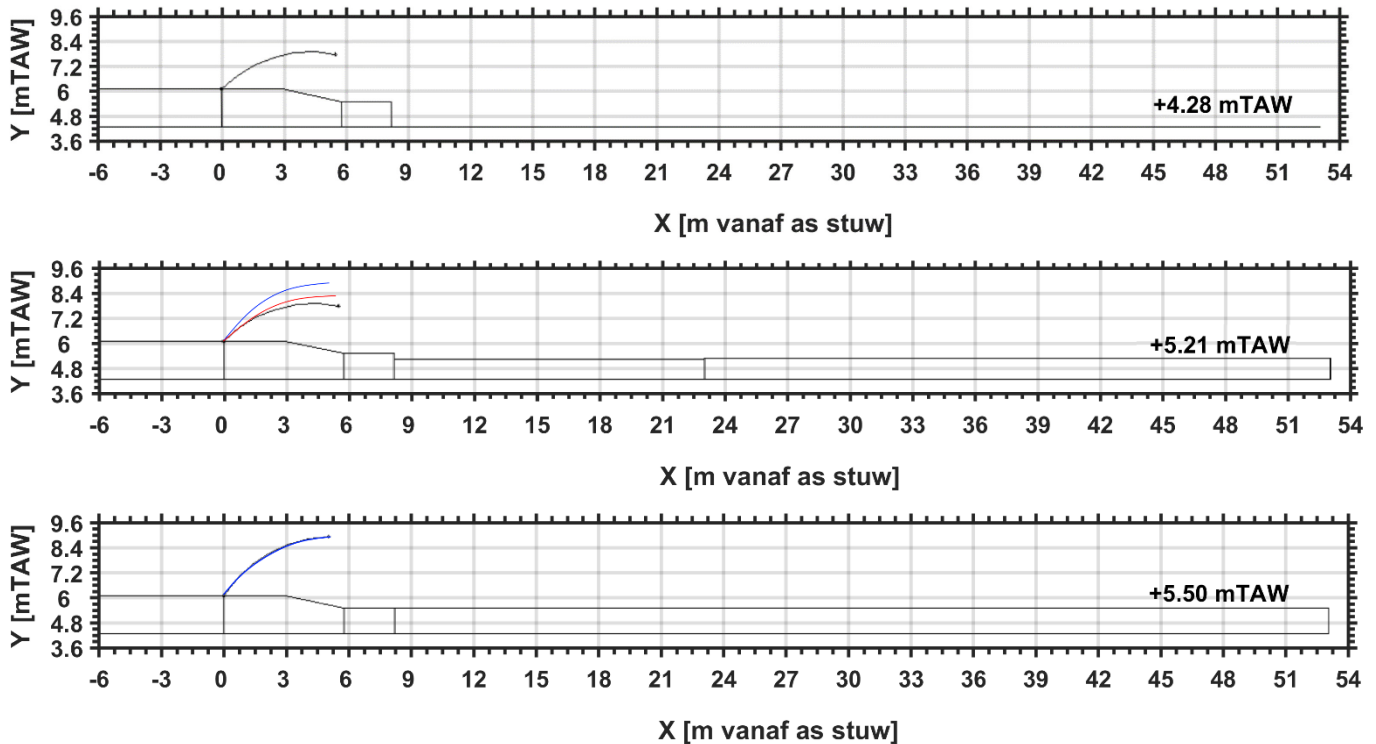
Tabel 5 – Overzicht uitgevoerde proeven

Proef	Conditie	Kruinpeil stuw	Bodempeil woelkom	Helling Einddrempel	Dissipatie- blokken	Bodempeil Afwaarts	Waterpeil Opwaarts	Waterpeil Afwaarts	Debiet
		mTAW	mTAW	[X:Y]	[J/N]	mTAW	mTAW	mTAW	m³/s/m
P01	2	+7.70	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	+4.28	+10.36	+7.47	8.56
P02						+4.28	+10.36	+7.83	8.58
P03						+4.28	+10.36	+7.84	8.57
P04						+4.28	+10.36	+7.60	8.58
P05						+5.21	+10.36	+8.76	8.59
P06				+10.36	+7.62	8.60			
P07				+10.35	+7.89	8.59			
P08				+10.35	+7.61	8.60			
P09				+10.37	+7.97	8.60			
P10				+10.37	+7.62	8.58			
P11	1	+8.86	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	+5.21	+10.37	+7.61	3.58
P12			+4.50	1:2	N	+5.50	+10.37	+7.60	3.53
P13							+10.35	+7.54	3.49
P14			+5.30				+10.38	+7.60	3.59
P15							+10.38	+7.30	3.59
P16	3	+8.23	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	+5.21	+10.87	+9.51	8.92
P17			+4.50	1:2	N	+5.50	+10.88	+9.51	8.85
P18			+5.30				+10.88	+9.50	8.86
P19	2	+7.70	+4.50	2:1	N	+5.50	+10.37	+7.96	8.80
P20							+10.37	+7.61	8.80
P21			+5.30				+10.37	+8.02	8.74
P22							+10.37	+7.61	8.73
P23			+4.50		J	+5.50	+10.37	+7.92	8.79
P24							+10.37	+7.61	8.78
P25			+5.30				+10.37	+7.98	8.69
P26							+10.37	+7.60	8.69
P27					+4.50	N	+5.50	+10.37	+7.60
P28	1	+8.86	+4.50		N	+5.50	+10.37	+7.31	3.48
P29			n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	+5.50	+10.36	+7.61	3.46

n.v.t. = niet van toepassing (geen woelkom aanwezig)

Voor de verschillende condities zijn een aantal configuraties met een verlaging van het bodempeil afwaarts van de nieuwe stuwen beproefd. Deze configuraties zijn voorgesteld in Figuur 9. Voor conditie 2 is zowel een bodemverlaging naar +4.28 mTAW als een bodemverlaging naar +5.21 mTAW beproefd (proeven P01 tot en met P06). Voor conditie 1 en conditie 3 is enkel de bodemverlaging naar +5.21 mTAW beproefd (proeven P11 en P16). Aan het einde van de proevenreeks is enkel voor conditie 1 nog een proef uitgevoerd met het huidig bodempeil afwaarts van de nieuwe stuwen (+5.50 mTAW).

Figuur 9 – Configuraties met bodemverlaging afwaarts nieuwe stuwen



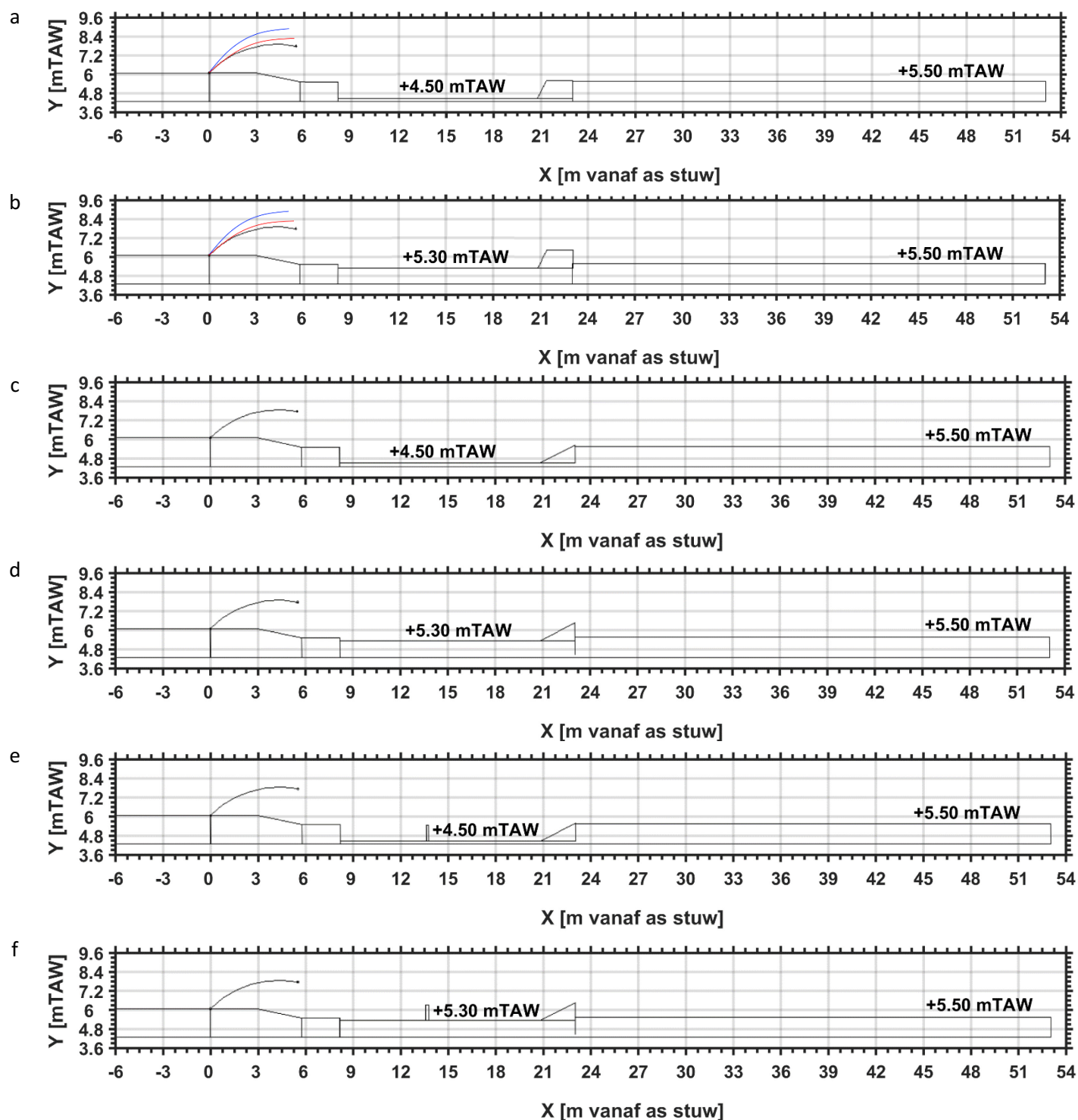
Zwart: Conditie 2; blauw: Conditie 1; rood: Conditie 3

Daarnaast zijn ook een aantal proeven uitgevoerd met een woelkom afwaarts van de nieuwe stuwen. De verschillende configuraties met woelkom zijn voorgesteld in Figuur 10.

Vooreerst zijn voor conditie 1, conditie 2 en conditie 3 proeven uitgevoerd met een woelkom met bodempeil op +4.50 mTAW en met een woelkom met bodempeil op +5.30 mTAW (configuraties a en b uit Figuur 10). Dit betreffen proeven P7 tot en met P10, P12 tot en met P15, P17 en P18. Bij deze configuraties is het bodempeil afwaarts gelijk aan +5.50 mTAW. Deze configuraties zijn eerst in het schaalmodel ingebouwd met een foutieve helling van de einddrempel van de woelkom gelijk aan 1:2. Peterka (1984) vermeldt echter een helling van de einddrempel van de woelkom gelijk aan 2:1. Om die reden zijn daarna enkel voor de meest maatgevende conditie (conditie 2), zowel voor de configuratie met een woelkom met bodempeil op +4.50 mTAW als de configuratie met een woelkom met bodempeil op +5.30 mTAW proeven uitgevoerd met een helling van de einddrempel van de woelkom gelijk aan 1:2. Dit betreft configuratie c en d uit Figuur 10 en proeven P19 tot en met P22, P27 en P28 uit Tabel 5.

Om de invloed van dissipatieblokken in de woelkom na te gaan, zijn daarna de proeven P23 tot en met P26 uitgevoerd (configuratie e en f in Figuur 10). Deze proeven zijn enkel uitgevoerd voor de meest maatgevende conditie (conditie 2) en zowel voor de configuratie met een woelkom met bodempeil op +4.50 mTAW als de configuratie met een woelkom met bodempeil op +5.30 mTAW. De helling van de einddrempel was bij deze proeven ook gelijk aan 2:1.

Figuur 10 – Configuraties met woelkom afwaarts nieuwe stuwen



Zwart: Conditie 2; blauw: Conditie 1; rood: Conditie 3

a,b: einddrempel 1:2, geen dissipatieblokken; c,d: einddrempel 2:1, geen dissipatieblokken;

e,f: einddrempel 2:1, dissipatieblokken

2.6 Metingen en verwerking meetresultaten

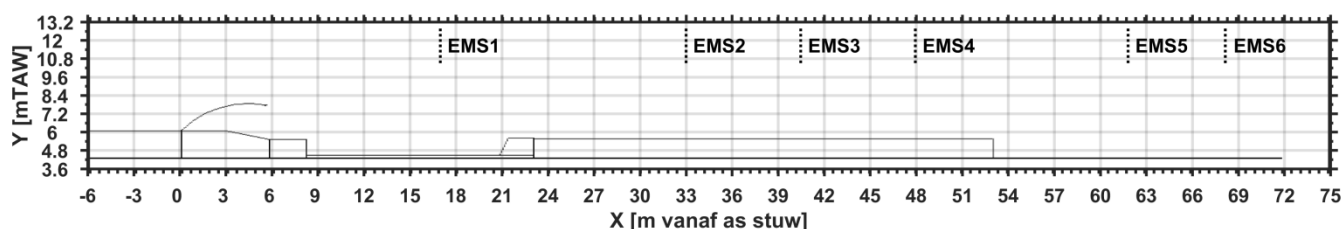
In het schaalmodel wordt het opwaarts toegevoegd debiet opgemeten door middel van een elektromagnetische debietmeter op de toevoerleiding. Daarnaast worden in het opwaarts en afwaarts pand de waterpeilen opgemeten.

Tijdens de proeven wordt de stroomsnelheid aan de bodem afwaarts van de nieuwe stuwen opgemeten op zes locaties met behulp van Elektromagnetische snelheidsmeters (EMS; van Deltares (WL|Delft Hydraulics, 2001)). De naamgeving en de locatie van deze snelheidsmetingen is gegeven in Tabel 6 en grafisch voorgesteld in Figuur 11. EMS1 is gepositioneerd op ca. 17 m afwaarts van de as van de nieuwe stuwen, ongeveer in het midden van de woelkom (bij proeven met een configuratie met woelkom). EMS2, EMS3 en EMS4 zijn gepositioneerd afwaarts van de woelkom op het gedeelte waar het bodempeil +5.50 mTAW aanwezig is bij de proeven met woelkom. De snelheidsmetingen in deze locaties geven een idee van de stroomsnelheid aan de bodem in de afwaartse stuwgeul. EMS5 en EMS6 bevinden zich afwaarts van de inbouw van het schaalmodel in de kleine stroomgoot. Ter plaatse van deze locaties doet zich in de stroomgoot een uniforme stroming voor. Voor al deze locaties geldt dat de stroomsnelheid wordt opgemeten op 24 cm boven de bodem in prototype-afmetingen (= 2 cm boven de bodem in het schaalmodel) gedurende een tijdspanne van 623.5 s in prototype (= 3 minuten in het schaalmodel). De stroomsnelheden worden in het schaalmodel gemeten aan 100 Hz, maar worden bewaard met een tijdstap van 0.1 s (= 10 Hz).

Tabel 6 – Locatie snelheidsmetingen

Meet-locatie	Afstand tot as nieuwe stuwen
EMS1	16.92 m
EMS2	33.00 m
EMS3	40.50 m
EMS4	48.00 m
EMS5	61.92 m
EMS6	68.28 m

Figuur 11 – Locatie snelheidsmetingen tijdens schaalmodelproeven.



Aan de zijkant van het schaalmodel bevinden zich vier netwerkcamera's. Deze camera's registreren een zijaanzicht van het stromingspatroon afwaarts van de nieuwe stuwen gedurende 15 s (in schaalmodel) aan 40 frames per s (in schaalmodel). De camerabeelden worden ten opzichte van elkaar gepositioneerd door middel van een aantal referentiepunten op de wand van het schaalmodel, waarvan de positie ten opzichte van de as van de nieuwe stuwen voorafgaand aan de verwerking van de meetresultaten opgemeten is.

Voor de verwerking van de camerabeelden wordt gebruik gemaakt van de image-processing toolbox van MATLAB. Hierbij wordt het volgende uitgevoerd voor alle foto's opgenomen tussen $t = 6.75$ s en $t = 7.75$ s (in schaalmodelafmetingen, een totaal van 40 foto's):

1. Aan de hand van de referentiepunten worden de beelden van de 4 camera's aan elkaar gekleefd tot één foto van het in het schaalmodel optredende stromingspatroon (afbeelding a in Figuur 12). Deze foto wordt gegeoreferenciert aan het assenstelsel van het schaalmodel (met nulpunt ter plaatse van de as van de nieuwe stuwen).
2. De resulterende afbeelding wordt geconvergeerd van kleurschema RGB naar kleurschema L^*a^*b .
3. In het kleurschema L^*a^*b worden enkel de kleuren van de afbeelding geselecteerd waarvan de parameters L , a en b niet behoren tot volgende intervallen: $0.000 \leq L \leq 39.174$, $-24.641 < a < 24.863$ en $-28.123 \leq b \leq 28.213$. Op deze wijze worden alle donkere gedeelten van de afbeelding geselecteerd.
4. Deze donkere gedeelten worden daarna in wit voorgesteld op een zwarte achtergrond, waarna in de matrix van de foto de randen van de witte gedeelten van de figuur met behulp van een '1' worden aangeduid en alle overige punten met een '0' met behulp van de routine edge.m.
5. Uit deze matrix worden alle elementen verwijderd die bestaan uit minder dan 120 pixels en worden daarna een aantal arrays gedefinieerd met de coördinaten van de randpunten van de open ruimtes in de matrix gebruik makend van de routine bwboundaries.m. De op deze wijze gedefinieerde randen zijn voor de 40 foto's grafisch en in verschillende kleuren voorgesteld in afbeelding b uit Figuur 12.
6. In afbeelding b van Figuur 12 is merkbaar dat op deze wijze naast de waterlijn van de figuur ook de donkere zijanten van het schaalmodel en deze van de inbouw in het schaalmodel geselecteerd zijn als rand alsook een aantal luchtballen die wat donkerder gekleurd zijn. Deze ongewenste geselecteerde delen zijn daarna manueel verwijderd. Op deze wijze wordt afbeelding c van Figuur 12 bekomen.

Op deze wijze wordt voor elke foto opgenomen tussen $t = 6.75$ s en $t = 7.75$ s (in schaalmodelafmetingen, een totaal van 40 foto's) de ligging van de waterlijn bepaald. Van deze 40 waterlijnen wordt daarna voor elke locatie afwaarts van de nieuwe stuwen de gemiddelde ligging van de waterlijn bepaald, alsook de hoogste als de laagste ligging van de waterlijn. Deze gemiddelde, hoogste en laagste ligging van de waterlijn is voor proef P07 grafisch voorgesteld in afbeelding d van Figuur 12.

Bij deze werkwijze wordt het volgende opgemerkt:

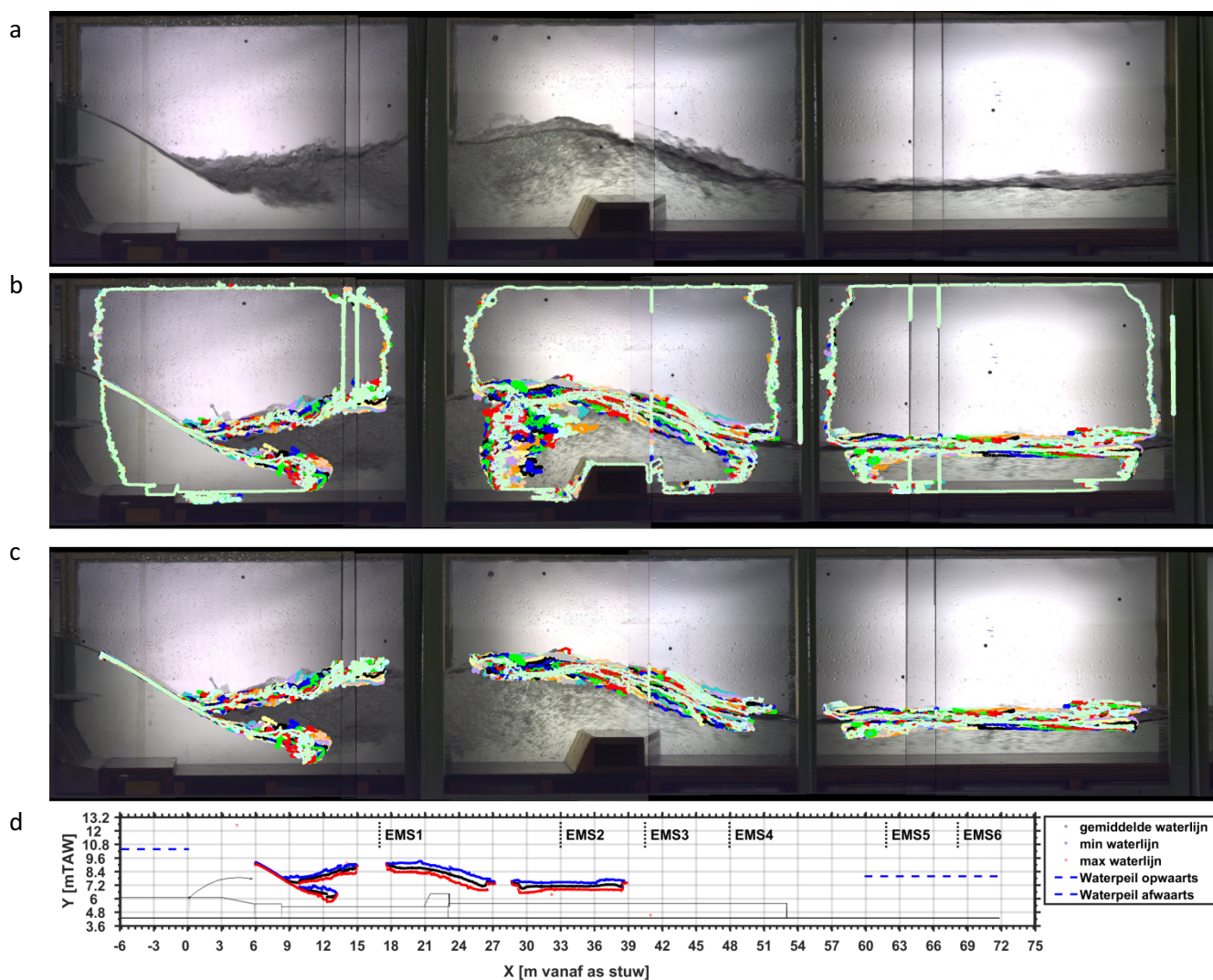
- Ter plaatse van de verticale stijlen van de ramen van de kleine stroomgoot is de waterlijn onderbroken. De schaduwzone van deze stijlen op de foto's worden bij deze werkwijze ook als waterlijn beschouwd en zijn om die reden in de hierboven beschreven procedure manueel verwijderd.
- Aan de achterzijde van het schaalmodel zijn een aantal lichtbakken met TL-lampen en een op de ramen gekleefde diffusiefolie aanwezig. Deze vorm van belichting zorgt ervoor dat aan de zijanten, de bovenkant en de onderkant van een individuele raam van de kleine stroomgoot een schaduwzone aanwezig is. Dit maakt dat rond de stijlen van deze ramen een grote zone aanwezig is, dewelke ook als waterlijn beschouwd wordt. Een meer egale vorm van verlichting, met minder schaduwvorming, bijvoorbeeld met behulp van led-panelen zou ervoor kunnen zorgen dat de ontbrekende stukken in de waterlijn minder groot zouden zijn.

De op deze wijze gedefinieerde waterlijn vertoont enige variatie tussen de hoogste en de laagste ligging van de waterlijn. Deze variatie kan als volgt verklaard worden:

- Het wateroppervlak afwaarts van de vallende straal vertoont zelf een variatie in de tijd door de grote turbulentie en het ontstaan van golven, die zich naar afwaarts voortplanten.
- De onzekerheid op de bepaling van de waterlijn. In de hierboven beschreven methodologie wordt de waterlijn geselecteerd aan de hand van kleurverschillen (de waterlijn is een iets donkerdere lijn ten opzichte van het water eronder en de lucht erboven).

- Indien de waterlijn zich dicht bij de bodem van het schaalmodel bevindt, wordt door de camera's schuin naar beneden op het wateroppervlak gekeken. Dit heeft tot gevolg dat de geselecteerde waterlijn, zowel de snijlijn tussen het wateroppervlak en de ramen aan de voorzijde van het schaalmodel omvat, als de snijlijn tussen het wateroppervlak en de ramen aan de achterzijde van het schaalmodel. Eigenlijk worden voor deze situaties de uiterste grenzen van het wateroppervlak bepaald. De gemiddelde ligging van de waterlijn komt wel ongeveer overeen met de ligging van de waterlijn ter plaatse van de as van het schaalmodel. Voor de locaties die zich ter hoogte van het centerpunt van de camera's bevinden, wordt één unieke en juistere ligging van de waterlijn bepaald.

Figuur 12 – Voorbeeld resultaat verwerking foto's schaalmodelproeven voor proef P07



a: Afbeelding na samenvoegen van de foto's van de 4 camera's; b: Resultaat selectie waterlijn; c: Selectie waterlijn na manueel verwijderen van punten die niet op de waterlijn liggen; d: Gemiddelde, hoogste en laagste ligging van de waterlijn.

3 Resultaten schaalmodelproeven

3.1 Algemeen

In Bijlage 1 is voor alle 29 uitgevoerde schaalmodelproeven het volgende gegeven:

- Een overzicht van alle uitgevoerde proeven in Tabel 26.
- De opname van het stromingspatroon afwaarts van de nieuwe stuwen in Figuur 26 tot en met Figuur 30.
- Een grafische voorstelling van de gemiddelde, hoogste en laagste ligging van de waterlijn in Figuur 31 tot en met Figuur 34. Deze grafische voorstelling volgt uit het uitvoeren van de verwerking beschreven in paragraaf 2.6 op de afbeeldingen van het stromingspatroon.
- Een overzicht van de stroomsnelheden opgemeten in de zes locaties afwaarts van de nieuwe stuwen in Tabel 27. De waarden van deze opgemeten stroomsnelheden is de gemiddelde waarde over de meetperiode van 3 minuten (in het schaalmodel).
- Een grafische voorstelling van de variatie in de tijd van de stroomsnelheid gemeten in de zes locaties afwaarts van de nieuwe stuwen in Figuur 35 tot en met Figuur 41.

Naast de stroomsnelheden opgemeten in de zes locaties afwaarts van de nieuwe stuwen vermeldt Tabel 27 in Bijlage 1 voor elke proef ook de opgemeten opwaartse en afwaartse waterstand, het waterpeil ter plaatse van de locaties EMS2 en EMS3 en het Froudegetal ter plaatse van de locatie EMS2, EMS3 en een het Froudegetal voor de gemiddelde stroming in de afwaartse vaargeul. Het waterpeil ter plaatse van de locaties EMS2 en EMS3 is in de figuren met de grafische voorstelling van de ligging van de waterlijn (Figuur 31 tot en met Figuur 34 in Bijlage 1) afgelezen als de gemiddelde waarde van de waterlijn in deze locaties. Het Froudegetal is als volgt berekend aan de hand van de stroomsnelheid en de waterdiepte:

$$Fr_x = \frac{U_x}{\sqrt{g h_x}}$$

Met:

– Fr_x	Froudegetal ter plaatse van locatie X	[-]
– U_x	Stroomsnelheid ter plaatse van locatie X	[m/s]
– h_x	Waterdiepte ter plaatse van locatie X	[m]
– g	Valversnelling (= 9.81 m/s ²)	[m/s]

Voor de berekening van het Froudegetal voor de gemiddelde stroming in de afwaartse vaargeul wordt de gemiddelde stroomsnelheid in de afwaartse vaargeul beschouwd, i.e. debiet gedeeld door waterdiepte in de afwaartse vaargeul. Uit een vergelijking van deze gemiddelde stroomsnelheid met de stroomsnelheid opgemeten in locatie EMS2, EMS3 en EMS4 volgt of in deze locaties reeds een uniforme stroming bereikt is. De waterdiepte in de afwaartse vaargeul wordt berekend als het verschil tussen het afwaarts waterpeil en het bodempeil ter plaatse van locatie EMS2 (het bodempeil van de inbouw in het schaalmodel).

Indien de waarde van het Froudegetal groter is dan 1.0, is de stroming superkritisch en kunnen zich grote stroomsnelheden voordoen. Bij een Froudegetal kleiner dan 1.0 is de stroming subkritisch. Het doel van de schaalmodelproeven is de watersprong, wat een overgang is van superkritische stroming naar subkritische stroming, juist afwaarts van de vallende straal te doen plaatsvinden.

Op basis van de camerabeelden is ook de lengte van de watersprong bepaald voor de proeven, waarbij zich een watersprong voordoet. Voor elke proef, waarbij een watersprong gevormd wordt, zijn de camerabeelden bekeken en op basis van deze camerabeelden is de positie van volgende punten visueel bepaald (zie ook Figuur 13):

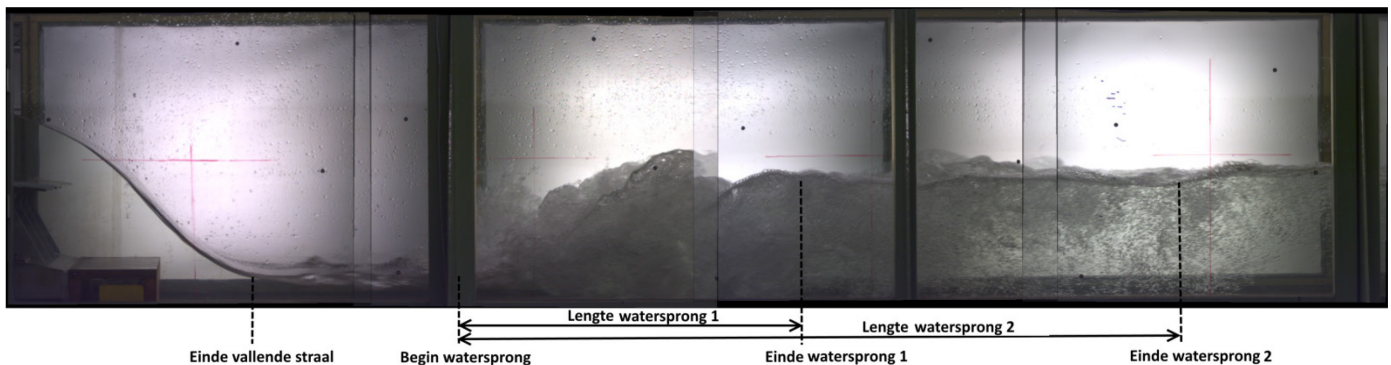
- Einde vallende straal: Het einde van de vallende straal is bepaald als de locatie waar de vallende straal overgaat in een horizontale stroming evenwijdig met de bodem van het schaalmodel.
- Begin watersprong: Indien de watersprong zich onmiddellijk voordoet na de vallende straal is deze locatie dezelfde als het einde van de vallende straal. Voor de andere proeven is dit de locatie waar de zone van schietend water eindigt en waar dus de (visueel) watersprong begint.
- Einde watersprong 1: De locatie waarbij de watersprong een waterpeil bereikt gelijk aan het afwaarts waterpeil.
- Einde watersprong 2: De locatie waar geen opstijgende turbulenties meer vastgesteld worden en de beweging van de luchtbellen gedomineerd wordt door de afwaartse component van de stroming.

Op basis van de locatie van deze punten worden volgende twee definities van de lengte van de watersprong toegepast:

- L_{WS1} : de afstand tussen het begin van de watersprong en einde watersprong 1.
- L_{WS2} : de afstand tussen het begin van de watersprong en einde watersprong 2.

Hierbij wordt opgemerkt dat deze locaties steeds visueel aan de hand van de camerabeelden bepaald zijn, waardoor deze een grote onnauwkeurigheid hebben. Voor elke proef zijn in Tabel 28 in Bijlage 1 de coördinaten van de hierboven beschreven locaties weergegeven (relatief ten opzichte van de as van de nieuwe stuwen) en de hieruit afgeleide bijbehorende lengte van de watersprong volgens de hierboven gegeven definities.

Figuur 13 – Locatie punten voor bepaling lengte watersprong.



In dit hoofdstuk worden in paragraaf 3.2 eerst de resultaten van de schaalmodelproeven voor de meest bepalende conditie (conditie 2) besproken, gevolgd door de resultaten voor conditie 1 (paragraaf 3.3) en conditie 3 (paragraaf 3.4). In deze paragrafen wordt de ligging van de waterlijn voor de verschillende uitgevoerde proeven vergeleken en worden de opgemeten stroomsnelheden in de 6 locaties en de lengte van de watersprong besproken. Paragraaf 3.5 vat de conclusies uit dit hoofdstuk samen.

3.2 Conditie 2

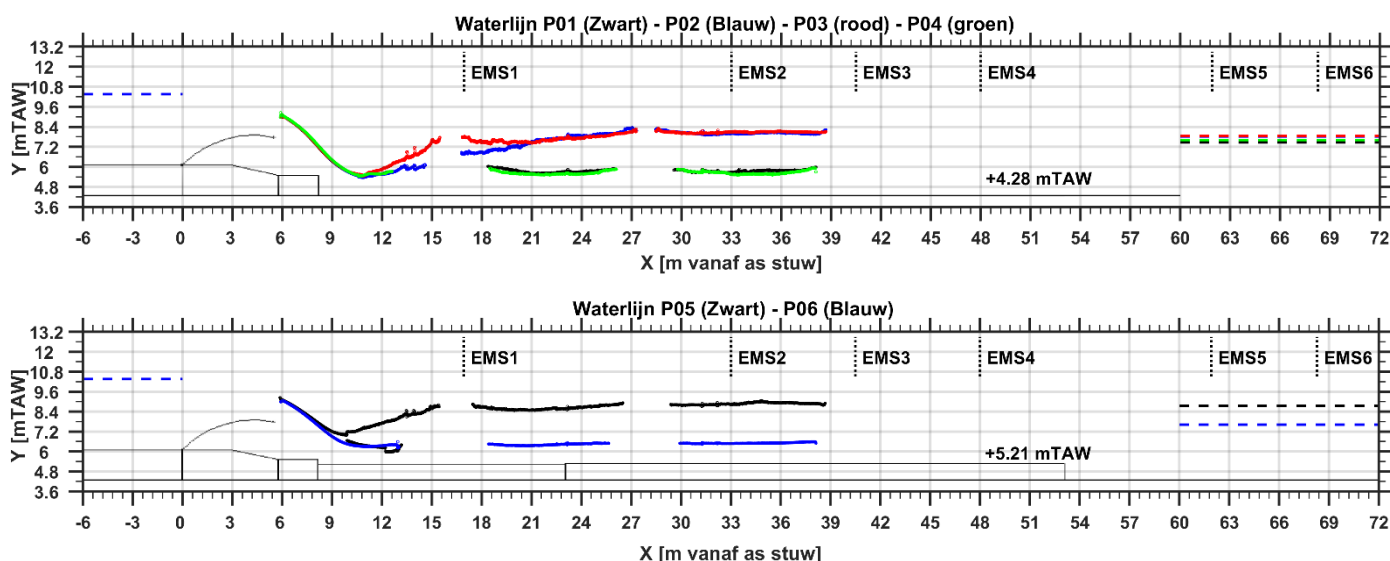
Vooreerst worden de resultaten van de schaalmodelproeven met een bodemverlaging afwaarts besproken (paragraaf 3.2.1), gevolgd door de resultaten van de proeven met een woelkom met bodempeil op +4.50 mTAW (paragraaf 3.2.2) en de resultaten van de proeven met een woelkom met bodempeil op +5.30 mTAW (paragraaf 3.2.3).

3.2.1 Bodemverlaging afwaarts

Voor conditie 2 zijn proeven uitgevoerd met twee verschillende bodempeilen afwaarts van de nieuwe stuwen, namelijk een bodemverlaging tot +4.28 mTAW en een bodemverlaging tot +5.21 mTAW. Voor de bodemverlaging afwaarts tot +4.28 mTAW is een proef uitgevoerd met het afwaarts waterpeil gelijk aan het streefpeil (Proef P04), een proef met een afwaarts waterpeil lager dan het streefpeil (Proef P01) en twee proeven met waterpeilen hoger dan het streefpeil (Proef P02 en Proef P03). Voor de bodemverlaging afwaarts tot +5.21 mTAW is een proef uitgevoerd met het afwaarts waterpeil gelijk aan het streefpeil (Proef P06) en een proef met een hoger waterpeil (Proef P05). Enkel bij Proef P02, Proef P03 en Proef P05 doet de watersprong zich voor juist afwaarts van de vallende straal.

Voor al deze proeven is in Figuur 14 de ligging van de waterlijn grafisch voorgesteld. De stroomsnelheden opgemeten in de zes locaties afwaarts van de nieuwe stuwen, de waarde van het berekende Froudegetal en de op basis van de camerabeelden bepaalde lengte van de watersprong is gegeven in Tabel 7.

Figuur 14 – Ligging waterlijn voor proeven met bodemverlaging afwaarts voor conditie 2.



Tabel 7 – Stroomsnelheden afwaarts nieuwe stuwen,
Froudegetal van de stroming en lengte watersprong voor proeven met bodemverlaging voor conditie 2.

Bodempeil afwaarts	Proef	Waterpeil opwaarts	Waterpeil afwaarts	EMS1	EMS2	EMS3	EMS4	EMS5	EMS6	U _{gem}	Fr _{EMS2}	Fr _{EMS3}	Fr _{gem}	L _{WS1}	L _{WS2}
		mTAW	mTAW	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	-	-	-	m	m
+5.21 mTAW	P05	10.36	8.76	5.66	2.86	2.91	2.34	1.68	1.66	2.47	0.48	0.49	0.42	11	16
	P06	10.36	7.62	8.43	7.91	7.87	7.45	5.54	3.87	3.68	2.29	2.28	0.77	*	*
+4.28 mTAW	P01	10.36	7.47	8.87	8.42	-	-	-	-	2.69	2.27	2.27	0.48	*	*
	P02	10.36	7.83	7.76	2.91	2.26	2.13	2.08	2.13	2.42	0.48	0.37	0.41	4	16
	P03	10.36	7.84	6.98	2.78	2.28	2.22	2.19	2.21	2.41	0.45	0.37	0.41	11	22
	P04	10.36	7.60	8.90	8.44	-	-	1.82	1.95	2.59	2.39	-	0.45	*	*

- = geen metingen uitgevoerd op deze locaties of waarde niet berekend; * = geen watersprong aanwezig
 EMSX=stroomsnelheid ter plaatse van locatie X; U_{gem}=Gemiddelde stroomsnelheid in de afwaartse vaargeul; Fr_x=Froudegetal ter plaatse van locatie X; Fr_{gem} = Froudegetal van de gemiddelde stroming in de afwaartse vaargeul; L_{WS1} = lengte watersprong 1; L_{WS2} = lengte watersprong 2; Groene arcering: Froudegetal kleiner of gelijk aan 1 (subkritische stroming); rode arcering: Froudegetal hoger dan 1 (superkritische stroming).

Uit Figuur 14 en Tabel 7 volgt het volgende:

- Bij een afwaarts waterpeil gelijk aan het streefpeil (+7.61 mTAW) doet zich afwaarts van de stuwen zowel bij een bodemverlaging afwaarts tot +5.21 mTAW (Proef P06) als bij de bodemverlaging tot +4.28 mTAW (Proef P04) een superkritische stroming met hoge stroomsnelheden van 7 à 8 m/s voor. Deze superkritische stroming strekt zich uit tot afwaarts van locatie EMS4. De watersprong, dewelke de overgang vormt naar subkritische stroming doet zich aan het afwaartse uiteinde van de stroomgoot voor op een relatief grote afstand afwaarts van de vallende straal.
- Bij een bodemverlaging tot +5.21 mTAW doet de watersprong zich juist afwaarts van de vallende straal voor bij een afwaarts waterpeil gelijk aan +8.76 mTAW (Proef P05). Bij deze proef wordt ter plaatse van locatie EMS2 en locatie EMS3, afwaarts van de watersprong, subkritische stroming waargenomen. Hieruit volgt dat een waterdiepte van 3.55 m nodig is om een watersprong juist afwaarts van de vallende straal te doen plaatsvinden. Bij een afwaarts streefpeil gelijk aan +7.61 mTAW betekent dit dat het maximaal bodempeil afwaarts gelijk moet zijn aan +7.61 mTAW - 3.55 = 4.06 mTAW. Ter vergelijking: in paragraaf 2.2 werd theoretisch berekend dat een bodempeil afwaarts gelijk aan +4.28 mTAW nodig is om schietend water afwaarts van de stuwen te voorkomen. Dit (theoretisch berekende) bodempeil is slechts 0.22 m hoger dan het bodempeil dat volgt uit de schaalmodelproeven.
- Analooog doet bij een bodemverlaging tot +4.28 mTAW de watersprong zich juist afwaarts van de vallende straal voor bij een waterpeil gelijk aan +7.84 mTAW (Proef P03). Hieruit volgt een benodigde afwaartse waterdiepte gelijk aan 3.56 m of een maximaal bodempeil afwaarts gelijk aan 4.05 mTAW. Deze waarde is gelijk aan het minimale bodempeil dat volgde uit de proef met een bodemverlaging afwaarts tot +5.21 mTAW.
- Bij een bodemverlaging tot +4.28 mTAW en een afwaartse waterstand gelijk aan +7.84 mTAW (Proef P03) doet de watersprong zich voor juist na de vallende straal. Bij een 0.01 m lagere waterstand van +7.83 mTAW (Proef P02) wordt een zone met schietend water met een lengte van 4.0 m waargenomen. Hieruit volgt dat kleine schommelingen in het afwaarts waterpeil aanleiding kunnen geven tot een stromingspatroon dat wisselt tussen een watersprong juist afwaarts van de vallende straal en een watersprong met voorafgaand een zone met schietend water.
- Indien de watersprong zich bij een bodemverlaging tot +4.28 mTAW juist afwaarts van de vallende straal voordoet, is lengte watersprong 1 gelijk aan 11 m en lengte watersprong 2 gelijk aan 22 m. Wanneer de watersprong zich iets meer afwaarts voordoet (in geval van een zone van schietend water voor de watersprong; Proef P02), wordt een iets kortere lengte van de watersprong opgemeten (lengte watersprong 1 is gelijk aan 4 m en lengte watersprong 2 is gelijk aan 16 m). Bij

een bodemverlaging tot +5.21 mTAW is lengte watersprong 1 gelijk aan 11 m en de lengte watersprong 2 gelijk aan 16 m.

- In paragraaf 2.2 werd voor een bodempeil van +5.21 mTAW met de formulering volgens Rand een lengte van de watersprong gelijk aan 14.2 m berekend en met de formule van Hager een lengte van de watersprong gelijk aan 17.3 m. De opgemeten lengte watersprong 2 komt goed overeen met de waarde berekend met de formule van Hager. De opgemeten lengte watersprong 1 is kleiner dan de berekende lengte van de watersprong.

3.2.2 Woelkom met bodempeil op +4.50 mTAW

Bij alle proeven met woelkom met bodempeil op +4.50 mTAW wordt vastgesteld dat de watersprong zich voordoet in de woelkom en juist afwaarts van de vallende straal. Echter bij de proeven waarbij het afwaarts waterpeil gelijk is aan het streefpeil (Proef P08, P19 en P23) wordt een tweede watersprong waargenomen afwaarts van de inbouw van het schaalmodel in de stroomgoot (54 à 60 m afwaarts van de as van de nieuwe stuwen en buiten bereik van de camera's). Na een verhoging van het afwaarts waterpeil (tot +7.89 mTAW bij proef P07, tot +7.96 mTAW bij proef P19 en tot +7.92 mTAW bij Proef P23) is de tweede watersprong (visueel) zo goed als niet meer aanwezig.

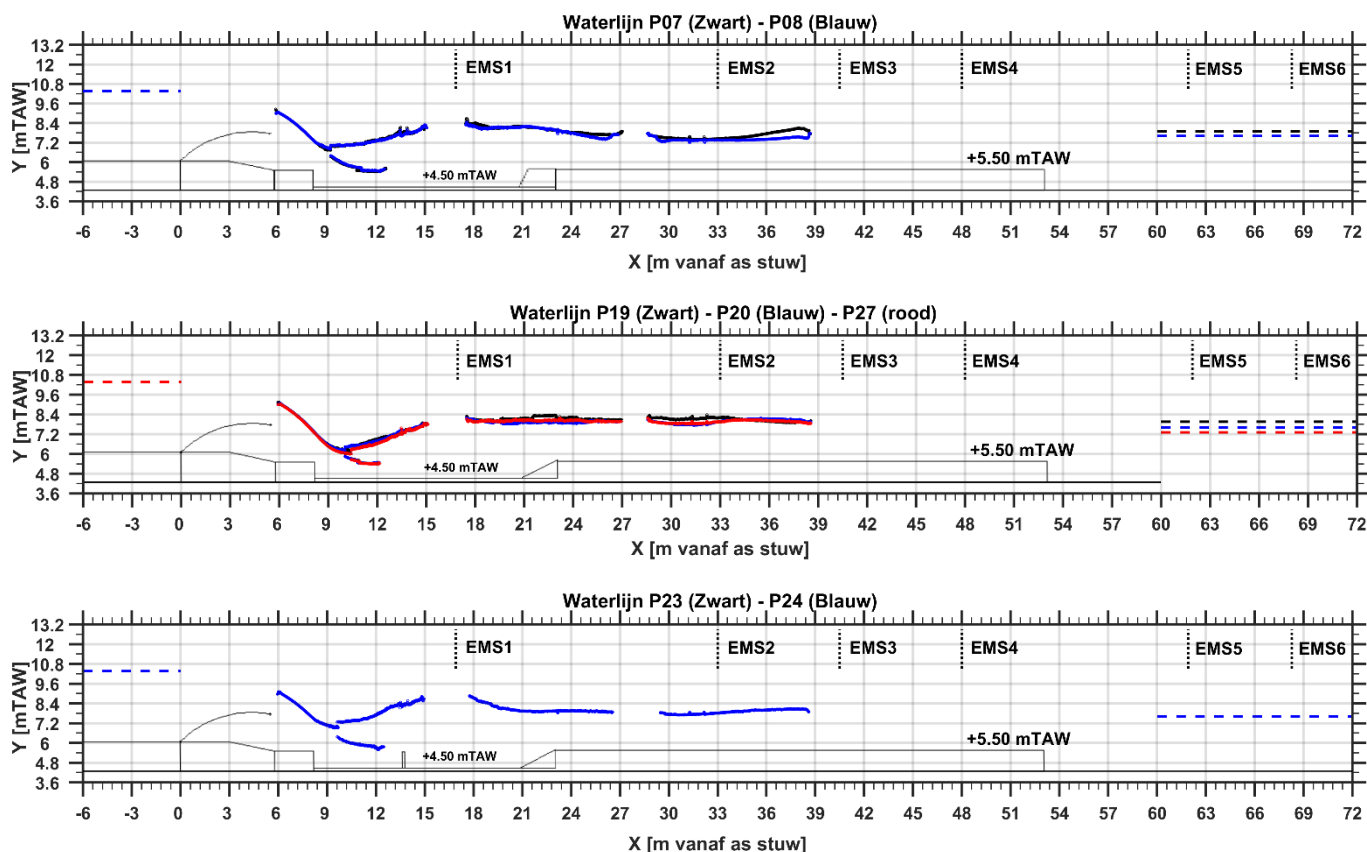
Vooreerst zijn proeven uitgevoerd met een helling van de einddrempel van de woelkom gelijk aan 1:2 (Proef P07 en P08). Na de vaststelling dat een te steile helling van de einddrempel was beschouwd, zijn beide proeven herhaald met de correcte helling van de einddrempel (2:1; proeven P19 en P20).

Het waterpeil afwaarts van de nieuwe stuwen vertoont in werkelijkheid een beperkte variatie (+/- 0.30 m) rond het streefpeil. Om de invloed van een verlaging van het streefpeil met 0.30 m na te gaan is proef P27 uitgevoerd met een afwaarts waterpeil gelijk aan +7.30 mTAW. Ook bij deze proef doet de watersprong zich voor in de woelkom juist afwaarts van de vallende straal.

Als laatste zijn twee proeven uitgevoerd met aanwezigheid van dissipatieblokken in de woelkom, namelijk proef P24 bij een afwaarts waterpeil gelijk aan het streefpeil en proef P23 bij een afwaarts waterpeil verhoogd tot +7.92 mTAW.

Voor al deze proeven is in Figuur 15 de ligging van de waterlijn grafisch voorgesteld. De stroomsnelheden opgemeten in de zes locaties afwaarts van de nieuwe stuwen, de waarde van het berekende Froudegetal en de op basis van de camerabeelden bepaalde lengte van de watersprong zijn gegeven in Tabel 8.

Figuur 15 – Ligging waterlijn voor proeven met woelkom met bodempeil op +4.50 mTAW voor conditie 2.



Tabel 8 – Stroomsnelheden afwaarts nieuwe stuwen, Froudegetal van de stroming en lengte watersprong voor proeven met woelkom met bodempeil op +4.50 mTAW voor conditie 2.

Helling eind-drempel	Dissipatie-blokken	Proef	Waterpeil opwaarts mTAW	Waterpeil afwaarts mTAW	EMS1 m/s	EMS2 m/s	EMS3 m/s	EMS4 m/s	EMS5 m/s	EMS6 m/s	U_{gem} m/s	Fr_{EMS2}	Fr_{EMS3}	Fr_{gem}	L_{WS1} m	L_{WS2} m
1:2	N	P07	10.35	7.89	-	-	3.62	4.19	-	-	3.67	-	0.73	0.77	12	15
		P08	10.35	7.61	5.87	5.16	4.79	4.28	3.44	2.64	4.18	1.20	1.08	0.93	12	16
2:1	N	P19	10.37	7.96	-	-	3.83	3.90	-	-	3.66	-	0.77	0.75	9	16
		P20	10.37	7.61	6.60	3.74	4.22	4.28	3.51	2.75	4.27	0.77	0.84	0.95	10	15
		P27	10.37	7.31	3.71	4.05	4.23	4.64	3.57	3.19	4.89	0.83	0.87	1.18	11	15
	J	P23	10.37	7.92	-	-	3.64	3.69	-	-	3.72	-	0.73	0.77	11	13
		P24	10.37	7.61	1.26	3.33	3.66	4.16	3.65	2.69	4.27	0.71	0.74	0.95	11	13

- = geen metingen uitgevoerd op deze locaties of waarde niet berekend; EMSX=stroomsnelheid ter plaatse van locatie X; U_{gem} =Gemiddelde stroomsnelheid in de afwaartse vaargeul; Fr_x =Froudegetal ter plaatse van locatie X; Fr_{gem} = Froudegetal van de gemiddelde stroming in de afwaartse vaargeul; L_{WS1} = lengte watersprong 1; L_{WS2} = lengte watersprong 2; Groene arcering: Froudegetal kleiner of gelijk aan 1 (subkritische stroming); rode arcering: Froudegetal hoger dan 1 (superkritische stroming).

Uit Figuur 15 en Tabel 8 volgt het volgende:

- Bij alle uitgevoerde proeven doet de watersprong zich voor in de woelkom juist afwaarts van de vallende straal. Bij de proeven met een minder steile einddrempel wordt een hogere waterdiepte opgemeten afwaarts van de woelkom ter plaatse van locaties EMS2 en EMS3 dan bij de proeven met de steilere einddrempel. Deze hogere waterdiepte heeft in locatie EMS2 ook een lagere opgemeten stroomsnelheid aan de bodem tot gevolg.
- Bij proeven met de steilere helling van de einddrempel (helling 1:2) doet zich ter plaatse van locatie EMS2 en locatie EMS3 nog een superkritische stroming voor bij een afwaarts waterpeil gelijk aan het streefpeil (proef P08). Bij de overige proeven met het afwaarts waterpeil gelijk aan het streefpeil is het Froudegetal ter plaatse van locaties EMS2 en EMS3 kleiner dan 1. Bij al deze proeven doet zich afwaarts van de inbouw van het schaalmodel in de stroomgoot nog wel een beperkte watersprong voor. Vermoedelijk doet zich op deze locatie een overstort voor ter plaatse van de verdieping. Deze watersprong is niet meer aanwezig bij een verhoging van het afwaarts waterpeil.
- Bij een verlaging van het afwaarts waterpeil van +7.61 mTAW naar +7.30 mTAW doet zich afwaarts van de woelkom subkritische stroming voor (Froudegetal is lager dan 1). Met uitzondering van locatie EMS1 (in de woelkom), worden bij proef P27 aan de bodem ongeveer even grote stroomsnelheden opgemeten als bij proef P20. Indien voor proef P27 het Froudegetal van de gemiddelde stroming in het afwaarts pand berekend wordt, blijkt dit wel hoger dan 1.0 te zijn. Dit wil zeggen dat bij deze waterstand in het afwaarts pand juist schietend water voorkomt.
- Door het toepassen van dissipatieblokken in de woelkom wordt afwaarts van de woelkom, ter plaatse van locaties EMS2, EMS3 en EMS4 een stroomsnelheid opgemeten die iets lager is dan bij de overeenkomstige proeven zonder dissipatieblokken. Uit Figuur 29 en Figuur 30 in Bijlage 1 volgt dat tussen de dissipatieblokken en de einddrempel van de woelkom een minder turbulent stromingspatroon aanwezig is.
- Bij de proeven zonder dissipatieblokken is lengte watersprong 1 gelijk aan 9 à 12 m en lengte watersprong 2 gelijk aan 15 à 16 m, zowel bij de proeven met een einddrempel met helling 1:2 als deze met een einddrempel met helling 2:1. Bij toepassen van dissipatieblokken is lengte watersprong 1 gelijk aan 11 m en neemt lengte watersprong 2 af naar 13 m, wat 2 à 3 m korter is dan bij afwezigheid van dissipatieblokken. In paragraaf 2.2 werd bij toepassing van dissipatieblokken een lengte van de woelkom berekend die 4.7 m korter is dan bij afwezigheid van dissipatieblokken, wat iets groter is als het verschil dat volgt uit de schaalmodelproeven. Hierbij wordt opgemerkt dat de locatie einde watersprong 1 bepaald is als het punt waar het waterpeil na de watersprong gelijk is aan het afwaarts waterpeil. De toepassing van dissipatieblokken zorgt echter voor een verhoging van de waterstand alvorens deze gelijk wordt aan het afwaarts waterpeil. Indien de locatie van deze verhoging beschouwd wordt als einde watersprong, dan wordt lengte watersprong 1 gelijk aan 8 à 9 m, wat 1 à 3 m korter is dan de lengte van de watersprong bij afwezigheid van dissipatieblokken.
- Bij een bodempeil van +5.50 mTAW in de afwaarts vaargeul worden hoge gemiddelde stroomsnelheden tussen 3.66 m/s en 4.89 m/s berekend in de afwaartse vaargeul. Bij streefpeil in het afwaarts pand wordt voor deze stroomsnelheden een Froudegetal berekend van ca. 0.95. Dit is zeer dicht bij 1.0 gelegen, wat betekent dat bijna schietend water voorkomt in de afwaartse stuwgeul. Bij een lager waterpeil van +7.30 mTAW komt in de afwaartse vaargeul schietend water voor.

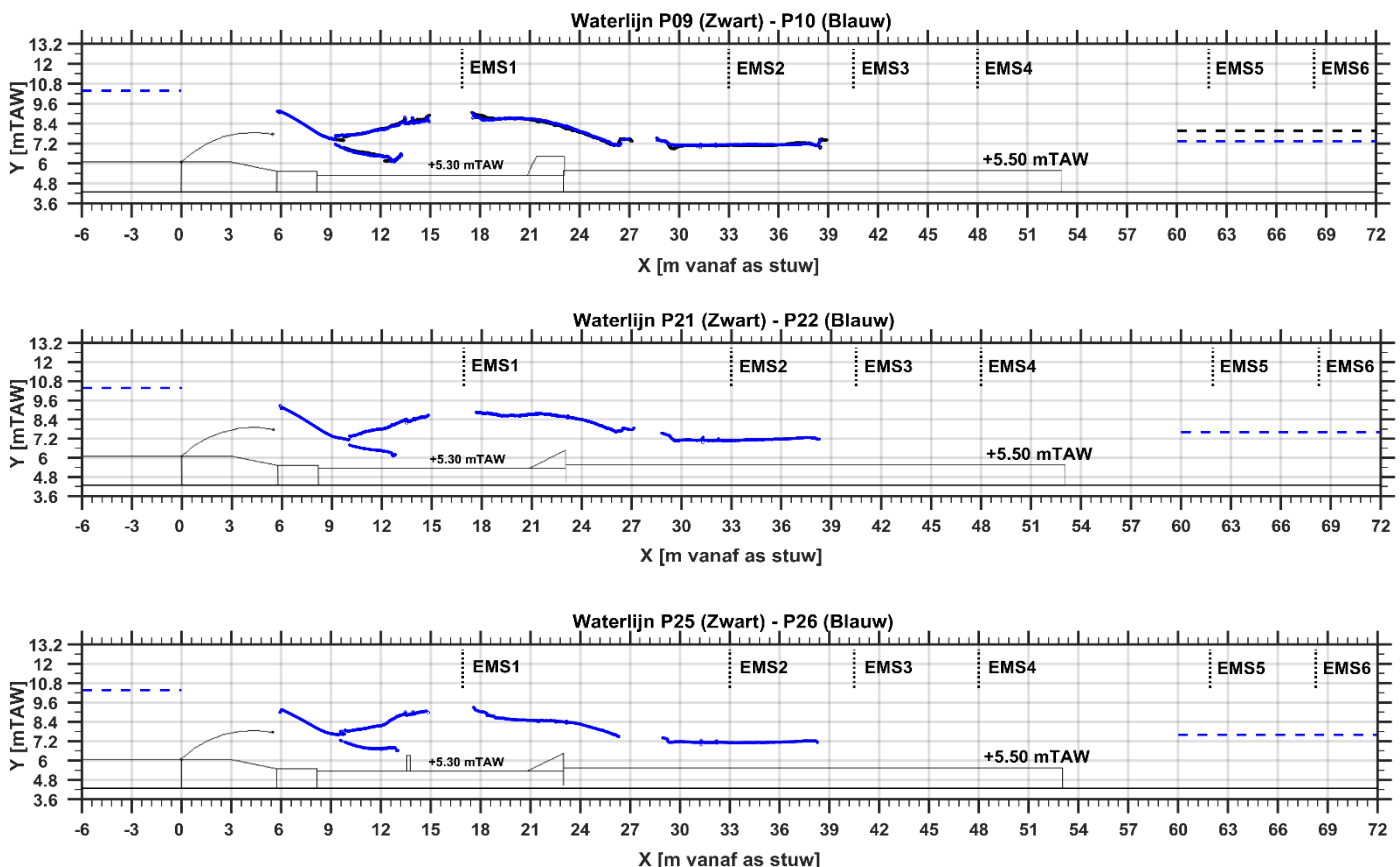
3.2.3 Woelkom met bodempeil op +5.30 mTAW

Analoog als bij de configuratie met woelkom met bodempeil op +4.50 mTAW vindt bij deze configuratie de watersprong bij alle uitgevoerde proeven plaats juist afwaarts van de vallende straal en in de woelkom. Bij de proeven die uitgevoerd zijn bij streefpeil (Proef P10, P22 en P26) wordt afwaarts van de inbouw van het schaalmodel in de stroomgoot (54 à 60 m afwaarts van de as van de stuwen) nog een tweede watersprong waargenomen. Om die reden zijn ook proeven uitgevoerd met een hoger waterpeil (+7.97 mTAW voor Proef P09, +8.02 mTAW voor Proef P21 en +7.98 mTAW voor P25). Bij deze proeven is de tweede watersprong (visueel) zo goed als verdwenen.

Vooreerst zijn proeven uitgevoerd met een helling van de einddrempel van de woelkom gelijk aan 1:2 (Proef P09 en P10). Na de vaststelling dat een te steile helling van de einddrempel was beschouwd, zijn de beide proeven herhaald met de correcte helling van de einddrempel (2:1; proeven P21 en P22). Om de invloed van de aanwezigheid van dissipatieblokken in de woelkom na te gaan zijn proeven P25 en P26 uitgevoerd.

Voor al deze proeven is in Figuur 16 de ligging van de waterlijn grafisch voorgesteld. De stroomsnelheden opgemeten in de zes locaties afwaarts van de nieuwe stuwen, de waarde van het berekende Froudegetal en de op basis van de camerabeelden bepaalde lengte van de watersprong zijn gegeven in Tabel 9.

Figuur 16 – Ligging waterlijn voor proeven met woelkom met bodempeil op +5.30 mTAW voor conditie 2



Tabel 9 – Stroomsnelheden afwaarts nieuwe stuwen,
Froudegetal van de stroming en lengte watersprong voor proeven met woelkom met bodempeil op +5.30 mTAW voor conditie 2.

Helling eind-drempel	Dissipatie-blokken	Proef	Waterpeil opwaarts mTAW	Waterpeil afwaarts mTAW	EMS1 m/s	EMS2 m/s	EMS3 m/s	EMS4 m/s	EMS5 m/s	EMS6 m/s	U _{gem} m/s	Fr _{EMS2}	Fr _{EMS3}	Fr _{gem}	L _{WS1} m	L _{WS2} m
1:2	N	P09	10.37	7.97	-	-	6.34	5.82	-	-	3.58	-	1.62	0.74	11	15
		P10	10.37	7.62	5.32	6.56	6.33	5.87	4.18	2.94	4.19	1.67	1.62	0.94	12	15
2:1	N	P21	10.37	8.02	-	-	6.11	5.43	-	-	3.57	-	1.53	0.73	11	15
		P22	10.37	7.61	5.50	6.33	6.12	5.53	4.12	2.89	4.28	1.64	1.53	0.96	11	15
	J	P25	10.37	7.98	-	-	5.85	5.26	-	-	3.57	-	1.44	0.73	9	12
		P26	10.37	7.60	1.18	5.92	5.84	5.36	3.74	2.83	4.22	1.51	1.44	0.94	9	13

- = geen metingen uitgevoerd op deze locaties of waarde niet berekend; EMSX=stroomsnelheid ter plaatse van locatie X; U_{gem}=Gemiddelde stroomsnelheid in de afwaartse vaargeul; Fr_x=Froudegetal ter plaatse van locatie X; Fr_{gem} = Froudegetal van de gemiddelde stroming in de afwaartse vaargeul; L_{WS1} = lengte watersprong 1; L_{WS2} = lengte watersprong 2; Groene arcering: Froudegetal kleiner of gelijk aan 1 (subkritische stroming); rode arcering: Froudegetal hoger dan 1 (superkritische stroming).

Uit Figuur 16 en Tabel 9 volgt het volgende:

- Bij alle uitgevoerde proeven doet de watersprong zich voor in de woelkom juist afwaarts van de vallende straal. Het waterpeil afwaarts van de woelkom ter plaatse van locaties EMS2, EMS3 en EMS4 is bij alle proeven ongeveer hetzelfde, onafhankelijk van het afwaarts waterpeil, de helling van de einddrempel en de aanwezigheid van dissipatieblokken. De stroomsnelheid in deze locaties is beduidend hoger dan in de proeven met een woelkom met bodempeil op +4.50 mTAW en bedraagt 5.3 à 6.6 m/s. In deze locaties doet zich nog een superkritische stroming voor met een Froudegetal groter dan 1.0.
- Bij alle proeven wordt ook een 'tweede' overstort over de drempel waargenomen, zie Figuur 27, Figuur 29 en Figuur 30 in bijlage 1. Het water wordt als het ware opgestuwd over de drempel. Hieruit kan besloten worden dat de drempel bij deze configuratie te hoog boven het afwaarts bodempeil uitsteekt.
- Ter plaatse van de locaties EMS2, EMS3 en EMS4 wordt bij de proeven met de steilere helling van de einddrempel (1:2) een iets hogere (ca. 0.3 m/s) stroomsnelheid opgemeten dan bij de proeven met de minder steile helling van de einddrempel. Bij aanwezigheid van dissipatieblokken in de woelkom wordt in deze locaties een iets lagere (ca. 0.3 m/s) stroomsnelheid opgemeten dan bij de proeven zonder dissipatieblokken in de woelkom. Bij de proeven met woelkom met bodempeil op +4.50 mTAW bedroegen deze verschillen ca. 0.6 m/s. De invloed van de helling van de einddrempel of van dissipatieblokken op de stroomsnelheid aan de bodem afwaarts van de woelkom is bijgevolg kleiner bij een hoger bodempeil van de woelkom.
- Bij de proeven zonder dissipatieblokken is lengte watersprong 1 gelijk aan 11 à 12 m en lengte watersprong 2 gelijk aan 15 m, zowel bij de proeven met een einddrempel met helling 1:2 als bij deze met een einddrempel met helling 2:1. Bij toepassen van dissipatieblokken neemt lengte watersprong 1 af naar 9 m en lengte watersprong 2 naar 12 à 13 m, dit is 2 à 3 m korter dan bij afwezigheid van dissipatieblokken. Deze lengte van de watersprong is, rekening houdend met de onzekerheid op de bepaling ervan, dezelfde als bij de proeven met een woelkom met bodempeil op +4.50 mTAW en toepassing van dissipatieblokken.
- Analoog als bij de proeven met woelkom met bodempeil op +4.50 mTAW worden ook hier bij het bodempeil van +5.50 mTAW in de afwaartse vaargeul hoge gemiddelde stroomsnelheden tussen 3.66 m/s en 4.89 m/s berekend in de afwaartse vaargeul. Bij streefpeil in het afwaarts pand wordt voor deze stroomsnelheden een Froudegetal berekend van ca. 0.95. Dit is zeer dicht bij 1.0 gelegen, wat betekent dat bijna schietend water voorkomt in de afwaartse stuwgeul.

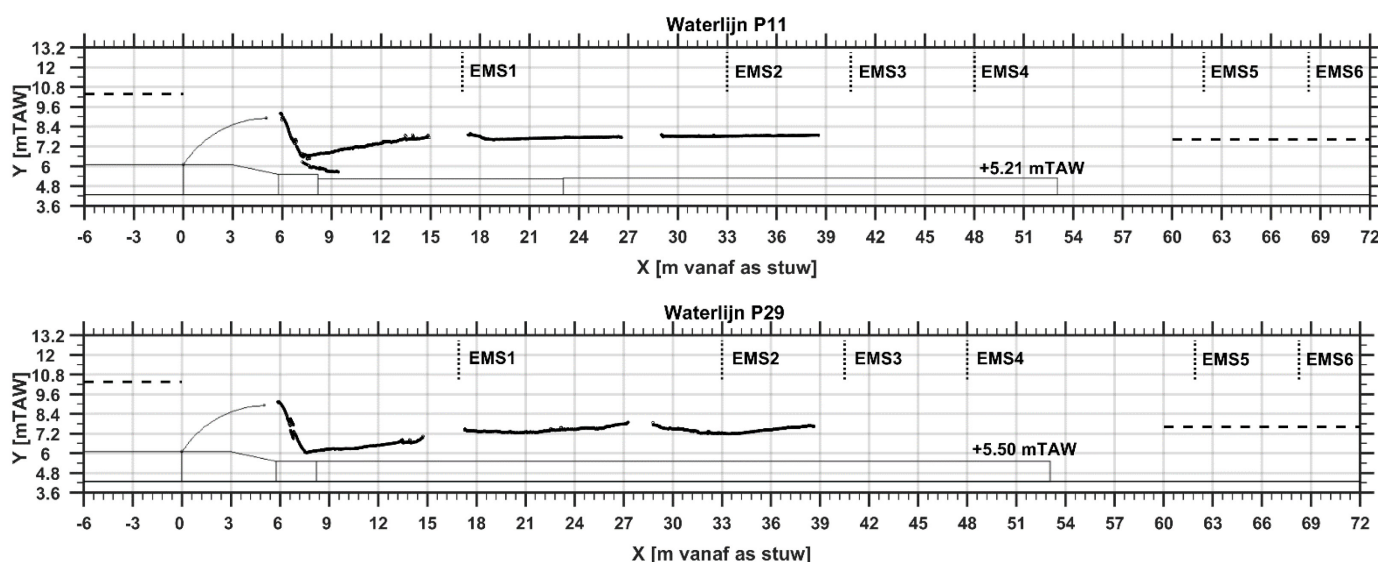
3.3 Conditie 1

Voor conditie 1 zijn proeven uitgevoerd met een bodemverlaging afwaarts (paragraaf 3.3.1), met een woelkom met bodempeil op +4.50 mTAW (paragraaf 3.3.2) en met een woelkom met bodempeil op +5.30 mTAW (paragraaf 3.3.3).

3.3.1 Bodemverlaging afwaarts

Voor conditie 1 zijn in het schaalmodel twee proeven uitgevoerd met een (uniforme) bodemverlaging afwaarts van de nieuwe stuwen. In proef P11 is de bodem afwaarts van de nieuwe stuwen verlaagd tot +5.21 mTAW (proef P11), in proef P29 is een proef uitgevoerd met het huidig bodempeil van de afwaartse stuwgeul (+5.50 mTAW; proef P29). Voor deze proeven is in Figuur 17 de ligging van de waterlijn grafisch voorgesteld. De stroomsnelheden opgemeten in de zes locaties afwaarts van de nieuwe stuwen, de waarde van het berekende Froudegetal en de op basis van de camerabeelden bepaalde lengte van de watersprong zijn gegeven in Tabel 10.

Figuur 17 – Ligging waterlijn voor proeven met bodemverlaging afwaarts voor conditie 1.



Tabel 10 – Stroomsnelheden afwaarts nieuwe stuwen, Froudegetal van de stroming en lengte watersprong voor proeven met bodemverlaging afwaarts voor conditie 1.

Bodempeil	Proef	Waterpeil opwaarts	Waterpeil afwaarts	EMS1	EMS2	EMS3	EMS4	EMS5	EMS6	U_{gem}	Fr_{EMS2}	Fr_{EMS3}	Fr_{gem}	L_{WS1}	L_{WS2}
		mTAW	mTAW	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	-	-	-	m	m
+5.21 mTAW	P11	10.37	7.62	2.95	1.35	1.41	1.39	0.97	0.95	1.53	0.27	0.28	0.32	11	15
+5.50 mTAW	P29	10.36	7.61	7.59	2.22	1.63	0.97	0.62	0.94	1.65	0.54	0.34	0.36	8	13

- = geen metingen uitgevoerd op deze locaties of waarde niet berekend; EMSX=stroomsnelheid ter plaatse van locatie X; U_{gem} =Gemiddelde stroomsnelheid in de afwaartse vaargeul; Fr_x =Froudegetal ter plaatse van locatie X; Fr_{gem} = Froudegetal van de gemiddelde stroming in de afwaartse vaargeul; L_{WS1} = lengte watersprong 1; L_{WS2} = lengte watersprong 2; Groene arcering: Froudegetal kleiner of gelijk aan 1 (subkritische stroming); rode arcering: Froudegetal hoger dan 1 (superkritische stroming).

Uit Figuur 16 en Tabel 10 volgt het volgende:

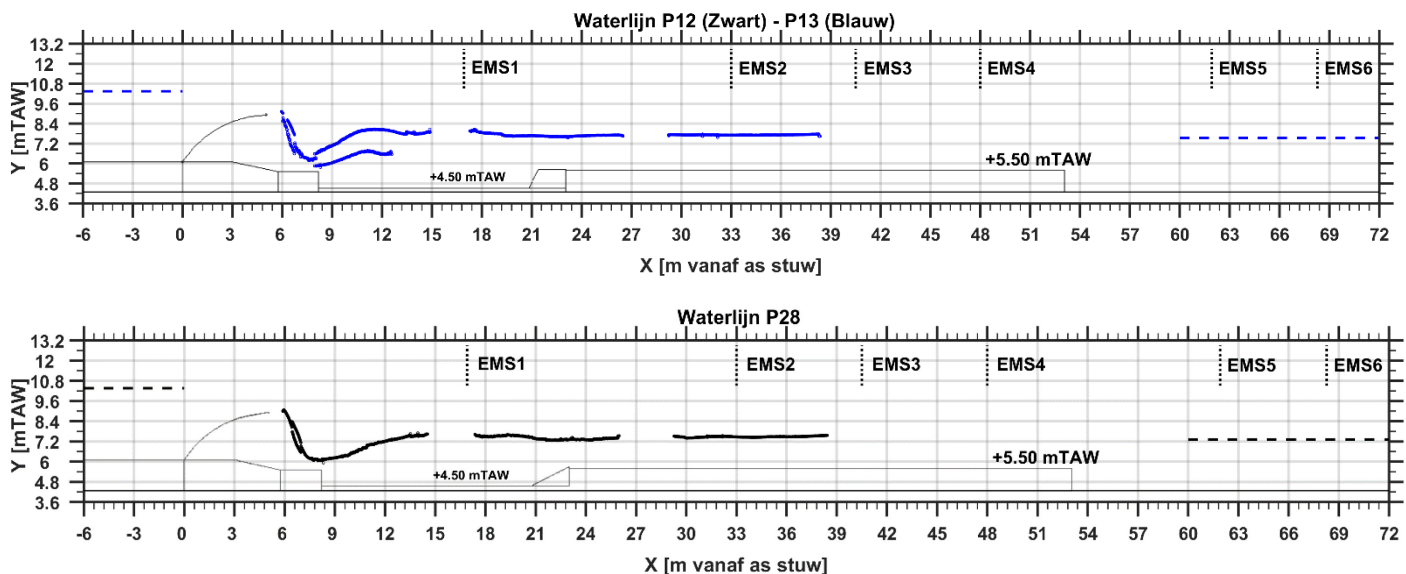
- Bij het bodempeil afwaarts gelijk aan +5.21 mTAW (proef P11) doet de watersprong zich voor juist afwaarts van de vallende straal. Ter plaatse van locatie EMS1 wordt een stroomsnelheid opgemeten gelijk aan 2.95 m/s, in de overige locaties wordt een lagere stroomsnelheid (1.0 à 1.4 m/s) opgemeten. Het Froudegetal in deze locaties is kleiner dan 1, wat subkritische stroming inhoudt. Bij deze proef is lengte watersprong 1 gelijk aan 11 m en lengte watersprong 2 gelijk aan 15 m.
- Bij de proef met het bodempeil afwaarts gelijk aan het huidig bodempeil (+5.50 mTAW; proef P29), bevindt de watersprong zich niet onmiddellijk afwaarts van de vallende straal, maar is er over een lengte van 6 m (zie Tabel 28 in Bijlage 1) nog een superkritische stroming met hoge stroomsnelheden tot 7.59 m/s aanwezig. Afwaarts van de watersprong, ter plaatse van locaties EMS2, EMS3 en EMS4 worden beduidend lagere stroomsnelheden opgemeten (1.0 à 2.3 m/s) en is het Froudegetal lager dan 1, wat wijst op subkritische stroming. Voor deze proef is lengte watersprong 1 gelijk aan 8 m en lengte watersprong 2 gelijk aan 13 m. In vergelijking met het afwaartse bodempeil +5.21 mTAW wordt voor deze proef een watersprong opgemeten die zich niet onmiddellijk afwaarts van de vallende straal voordoet, dewelke iets korter is en waarbij ter plaatse van locaties EMS2, EMS3 en EMS4 iets hogere stroomsnelheden aan de bodem worden opgemeten.
- In paragraaf 2.2 werd de lengte van de watersprong berekend voor een bodempeil afwaarts gelijk aan +5.21 mTAW en een bodempeil gelijk aan +5.50 mTAW, zie Tabel 2. Voor het bodempeil +5.21 mTAW werd een verdrongen watersprong berekend met een lengte gelijk aan 14.5 m. De verdrinkingsgraad bedroeg hierbij 0.05, wat betekent dat de watersprong juist verdrongen is. Bij het bodempeil +5.50 mTAW werd een vrije watersprong met zone met schietend water berekend, wat overeen blijkt te komen met de resultaten in het schaalmodel. Met behulp van de formulering volgens Rand werd een lengte van de watersprong gelijk aan 10.9 m berekend, met behulp van de formulering volgens Hager een lengte gelijk aan 12.9 m. Voor de beide afwaartse bodempeilen is de berekende lengte van de watersprong gelijk aan de in het schaalmodel opgemeten lengte watersprong 2, maar hoger dan de in het schaalmodel opgemeten lengte watersprong 1.

3.3.2 Woelkom met bodempeil op +4.50 mTAW

Voor een woelkom met bodempeil op +4.50 mTAW zijn in het schaalmodel drie proeven uitgevoerd. Eerst is proef P12 met het afwaarts waterpeil gelijk aan het streefpeil uitgevoerd. Bij deze proef is vastgesteld dat de watersprong zich voordoet in de woelkom en juist afwaarts van de vallende straal. Het betreft een verdrongen watersprong. Daarna is proef P13 uitgevoerd bij een waterpeil gelijk aan +7.54 mTAW. Bij dit waterpeil is de watersprong niet langer verdrongen maar doet zich nog wel juist afwaarts van de vallende straal voor. Daarnaast is, analoog als bij conditie 2, een proef uitgevoerd met een waterpeil afwaarts verlaagd tot +7.31 mTAW. Ook bij deze proef werd vastgesteld dat de watersprong zich voordoet in de woelkom en juist afwaarts van de vallende straal. Hierbij wordt opgemerkt dat proef P28 uitgevoerd is met de minder steile helling 2:1 van de einddrempel van de woelkom, terwijl proeven P12 en P13 uitgevoerd zijn met de steilere helling 1:2.

Voor deze proeven is in Figuur 18 de ligging van de waterlijn grafisch voorgesteld. De stroomsnelheden opgemeten in de zes locaties afwaarts van de nieuwe stuwen, de waarde van het berekende Froudegetal en de op basis van de camerabeelden bepaalde lengte van de watersprong zijn gegeven in Tabel 11.

Figuur 18 – Ligging waterlijn voor proeven met woelkom met bodempeil op +4.50 mTAW voor conditie 1.



Tabel 11 – Stroomsnelheden afwaarts nieuwe stuwen,
Froudegetal van de stroming en lengte watersprong voor proeven met woelkom met bodempeil op +4.50 mTAW voor conditie 1.

Helling eind- drempel	Proef	Waterpeil opwaarts mTAW	Waterpeil afwaarts mTAW	EMS1	EMS2	EMS3	EMS4	EMS5	EMS6	U_{gem}	Fr_{EMS2}	Fr_{EMS3}	Fr_{gem}	L_{WS1}	L_{WS2}
				m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	-	-	-	m	m
1:2	P12	10.37	7.60	3.10	1.55	1.58	1.62	1.03	0.97	1.76	0.34	0.34	0.40	9	15
	P13	10.35	7.54	0.60	1.58	1.63	1.64	1.03	0.95	1.79	0.35	0.35	0.41	9	14
2:1	P28	10.36	7.31	1.32	1.87	1.80	1.80	1.04	1.04	2.04	0.44	0.41	0.50	11	15

- = geen metingen uitgevoerd op deze locaties of waarde niet berekend; EMSX=stroomsnelheid ter plaatse van locatie X; U_{gem} =Gemiddelde stroomsnelheid in de afwaartse vaargeul; Fr_X =Froudegetal ter plaatse van locatie X; Fr_{gem} = Froudegetal van de gemiddelde stroming in de afwaartse vaargeul; L_{WS1} = lengte watersprong 1; L_{WS2} = lengte watersprong 2; Groene arcering: Froudegetal kleiner of gelijk aan 1 (subkritische stroming); rode arcering: Froudegetal hoger dan 1 (superkritische stroming).

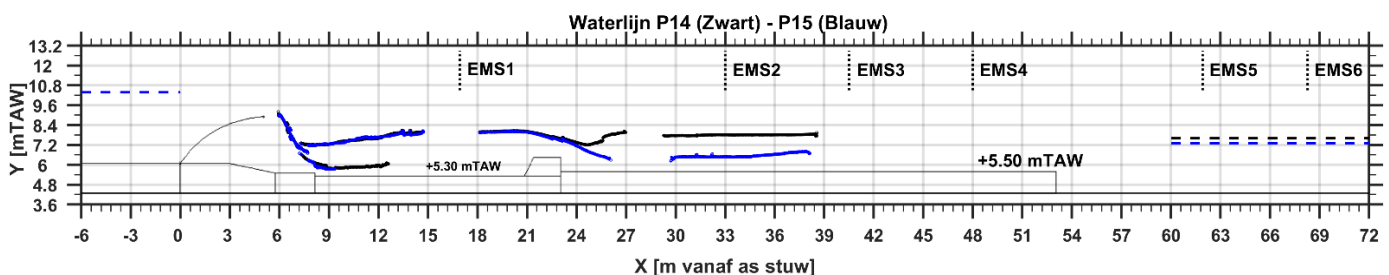
Uit Figuur 18 en Tabel 11 volgt dat bij alle proeven de watersprong zich voordoet in de woelkom juist afwaarts van de vallende straal. Bij alle proeven is de stroming afwaarts van de woelkom subkritisch (Froudegetal kleiner dan 1). De stroomsnelheid in de woelkom zelf (ter plaatse van locatie EMS1) bedraagt bij proef P12 3.10 m/s, terwijl deze bij proef P13 0.60 m/s bedraagt en bij proef P28 1.32 m/s. De beduidend lagere stroomsnelheid van 0.60 m/s die bij proef P13 ter plaatse van locatie EMS1 wordt opgemeten, kan vermoedelijk verklaard worden door het feit dat deze meting ter plaatse van de watersprong uitgevoerd is. De vorm van de watersprong is in deze proef ook verschillend in vergelijking met de vorm van de watersprong bij proef P12. Afwaarts van de woelkom, ter plaatse van de locaties EMS2, EMS3 en EMS4, wordt een stroomsnelheid van ca. 1.60 m/s opgemeten bij proeven P12 en P13 en een stroomsnelheid van ca. 1.80 m/s bij proef P28. Bij proeven P12 en P13 bedraagt de lengte watersprong 1 9 m en is lengte watersprong 2 gelijk aan 14 à 15 m. Bij proef P28 worden gelijkaardige lengtes van de watersprong opgemeten (lengte watersprong 1 is gelijk aan 11 m en lengte watersprong 2 is gelijk aan 15 m).

3.3.3 Woelkom met bodempeil op +5.30 mTAW

Voor conditie 1 zijn met een woelkom met bodempeil op +5.30 mTAW in het schaalmodel 2 proeven uitgevoerd. Eerst is een proef uitgevoerd met het afwaarts waterpeil gelijk aan het streefpeil (proef P14). Bij deze proef doet de watersprong zich juist afwaarts van de vallende straal in de woelkom voor. Afwaarts van de drempel wordt een tweede kleinere watersprong waargenomen. Om de invloed van de variatie van het afwaarts waterpeil na te gaan is in proef P15 het afwaarts waterpeil verlaagd naar +7.30 mTAW. Bij deze laatste proef wijzigt de locatie van de watersprong niet. Deze doet zich nog altijd voor juist afwaarts van de vallende straal in de woelkom. Echter afwaarts van de woelkom, wordt een beduidend lager waterpeil opgemeten. Hierdoor ontstaat tussen de drempel en locatie EMS3 een zone met eerder schietend water en doet de tweede watersprong zich voor ter plaatse van locatie EMS3 (echter buiten het bereik van de camera's). Het optreden van een tweede watersprong is niet wenselijk en geeft aan dat de woelkom niet voor voldoende dissipatie zorgt.

Voor deze beide proeven is in Figuur 19 de ligging van de waterlijn grafisch voorgesteld. De stroomsnelheden opgemeten in de 6 locaties afwaarts van de nieuwe stuwen, de waarde van het berekende Froudegetal en de op basis van de camerabeelden bepaalde lengte van de watersprong is gegeven in Tabel 12.

Figuur 19 – Ligging waterlijn voor proeven met woelkom met bodempeil op +5.30 mTAW voor conditie 1.



Tabel 12 – Stroomsnelheden afwaarts nieuwe stuwen, Froudegetal van de stroming en lengte watersprong voor proeven met woelkom met bodempeil op +5.30 mTAW voor conditie 1.

Proef	Waterpeil opwaarts	Waterpeil afwaarts	EMS1	EMS2	EMS3	EMS4	EMS5	EMS6	U_{gem}	Fr_{EMS2}	Fr_{EMS3}	Fr_{gem}	L_{WS1}	L_{WS2}
	mTAW	mTAW	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	-	-	-	m	m
P14	10.38	7.60	2.74	1.49	1.59	1.62	1.14	1.04	1.79	0.32	0.34	0.40	11	16
P15	10.38	7.30	-	-	3.61	2.98	-	-	2.10	-	1.08	0.51	12	16

- = geen metingen uitgevoerd op deze locaties of waarde niet berekend; EMSX=stroomsnelheid ter plaatse van locatie X; U_{gem} =Gemiddelde stroomsnelheid in de afwaartse vaargeul; Fr_x =Froudegetal ter plaatse van locatie X; Fr_{gem} = Froudegetal van de gemiddelde stroming in de afwaartse vaargeul; L_{WS1} = lengte watersprong 1; L_{WS2} = lengte watersprong 2; Groene arcering: Froudegetal kleiner of gelijk aan 1 (subkritische stroming); rode arcering: Froudegetal hoger dan 1 (superkritische stroming).

Uit Figuur 19 en Tabel 12 volgt het volgende:

- Bij de beide proeven doet de watersprong zich voor juist afwaarts van de vallende straal in de woelkom. Wel is, net als bij conditie 2, een tweede overstort te zien ter plaatse van de drempel en doet zich afwaarts van de drempel een tweede watersprong voor. Hieruit kan besloten worden dat deze hooggelegen woelkom voor onvoldoende energiedissipatie zorgt.
- Bij proef P14 wordt in de woelkom ter plaatse van locatie EMS1 een stroomsnelheid van 2.74 m/s opgemeten. Afwaarts van de woelkom ter plaatse van de locaties EMS2, EMS3 en EMS4 wordt een

stroomsnelheid van 1.49 à 1.62 m/s opgemeten. In al deze locaties doet zich een subkritische stroming voor met een Froudegetal lager dan 1.

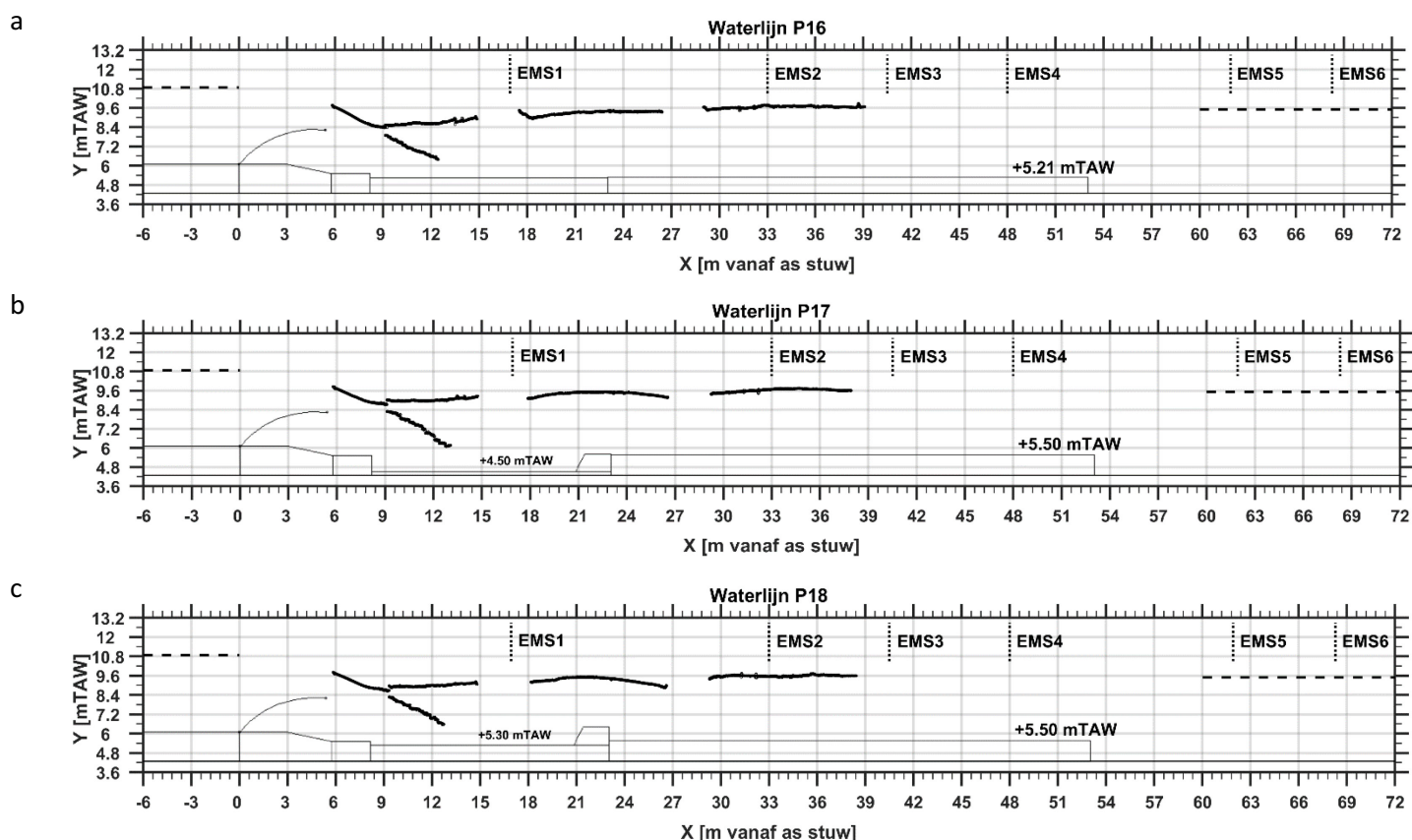
- Bij proef P15 wordt ter plaatse van locatie EMS3 een beduidend hogere stroomsnelheid gelijk aan 3.61 m/s opgemeten. Ter plaatse van deze locatie is de stroming superkritisch. Ter plaatse van locatie EMS4 wordt al een iets lagere stroomsnelheid opgemeten. De stroomsnelheid in deze beide locaties is nog wel hoger dan de gemiddelde stroomsnelheid in het afwaarts pand, wat betekent dat de stroming nog niet volledige uniform is.
- Voor beide proeven is lengte watersprong 1 gelijk aan 11 à 12 m en is lengte watersprong 2 gelijk aan 16 m.

3.4 Conditie 3

Voor conditie 3 zijn drie proeven uitgevoerd, namelijk één proef met een bodempeil afwaarts van de nieuwe stuwen op +5.21 mTAW (proef P16), één proef met een woelkom met bodempeil op +4.50 mTAW (proef P17) en één proef met een woelkom met bodempeil op +5.30 mTAW (proef P18). Bij al deze proeven is vastgesteld dat de watersprong zich voordoet juist afwaarts van de vallende straal. Bij de proeven met woelkom wordt opgemerkt dat de helling van de einddrempel van de woelkom gelijk is aan 1:2. Aangezien bij deze helling van de einddrempel de watersprong zich reeds voordeed juist afwaarts van de vallende straal zijn geen proeven meer uitgevoerd met een wijziging van de helling van de einddrempel naar helling 2:1.

Voor deze drie proeven is in Figuur 20 de ligging van de waterlijn grafisch voorgesteld. De stroomsnelheden opgemeten in de zes locaties afwaarts van de nieuwe stuwen, de waarde van het berekende Froudegetal en de op basis van de camerabeelden bepaalde lengte van de watersprong zijn per proef gegeven in Tabel 13.

Figuur 20 – Ligging waterlijn voor proeven met bodemverlaging afwaarts, proeven met woelkom met bodempeil op +4.50 mTAW en proeven met woelkom met bodempeil op +5.30 mTAW voor conditie 3.



a: geen woelkom, bodempeil afwaarts +5.21 mTAW; b: woelkom +4.50 mTAW, bodempeil afwaarts +5.50 mTAW; c: woelkom +5.30 mTAW, bodempeil afwaarts +5.50 mTAW.

Tabel 13 – Stroomsnelheden afwaarts nieuwe stuwen,
Froudegetal van de stroming en lengte watersprong voor proef met bodemverlaging afwaarts,
proef met woelkom met bodempeil op +4.50 mTAW en proef met woelkom met bodempeil op +5.30 mTAW voor conditie 3.

Bodempeil woelkom	Proef	Waterpeil opwaarts mTAW	Waterpeil afwaarts mTAW	EMS1 m/s	EMS2 m/s	EMS3 m/s	EMS4 m/s	EMS5 m/s	EMS6 m/s	U_{gem} m/s	Fr_{EMS2} -	Fr_{EMS3} -	Fr_{gem} -	L_{WS1} m	L_{WS2} m
n.v.t.	P16	10.87	9.51	5.35	2.79	2.39	2.12	1.53	1.55	2.11	0.42	0.36	0.33	13	21
+4.50 mTAW	P17	10.88	9.51	4.68	1.62	2.01	2.08	1.58	1.56	2.24	0.26	0.32	0.36	13	18
+5.30 mTAW	P18	10.88	9.50	4.67	1.41	1.97	2.06	1.64	1.60	2.24	0.22	0.31	0.36	13	17

- = geen metingen uitgevoerd op deze locaties of waarde niet berekend; EMSX=stroomsnelheid ter plaatse van locatie X; U_{gem} =Gemiddelde stroomsnelheid in de afwaartse vaargeul; Fr_X =Froudegetal ter plaatse van locatie X; Fr_{gem} = Froudegetal van de gemiddelde stroming in de afwaartse vaargeul; L_{WS1} = lengte watersprong 1; L_{WS2} = lengte watersprong 2; Groene arcering: Froudegetal kleiner of gelijk aan 1 (subkritische stroming); rode arcering: Froudegetal hoger dan 1 (superkritische stroming).

Uit Figuur 20 en Tabel 13 volgt het volgende:

- Bij alle proeven ter plaatse van locatie EMS 1 wordt een hoge stroomsnelheid opgemeten van 4.67 m/s à 5.35 m/s. Zowel bij proef P16 met het bodempeil afwaarts op +5.21 mTAW als bij de proeven met woelkom (proef P17 en proef P18) wordt ter plaatse van locatie EMS2, EMS3 en EMS4 een beduidend lagere stroomsnelheid opgemeten. Bij de proef met een bodempeil afwaarts op +5.21 mTAW neemt de stroomsnelheid aan de bodem in deze locaties af van 2.79 m/s naar 2.12 m/s. Bij de proeven met woelkom, wordt ter plaatse van locatie EMS2 een lagere stroomsnelheid opgemeten (1.41 m/s à 1.62 m/s) dan in de locaties EMS3 en EMS4 (ca. 2.0 m/s).
- Voor alle configuraties geldt dat de stroming subkritisch (Froudegetal kleiner dan 1) is voor alle locaties afwaarts van EMS1. Voor alle proeven is lengte watersprong 1 gelijk aan 13 m. Bij proef P16, met het bodempeil afwaarts op +5.21 mTAW wordt in het schaalmodel een lengte watersprong 2 opgemeten gelijk aan 21 m. Bij de proeven met woelkom is deze lengte iets korter en bedraagt deze 17 à 18 m. In hoofdstuk 2 werd voor een bodempeil afwaarts op +5.21 mTAW voor conditie 3 een lengte van de verdrongen watersprong berekend gelijk aan 25.2 m. Deze lengte is iets groter dan de bij proef P16 in het schaalmodel opgemeten lengte watersprong 2 (21 m) en beduidend groter dan de in het schaalmodel opgemeten lengte watersprong 1 (13 m).

3.5 Samenvatting resultaten

In het schaalmodel zijn proeven uitgevoerd voor drie hydraulische condities (zie Tabel 3 in paragraaf 2.2). Voor elk van deze condities zijn drie configuraties beschouwd: een verlaging van het bodempeil afwaarts naar +5.21 mTAW of naar +4.28 mTAW, een woelkom met bodempeil op +4.50 mTAW en een woelkom met bodempeil op +5.30 mTAW. Enkel voor conditie 1 is ook nog een proef uitgevoerd met het huidig bodempeil op +5.50 mTAW. Voor conditie 2 zijn twee mogelijke hellingen van de einddrempel van de woelkom beschouwd en is voor de woelkom met bodempeil op +4.50 mTAW ook de invloed van dissipatieblokken in de woelkom beproefd.

Met betrekking tot de beschouwde configuraties wordt op basis van de verschillende uitgevoerde schaalmodelproeven het volgende besloten:

1. Huidig bodempeil afwaarts +5.50 mTAW.

Met dit bodempeil is enkel voor conditie 1 een proef uitgevoerd. Bij deze proef wordt tussen het einde van de vallende straal en het begin van de watersprong een zone (met lengte van 6 m) met hoge stroomsnelheden tot 8 m/s waargenomen. De lengte van de watersprong bedraagt ca. 8 à 13 m, waardoor deze eindigt ca. 22 à 27 m afwaarts van de as van de nieuwe stuwen.

2. Verlaging bodempeil afwaarts naar +5.21 mTAW of +4.28 mTAW

Uit de proeven voor conditie 2 volgt dat zich afwaarts van de nieuwe stuwen bij streefpeil in het afwaarts pand (+7.61 mTAW) een superkritische stroming voordoet zowel bij het bodempeil gelijk aan +5.21 mTAW als bij een bodempeil gelijk aan +4.28 mTAW. Deze superkritische stroming wordt gekenmerkt door hoge stroomsnelheden aan de bodem tot 8 m/s. Afwaarts van de inbouw van het schaalmodel in de stroomgoot, i.e. op een locatie waar zich de verdieping van het dwarsprofiel voordoet, doet zich een watersprong voor en gaat de stroming over naar subkritische stroming met lagere opgemeten stroomsnelheden aan de bodem. In realiteit zal deze watersprong zich dus voordoen op locaties ter plaatse van een vergroting van de natte sectie (zowel door een verbreding van het dwarsprofiel als door een verdieping).

Het verhogen van het afwaarts waterpeil in het schaalmodel tot het peil waarbij zich afwaarts een waterdiepte gelijk aan minimaal 3.55 m voordoet, zorgt ervoor dat de watersprong zich altijd juist afwaarts van de vallende straal voordoet. Bijgevolg kan besloten worden dat bij streefpeil in het afwaarts pand, het bodempeil van het afwaarts pand dient verlaagd te worden tot minimaal +4.06 mTAW. De bij dit bodempeil aanwezige waterdiepte zorgt ervoor dat de watersprong zich altijd juist na de vallende straal voordoet. Hierbij wordt opgemerkt dat in het schaalmodel het waterpeil bepaald is, waarbij de overgang plaatsvindt tussen een watersprong juist afwaarts van de vallende straal en een watersprong met voorafgaand zone met schietend water. In werkelijkheid varieert het afwaarts waterpeil rond het streefpeil en is ook een beperkt lager waterpeil mogelijk. Hierdoor is het mogelijk dat een watersprong voorafgegaan door een beperkte zone met schietend water voorkomt.

Bij het bodempeil +5.21 mTAW afwaarts van de nieuwe stuwen en een waterdiepte van 3.55 m wordt een lengte van de watersprong van circa 11 tot 16 m opgemeten, terwijl deze bij het bodempeil afwaarts gelijk aan +4.28 mTAW (en eveneens een waterdiepte van 3.55 m) circa 11 tot 22 m bedraagt. Het einde van de watersprong bevindt zich hierbij op respectievelijk circa 20 à 25 m en 22 à 32 m afwaarts van de as van de nieuwe stuwen.

Zowel bij conditie 1, als bij conditie 3 doet de watersprong zich bij de proef met bodemverlaging tot +5.21 mTAW juist afwaarts voor van de vallende straal. Hierbij wordt voor conditie 1 een lengte van de watersprong van circa 8 tot 15 m opgemeten en voor conditie 3 een lengte van ca. 14 à 23 m. het einde van de watersprong bevindt zich voor conditie 1 op ca. 18 tot 27 m afwaarts van de as van de nieuwe stuwen en voor conditie 3 op ca. 23 à 31 m afwaarts van de as van de nieuwe stuwen.

3. Woelkom met bodempeil op +4.50 mTAW of bodempeil op +5.30 mTAW

Voor conditie 2 volgt uit de proeven met beide bodempeilen van de woelkom dat de watersprong altijd plaatsvindt juist afwaarts van de vallende straal. Bij de proeven met een bodempeil van de woelkom op +5.30 mTAW doet zich echter afwaarts van de woelkom nog steeds een superkritische stroming voor (met hoge stroomsnelheden aan de bodem). Deze zone met hoge stroomsnelheden wordt gevolgd door een tweede watersprong meer afwaarts in de stroomgoot na de inbouw van het model, waar zich door de verdieping een vergroting van de natte sectie voordoet.

Bij de proeven met woelkom met bodempeil +4.50 mTAW, met uitzondering van de proef met helling 1:2 van de einddrempel van de woelkom bij streefpeil in het afwaarts pand, wordt geen superkritische stroming afwaarts van de woelkom waargenomen. Afwaarts van de woelkom worden bij deze proeven nog wel relatief hoge stroomsnelheden opgemeten (circa 3.5 tot 4.6 m/s). Bij deze proeven wordt wel nog een beperkte watersprong waargenomen afwaarts van de inbouw van het schaalmodel in de stroomgoot (vermoedelijk ten gevolge van overstort ter plaatse van de verdieping in het model).

Bij de flauwere helling 2:1 van de einddrempel doen zich afwaarts van de woelkom beperkt lagere stroomsnelheden voor dan bij de steilere helling 1:2 van de einddrempel. In vergelijking met de proeven zonder dissipatieblokken in de woelkom zorgt de aanwezigheid van dissipatieblokken voor een iets kortere watersprong en iets lagere stroomsnelheden aan de bodem afwaarts van de woelkom. Wel wordt opgemerkt dat de toepassing van dissipatieblokken mogelijk kan zorgen voor een verhoging van de mortaliteit bij stroomafwaartse migratie van vissen.

Bij conditie 1 en conditie 3 doet de watersprong zich bij alle proeven voor in de woelkom juist afwaarts van de vallende straal. Afwaarts van de woelkom wordt voor de beide bodempeilen van de woelkom een subkritische stroming opgemeten met relatief lage stroomsnelheden tussen 1.5 à 2.0 m/s. Bij een verlaging van het afwaarts peil naar +7.30 mTAW voor conditie 1 wordt bij de configuratie met woelkom met bodempeil op +4.50 mTAW nog altijd een subkritische stroming afwaarts van de woelkom opgemeten, terwijl bij de configuratie met woelkom met bodempeil op +5.30 mTAW een superkritische stroming wordt opgemeten gevolgd door een tweede watersprong (ter plaatse van de verdieping na de inbouw van het schaalmodel in de stroomgoot).

Voor de proeven met een constant bodempeil afwaarts, zowel het huidige bodempeil +5.50 mTAW, als een bodempeil verlaagd naar +5.21 mTAW, is de lengte van de in het schaalmodel opgemeten watersprong vergeleken met de waarden die in hoofdstuk 2.2 berekend zijn aan de hand van literatuurformules. Hieruit volgt dat lengte watersprong 2, namelijk de afstand tussen begin watersprong en de locatie waar geen opstijgende turbulenties meer waargenomen worden, relatief goed overeenkomt met de waarde berekend aan de hand van literatuurformules.

Aan de hand van de resultaten van deze schaalmodelproeven wordt besloten dat één van volgende maatregelen nodig zal zijn om er voor te zorgen dat de watersprong zich voor alle beproefde condities juist afwaarts van de vallende straal voordoet:

- Verlaging van het bodempeil afwaarts van de nieuwe stuwen naar minimaal +4.06 mTAW. Bij streefpeil in het afwaarts pand bedraagt de waterdiepte minimaal 3.55 m. Deze verlaging wordt minimaal uitgevoerd over een afstand gelijk aan de in het schaalmodel opgemeten lengte van de watersprong, i.e. 31 m.
- Een woelkom met bodempeil op +4.50 mTAW en bodempeil afwaarts van de woelkom op +5.50 mTAW. Hierbij wordt opgemerkt dat voor het bodempeil van +5.50 mTAW afwaarts van de woelkom nog wel hoge gemiddelde stroomsnelheden berekend worden met Froudegetallen die dichtbij 1.0 gelegen zijn.

4 Bepaling scenario bodembescherming

Na het beëindigen van het schaalmodelonderzoek zijn door WL simulaties uitgevoerd met het MIKE11-model van de Dender met als doel de waterstanden en de debieten te Denderleeuw met hoge terugkeerperiodes te bepalen. Volgende simulaties zijn uitgevoerd met de nieuwe stuwen (2 stuwen breedte 7.00 m en drempelpeil +6.37 mTAW) in het numeriek model:

1. Was november 2010
2. Was met terugkeerperiode 1 jaar
3. Was met terugkeerperiode 10 jaar
4. Was met terugkeerperiode 100 jaar
5. Was met terugkeerperiode 500 jaar
6. Was met terugkeerperiode 1000 jaar

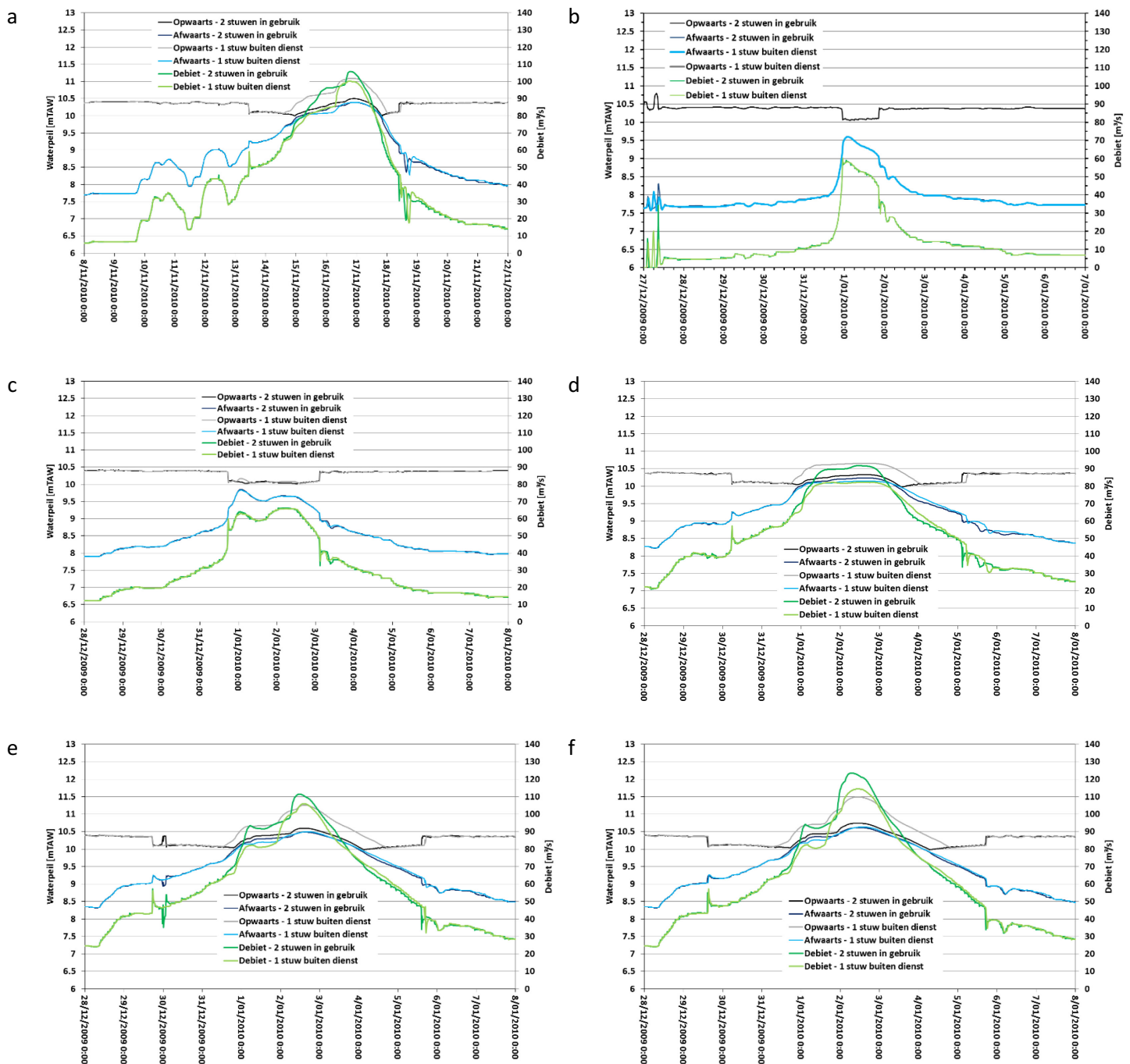
Voor de nieuwe stuwen is bij deze simulaties de controlestrategie uit Tabel 14 toegepast. Hierbij wordt opgemerkt dat deze controlestrategie gebaseerd is op de regeling van de huidige stuwen te Denderleeuw. In de huidige regeling wordt het aantal schotbalken dat te Denderleeuw verwijderd wordt, of bijgevoegd wordt, bepaald op basis van het debiet van de Dender te Aalst. Het is mogelijk dat in de toekomst een andere stuwregeling wordt toegepast voor de nieuwe stuwen te Denderleeuw.

De simulaties zijn met het MIKE11-model zowel uitgevoerd bij 2 stuwen in gebruik als voor de toestand waarbij 1 stuw buiten dienst is en alle debiet over de overige stuw wordt afgevoerd. Figuur 21 geeft voor deze simulaties een grafische voorstelling van de variatie in de tijd van de waterstand opwaarts en afwaarts van de nieuwe stuwen te Denderleeuw en het debiet over de nieuwe stuwen.

Tabel 14 – Controledefinities nieuwe stuwen Denderleeuw in Mike11-model.

Controle definitie	Voorwaarde	Controle strategie
1	Debiet Dender te Aalst < 50 m ³ /s Waterpeil opwaarts Denderleeuw > +10.42 mTAW	Kruinpeil stuw verlaagt
2	Debiet Dender te Aalst < 50 m ³ /s Waterpeil opwaarts Denderleeuw < +10.37 mTAW	Kruinpeil stuw stijgt
3	Debiet Dender te Aalst > 50 m ³ /s Waterpeil opwaarts Denderleeuw > +10.22 mTAW	Kruinpeil stuw verlaagt
4	Debiet Dender te Aalst > 50 m ³ /s Waterpeil opwaarts Denderleeuw < +10.17 mTAW	Kruinpeil stuw stijgt
5	Alle andere gevallen	Kruinpeil stuw blijft gelijk

Figuur 21 – Waterstand en debiet uit MIKE11-model met nieuwe stuwen te Denderleeuw in wascondities



a: was november 2010; b: was T1; c: was T10; d: was T100; e: was T500; f: was T1000.

Uit Figuur 21 volgt het volgende:

- Bij een stijging van het debiet boven 50 m³/s wordt, cfr. de controledefinities uit Tabel 14, het kruinpeil van de nieuwe stuwen verlaagd. Dit heeft tot gevolg dat het opwaarts waterpeil met ca. 0.20 m verlaagt. Na deze verlaging blijft het opwaarts waterpeil constant voor alle tijdstippen dat het afwaarts waterpeil lager is dan het opwaarts waterpeil. Met andere woorden de stuw is niet verdronken.
- Vanaf een debiet van ca. 65 m³/s vertoont het opwaarts waterpeil een variatie in de tijd die gelijk loopt met het afwaarts waterpeil.
- Vanaf een debiet van ca. 10 à 20 m³/s begint het afwaarts waterpeil te stijgen. Het afwaarts streefpeil kan vanaf dit debiet niet meer behouden blijven. Het feit dat dit reeds gebeurt bij een debiet van 10 à 20 m³/s wordt veroorzaakt door de afvoercapaciteit van het pand tussen Aalst en Denderleeuw.

De schaalmodelproeven zijn uitgevoerd voor de volgende condities:

1. De normale toestand met een debiet van 50 m³/s bij streefpeilen in het opwaarts en afwaarts pand (conditie 1).
2. Een was met debiet van 115 m³/s bij streefpeilen in het opwaarts en afwaarts pand (conditie 2).
3. Een was met debiet van 115 m³/s en een afwaarts waterpeil gelijk aan +9.50 mTAW en een opwaarts waterpeil gelijk aan +10.88 mTAW (conditie 3).

Hierbij wordt opgemerkt dat deze condities allen beschouwd worden met afvoer over beide stuwen. Omwille van de tweedimensionale benadering van het schaalmodel kan elke beproefde conditie echter ook aanzien worden als een noodtoestand waarbij 1 stuw buiten gebruik is en de helft van het beschouwde debiet over één stuw wordt afgevoerd.

Een vergelijking van de in het schaalmodel beproefde condities met de hierboven vermelde besluiten met betrekking tot de met MIKE11 berekende waterstanden en debieten leert dat conditie 2 uit de schaalmodelproeven in werkelijkheid niet kan voorkomen. In praktijk zal het streefpeil behouden blijven tot een debiet van 20 m³/s. Bij een noodtoestand, waarbij slechts één stuw in gebruik is, komt een debiet van 20 m³/s afgevoerd over één stuw ongeveer overeen met conditie 1 uit de schaalmodelproeven. Anderzijds volgt uit Figuur 21 dat bij de was met terugkeerperiode 1 jaar het maximale debiet gelijk is aan 50 m³/s. Op dat tijdstip bedraagt het afwaarts waterpeil +9.61 mTAW. Bij een noodtoestand, waarbij slechts één stuw in gebruik is, komt deze conditie wat waterstanden en debiet betreft overeen met conditie 3 uit het schaalmodel (een debiet van 115 m³/s bij een afwaartse waterstand gelijk aan +9.50 mTAW). Bijgevolg zullen zich in praktijk dus enkel conditie 1 en conditie 3 voordoen.

De schaalmodelproeven voor conditie 2 leren dat afwaarts van de nieuwe stuwen minimaal een waterdiepte van 3.55 m nodig is om een watersprong te doen ontstaan juist afwaarts van de vallende straal. Bij een was met terugkeerperiode 1 jaar bedraagt het maximale afwaarts waterpeil +9.61 mTAW en is het maximale debiet gelijk aan ca. 50 m³/s. Indien in deze toestand afwaarts van de nieuwe stuwen een bodempeil van +5.50 mTAW aanwezig is, bedraagt de waterdiepte 4.11 m. Dit is voldoende om een watersprong juist afwaarts van de vallende straal te doen ontstaan.

Het behouden van het huidig bodempeil afwaarts op +5.50 mTAW is bijgevolg voldoende om een watersprong te doen ontstaan juist afwaarts van de vallende straal. Door de opdrachtgever is nog niet beslist of een bodemverlaging afwaarts tot +5.21 mTAW, gelijk aan het bodempeil van de vaargeul, wordt uitgevoerd. Deze bodemverlaging zorgt voor een verhoging van de waterdiepte, wat voordelig is voor het ontstaan van een watersprong juist afwaarts van de vallende straal.

Hierbij wordt opgemerkt dat in de numeriek simulaties enerzijds de huidige regeling van de stuwen is toegepast (zie Tabel 14) en dat anderzijds de afvoercapaciteit van de het pand tussen Denderleeuw en Aalst een bepalende factor speelt in het mogelijke peilbeheer van het afwaarts pand. Indien in de toekomst een andere stuwregeling wordt toegepast of indien bepaalde rivierverruimende maatregelen worden uitgevoerd, is het mogelijk dat het waterpeil van het afwaarts pand pas begint te stijgen bij hogere

debieten dan 10 à 20 m³/s. Ook bleek uit de schaalmodelproeven dat bij het huidige bodempeil van +5.50 mTAW bij conditie 1 (Proef P29 uit paragraaf 3.3.1) een watersprong met voorafgaand een zone met schietend water voorkomt. Omwille van deze redenen wordt geadviseerd om het afwaartse bodempeil te verlagen naar minimaal +5.21 mTAW, gelijk aan het toekomstige bodempeil van de afwaartse vaargeul. Dit maakt het ontwerp van de stuwen robuuster met oog op mogelijke toekomstige rivierverruiming van het afwaartse pand en/of optimalisatie van de stuwregeling. Ook brengt dit de afwaartse waterdiepte dichterbij de ontwerpdiepte van de andere stuwsluiscomplexen op de Dender (ca. 3 m). Hierbij wordt opgemerkt dat door het vervallen van de stuw te Terafene de waterdiepte in het afwaartse pand van Denderleeuw 0.56 m ondieper is geworden in vergelijking met de huidige toestand, wat aanleiding geeft tot hogere stroomsnelheden.

Om bovengenoemde redenen worden volgende bodempeilen afwaarts van de nieuwe stuwen beschouwd voor de dimensionering van de bodembescherming:

- Huidig bodempeil afwaarts op +5.50 mTAW
- Bodempeil afwaarts verlaagd tot +5.21 mTAW, gelijk aan het bodempeil van de vaargeul.

Hierbij wordt opgemerkt dat dan ook geen woelkom voorzien wordt afwaarts van de nieuwe stuwen.

5 Dimensionering bodembescherming

Dit hoofdstuk beschrijft de dimensionering van de bodembescherming opwaarts en afwaarts van de nieuwe stuwen voor het scenario van de bodembescherming uit hoofdstuk 4. In paragraaf 5.2 wordt voor dit scenario eerst de hydraulische belasting op de bodem bepaald. De methodologie voor het bepalen van het type bodembescherming wordt beschreven in paragraaf 5.2. Paragraaf 5.3 beschrijft de resultaten van de dimensionering van de bodembescherming opwaarts en afwaarts van de nieuwe stuwen.

5.1 Hydraulische belasting op de bodem

5.1.1 Algemeen

Voor de bepaling van de hydraulische belasting op de bodem worden de raaien uit Figuur 22 gedefinieerd.

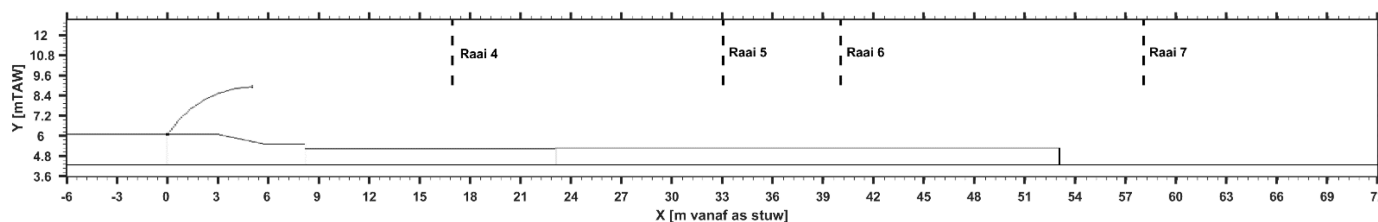
Figuur 22 – Locatie raaien voor bepaling hydraulische belasting op de bodem



Bij Figuur 22 wordt opgemerkt dat raai 1 zich ter plaatse van de splitsing tussen stuwgeul en vaargeul bevindt. Raai 2 en raai 3 bevinden zich respectievelijk aan het opwaarts en het afwaarts uiteinde van de bouwkuip van de nieuwe stuwen. Voor deze raaien wordt telkens de breedte van 7 m tussen de stuwmuur van de beide stuwen beschouwd. Raai 4 bevindt zich ter plaatse van de meetlocatie EMS1 uit de schaalmodelproeven. Raai 5 en raai 6 bevinden zich ter plaatse van meetlocaties EMS2 en EMS3, waar in

het schaalmodel de stroomsnelheden aan de bodem zijn opgemeten en waar in de schaalmodelproeven tevens het einde van de watersprong werd waargenomen voor de meest maatgevende debieten. Raai 7 bevindt zich juist opwaarts van de brug over de afwaartse stuwgeul, waaronder de huidige stuwen zich bevinden, terwijl raai 8 zich bevindt juist afwaarts van deze brug. Raai 10 bevindt zich aan het uiteinde van de afwaartse stuwgeul. Raai 9 bevindt zich midden tussen raai 8 en raai 10. De ligging van raai 4, raai 5, raai 6 en raai 7 is voor de configuratie met verlaagd bodempeil uit de schaalmodelproeven voorgesteld in Figuur 23.

Figuur 23 – Locatie raaien 4, 5, 6 en 7



Tabel 15 geeft voor alle gedefinieerde raaien de afstand tot de stuwas, de breedte van de sectie en het bodempeil. Bij deze tabel wordt opgemerkt dat tussen de nieuwe stuwen en raai 1 een bodempeil van +6.37 mTAW beschouwd wordt. De overgang naar het bodempeil +7.97 mTAW bevindt zich opwaarts van raai 1. Zoals besloten in hoofdstuk 4 wordt voor de afwaartse stuwgeul zowel het huidig bodempeil +5.50 mTAW als het verlaagde bodempeil +5.21 mTAW beschouwd.

Tabel 15 – Afstand tot as van stuwen, breedte en bodempeil van de gedefinieerde raaien

Raai nr.	Afstand tot as stuwen	Breedte	Bodempeil
1	-22 m	23.6 m	+6.37 mTAW
2a	-4 m	7.0 m	+6.37 mTAW
2b	-4 m	7.0 m	+6.37 mTAW
3a	8.1 m	7.0 m	+5.21 mTAW / +5.50 mTAW
3b	8.1 m	7.0 m	+5.21 mTAW / +5.50 mTAW
4	17 m	17.5 m	+5.21 mTAW / +5.50 mTAW
5	30 m	19.2 m	+5.21 mTAW / +5.50 mTAW
6	40 m	19.0 m	+5.21 mTAW / +5.50 mTAW
7	58 m	16.5 m	+5.21 mTAW / +5.50 mTAW
8	77 m	17.1 m	+5.21 mTAW / +5.50 mTAW
9	165 m	17.5 m	+5.21 mTAW / +5.50 mTAW
10	243 m	21.0 m	+5.21 mTAW / +5.50 mTAW

Voor deze raaien wordt in paragraaf 5.1.2 de stroomsnelheid aan de bodem berekend in de normale toestand en in paragraaf 5.1.3 bij wascondities.

5.1.2 Normale toestand

In de normale toestand zijn opwaarts en afwaarts van de nieuwe stuwen de streefpeilen aanwezig. Uit paragraaf 5.1.1 volgt dat de streefpeilen in het opwaarts en afwaarts pand kunnen behouden blijven tot een debiet van 10 à 20 m³/s. Dit is beduidend lager dan de debieten bij was. Bijgevolg is de stroomsnelheid aan de bodem voor de raaien opwaarts van de stuwen (raai 1 en raai 2) en de meest afwaarts gelegen raaien (raai 7, raai 8 en raai 9) altijd lager dan de stroomsnelheden bij was. Afwaarts van de nieuwe stuwen wordt hierbij steeds een watersprong gevormd. Ter plaatse van deze watersprong kan zich een hogere stroomsnelheid aan de bodem voordoen dan bij was. Daarom worden in deze paragraaf enkel de stroomsnelheden bepaald voor de raaien 3a, 3b, 4, 5 en 6.

De stroomsnelheden aan de bodem voor deze locaties zijn bepaald op basis van de uitgevoerde schaalmodelproeven beschreven in hoofdstuk 3. Uit paragraaf 5.1.1 volgt dat bij behoud van de streefpeilen in opwaarts en afwaarts pand in praktijk enkel conditie 1 uit de schaalmodelproeven kan voorkomen. Voor het huidige bodempeil +5.50 mTAW wordt de opgemeten stroomsnelheid aan de bodem overgenomen uit proef P29, voor het bodempeil +5.21 mTAW uit proef P11.

Tabel 16 geeft een overzicht van de op deze wijze bepaalde stroomsnelheden voor raai 3a, 3b, 4, 5 en 6 in de normale toestand. Uit Tabel 16 volgt dat bij een bodempeil +5.21 mTAW voor alle raaien een lagere stroomsnelheid aan de bodem wordt opgemeten dan bij een bodempeil +5.50 mTAW. Bijgevolg worden voor de dimensionering van de bodembescherming enkel de maatgevende stroomsnelheden bij een bodempeil +5.50 mTAW beschouwd.

Tabel 16 – Stroomsnelheid aan de bodem voor raai 3a, 3b, 4a, 4b, 5 en 6 in de normale toestand.

Raai nr.	Bodempeil afwaarts +5.50 mTAW			Bodempeil afwaarts +5.21 mTAW		
	Bodempeil	Waterpeil	Stroomsnelheid	Bodempeil	Waterpeil	Stroomsnelheid
	mTAW	mTAW	m/s	mTAW	mTAW	m/s
3a	+5.50	+7.61	-	+5.21	+7.61	-
3b	+5.50	+7.61	-	+5.21	+7.61	-
4	+5.50	+7.61	7.59	+5.21	+7.61	2.95
5	+5.50	+7.61	2.22	+5.21	+7.61	1.35
6	+5.50	+7.61	1.63	+5.21	+7.61	1.41

- = geen metingen van stroomsnelheid beschikbaar voor deze locatie.

5.1.3 Wasconditie

Uit hoofdstuk 4 volgt dat met het MIKE11-model van WL volgende simulaties zijn uitgevoerd:

1. Was november 2010
2. Was met terugkeerperiode 10 jaar
3. Was met terugkeerperiode 100 jaar
4. Was met terugkeerperiode 500 jaar
5. Was met terugkeerperiode 1000 jaar

Voor al deze condities geven Tabel 29 (was november 2010), Tabel 30 (was T10 en T100), Tabel 31 (was T500 en T1000) in Bijlage 1 de berekende sectiegemiddelde stroomsnelheid zowel voor de toestand met 2 stuwen in gebruik als voor de toestand met 1 stuw in gebruik bij beide beschouwde bodempeilen van het afwaarts pand.

Voor de toestand met slechts 1 stuw in gebruik, zal zich afwaarts van de stuwen een uitspreiding van de stroming voordoen tot de volledige breedte van het afwaarts pand. In Hunt & Brunner (1995) wordt voor de expansie van de stroming afwaarts van een contractie een maximale waarde van de expansieverhouding vermeld van 4:1. Bij 1 stuw in gebruik bedraagt de breedte van de stroming ter plaatse van de stuwen 7 m. Hierbij vindt geen stroming plaats in ca. 8 m van de breedte van het dwarsprofiel. Het verwijden van de stroming tot de volledige breedte doet zich bij een expansieverhouding 4:1 bijgevolg voor over een afstand van ca. 32 m afwaarts van de bouwkuip van de nieuwe stuwen of ca. 40 m afwaarts van de as van de stuwen.

Bijgevolg is voor de berekening van de sectiegemiddelde stroomsnelheid voor de toestand met 1 stuw in gebruik conservatief verondersteld dat de breedte van de stroming voor raai 3a/3b, raai 4, raai 5 en raai 6 de halve breedte van de raai bedraagt. Voor raai 7, raai 8 en raai 9 wordt de volledige breedte van het dwarsprofiel beschouwd.

Daarnaast wordt ook opgemerkt dat voor elke raai de natte sectie berekend is als de breedte van het dwarsprofiel vermenigvuldigd met de waterdiepte. Er is dus geen rekening gehouden met eventuele schuine taludhellingen van de oevers.

In Tabel 17 is voor de beide beschouwde bodemhoogtes in het afwaarts pand voor elk beschouwd dwarsprofiel en voor elke beschouwde wasconditie de maximale waarde van de sectiegemiddelde stroomsnelheid gegeven.

Uit Tabel 17 volgt vooreerst dat voor raaien 3, 4, 5 en 6 de toestand met 1 stuw in gebruik de meest maatgevende conditie is. Voor de overige raaien is dit de toestand met 2 stuwen in gebruik. Daarnaast volgt uit de tabel ook dat de waterpeilen en de berekende stroomsnelheid aan de bodem voor de was van november 2010 beperkt lager zijn dan deze van de was met terugkeerperiode 500 jaar en iets hoger dan deze van de was met terugkeerperiode 100 jaar. Bijgevolg wordt de was van november 2010 niet meer beschouwd bij de dimensionering van de bodembescherming en wordt de dimensionering van de bodembescherming uitgevoerd voor de was met terugkeerperiode 10 jaar, 100 jaar, 500 jaar en 1000 jaar.

Tabel 17 – Maximale waarde van de sectiegemiddelde stroomsnelheden voor gedefinieerde raaien bij wascondities.

Raai nr.	Bodem-peil	Aantal stuwen in gebruik	November 2010		T10		T100		T500		T1000	
			Water-peil	Stroom-snelheid	Water-peil	Stroom-snelheid	Water-peil	Stroom-snelheid	Water-peil	Stroom-snelheid	Water-peil	Stroom-snelheid
1	6.37	2 stuwen	10.49	1.09	10.04	0.76	10.32	0.98	10.59	1.12	10.73	1.20
2a	6.37	1 stuw	11.09	3.03	10.08	2.53	10.65	2.74	11.26	3.10	11.49	3.19
2b	6.37	1 stuw	11.09	3.03	10.08	2.53	10.65	2.74	11.26	3.10	11.49	3.19
3a	5.21	1 stuw	10.38	2.77	9.65	2.11	10.14	2.38	10.49	2.87	10.62	3.02
	5.50	1 stuw	10.38	2.93	9.65	2.26	10.14	2.53	10.49	3.04	10.62	3.19
3b	5.21	1 stuw	10.38	2.77	9.65	2.11	10.14	2.38	10.49	2.87	10.62	3.02
	5.50	1 stuw	10.38	2.93	9.65	2.26	10.14	2.53	10.49	3.04	10.62	3.19
4	5.21	1 stuw	10.38	2.21	9.65	1.69	10.14	1.90	10.49	2.29	10.62	2.42
	5.50	1 stuw	10.38	2.35	9.65	1.81	10.14	2.02	10.49	2.43	10.62	2.55
5	5.21	1 stuw	10.38	2.02	9.65	1.54	10.14	1.74	10.49	2.09	10.62	2.20
	5.50	1 stuw	10.38	2.14	9.65	1.65	10.14	1.84	10.49	2.21	10.62	2.33
6	5.21	1 stuw	10.38	2.04	9.65	1.56	10.14	1.75	10.49	2.11	10.62	2.23
	5.50	1 stuw	10.38	2.16	9.65	1.67	10.14	1.86	10.49	2.24	10.62	2.35
7	5.21	2 stuwen	10.38	1.24	9.66	0.90	10.23	1.11	10.47	1.28	10.60	1.39
	5.50	2 stuwen	10.38	1.31	9.66	0.96	10.23	1.18	10.47	1.36	10.60	1.47
8	5.21	2 stuwen	10.38	1.20	9.66	0.87	10.23	1.07	10.47	1.24	10.60	1.34
	5.50	2 stuwen	10.38	1.27	9.66	0.93	10.23	1.13	10.47	1.31	10.60	1.42
9	5.21	2 stuwen	10.38	1.17	9.66	0.85	10.23	1.04	10.47	1.21	10.60	1.31
	5.50	2 stuwen	10.38	1.24	9.66	0.91	10.23	1.11	10.47	1.28	10.60	1.38
10	5.21	2 stuwen	10.38	0.97	9.66	0.71	10.23	0.87	10.47	1.01	10.60	1.09
	5.50	2 stuwen	10.38	1.03	9.66	0.76	10.23	0.92	10.47	1.07	10.60	1.15

5.2 Methodologie bepaling type bodembescherming

In paragraaf 5.1 is de hydraulische belasting op de bodem opwaarts en afwaarts van de nieuwe stuwen bepaald voor de normale toestand en bij wascondities. Aan de hand van deze berekende stroomsnelheden aan de bodem wordt de dimensionering van de bodembescherming uitgevoerd. Hierbij wordt initieel een bodembescherming uit breuksteen opwaarts en afwaarts van de nieuwe stuwen verondersteld. Indien een breuksteenbekleding niet voldoet om te weerstaan aan de hydraulische belasting op de bodem wordt in dit rapport breuksteen gepenetreerd met colloïdaal beton en een bodembescherming uit beton als alternatief type bodembescherming voorgesteld.

In paragraaf 5.2.1, 5.2.2 en paragraaf 5.2.3 worden de toegepaste formuleringen beschreven voor de bepaling van respectievelijk de breuksteendiameter, de dimensionering van gepenetreerde breuksteen en de dimensionering van een bodembescherming uit beton.

5.2.1 Breuksteenbekleding

Wat breuksteen betreft wordt de diameter van breuksteen berekend aan de hand van de volgende formuleringen:

1. De Shields-formulering aangepast voor stralen uit "Ontwerp van Schutsluizen" (Beem *et al.*, 2000), wanneer de stroomsnelheid nabij de bodem gekend is:

$$D_{n50} = \left[\frac{0.8}{\Delta h^{1/3}} \cdot \frac{(u_b(1 + 3r))^2}{2g} \right]^{3/2}$$

met:

– D_{n50}	Nominale breuksteendiameter	[m]
– Δ	Relatieve dichtheid van de stenen ($\Delta = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}$)	[-]
– ρ_s	Dichtheid breuksteen (= 2650 kg/m ³)	[kg/m ³]
– ρ_w	Dichtheid water (= 1000 kg/m ³)	[kg/m ³]
– u_b	Stroomsnelheid boven de bodem	[m/s]
– h	Waterdiepte	[m]
– r	turbulentie-intensiteit	[-]
– g	Valversnelling (= 9.81 m/s ²)	[m/s ²]

2. De formulering volgens Pilarczyk (Pilarczyk, 1990, 1998) wanneer een dieptegemiddelde stroomsnelheid gekend is:

$$\Delta D_{n50} = 0.035 \frac{\Phi}{\Psi} \frac{K_T K_H}{K_S} \frac{u_{cr}^2}{2g}$$

met:

– D_{n50}	Nominale breuksteendiameter	[m]
– Δ	Relatieve dichtheid van de stenen ($\Delta = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}$)	[-]
– ρ_s	Dichtheid breuksteen (= 2650 kg/m ³)	[kg/m ³]
– ρ_w	Dichtheid water (= 1000 kg/m ³)	[kg/m ³]
– K_T	Turbulentiefactor	[-]
	Waarden: 1.0	Normale turbulentie
	1.5	Verhoogde turbulentie
	2.0	Hevige turbulentie (watersprong)
	3.0 à 4.0	Schroefstraalstroming

– K_h	Diepte- (of snelheidsprofiel) factor	[-]
	$K_h = \left(\frac{h}{D_{n50}}\right)^{-0.2}$ <i>niet volledig ontwikkeld snelheidsprofiel</i>	
– K_s	Hellingfactor (= 1 voor vlakke bodem)	[-]
– Ψ	Kritische schuifspanningsparameter (= 0.035 voor breuksteen)	[-]
– Φ	Stabiliteitsfactor voor stroming (= 1.00)	[-]
– u_{cr}	Stroomsnelheid aan de bodem	[m/s]
– h	Waterdiepte	[m]
– g	Valversnelling (= 9.81 m/s ²)	[m/s ²]

Wat betreft de stabiliteitsfactor Φ beveelt het PIANC rapport 180 (MarCom Working Group 180, 2015) een waarde tussen 0.75 en 1.00 aan voor een continue breuksteenbekleding. In deze studie wordt voor deze factor de waarde 1.00 toegepast. Aangezien in deze studie voornamelijk sectiegemiddelde stroomsnelheden afwaarts van een stuw bij was beschouwd worden, wordt in de rest van dit rapport een waarde 1.5 voor de parameter K_T toegepast.

Aan de hand van deze formuleringen wordt de mediaan nominale diameter D_{n50} van de breuksteen berekend. Daarna wordt de mediaan nominale breuksteendiameter D_{n50} omgerekend naar een gemiddeld breuksteengewicht M_{50} ($M_{50} = \rho_s (D_{n50})^3$; met $\rho_s = 2650$ kg/m³). Op basis van het berekende gemiddeld breuksteengewicht wordt een breuksteensortering geselecteerd uit Tabel 18.

Tabel 18 – Beschouwde breuksteensorteringen

Sortering	D_{n50} [m]	M_{50} [kg]	Laagdikte [m]
32/90 mm	0.03 – 0.08	0.1 – 1.1	0.30
45/125 mm	0.04 – 0.11	0.1 – 3.1	0.30
63/180 mm	0.05 - 0.15	0.4 – 9.2	0.30
90/250 mm	0.08 – 0.21	1.1 – 24.5	0.42
45/180 mm	0.04 – 0.15	0.1 – 9.2	0.30
90/180 mm	0.08 – 0.15	1.1 – 9.2	0.30
5 – 40 kg	0.17 – 0.21	14 – 28	0.42
10 – 60 kg	0.21 – 0.26	27 – 47	0.52
15 -120 kg	0.26 – 0.31	45 - 78	0.62
40 – 200 kg	0.32 – 0.37	101 – 152	0.74
60 – 300 kg	0.38 – 0.43	149 – 236	0.86
15 – 300 kg	0.30 – 0.43	70 – 211	0.86

Bron: NBN EN 13383 (BIN, 2002);

M_{50} : Mediaan breuksteengewicht; D_{n50} : Mediaan breuksteendiameter

Bij deze breuksteensorteringen moet het volgende opgemerkt worden:

- De breuksteensorteringen uit het standaardbestek 260 voor de waterbouw zijn dezelfde als de lichte sorteringen vermeld in de norm voor waterbouwsteen NBN EN 13383 (BIN, 2002). Aan de norm voor waterbouwsteen NBN EN 13383 zal in de toekomst de breuksteensortering 15 – 120 kg ($45 \text{ kg} < M_{50} < 78 \text{ kg}$) toegevoegd worden. Waar nodig zal ook deze verdeling in deze studie reeds toegepast worden. De breuksteensortering uit Tabel 18 worden gekarakteriseerd door een

gemiddeld breuksteengewicht. Om de laagdikte te bepalen, is dit gemiddeld breuksteengewicht omgerekend naar de bijbehorende gemiddelde breuksteendiameter.

- De norm voor waterbouwsteen NBN EN 13383 vermeldt een aantal lichtere breuksteensorteringen dan 5 – 40 kg, dewelke niet in het standaardbestek 260 voor de waterbouw vermeld zijn. Deze zijn ook toegevoegd in Tabel 18. Daarnaast vermeldt de norm voor waterbouwsteen NBN EN 13383 dat de breuksteensortering 45/180 mm een speciale sortering met een brede verdeling is en dat de breuksteensortering 90/180 mm enkel toegepast wordt voor schanskorven. Deze (speciale) sorteringen (grijs gearceerd in Tabel 18) worden in deze studie niet beschouwd.
- Voor elke sortering wordt in Tabel 18 een laagdikte van de breuksteensortering vermeld. Deze is berekend als het maximum van de volgende 3 voorwaarden (CIRIA; CUR, 2007; De Rouck, s.d.):

$$t = 1.25 D_{n50}$$

$$t = n \cdot k_t \cdot D_{n50}$$

$$t \geq 0.30$$

met:

– t	Theoretisch orthogonale laagdikte (laagdikte gemeten loodrecht op de bodem)	[m]
– D_{n50}	Mediaan nominale breuksteendiameter	[m]
– n	Aantal lagen (n = 2, De Rouck (n.d.))	[-]
– k_t	Laagdiktecoëfficiënt ($k_t = 1.00$)	[-]

Bij de berekening van de laagdikte moet het volgende opgemerkt worden:

- Voor de diameter D_{n50} wordt de maximale D_{n50} van de breuksteensortering beschouwd.
- De 3^e voorwaarde wordt enkel vermeld in De Rouck (n.d.) verwijzend naar de vorige editie van de Rock Manual (CIRIA; CUR, 1991). De Rouck (n.d.) vermeldt echter, om constructieve redenen, voor rivieren een minimale laagdikte van 0.50 m. In deze studie is een minimale laagdikte van 0.30 m gebruikt.
- De Rouck (n.d.) vermeldt dat voor rivieren “a standard double layer thickness” wordt toegepast. Dit betekent dat de laagdikte van de breuksteen standaard gelijk genomen wordt aan 2 maal de nominale breuksteendiameter ($n=2$).
- In De Rouck (n.d.) worden voor de laagdiktecoëfficiënt k_t bij een standaarduitvoering in één laag, waarvan de laagdikte gelijk is aan 2 maal de nominale diameter, waarden tussen 0.87 en 0.96 vermeld. In deze studie zal voor k_t , als conservatieve benadering, de waarde 1.00 beschouwd worden.

5.2.2 Gepenetreerde breuksteen

Door het toepassen van een grouting wordt de stabiliteit van losse breuksteen onder invloed van stroming vergroot. EAU 2004 (Members of the Committee for Waterfront Structures, 2006) vermeldt, verwijzend naar Römisch (2000), dat partieel gegroute stortsteen stabiel blijft tot stroomsnelheden van 6 à 8 m/s.

Aangezien de auteurs van dit rapport geen formules of aanbevelingen bekend zijn voor de bepaling van de breuksteendiameter die bij grouting dient toegepast te worden, worden hiervoor de twee kleinste breuksteensorteringen uit standaardbestek 260 voor de waterbouw beschouwd. Tabel 19 geeft een overzicht van het mediaan breuksteengewicht M_{50} voor deze sorteringen. Op basis hiervan is de mediaan breuksteendiameter D_{n50} en de minimale laagdikte voor het aanbrengen van deze sortering berekend en vermeld in de laatste kolom van de tabel.

Tabel 19 – Breuksteensortering voor grouting.

Sortering	M ₅₀ [kg]	D _{n50} [m]	Laagdikte [m]
5 – 40 kg	14 - 28	0.17-0.22	0.44 m
10 – 60 kg	27 - 47	0.22-0.26	0.52 m

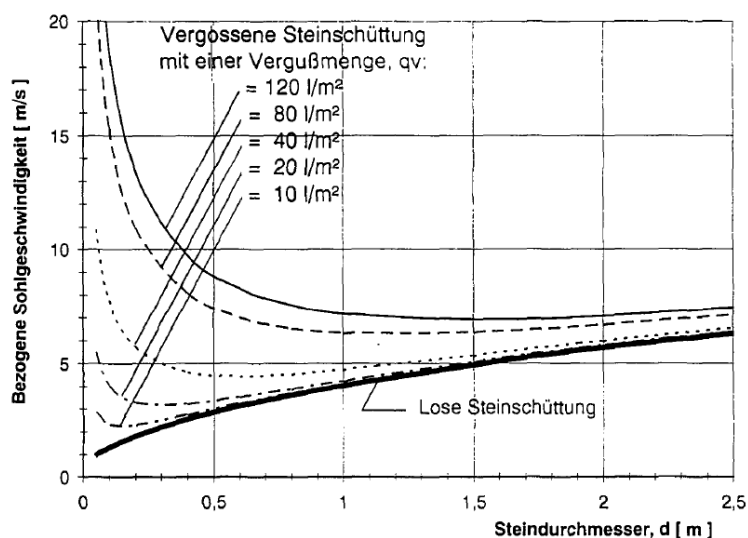
Het standaardbestek 260 voor de waterbouw voorziet twee soorten van grouting:

- Penetratie met gietasfalt of asfaltmastiek.
- Penetratie met colloïdaal beton.

Hierbij wordt opgemerkt dat in de praktijk penetratie met gietasfalt en asfaltmastiek voornamelijk bij uitvoering boven water toegepast wordt en dat penetratie met colloïdaal beton vooral voor onderwatertoepassingen toegepast wordt. Aangezien de bodembescherming onder water uitgevoerd zal worden, wordt voor de dimensionering enkel penetratie met colloïdaal beton beschouwd.

Figuur 24 uit Römisch (2000) geeft het verband tussen de maximaal toelaatbare stroomsnelheid boven (met beton) gepenetreerde breuksteen en de breuksteendiameter.

Figuur 24 – Verband tussen maximaal toegelaten stroomsnelheid en breuksteendiameter voor (met beton) gepenetreerde breuksteen



Bron: Römisch (2000).

Uit Figuur 24 volgt dat breuksteen met diameters tussen 0.20 m en 0.30 m gepenetreerd met 150 l/m² kan weerstaan aan stroomsnelheden hoger dan 10 m/s. Römisch (2000) merkt hierbij wel op dat de weerstand van gepenetreerde breuksteen tegen stroomsnelheden tot 6 à 8 m/s bewezen is uit proeven en metingen, maar dat de toelaatbare stroomsnelheden hoger dan 6 à 8 m/s volgen uit theoretische berekeningen.

Met betrekking tot de hoeveelheid beton voor penetratie moet het volgende opgemerkt worden:

- Het standaardbestek 260 voor de waterbouw voorziet enkel in volledige penetratie van de breuksteen en vermeldt hiervoor een hoeveelheid van 150 l/m² beton.
- In Nederland (TAW, 2002) wordt een onderscheid gemaakt tussen volledige penetratie en patroonpenetratie (stippenpenetratie of strokenpenetratie). Hierbij worden geen hoeveelheden toe te passen penetratiemateriaal vermeld. Persoonlijke communicatie met Nederlandse experts

leert dat bij volledige penetratie geen hoeveelheden penetratiemateriaal voorgeschreven worden in het bestek, maar dat voldoende penetratiemateriaal dient gebruikt te worden zodat de breuksteen volledig gepenetreerd wordt. Bij dijken (aangelegd boven water) wordt dit gecontroleerd door boorkernen te nemen en deze te onderzoeken op de vullingsgraad van de boorkern.

- In de Duitse richtlijnen (Bundesanstalt für Wasserbau, 2008) wordt een onderscheid gemaakt tussen volledige en gedeeltelijke penetratie. Bij volledige penetratie wordt de hoeveelheid beton berekend aan de hand van volgende formulering:

$$V_{\text{penetratie}} = 10 n d_D$$

met:

– $V_{\text{penetratie}}$	Hoeveelheid penetratiemateriaal	[l/m ²]
– n	Poriëngehalte	[%]
– d_D	Laagdikte bodembescherming	[m]

- Persoonlijke communicatie met de Bundesanstalt für Wasserbau (Dr.-ing. Jan Kayser, Afdeling Geotechniek van BAW), leert dat naast kaaimuren volgende penetratie in de praktijk wordt toegepast:
 - In een zone met een breedte van 1.0 m naast de kaaimuur wordt een volledige penetratie toegepast.
 - In het overige gedeelte van de bodembescherming (tot en met een breedte gelijk aan 1 maal de scheepsbreedte) wordt een gedeeltelijke penetratie toegepast met een hoeveelheid beton van 70 à 90 l/m².
 - Daarnaast wordt nog een overgangszone met een breedte van 3.0 à 5.0 m voorzien waarin de hoeveelheid penetratie afneemt van 60 l/m² over 30 l/m² naar 0 l/m².

Bij het ontwerp van de bodembescherming voor de sluis te Sint-Baafs-Vijve (Verelst *et al.*, 2016) is beslist om bij gepenetreerde breuksteen enkel een volledige penetratie toe te laten. Dit wordt ook in deze studie toegepast. Hierbij dient een voldoende hoeveelheid beton voorzien te worden zodat een volledige penetratie bereikt wordt. Dit kan bijgevolg meer bedragen dan de 150 l/m², dewelke in het standaardbestek 260 voor de waterbouw vermeld wordt. Uit ervaringen met penetratie van breuksteen bij afdeling Bovenschelde van de Vlaamse Waterweg nv blijkt namelijk dat een hoeveelheid van 200 l/m² nodig is voor het volledig penetreren van een breuksteen met sortering 5 - 40 kg.

5.2.3 Bodembescherming uit beton

Algemeen kan de dikte van de bodembescherming uit beton berekend worden door het eigengewicht van het beton gelijk te stellen aan de liftkracht ten gevolge van de stroomsnelheid boven de bodembescherming:

$$\frac{\rho_w C_L u_b^2}{2} = (\rho_s - \rho_w) g d$$

Of:

$$d = \frac{C_L u_b^2}{2 g \Delta}$$

met:

– u_b	Stroomsnelheid aan de bodem	[m/s]
– C_L	Liftcoëfficiënt	[-]
– ρ_s	Dichtheid breuksteen (= 2400 kg/m ³)	[kg/m ³]
– ρ_w	Dichtheid water (= 1000 kg/m ³)	[kg/m ³]
– Δ	Relatieve dichtheid van de stenen ($\Delta = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}$)	[-]
– g	Valversnelling (= 9.81 m/s ²)	[m/s ²]
– d	Dikte bodembescherming uit beton	[m]

De moeilijkheid bij het gebruik van deze formulering bestaat in de bepaling van de liftcoëfficiënt voor een bodembescherping uit beton.

Hawkswood *et al.* (2014) vermelden dat de dikte van de bodembescherping uit colloïdaal beton bepaald kan worden aan de hand van de formuleringen voor blokkenmatten indien de afmetingen van de betonplaat groter zijn dan 45 maal de dikte van de bodembescherping die volgt uit de dimensionering of groter dan de diameter van de schroef (bij belasting door scheepvaart). De bekomen diktes dienen wel nog verhoogd te worden om oneffenheden bij de uitvoering van de betonplaat in rekening te brengen.

In deze studie wordt de dimensionering van de bodembescherping uit beton uitgevoerd aan de hand van volgende formuleringen voor de dimensionering van blokkenmatten:

- a. De formulering voor de bepaling van de dikte van blokkenmatten volgens Raes *et al.* (1996):

De dikte wordt berekend aan de hand van volgende formulering

$$d = \frac{u_b^2}{g\Delta\theta^2}$$

met:

– d	Dikte bodembescherping	[m]
– u_b	Stroomsnelheid aan de bodem	[m/s]
– Δ	Relatieve dichtheid van de stenen ($\Delta = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}$)	[-]
– ρ_s	Dichtheid breuksteen (= 2400 kg/m ³)	[kg/m ³]
– ρ_w	Dichtheid water (= 1000 kg/m ³)	[kg/m ³]
– g	Valversnelling (= 9.81 m/s ²)	[m/s ²]
– θ	Parameter ($= \sqrt{\frac{2}{C_L}}$)	[-]
	Blokkenmatten: $\theta = 2.0$ doorgaande delen en	
	$\theta = 1.0$ hoeken en overgangen	
– C_L	Liftcoëfficiënt	[-]

In feite komt deze formulering neer op het oplossen van de vergelijking waarbij de lift ten gevolge van de stroomsnelheid aan de bodem gelijk gesteld wordt aan het eigengewicht van de bodembescherping en waarbij een liftcoëfficiënt van 0.5 beschouwd wordt voor doorgaande delen en een liftcoëfficiënt van 1.0 voor hoeken en overgangen.

PIANC rapport 180 (MarCom Working Group 180, 2015) vermeldt dat om een zekere veiligheid in te bouwen de coëfficiënt C_L kan vermenigvuldigd worden met een veiligheidsfactor S_f (= 1.0 à 1.5). Aangezien bij de dimensionering van breuksteen geen veiligheidsfactor wordt in rekening gebracht, wordt dit in dit rapport ook niet toegepast bij de dimensionering van de bodembescherping uit beton.

- b. De formulering voor de bepaling van de dikte van blokkenmatten volgens Pilarczyk (Beem *et al.*, 2000b; Pilarczyk, 1998; Pilarczyk, 1990).

$$\Delta d = 0.035 \frac{\phi}{\psi} \frac{K_T K_H}{K_S} \frac{u_b^2}{2g}$$

met:

– d	Dikte bodembescherping	[m]
– Δ	Relatieve dichtheid van de stenen ($\Delta = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}$)	[-]
– ρ_s	Dichtheid breuksteen (= 2400 kg/m ³)	[kg/m ³]
– ρ_w	Dichtheid water (= 1000 kg/m ³)	[kg/m ³]
– K_T	Turbulentiefactor	[-]
	Waarden: 1.0 Normale turbulentie	
	1.5 Verhoogde turbulentie	

	2.0	Hevige turbulentie (watersprong)	
	3.0 à 4.0	Schroefstraalstroming	
– K_h	Diepte- (of snelheidsprofiel) factor $\left(1 + \frac{h}{d}\right)^{-0.2}$		[-]
– K_s	Hellingfactor (= 1 voor vlakke bodem)		[-]
– ψ	Kritische schuifspanningsparameter (= 0.07)		[-]
– ϕ	Stabiliteitsfactor voor stroming		[-]
– u_b	Stroomsnelheid aan de bodem		[m/s]
– h	Waterdiepte		[m]
– g	Valversnelling (= 9.81 m/s ²)		[m/s ²]

Raes *et al.* (1996) vermeldt dat voor de dimensionering van blokkenmatten om praktische redenen in de formulering volgens Pilarczyk de parameter $\phi = 0.50$ dient beschouwd te worden voor doorgaande delen en $\phi = 1.00$ voor hoeken en overgangen, in plaats van $\phi = 0.50$ voor doorgaande delen en $\phi = 0.75$ voor hoeken en overgangen uit de originele formulering volgens Pilarczyk (Pilarczyk, 1998). PIANC rapport 180 (MarCom Working Group 180, 2015) vermeldt dat $\phi = 0.50$ à 0.75 dient beschouwd te worden voor doorgaande delen en $\phi = 0.75$ à 1.00 voor hoeken en overgangen. In dit rapport worden conservatief de waarde $\phi = 0.75$ beschouwd voor doorgaande delen en $\phi = 1.00$ voor hoeken en overgangen.

5.3 Dimensionering bodembescherming

Zoals vermeld in paragraaf 5.2 wordt bij de dimensionering van de bodembescherming voor alle gedefinieerde raaien eerst breuksteen als bodembescherming verondersteld. Voor de normale toestand wordt de bepaling van de breuksteensortering en de bepaling van de dikte van beton uitgevoerd voor de stroomsnelheden aan de bodem berekend bij het bodempeil +5.50 mTAW, aangezien deze stroomsnelheden maatgevend zijn. Bij was worden zowel de stroomsnelheden aan de bodem berekend bij een bodempeil +5.50 mTAW als deze berekend bij een bodempeil +5.21 mTAW beschouwd. Tabel 32 (normale toestand) en Tabel 33 (wascondities) in Bijlage 1 geven de resultaten van de bepaling van de breuksteensortering.

Tabel 20 geeft een overzicht van de maximale waarde van de berekende breuksteensortering voor raai 4, raai 5 en raai 6 in de normale toestand en Tabel 21 voor alle gedefinieerde raaien bij wascondities. Uit Tabel 20 en Tabel 21 volgt dat voor raai 4 geen breuksteen mogelijk is. Om die reden is voor deze raai ook de dimensionering van colloïdaal beton uitgevoerd. De resultaten hiervan zijn gegeven in Tabel 22 (normale condities) en Tabel 23 (wascondities). Als alternatief voor colloïdaal beton kan voor raai 4 ook gepenetreerde breuksteen beschouwd worden (bijvoorbeeld een breuksteensortering 10-60 kg gepenetreerd met beton).

Tabel 20 – Resultaten bepaling breuksteensortering voor raai 4a, 4b, 5 en 6 in de normale toestand

Raai nr.	Breuksteen-sortering
4	*
5	5 – 40 kg
6	45/125 mm

* = geen breuksteen mogelijk

Tabel 21 – Resultaten bepaling breuksteensortering voor raaien 1, 2a, 2b, 4, 5, 6, 7, 8, 9 en 10 bij wascondities

Raai nr.	Bodempeil	T10	T100	T500	T1000
1	+6.37 mTAW	32/90 mm	32/90 mm	32/90 mm	32/90 mm
2a/2b	+6.37 mTAW	5 – 40 kg	5 – 40 kg	10 - 60 kg	10 - 60 kg
4	+5.21 mTAW	32/90 mm	32/90 mm	63/180 mm	63/180 mm
	+5.50 mTAW	32/90 mm	45/125 mm	63/180 mm	63/180 mm
5	+5.21 mTAW	32/90 mm	32/90 mm	45/125 mm	63/180 mm
	+5.50 mTAW	32/90 mm	32/90 mm	45/125 mm	63/180 mm
6	+5.21 mTAW	32/90 mm	32/90 mm	45/125 mm	63/180 mm
	+5.50 mTAW	32/90 mm	32/90 mm	63/180 mm	90/250 mm
7	+5.21 mTAW	32/90 mm	32/90 mm	32/90 mm	32/90 mm
	+5.50 mTAW	32/90 mm	32/90 mm	32/90 mm	32/90 mm
8	+5.21 mTAW	32/90 mm	32/90 mm	32/90 mm	32/90 mm
	+5.50 mTAW	32/90 mm	32/90 mm	32/90 mm	32/90 mm
9	+5.21 mTAW	32/90 mm	32/90 mm	32/90 mm	32/90 mm
	+5.50 mTAW	32/90 mm	32/90 mm	32/90 mm	32/90 mm
10	+5.21 mTAW	32/90 mm	32/90 mm	32/90 mm	32/90 mm
	+5.50 mTAW	32/90 mm	32/90 mm	32/90 mm	32/90 mm

Tabel 22 – Dikte beton (in m) voor raai 4 in de normale toestand.

Raai nr.	Bodempeil	Raes et al. (1996)	Pilarczyk
4	+5.50 mTAW	1.05	1.02

Tabel 23 – Dikte beton (in m) voor raai 4 bij wascondities.

Raai nr.	Bodempeil	T10		T100		T500		T1000	
		Raes et al. (1996)	Pilarczyk	Raes et al. (1996)	Pilarczyk	Raes et al. (1996)	Pilarczyk	Raes et al. (1996)	Pilarczyk
4	+5.21 mTAW	0.05	0.02	0.07	0.02	0.10	0.04	0.11	0.04
	+5.50 mTAW	0.06	0.02	0.07	0.03	0.11	0.05	0.12	0.05

Op basis van de bovenstaande resultaten wordt ervoor gekozen om opwaarts van de nieuwe stuwen een breuksteensortering 10-60 kg te voorzien tussen raai 1 en raai 2. Afwaarts van de nieuwe stuwen is tussen raai 3a/3b en raai 5 geen breuksteen mogelijk. In deze zone kan een bodembescherming uit colloïdaal beton met een dikte van 1.10 m worden voorzien of een bodembescherming uit breuksteen gepenetreerd met colloïdaal beton. Voor de bodembescherming uit breuksteen gepenetreerd met colloïdaal beton wordt een breuksteensortering 10-60 kg beschouwd. Deze dikte wordt beschouwd, aangezien lift van stroming met hoge stroomsnelheden op de bodembescherming in deze zone een belangrijke belasting is. Een bodembescherming met een grotere laagdikte kan hieraan beter weerstaan. Tussen raai 5 en 6 volgt uit Tabel 20 een breuksteensortering 5-40 kg als bodembescherming en tussen raai 6 en raai 10 een breuksteensortering 45/125 mm. Tabel 24 geeft een samenvatting van dit voorstel van de bodembescherming bij een bodempeil +5.21 mTAW of +5.50 mTAW afwaarts van de nieuwe stuwen. Hierbij wordt opgemerkt dat voor de wascondities telkens conservatief de maximale bodembescherming wordt beschouwd, i.e. bij een terugkeerperiode van 1000 jaar. Het staat de opdrachtgever altijd vrij om voor de wasconditie altijd een lagere terugkeerperiode te beschouwen voor de bepaling van de bodembescherming.

Tabel 24 – Resultaat dimensionering bodembescherming.

Raai begin	Raai einde	Bodempeil	Bodembescherming	Laagdikte
1	2a/2b	+6.37 mTAW	Breuksteen 10-60 kg	0.52 m
2a/2b	3a/3b	Bouwkuip nieuwe stuwen (beton)		
3a/3b	5	+5.50 mTAW of	Beton	1.10 m
		+5.21 mTAW	Breuksteen 10-60 kg gepenetreerd met beton	0.52 m
5	6	+5.50 mTAW of +5.21 mTAW	Breuksteen 5-40 kg	0.42 m
6	10	+5.50 mTAW of +5.21 mTAW	Breuksteen 45/125 mm	0.30 m

6 Conclusies

Voor de vernieuwing van het stuwsluiscomplex te Denderleeuw werkt het studiebureau Arcadis in opdracht van De Vlaamse Waterweg nv afdeling Bovenschelde (aBS) aan het voorontwerp van de nieuwe stuwen te Denderleeuw. In dit voorontwerp worden de nieuwe stuwen van het type balgstuwen ingeplant in de huidige stuwgeul ca. 55 m opwaarts van de huidige stuwen. De vernieuwing van de bestaande sluis wordt als 'Design and Build'-project op de markt gezet. Door aBS wordt in het kader hiervan aan het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) gevraagd om de dimensionering van de bodembescherming op- en afwaarts van de nieuwe stuwen uit te voeren.

Vooraleer de dimensionering van de erosiebescherming opwaarts en afwaarts van de nieuwe stuwen uit te voeren wordt de hydraulische belasting op de bodem bepaald. De hydraulische belasting bestaat onder andere uit de bodemnabije stroming ten gevolge van de werking van de stuwen. De nieuwe stuwen betreffen balgstuwen, waardoor er enkel stroming door overstorting over de stuwen mogelijk is. Bij overstorting kan afwaarts van de nieuwe stuwen een watersprong gevormd worden, eventueel voorafgegaan door een zone met schietend water en hoge stroomsnelheden. Voor de bepaling van de hydraulische belasting op de bodem is daarom eerst een schaalmodelonderzoek uitgevoerd naar de energiedissipatie afwaarts van de nieuwe stuwen. Hierbij is ook nagegaan welke maatregelen, zoals een verdieping van het bodempeil afwaarts of de toepassing van een woelkom afwaarts van de nieuwe stuwen, kunnen genomen worden om ervoor te zorgen dat de watersprong zich voordoet onmiddellijk afwaarts van vallende straal. Daarnaast is ook de stroomsnelheid aan de bodem opgemeten afwaarts van de nieuwe stuwen.

Paragraaf 6.1 vermeldt de besluiten met betrekking tot het schaalmodelonderzoek naar de energiedissipatie afwaarts van de nieuwe stuwen, terwijl de besluiten met betrekking tot de dimensionering van de bodembescherming opwaarts en afwaarts van de nieuwe stuwen beschreven zijn in paragraaf 6.2.

6.1 Energiedissipatie afwaarts van de nieuwe stuwen

De schaalmodelproeven met betrekking tot de energiedissipatie afwaarts van de nieuwe stuwen zijn uitgevoerd voor drie hydraulische condities:

1. Conditie 1: Een verhoogde afvoer van 50 m³/s bij behoud van het streefpeil in het opwaarts (+10.37 mTAW) en het afwaarts pand (+7.61 mTAW).
2. Conditie 2: Een debiet van 115 m³/s, gemeten tijdens de was van november 2010, bij behoud van het streefpeil in het opwaarts en het afwaarts pand.
3. Conditie 3: Een debiet van 115 m³/s bij de werkelijke (verhoogde) waterpeilen, dewelke tijdens de was van november 2010 werden opgemeten.

Voor elk van deze condities werd enerzijds een bodemverlaging afwaarts van de nieuwe stuwen en anderzijds de aanwezigheid van een woelkom afwaarts van de nieuwe stuwen beproefd als maatregel om ervoor te zorgen dat de watersprong zich voordoet juist afwaarts van de vallende straal. Uit deze schaalmodelproeven wordt het volgende besloten:

1. Bodemverlaging afwaarts nieuwe stuwen

Proeven zijn uitgevoerd met een bodempeil afwaarts gelijk aan +5.21 mTAW en een bodempeil afwaarts gelijk aan +4.28 mTAW. Voor conditie 1 is één proef uitgevoerd met het huidige bodempeil afwaarts van +5.50 mTAW.

Bij de meest extreme conditie, i.e. conditie 2, volgt zowel uit de proeven met bodemverlaging tot +5.21 mTAW als uit de proeven met bodemverlaging tot +4.28 mTAW, dat zich afwaarts van de nieuwe stuwen een superkritische stroming voordoet. Deze superkritische stroming wordt gekenmerkt door hoge stroomsnelheden aan de bodem tot 8 m/s en het optreden van een watersprong op een locatie waar zich een verwijding van het dwarsprofiel voordoet. Door in de proeven het afwaarts waterpeil geleidelijk te verhogen werd vastgesteld dat bij een overstortdebiet van 115 m³/s een minimale waterdiepte van 3.55 m nodig is om er voor te zorgen dat de watersprong zich altijd juist afwaarts van de vallende staal voordoet. Bij streefpeil in het afwaarts pand betekent dit dat een bodemverlaging tot minimaal +4.06 mTAW benodigd is. Voor deze conditie werd het einde van de watersprong waargenomen op een afstand van circa 22 tot 32 meter gerekend uit de as van de stuwen.

Zowel bij conditie 1, als bij conditie 3 doet de watersprong zich bij de proef met bodemverlaging tot +5.21 mTAW juist afwaarts voor van de vallende straal. Het einde van de watersprong bevindt zich voor conditie 1 op ca. 18 tot 27 m afwaarts van de as van de nieuwe stuwen en voor conditie 3 op ca. 23 à 31 m afwaarts van de as van de nieuwe stuwen. Voor conditie 1 is ook een proef uitgevoerd met het huidige bodempeil afwaarts +5.50 mTAW. Hieruit volgt dat tussen het einde van de vallende straal en het begin van de watersprong een zone (met lengte van 6 m) met hoge stroomsnelheden tot 8 m/s wordt waargenomen. De watersprong eindigt ca. 22 à 27 m afwaarts van de as van de nieuwe stuwen.

2. Woelkom afwaarts nieuwe stuwen

Proeven zijn uitgevoerd met een woelkom met lengte 14.9 m en een einddrempel met een hoogte gelijk aan 1.10 m. Wat het bodempeil van de woelkom betreft zijn zowel een bodempeil +4.50 mTAW als een bodempeil +5.30 mTAW beproefd. Afwaarts van de woelkom is een bodempeil beschouwd dat gelijk is aan het huidige bodempeil +5.50 mTAW.

Uit de proeven volgt dat de toepassing van een woelkom ervoor zorgt dat de watersprong zich voor alle condities juist afwaarts van de vallende straal voordoet. Bij conditie 2 worden afwaarts van de woelkom, bij beide bodempeilen van de woelkom, nog hoge stroomsnelheden waargenomen. Bij een bodempeil van de woelkom op +5.30 mTAW doet zich zelfs nog een superkritische stroming voor (met hoge stroomsnelheden aan de bodem), gevolgd door een tweede watersprong meer afwaarts op een locatie waar de natte sectie vergroot (door verbreding of verdieping). Bij conditie 1 en conditie 3 wordt voor de beide bodempeilen van de woelkom afwaarts van de woelkom een subkritische stroming opgemeten met relatief lage stroomsnelheden tussen 1.5 à 2.0 m/s. Bij een verlaging van het afwaarts peil naar +7.30 mTAW voor conditie 1 wordt bij de configuratie met woelkom met bodempeil op +4.50 mTAW een subkritische stroming afwaarts van de woelkom opgemeten, terwijl bij de configuratie met woelkom met bodempeil op +5.30 mTAW een superkritische stroming wordt opgemeten gevolgd door een tweede watersprong (ter plaatse van de verdieping na de inbouw van het schaalmodel in de stroomgoot).

Bij de flauwere helling 2:1 van de einddrempel van de woelkom doen zich afwaarts van de woelkom beperkt lagere stroomsnelheden voor dan bij de steilere helling 1:2 van de einddrempel. In vergelijking met de proeven zonder dissipatieblokken in de woelkom geeft de aanwezigheid van dissipatieblokken in de woelkom aanleiding tot een iets kortere watersprong en iets lagere stroomsnelheden aan de bodem afwaarts van de woelkom. Wel wordt opgemerkt dat de toepassing van dissipatieblokken mogelijk kan zorgen voor een verhoging van de mortaliteit bij stroomafwaartse migratie van vissen.

Algemeen kan uit de schaalmodelproeven besloten worden dat de verhouding tussen de afwaartse waterdiepte en het overstortdebiet over de stuwen bepalend is voor noodzaak en/of het effect van energiedissiperende maatregelen. Om die reden zijn na het uitvoeren van de schaalmodelproeven numerieke simulaties uitgevoerd met het MIKE11-model van de Dender voor wassen met een aantal maatgevende terugkeerperiodes. Uit deze numerieke simulaties bleek dat bij toepassen van een stuwregeling analoog aan deze van de huidige stuwen en bij de huidige afvoercapaciteit van de Dender, het afwaarts waterpeil reeds bij een debiet hoger dan circa 10-20 m³/s stijgt boven het streefpeil. Dit betekent dat scenario 2 uit de schaalmodelstudie in de praktijk niet zal voorkomen en dat maatregelen zoals afwaartse bodemverlaging of het toepassen van een woelkom in principe dus niet nodig zijn. Het behoud

van het huidige bodempeil van +5.50 mTAW afwaarts van de nieuwe stuwen is voldoende. Toch wordt geadviseerd om het afwaartse bodempeil te verlagen naar minimaal +5.21 mTAW, een peil gelijk aan het minimaal benodigde peil van de vaargeul afwaarts. Dit maakt het ontwerp van de stuwen namelijk iets robuuster met oog op eventuele toekomstige rivierverruiming in het afwaartse pand en/of optimalisatie van de stuwregeling. Tevens compenseert dit enigszins de afname van de waterdiepte met 0.56 m in de nieuwe situatie door het vervallen van het stuwsluiscomplex te Teralfene. Tenslotte brengt deze verlaging de afwaartse waterdiepte iets dichterbij de ontwerpdiepte van de andere stuwsluiscomplexen op de Dender (van minimaal circa 3 m afwaartse waterdiepte).

Bij een bodempeil van 5.21 mTAW werd het einde van de watersprong tijdens de schaalmodelproeven waargenomen op een maximale afstand van circa 23 tot 31 meter gerekend uit de as van de stuwen. Een verdieping van het afwaartse bodempeil tot +5.21 mTAW wordt daarom aanbevolen over een minimale afstand van 35 meter uit de stuwas.

6.2 Dimensionering van de bodembescherming opwaarts en afwaarts van de nieuwe stuwen.

Aan de hand van de resultaten van de schaalmodelproeven en de numerieke simulaties is de dimensionering van de bodembescherming uitgevoerd voor de volgende bodempeilen afwaarts:

- Huidig bodempeil afwaarts op +5.50 mTAW.
- Bodempeil afwaarts verlaagd tot +5.21 mTAW, gelijk aan het bodempeil van de vaargeul.

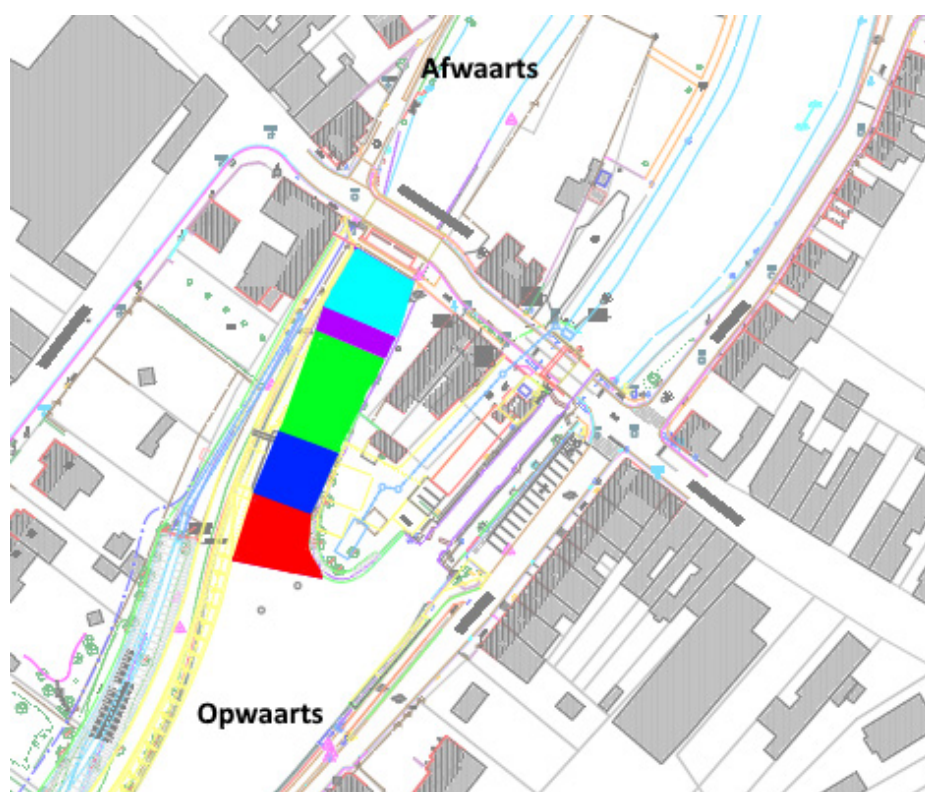
Voor deze beide afwaartse bodempeilen en een opwaarts bodempeil van +6.37 mTAW zijn de stroomsnelheden aan de bodem bepaald op basis van de uitgevoerde schaalmodelproeven voor de normale toestand en op basis van de waterstanden en debieten berekend met het MIKE11-model van WL voor een aantal wascondities. Daarna is de dimensionering van de bodembescherming opwaarts en afwaarts van de nieuwe stuwen uitgevoerd.

Het resultaat van de dimensionering van de bodembescherming is gegeven in Tabel 25. De verschillende zones zijn grafisch voor gesteld in Figuur 25.

Tabel 25 – Resultaat dimensionering bodembescherming opwaarts en afwaarts van de nieuwe stuwen

Begin zone	Einde zone	Bodempeil	Bodembescherming	Laagdikte
-22 m	-4 m	+6.37 mTAW	Breuksteen 10-60 kg	0.52 m
-4 m	8.1 m	Bouwkuip nieuwe stuwen (beton)		
8.1 m	30 m	+5.50 mTAW of +5.21 mTAW	Beton	1.10 m
			Breuksteen 10-60 kg gepenetreerd met beton	0.52 m
30 m	40 m	+5.50 mTAW of +5.21 mTAW	Breuksteen 5-40 kg	0.42 m
40 m	58 m	+5.50 mTAW of +5.21 mTAW	Breuksteen 45/125 mm	0.30 m

Figuur 25 – Locatie zones uit Tabel 25



Bij deze besluiten worden volgende opmerkingen/aanbevelingen geformuleerd:

- a) Bij de bepaling van de hydraulische belasting op de bodem en de dimensionering van de bodembescherming zijn een aantal conservatieve aannames gemaakt, voornamelijk met betrekking tot de optredende stroomsnelheden.
- b) Voor de zone tussen 40 m en 58 m afwaarts van de as van de nieuwe stuwen volgt uit Tabel 25 een zeer kleine bodembescherming. De opdrachtgever zou kunnen opteren om in deze zones geen bodembescherming aan te brengen of conservatief de bodembescherming van de zone tussen 30 m en 40 m afwaarts van de nieuwe stuwen doortrekken naar afwaarts. Ter plaatse van de brug over de afwaartse stuwgeul bevinden zich de huidige stuwen (2 stuwen met breedte 5.11 m en bodempeil +5.46 mTAW), dewelke zullen verwijderd worden. Om geen opstuwing in de afwaartse vaargeul te creëren zal bij de verwijdering van de stuwen ook de sectie moeten verruimd worden tot minimaal 14.0 m breedte (gelijk aan de breedte ter plaatse van de nieuwe stuwen), zoniet zullen ter plaatse van deze vernauwde sectie hoge stroomsnelheden voorkomen. Om die reden is het aanbevolen om ook opwaarts en afwaarts van de brug een zone met bodembescherming te voorzien. Afwaarts van de brug is vermoedelijk reeds een bodembescherming aanwezig, aangezien dit het stortebed van de huidige stuwen betreft.
- c) Bij gepenetreerde breuksteen dient een voldoende hoeveelheid colloïdaal beton toegepast te worden, zodat een volledige penetratie bekomen wordt. De benodigde hoeveelheid kan hierbij meer bedragen dan de 150 l/m² vermeld in het standaardbestek 260 voor de waterbouw. Uit ervaringen met penetratie van breuksteen bij de opdrachtgever blijkt namelijk dat een hoeveelheid van 200 l/m² nodig is voor het volledig penetreren van een breuksteen met sortering 5 - 40 kg.
- d) Voor de penetratie van breuksteen is in deze studie enkel colloïdaal beton voorgesteld, aangezien de penetratie in praktijk onder water zal aangebracht worden. Hierbij is penetratie met open colloïdaal beton en penetratie met gesloten colloïdaal beton mogelijk. Ervaring met penetratie van breuksteen met open colloïdaal beton in Duitsland (pers. comm. Bundesanstalt für Wasserbau)

leert dat deze breuksteenbekleding niet kan weerstaan aan hoge stroomsnelheden ten gevolge van scheepvaart. Om die reden wordt penetratie van breuksteen met open colloïdaal beton niet aangeraden.

- e) Algemeen is het een aanbeveling om in het bestek met betrekking tot de bouw van de stuw voldoende controles te voorzien met betrekking tot het uitvoeren van de bodembescherming, o.a. door het inzetten van duikers om de penetratie te controleren en eventueel door het registreren van de coördinaten van de kraan tijdens het aanbrengen van het colloïdaal beton met behulp van GPS. Daarnaast is het aanbevolen om na aanleg van de bodembescherming regelmatig een monitoring van de bodembescherming uit te voeren, zeker gezien de onzekerheden op de bepaling van de minimaal aan te brengen lengte van de bodembescherming opwaarts en afwaarts van een constructie.

7 Referenties

- Beem, R.C.A.; Boogaard, A.; Glerum, A.; de Graaf, M.A.; Henneberque, S.D.; Hiddinga, P.H.; Kranenburg, D.; van der Meer, M.T.J.; Nagtegaal, G.; Van der Paverd, M.; Smink, L.M.C.; Vrijburcht, A.; Weijers, J.** (2000). Ontwerp van schutsluizen: deel 2. Bouwdienst Rijkswaterstaat: Utrecht. ISBN 90-369-3306-4
- Bélanger, J.B.** (1828). Essai sur la Solution Numérique de quelques Problèmes Relatifs au Mouvement Permanent des Eaux Courantes.
- Belgisch Instituut voor Normalisatie (BIN).** (2002). NBN EN 13383-1. Waterbouwsteen – Deel 1: Specificatie.: Brussel, Belgium
- Bundesanstalt für Wasserbau.** (2008). Code of practice Use of Cementitious and Bituminous Materials for Grouting Armourstone on Waterways (MAV): Karlsruhe
- Chanson, H.** (2002). The hydraulics of stepped chutes and spillways. Swets & Zeitlinger: Lisse. ISBN 90-5809-352-2
- CIRIA; CUR.** (1991). Manual on the use of rock in coastal and shoreline engineering. *CUR-Publicatie*, 154: Gouda. ISBN 0-86017-326-7
- CIRIA; CUR.** (2007). Manual on the use of rock in hydraulic engineering (2nd edition)
- De Rouck, J.** (S.d.). Rivieren, kanalen en sluizen. Partim: rivieren en kanalen [CURSUS]. Universiteit Gent. Faculteit Ingenieurswetenschappen: Gent
- Hager, W.H.; Bremen, R.; Kawagoshi, N.** (1990). Classical hydraulic jump: length of roller. *J. Hydraul. Res.* 28(5): 591–608. doi:10.1080/00221689009499048
- Hunt, J.H.; Brunner, G.W.** (1995). Flow Transitions in bridge backwater analysis. US Army Corps of Engineers
- MarCom Working Group 180.** (2015). Guidelines for protecting berthing structures from scour caused by ships. *PIANC Report*. PIANC: Brussels. ISBN 978-2-87223-223-9
- Members of the Committee for Waterfront Structures.** (2006). Recommendations of the committee for waterfront structures harbours and waterways: EAU 2004. Ernst & Sohn: Berlin. ISBN 978-3-433-01666-4
- Peterka, A.J.** (1984). Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators. *Engineering monograph (Washington)*, 25. U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Reclamation: Washington
- Pilarczyk, K.W.** (1990). Proceedings of the short course on coastal protection, Delft University of Technology / 30 June-1 July 1990. Balkema: Rotterdam. ISBN 90-6191-127-3
- Pilarczyk, K.W.** (1998). Dikes and revetments: design, maintenance and safety assessment. Balkema: Rotterdam. ISBN 90-5410-455-4
- Raes, L.; Elskens, F.; Romisch, K.; Sas, M.** (1996). The effects of ship propellers on bottom velocities and on scour near berths and protection methods using thin flexible revetments, *in*: (1996). *11th International Harbour Congress, Antwerpen, June 17-21, 1996*. pp.433–442
- Rand, W.** (1955). Flow geometry at straight drop spillways. *Proc. Am. Soc. Civ. Eng.* 81: 1–13
- Römisch, K.** (2000). Strömungsstabilität vergossener Steinschüttungen. *Wasserwirtschaft* 90 7–8: 356
- Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW).** (2002). Technisch rapport asfalt voor waterkeren. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW): Delft. ISBN 90-369-5519-X. 340 pp.

Thompson, P.L.; Kilgore, R.T. (2006). Hydraulic design of energy dissipators for culverts and channels. *Hydraulic Engineering Circular*, 14. U.S. Department of Transportation. Federal Highway Administration: Arlington. 287 pp.

Vercruysse, J.B.; Verelst, K.; Peeters, P.; Mostaert, F. (2015). Sigmaplan – gereduceerde getijdegebieden: advies in- en uitwateringsconstructie Doelpolder. *WL Adviezen*, 14_151. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

Verelst, K.; Vercruysse, J.B.; Taverniers, E.; De Mulder, T.; Verwilligen, J.; Peeters, P.; Mostaert, F. (2016). Ondersteuning ontwerp klasse Vb-sluist te Sint-Baafs-Vijve: deelrapport 4. Dimensionering bodembescherming stuwsluis. versie 11.. *WL Rapporten*, 12_142_4. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. XII, 63 + 51 bijlagen pp.

Vischer, D.L.; Hager, W.H. (Eds.). (1995). Energy dissipators. *Hydraulic Structures Design Manual: Hydraulic Design Considerations*, 9. A.A. Balkema: Rotterdam. ISBN 90-54109-198-9

Visser, K.P.; Vercruysse, J.; Peeters, P.; Mostaert, F. (2016). Debiet- en watersprong berekening nieuwe stuwen op de Dender te Denderleeuw: advies m.b.t. nautische en hydraulische randvoorwaarden. *WL Rapporten*, 14_128. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

WL|Delft Hydraulics. (2001). P-EMS. Programmable electronic liquid velocity meter. version 2.01. User-Manual

Bijlage 1: Resultaten schaalmodelproeven

Overzicht uitgevoerde proeven

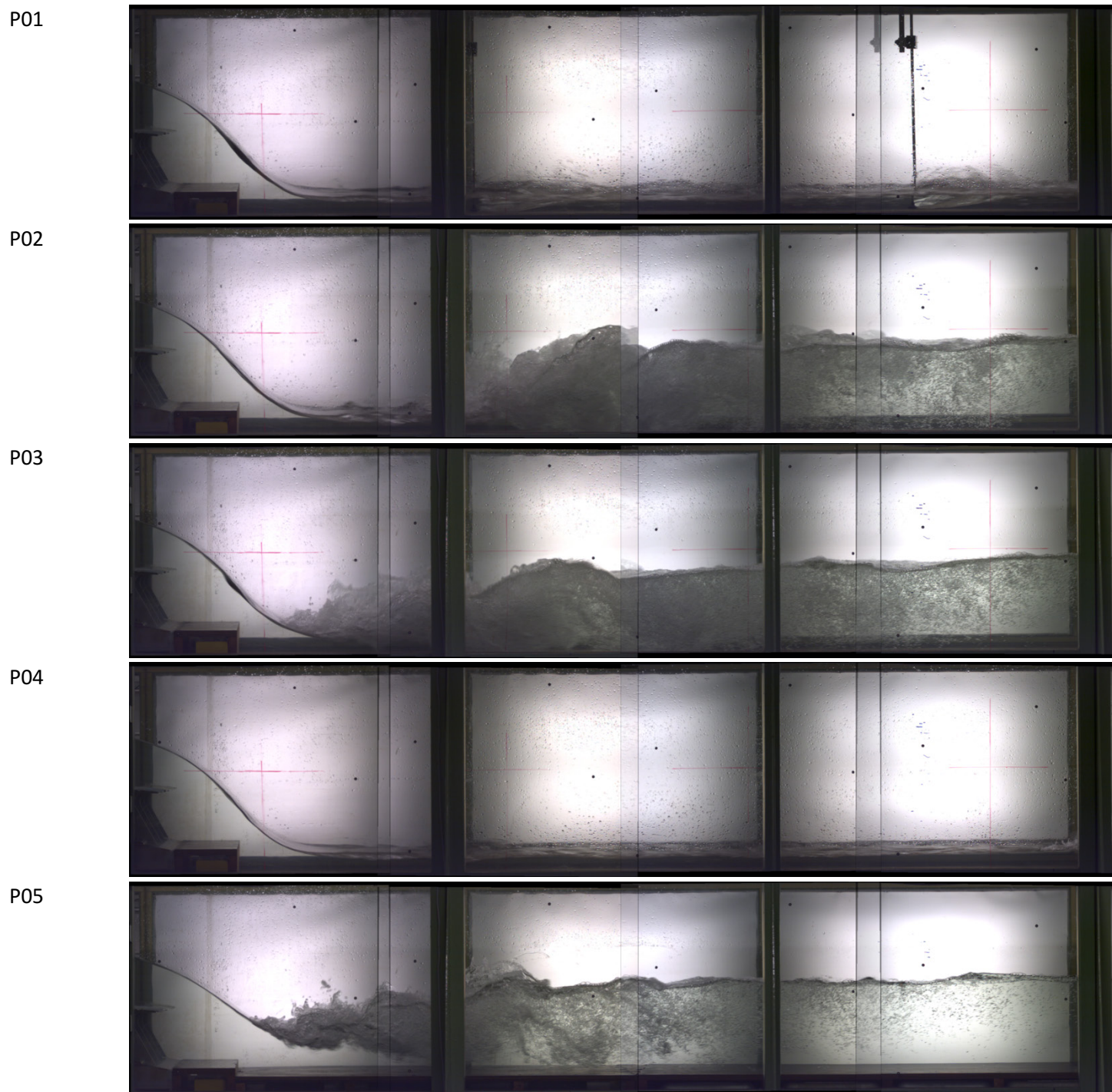
Tabel 26 – Overzicht uitgevoerde proeven

Proef	Conditie	Kruinpeil stuw	Bodempeil woelkom	Helling Einddrempel	Dissipatie- blokken	Bodempeil Afwaarts	Waterpeil Opwaarts	Waterpeil Afwaarts	Debiet			
		mTAW	mTAW	[X:Y]	[J/N]	mTAW	mTAW	mTAW	m³/s/m			
P01	2	+7.70	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	+4.28	+10.36	+7.47	8.56			
P02						+4.28	+10.36	+7.83	8.58			
P03						+4.28	+10.36	+7.84	8.57			
P04						+4.28	+10.36	+7.60	8.58			
P05						+5.21	+10.36	+8.76	8.59			
P06				+10.36	+7.62	8.60						
P07			+4.50	1:2	N	+5.50	+10.35	+7.89	8.59			
P08							+10.35	+7.61	8.60			
P09							+10.37	+7.97	8.60			
P10			+5.30				+10.37	+7.62	8.58			
P11	1	+8.86	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	+5.21	+10.37	+7.61	3.58			
P12			+4.50	1:2	N	+5.50	+10.37	+7.60	3.53			
P13							+10.35	+7.54	3.49			
P14							+10.38	+7.60	3.59			
P15							+5.30	+10.38	+7.30	3.59		
P16	3	+8.23	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	+5.21	+10.87	+9.51	8.92			
P17			+4.50	1:2	N	+5.50	+10.88	+9.51	8.85			
P18			+5.30				+10.88	+9.50	8.86			
P19	2	+7.70	+4.50	2:1	N	+5.50	+10.37	+7.96	8.80			
P20							+10.37	+7.61	8.80			
P21							+10.37	+8.02	8.74			
P22			+5.30				+10.37	+7.61	8.73			
P23			+4.50		J	+5.50	+10.37	+7.92	8.79			
P24							+10.37	+7.61	8.78			
P25			+5.30				+10.37	+7.98	8.69			
P26							+10.37	+7.60	8.69			
P27			+4.50		N	+5.50	+10.37	+7.60	8.60			
P28	1	+8.86	+4.50		N	+5.50	+10.37	+7.31	3.48			
P29			n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	+5.50	+10.36	+7.61	3.46			

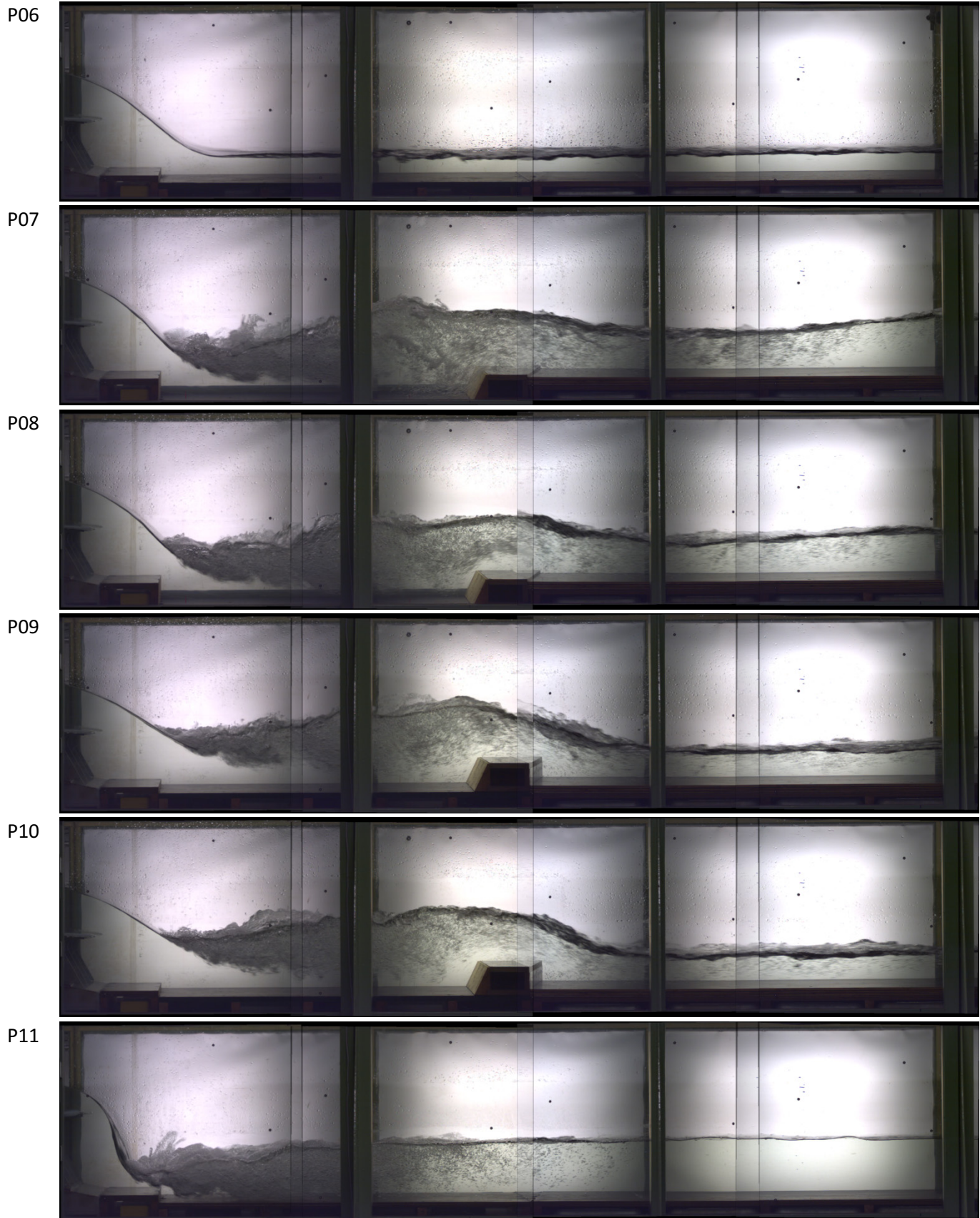
n.v.t. = niet van toepassing

Opname stromingspatroon

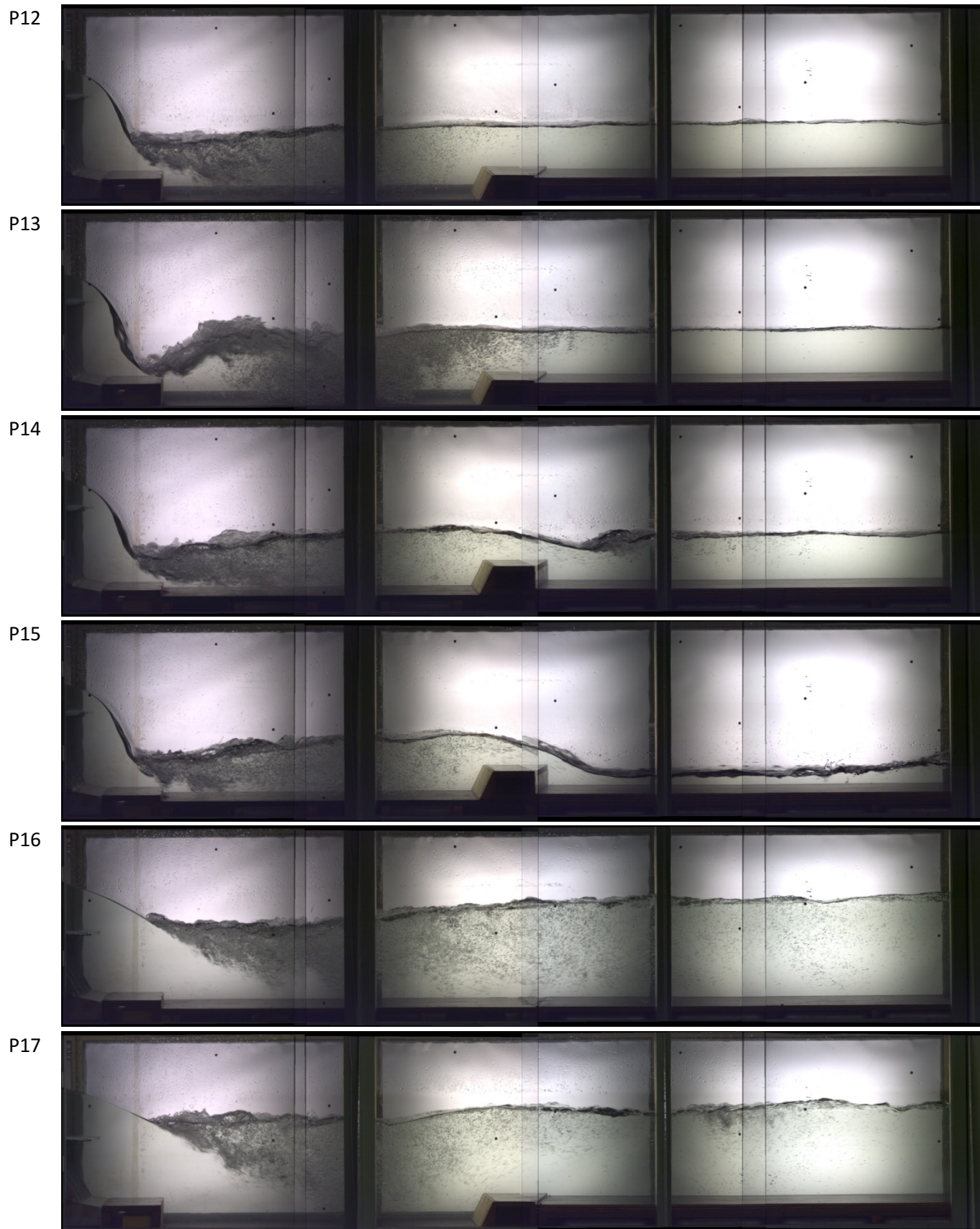
Figuur 26 – Opname stromingspatroon proeven P01, P02, P03,P04 en P05



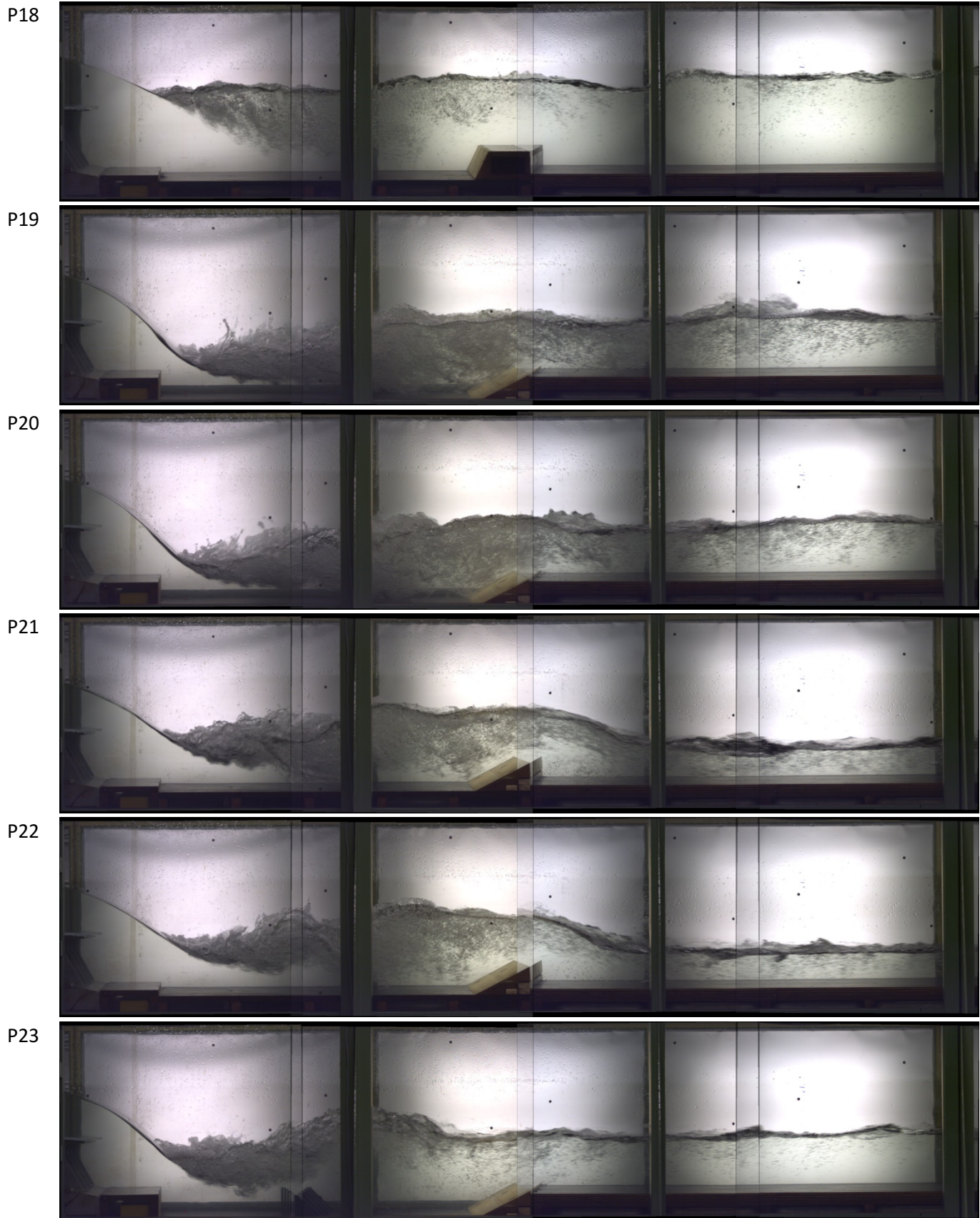
Figuur 27 – Opname stromingspatroon P06, P07, P08, P09, P10 en P11



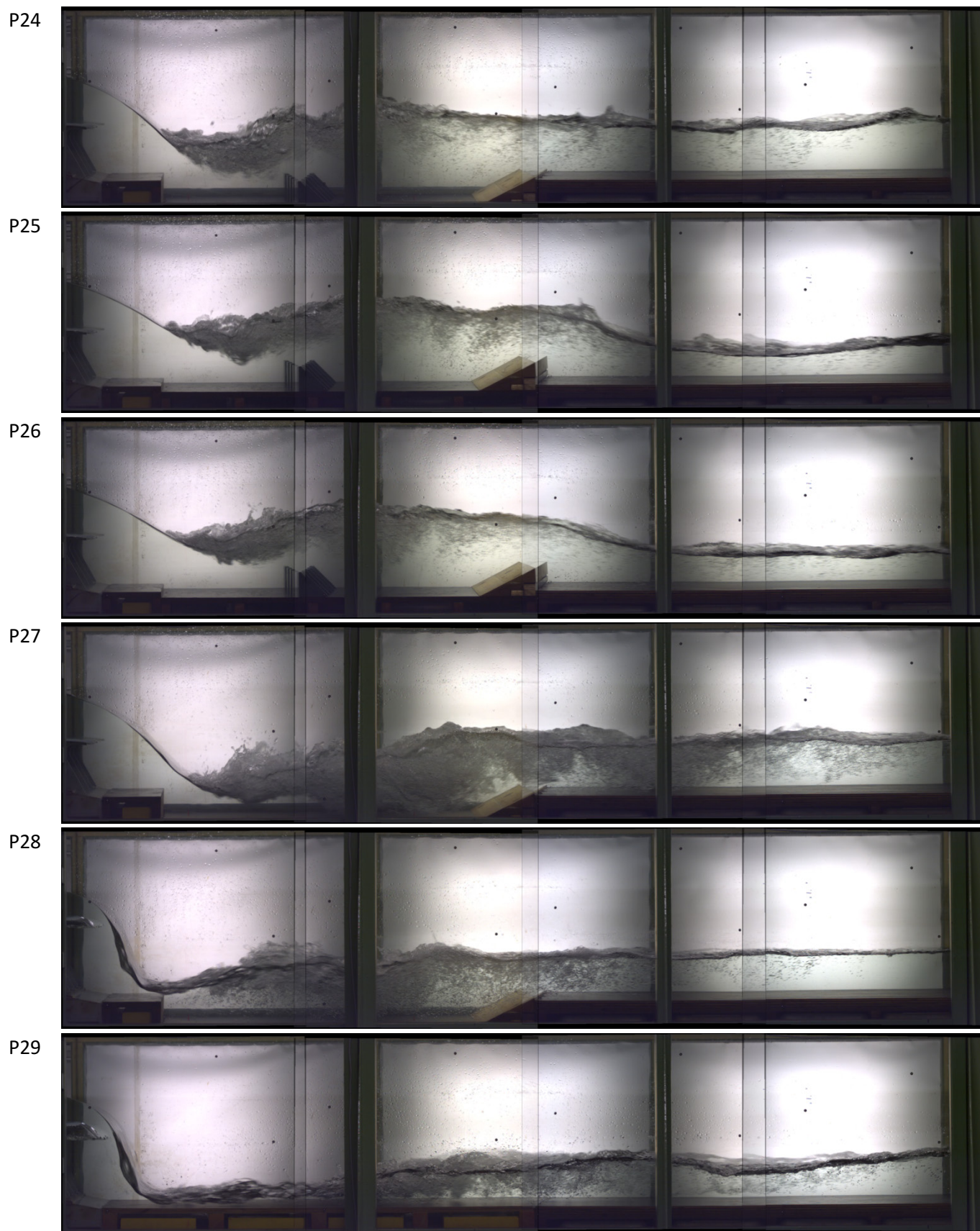
Figuur 28 – Opname stromingspatroon P12, P13, P14, P15, P16 en P17



Figuur 29 – Opname stromingspatroon P18, P19, P20, P21, P22 en P23

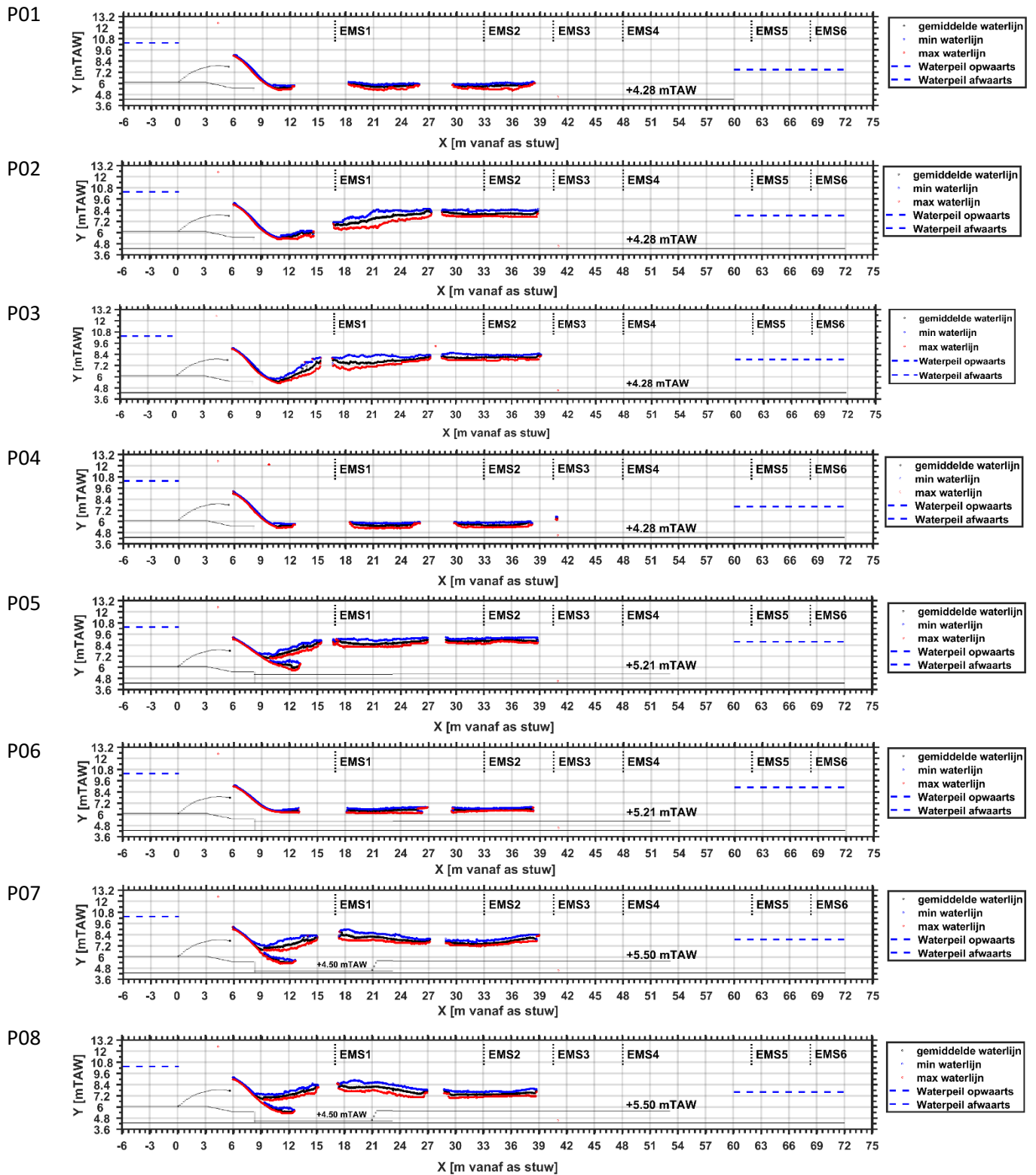


Figuur 30 – Opname stromingspatroon P24, P25, P26, P27, P28 en P29

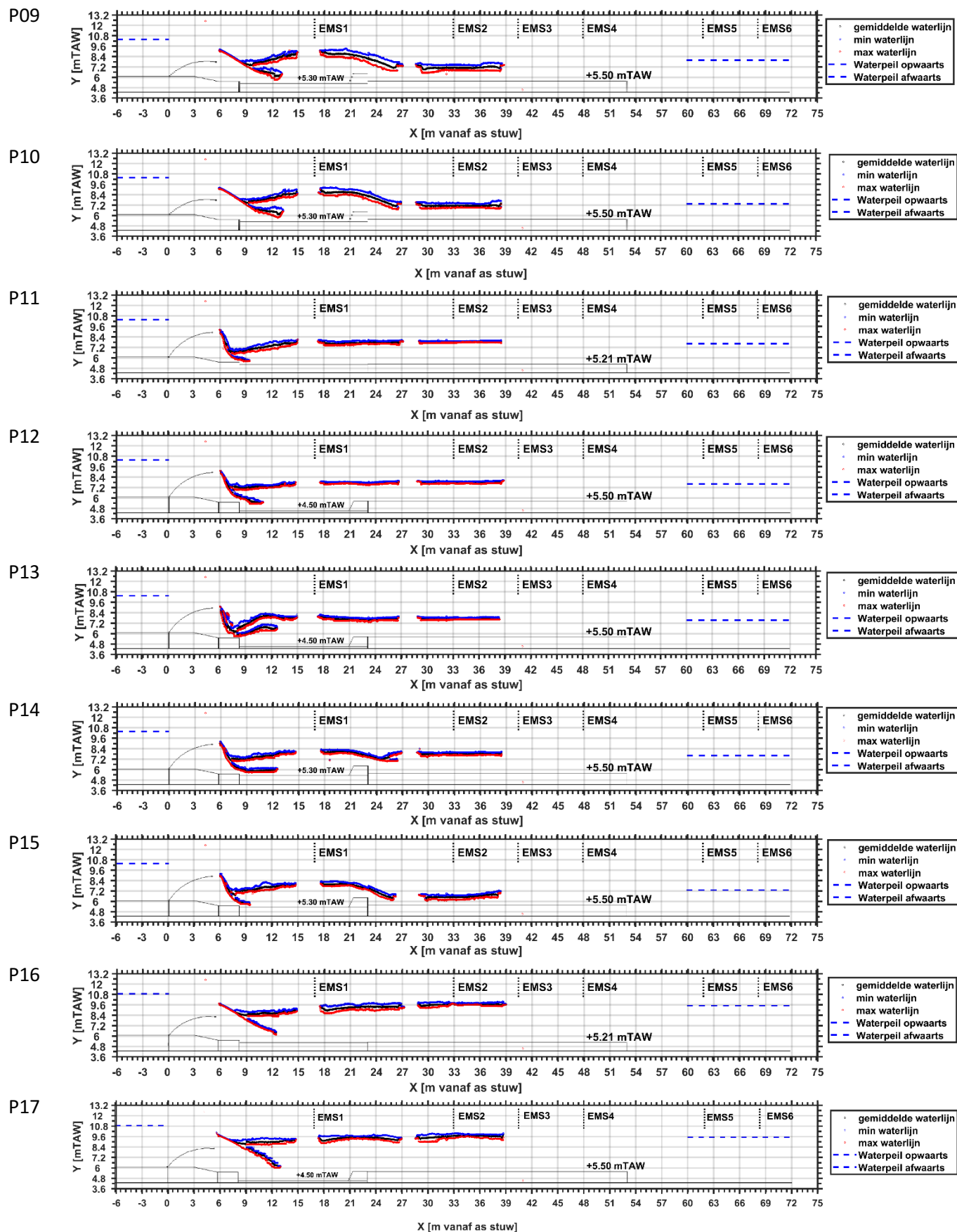


Ligging waterlijn

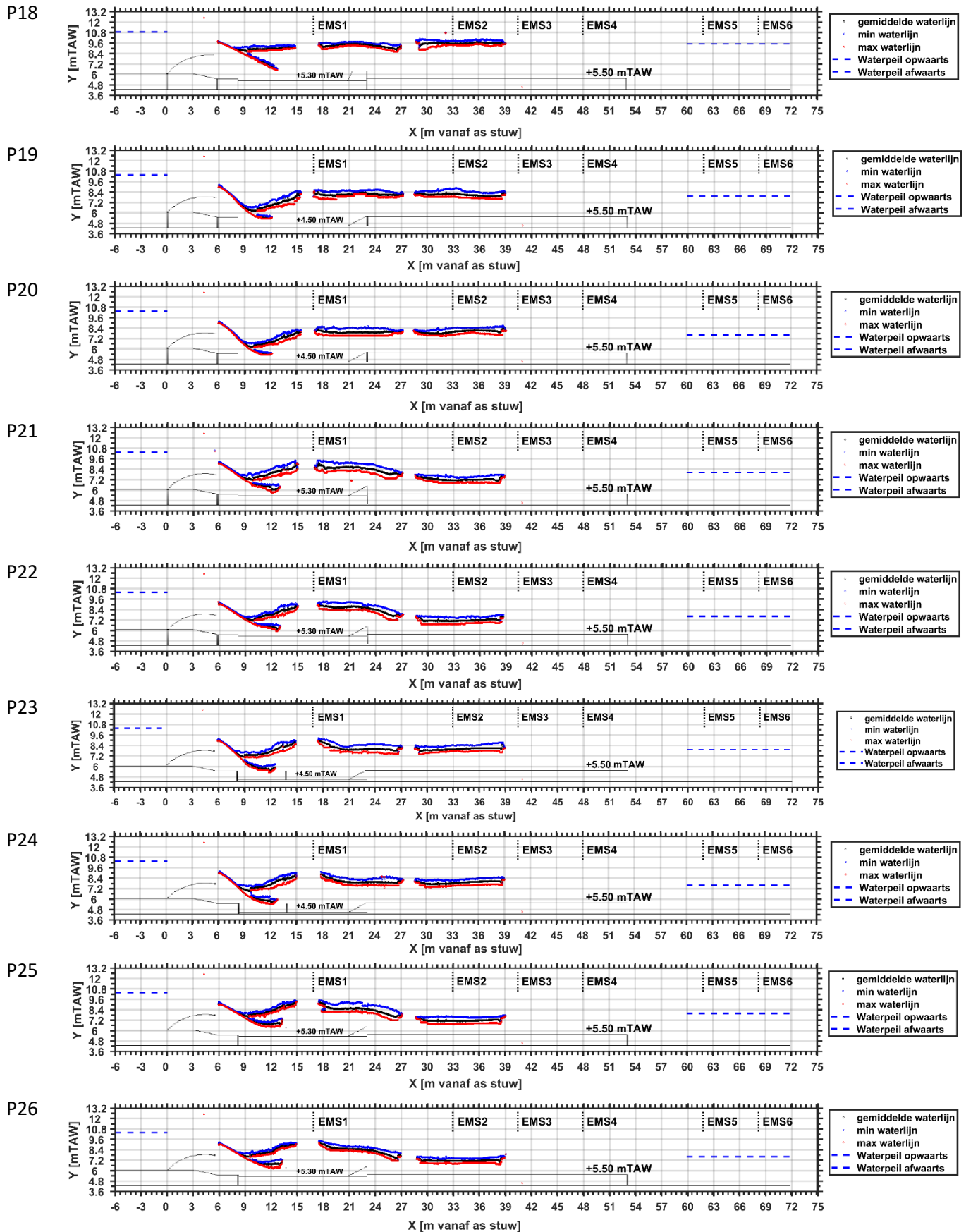
Figuur 31 – Ligging waterlijn proef P01, P02, P03, P04, P05, P06, P07 en P08



Figuur 32 – Ligging waterlijn proef P09, P10, P11, P12, P13, P14, P15, P16 en P17

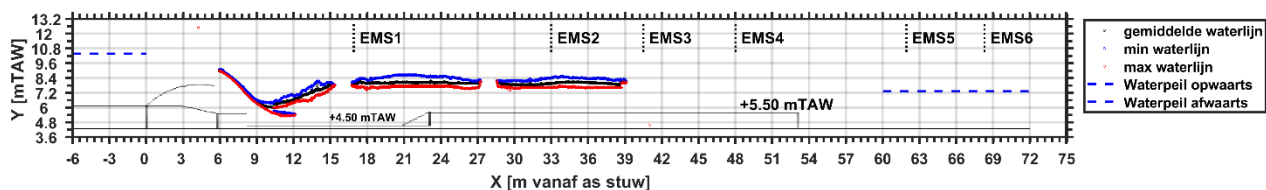


Figuur 33 – Ligging waterlijn proef P18, P19, P20, P21, P22, P23, P24, P25 en P26

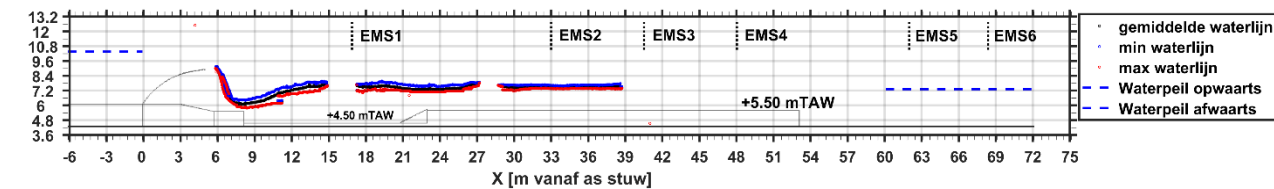


Figuur 34 – Ligging waterlijn proef P27, P28 en P29

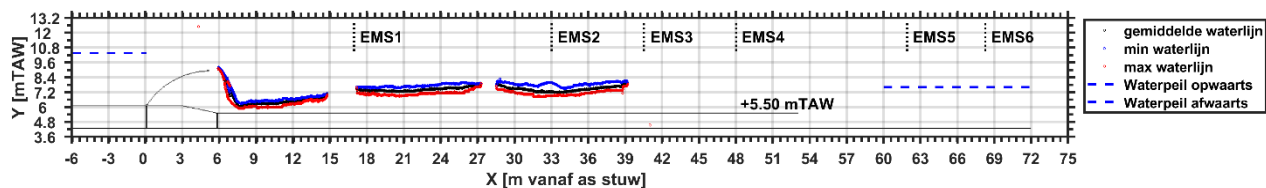
P27



P28



P29



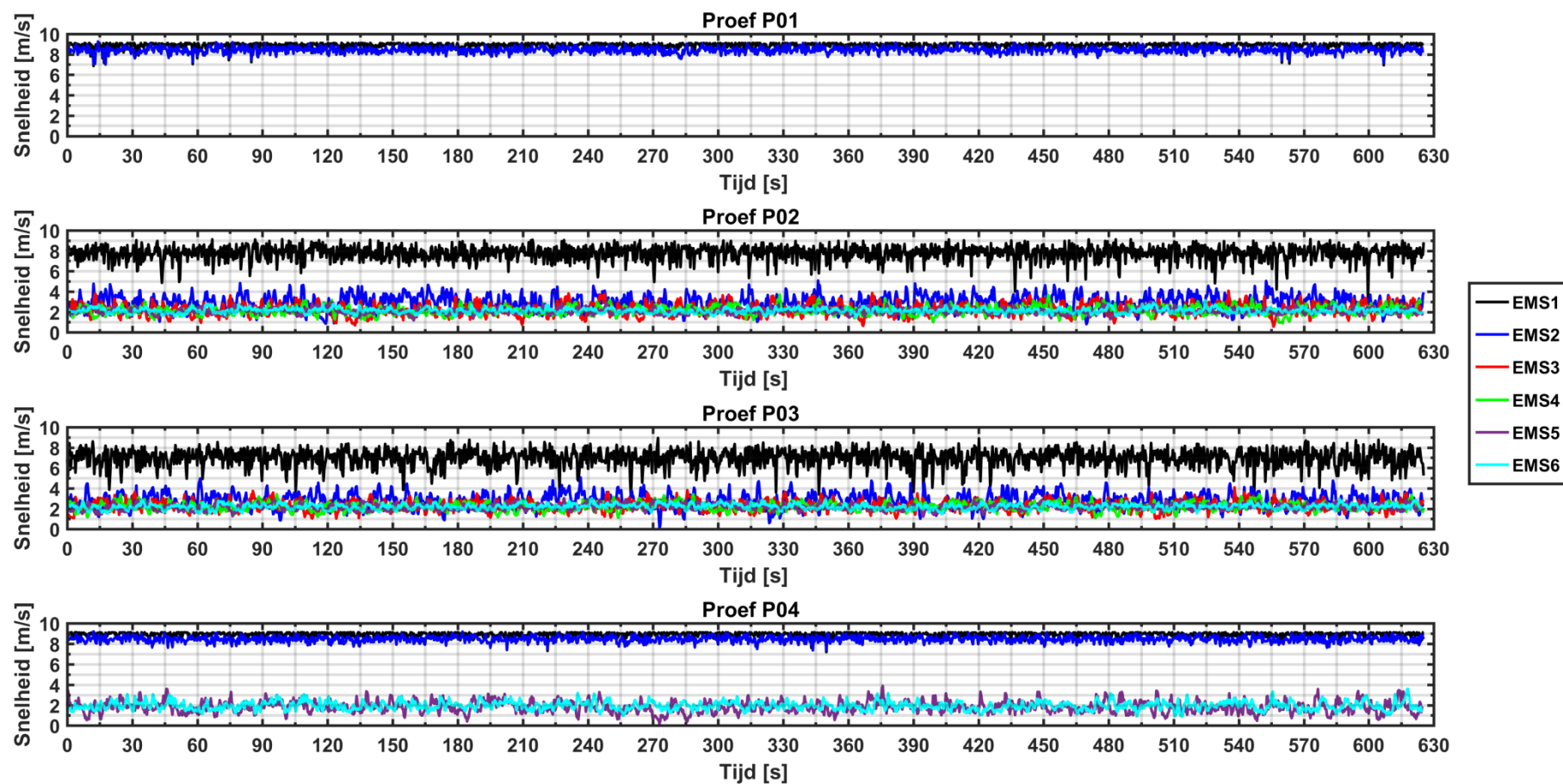
Meting stroomsnelheid

Tabel 27 – Meetgegevens stroomsnelheid

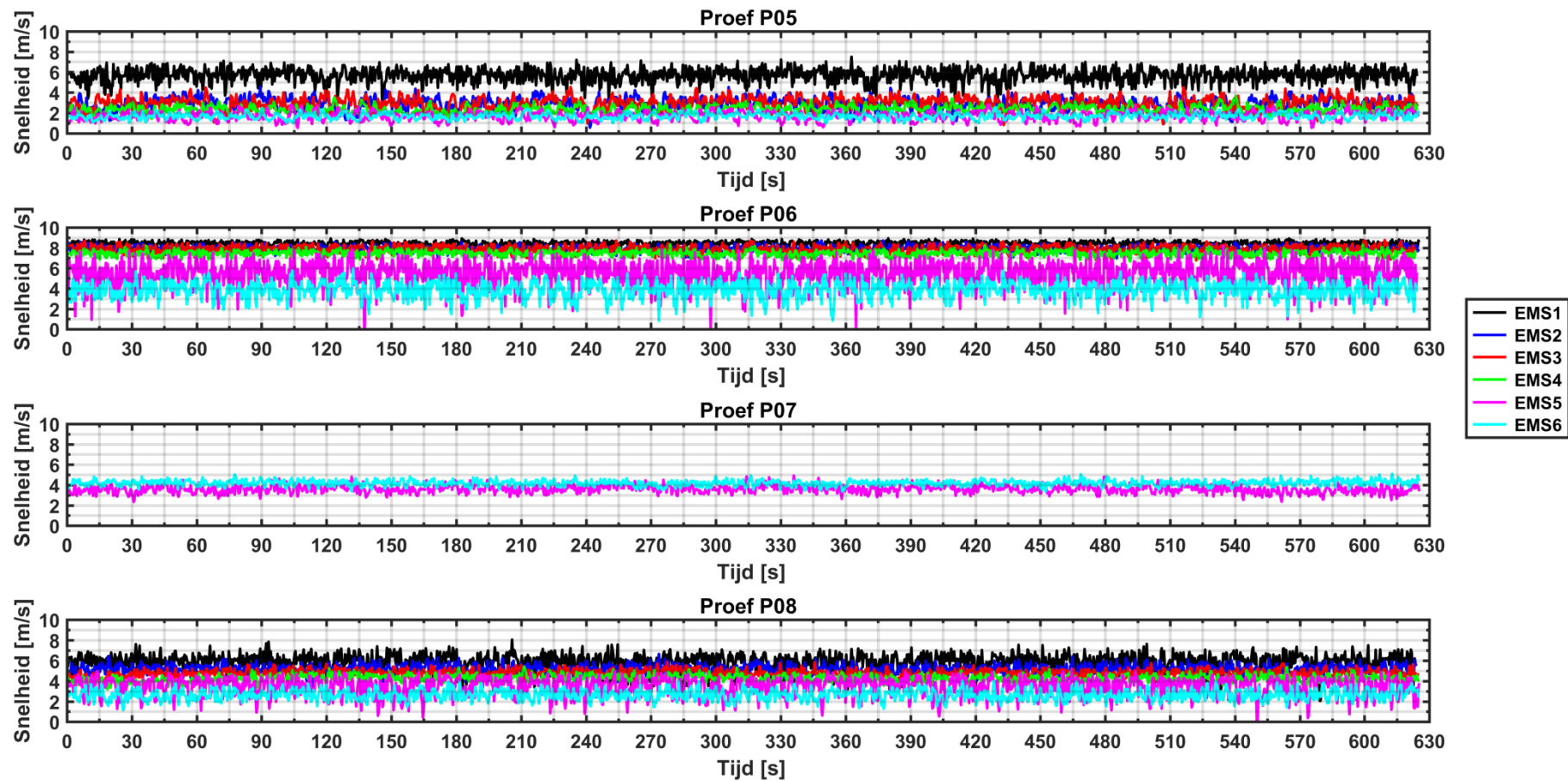
Proef	Conditie	Kruinpeil stuw	Bodempeil Woelkom	Helling einddrempel	Dissipatie- blokken	Debiet	Bodempeil Afwaarts	Waterpeil				Stroomsnelheid						Froudegetal				
		mTAW	mTAW	[X:Y]	[J/N]	m³/s/m	mTAW	mTAW	Afwaarts	EMS2	EMS3	EMS1	EMS2	EMS3	EMS4	EMS5	EMS6	EMS2	EMS3	Gemiddeld		
												m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	-	-	-		
P01	2	+7.70	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	8.56	+4.28	+10.36	+7.47	5.68	5.68	8.87	8.42	-	-	-	-	2.27	2.27	0.48		
P02						8.58	+4.28	+10.36	+7.83	8.02	8.02	7.76	2.91	2.26	2.13	2.08	2.13	0.48	0.37	0.41		
P03						8.57	+4.28	+10.36	+7.84	8.12	8.12	6.98	2.78	2.28	2.22	2.19	2.21	0.45	0.37	0.41		
P04						8.58	+4.28	+10.36	+7.60	5.56	5.56	8.90	8.44	-	-	1.82	1.95	2.39	-	0.45		
P05			n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	8.59	+5.21	+10.36	+8.76	8.86	8.86	5.66	2.86	2.91	2.34	1.68	1.66	0.48	0.49	0.42		
P06						8.60	+5.22	+10.36	+7.62	6.49	6.49	8.43	7.91	7.87	7.45	5.54	3.87	2.29	2.28	0.77		
P07			+4.50	1:2	N	8.59	+5.50	+10.35	+7.89	7.44	8.07	-	-	3.62	4.19	-	-	-	0.73	0.77		
P08						8.60	+5.50	+10.35	+7.61	7.44	7.55	5.87	5.16	4.79	4.28	3.44	2.64	1.20	1.08	0.93		
P09			+5.30	1:2	N	8.60	+5.50	+10.37	+7.97	7.14	7.13	-	-	6.34	5.82	-	-	-	1.62	0.74		
P10						8.58	+5.50	+10.37	+7.62	7.14	7.13	5.32	6.56	6.33	5.87	4.18	2.94	1.67	1.62	0.94		
P11	1	+8.86	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	3.58	+5.21	+10.37	+7.61	7.83	7.89	2.95	1.35	1.41	1.39	0.97	0.95	0.27	0.28	0.32		
P12			+4.50	1:2	N	3.53	+5.50	+10.37	+7.60	7.71	7.76	3.10	1.55	1.58	1.62	1.03	0.97	0.34	0.34	0.40		
P13						3.49	+5.50	+10.35	+7.54	7.71	7.76	0.60	1.58	1.63	1.64	1.03	0.95	0.35	0.35	0.41		
P14			+5.30	1:2	N	3.59	+5.50	+10.38	+7.60	7.82	7.84	2.74	1.49	1.59	1.62	1.14	1.04	0.32	0.34	0.40		
P15						3.59	+5.50	+10.38	+7.30	6.50	6.72	-	-	3.61	2.98	-	-	-	1.08	0.51		
P16	3	+8.23	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	8.92	+5.21	+10.87	+9.51	9.77	9.67	5.35	2.79	2.39	2.12	1.53	1.55	0.42	0.36	0.33		
P17			+4.50	1:2	N	8.85	+5.50	+10.88	+9.51	9.69	9.60	4.68	1.62	2.01	2.08	1.58	1.56	0.26	0.32	0.36		
P18						+5.30	8.86	+5.50	+10.88	+9.50	9.56	9.55	4.67	1.41	1.97	2.06	1.64	1.60	0.22	0.31	0.36	
P19	2	+7.70	+4.50	2:1	N	8.80	+5.50	+10.37	+7.96	8.21	8.07	-	-	3.83	3.90	-	-	-	0.77	0.75		
P20						8.80	+5.50	+10.37	+7.61	7.98	8.10	6.60	3.74	4.22	4.28	3.51	2.75	0.77	0.84	0.95		
P21			+5.30			8.74	+5.50	+10.37	+8.02	7.09	7.21	-	-	6.11	5.43	-	-	-	1.53	0.73		
P22						8.73	+5.50	+10.37	+7.61	7.09	7.21	5.50	6.33	6.12	5.53	4.12	2.89	1.64	1.53	0.96		
P23			+4.50		J	8.79	+5.50	+10.37	+7.92	7.96	8.11	-	-	3.64	3.69	-	-	-	0.73	0.77		
P24						8.78	+5.50	+10.37	+7.61	7.82	8.06	1.26	3.33	3.66	4.16	3.65	2.69	0.71	0.74	0.95		
P25			+5.30			8.69	+5.50	+10.37	+7.98	7.11	7.22	-	-	5.85	5.26	-	-	-	1.44	0.73		
P26						8.69	+5.50	+10.37	+7.60	7.11	7.22	1.18	5.92	5.84	5.36	3.74	2.83	1.51	1.44	0.94		
P27			+4.50		N	8.60	+5.50	+10.37	+7.60	7.97	7.98	3.71	4.05	4.23	4.64	3.57	3.19	0.83	0.87	1.18		
P28			1	+8.86	+4.50	n.v.t.	n.v.t.	3.48	+5.50	+10.37	+7.31	7.48	7.57	1.32	1.87	1.80	1.80	1.04	1.04	0.44	0.41	0.50
P29	n.v.t.	3.46			+5.50			+10.36	+7.61	7.25	7.84	7.59	2.22	1.63	0.97	0.62	0.94	0.54	0.34	0.36		

n.v.t. = niet van toepassing (geen woelkom aanwezig)

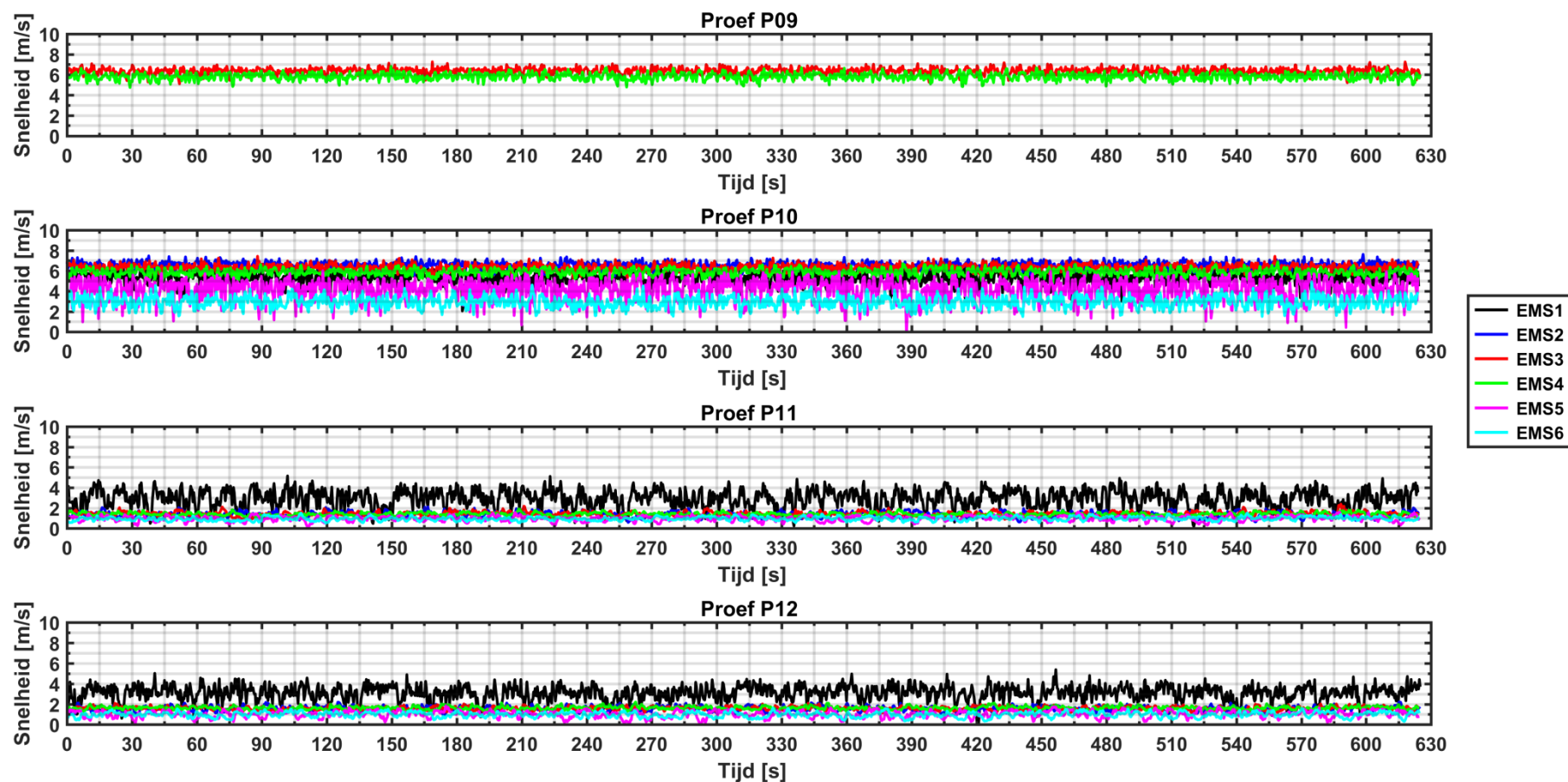
Figuur 35 – Stroomsnelheid proef P01, P02, P03 en P04



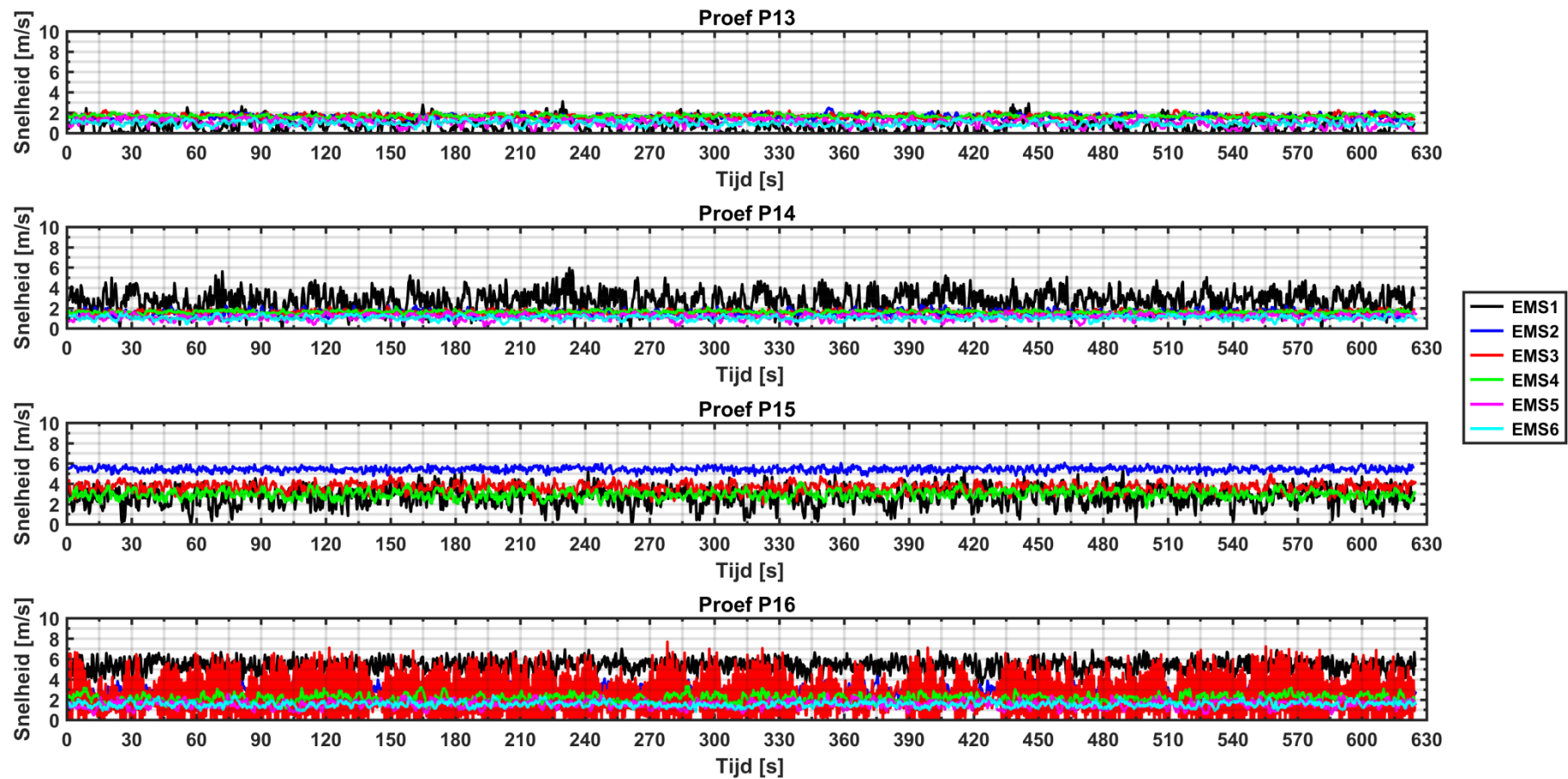
Figuur 36 – Stroomsnelheid proef P05, P06, P07 en P08



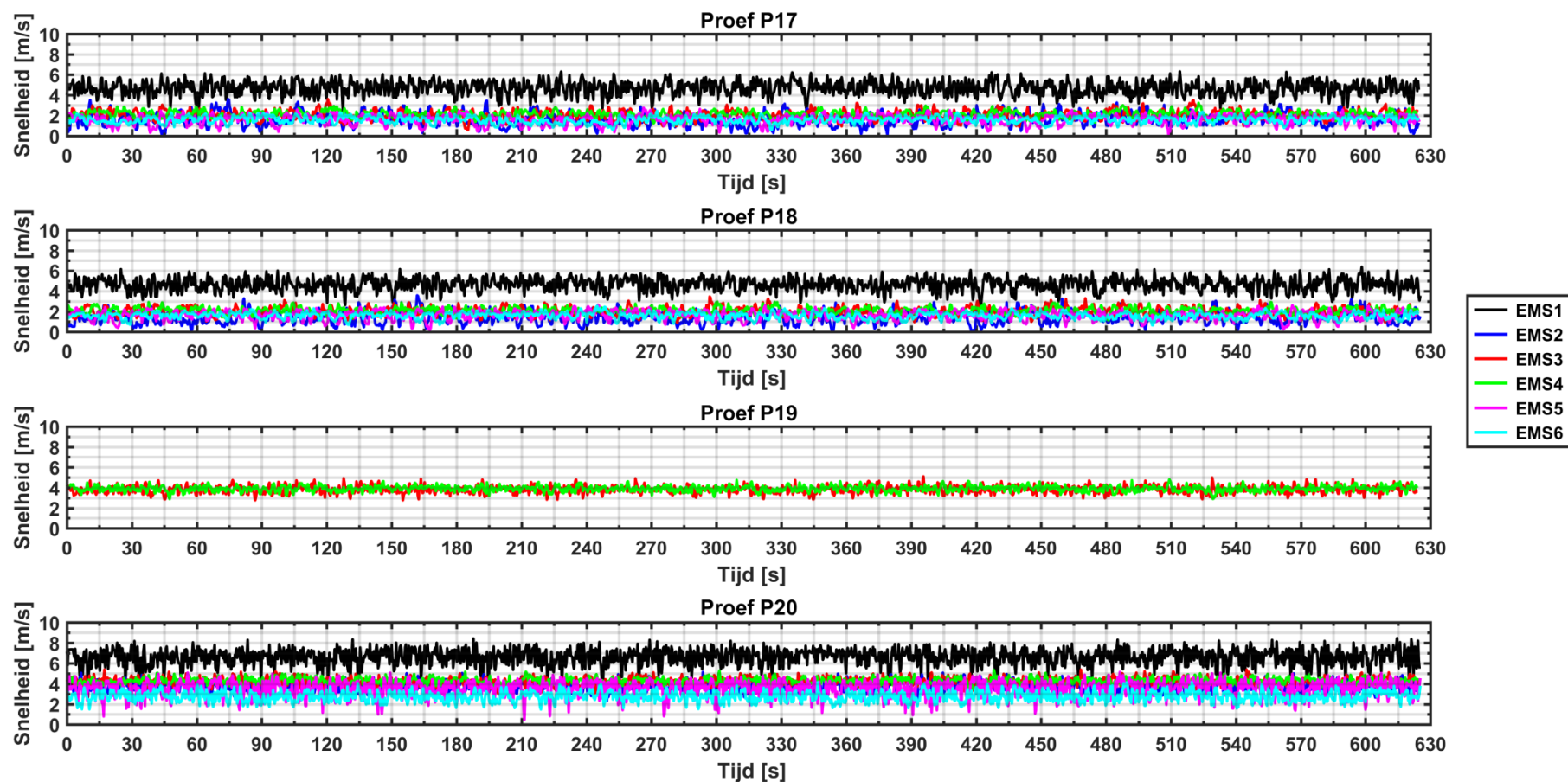
Figuur 37 – Stroomsnelheid proef P09, P10, P11 en P12



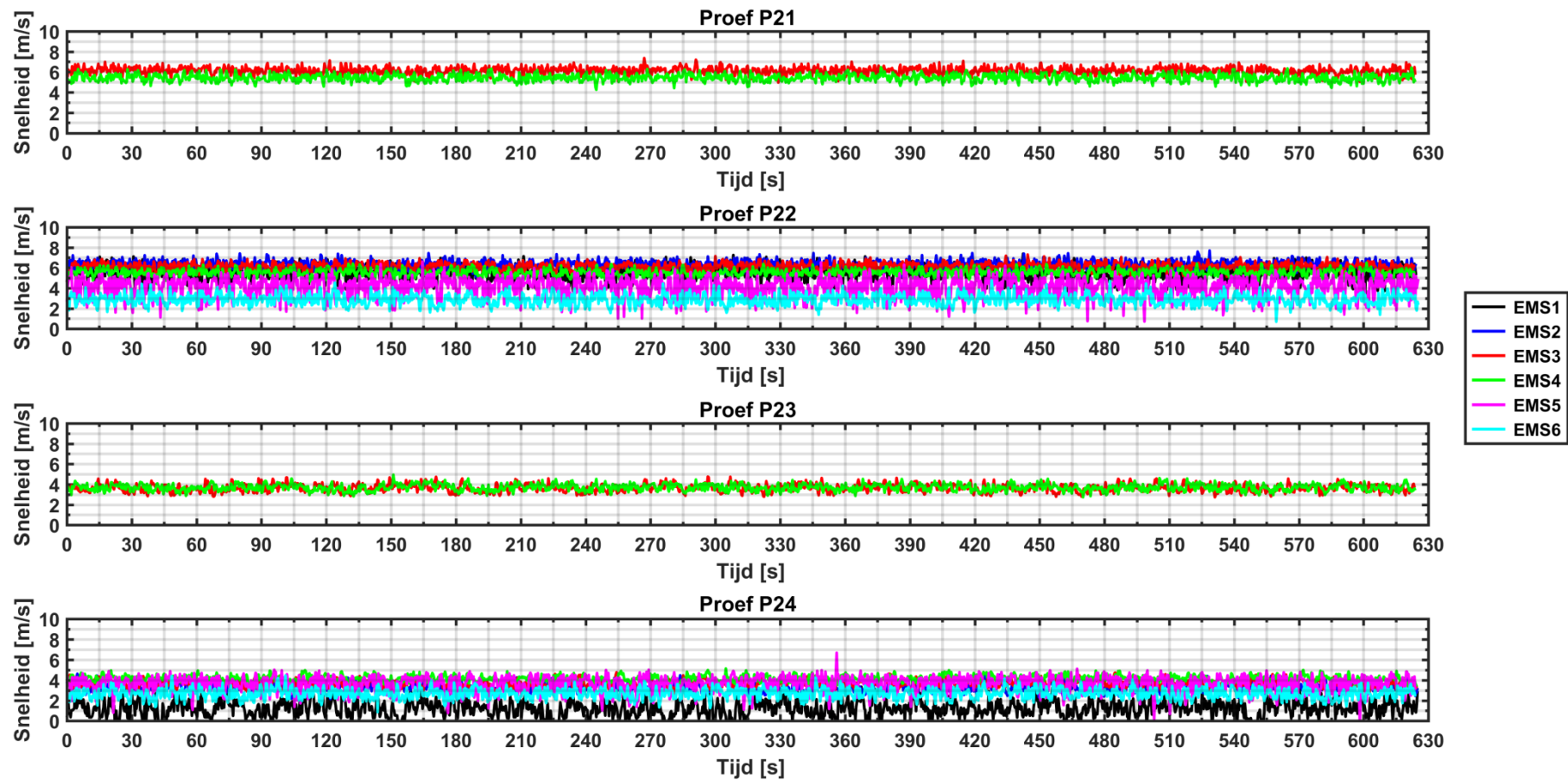
Figuur 38 – Stroomsnelheid proef P13, P14, P15 en P16



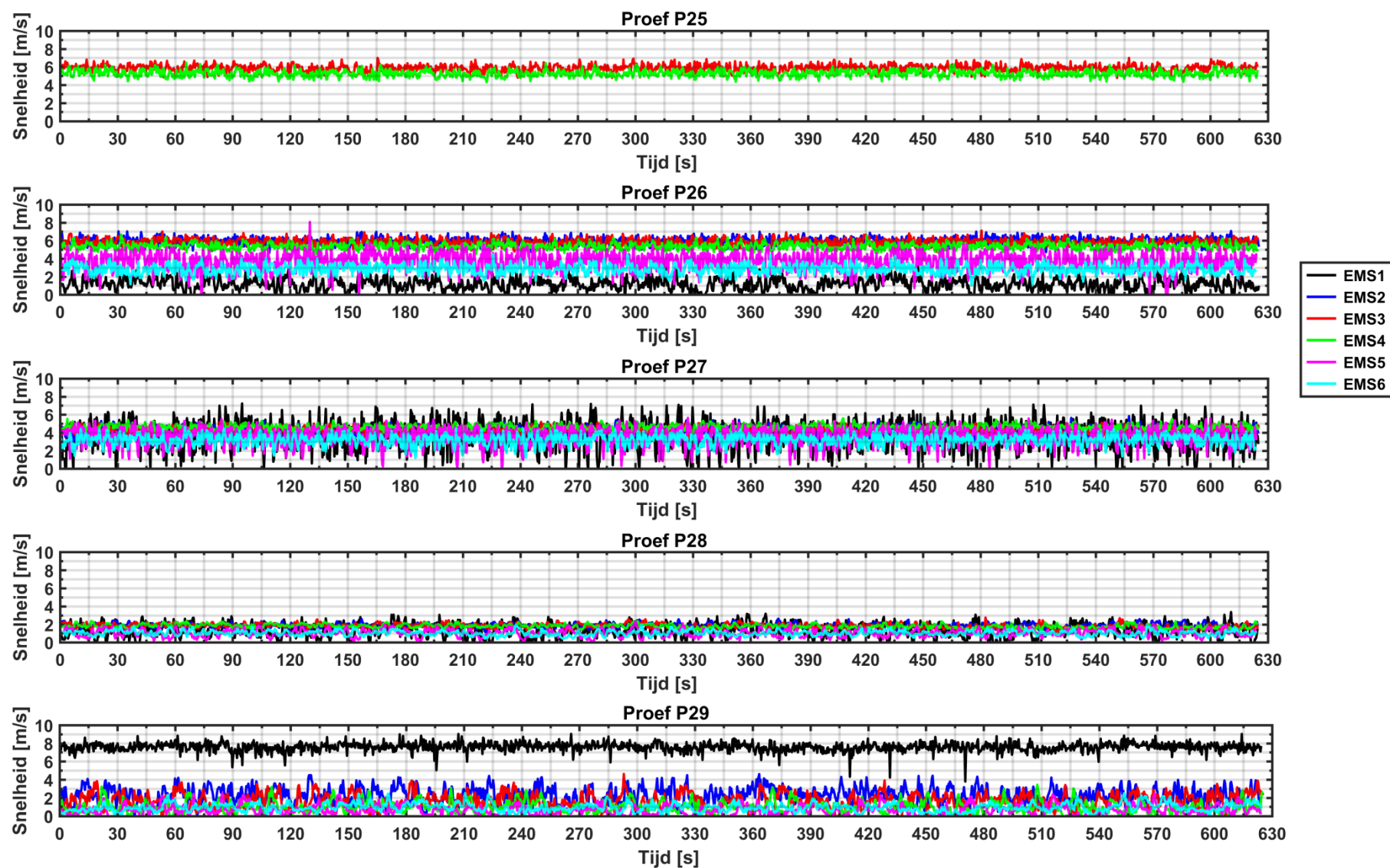
Figuur 39 – Stroomsnelheid proef P17, P18, P19 en P20



Figuur 40 – Stroomsnelheid proef P21, P22, P23 en P24

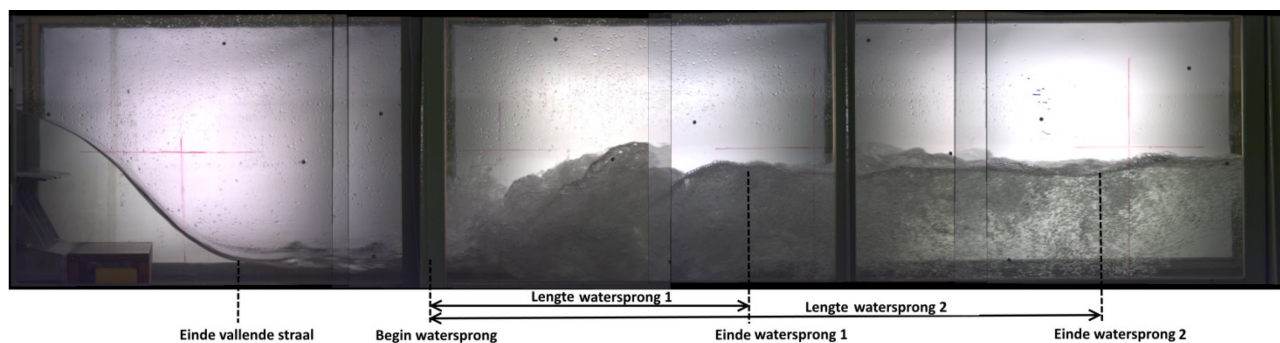


Figuur 41 – Stroomsnelheid proef P25, P26, P27, P28 en P29



Lengte watersprong

Figuur 42 – Locaties voor bepaling lengte watersprong



Tabel 28 – Coördinaten locaties en bepaling lengte watersprong

Proef	Afgelezen coördinaten t.o.v. as van stuw				Lengte watersprong	
	Einde vallende straal	begin watersprong	einde watersprong 1	einde watersprong 2	Lengte watersprong 1	Lengte watersprong 2
	m	m	m	m	m	m
P01	Geen watersprong aanwezig					
P02	10	15	19	31	4	16
P03	11	11	22	32	11	22
P04	Geen watersprong aanwezig					
P05	12	9	20	25	11	16
P06	Geen watersprong aanwezig					
P07	12	8	20	23	12	15
P08	12	8	20	24	12	16
P09	12	9	20	24	11	15
P10	13	9	20	24	12	15
P11	8	7	18	22	11	15
P12	8	7	16	22	9	15
P13	7	7	16	21	9	14
P14	8	7	19	22	12	15
P15	8	7	18	22	11	15
P16	12	8	23	31	14	23
P17	13	8	19	24	11	16
P18	12	8	21	24	12	16
P19	11	9	19	25	9	16
P20	12	9	20	25	10	15
P21	12	9	20	25	11	15
P22	12	9	20	24	11	15
P23	12	9	20	22	11	13
P24	12	9	20	22	11	13
P25	12	9	18	21	9	12
P26	12	9	18	22	9	13
P27	11	9	20	24	11	15
P28	8	8	19	23	11	15
P29	8	14	22	27	8	13

Bijlage 2: Tabellen dimensionering bodembescherming

Hydraulische belasting bij was

Tabel 29 – Berekening sectiegemiddelde stroomsnelheid in gedefinieerde raaien voor was november 2010

Raai nr	Breedte m	Bodem- peil mTAW	2 stuwen in gebruik					1 stuw in gebruik				
			Water- peil mTAW	Water- diepte m	Natte sectie m ²	Debiet m ³ /s	Stroom- snelheid m/s	Water- peil mTAW	Water- diepte m	Natte sectie m ²	Debiet m ³ /s	Stroom- snelheid m/s
			mTAW	m	m ²	m ³ /s	m/s	mTAW	m	m ²	m ³ /s	m/s
1	23.6	7.97	10.49	2.52	59.47	105.75	1.78	11.09	3.12	73.63	100.16	1.36
2a	23.6	6.37	10.49	4.12	97.23	105.75	1.09	11.09	4.72	111.39	100.16	0.90
2b	7	6.37	10.49	4.12	28.84	52.88	1.83	11.09	4.72	33.04	100.16	3.03
3a	7	6.37	10.49	4.12	28.84	52.88	1.83	11.09	4.72	33.04	100.16	3.03
	7	5.21	10.38	5.17	36.19	52.88	1.46	10.38	5.17	36.19	100.16	2.77
3b	7	5.50	10.38	4.88	34.16	52.88	1.55	10.38	4.88	34.16	100.16	2.93
	7	5.21	10.38	5.17	36.19	52.88	1.46	10.38	5.17	36.19	100.16	2.77
4	7	5.50	10.38	4.88	34.16	52.88	1.55	10.38	4.88	34.16	100.16	2.93
	17.5	5.21	10.38	5.17	90.48	105.75	1.17	10.38	5.17	45.24	100.16	2.21
5	17.5	5.50	10.38	4.88	85.40	105.75	1.24	10.38	4.88	42.70	100.16	2.35
	19.2	5.21	10.38	5.17	99.26	105.75	1.07	10.38	5.17	49.63	100.16	2.02
6	19.2	5.50	10.38	4.88	93.70	105.75	1.13	10.38	4.88	46.85	100.16	2.14
	19	5.21	10.38	5.17	98.23	105.75	1.08	10.38	5.17	49.12	100.16	2.04
7	19	5.50	10.38	4.88	92.72	105.75	1.14	10.38	4.88	46.36	100.16	2.16
	16.5	5.21	10.38	5.17	85.31	105.75	1.24	10.38	5.17	85.31	100.16	1.17
8	16.5	5.50	10.38	4.88	80.52	105.75	1.31	10.38	4.88	80.52	100.16	1.24
	17.1	5.21	10.38	5.17	88.41	105.75	1.20	10.38	5.17	88.41	100.16	1.13
9	17.1	5.50	10.38	4.88	83.45	105.75	1.27	10.38	4.88	83.45	100.16	1.20
	17.5	5.21	10.38	5.17	90.48	105.75	1.17	10.38	5.17	90.48	100.16	1.11
10	17.5	5.50	10.38	4.88	85.40	105.75	1.24	10.38	4.88	85.40	100.16	1.17
	21	5.21	10.38	5.17	108.57	105.75	0.97	10.38	5.17	108.57	100.16	0.92

Tabel 30 – Berekening sectiegemiddelde stroomsnelheid in gedefinieerde raaien voor was T10 en T100

Was	Raai nr	Breedte	Bodem-peil	2 stuwen in gebruik					1 stuw in gebruik				
				Water-peil	Water-diepte	Natte sectie	Debiet	Stroom-snelheid	Water-peil	Water-diepte	Natte sectie	Debiet	Stroom-snelheid
		m	mTAW	mTAW	m	m ²	m ³ /s	m/s	mTAW	m	m ²	m ³ /s	m/s
T10	1	23.6	6.37	10.04	3.67	86.61	66.17	0.76	10.08	3.71	87.56	65.71	0.75
	2a	7.0	6.37	10.04	3.67	25.69	33.09	1.29	10.08	3.71	25.97	65.71	2.53
	2b	7.0	6.37	10.04	3.67	25.69	33.09	1.29	10.08	3.71	25.97	65.71	2.53
	3a	7.0	5.21	9.66	4.45	31.15	33.09	1.06	9.65	4.44	31.08	65.71	2.11
		7.0	5.50	9.66	4.16	29.12	33.09	1.14	9.65	4.15	29.05	65.71	2.26
	3b	7.0	5.21	9.66	4.45	31.15	33.09	1.06	9.65	4.44	31.08	65.71	2.11
		7.0	5.50	9.66	4.16	29.12	33.09	1.14	9.65	4.15	29.05	65.71	2.26
	4	17.5	5.21	9.66	4.45	77.88	66.17	0.85	9.65	4.44	38.85	65.71	1.69
		17.5	5.50	9.66	4.16	72.80	66.17	0.91	9.65	4.15	36.31	65.71	1.81
	5	19.2	5.21	9.66	4.45	85.44	66.17	0.77	9.65	4.44	42.62	65.71	1.54
		19.2	5.50	9.66	4.16	79.87	66.17	0.83	9.65	4.15	39.84	65.71	1.65
	6	19.0	5.21	9.66	4.45	84.55	66.17	0.78	9.65	4.44	42.18	65.71	1.56
		19.0	5.50	9.66	4.16	79.04	66.17	0.84	9.65	4.15	39.43	65.71	1.67
	7	16.5	5.21	9.66	4.45	73.43	66.17	0.90	9.65	4.44	73.26	65.71	0.90
		16.5	5.50	9.66	4.16	68.64	66.17	0.96	9.65	4.15	68.48	65.71	0.96
	8	17.1	5.21	9.66	4.45	76.10	66.17	0.87	9.65	4.44	75.92	65.71	0.87
		17.1	5.50	9.66	4.16	71.14	66.17	0.93	9.65	4.15	70.97	65.71	0.93
	9	17.5	5.21	9.66	4.45	77.88	66.17	0.85	9.65	4.44	77.70	65.71	0.85
		17.5	5.50	9.66	4.16	72.80	66.17	0.91	9.65	4.15	72.63	65.71	0.90
	10	21.0	5.21	9.66	4.45	93.45	66.17	0.71	9.65	4.44	93.24	65.71	0.70
		21.0	5.50	9.66	4.16	87.36	66.17	0.76	9.65	4.15	87.15	65.71	0.75
T100	1	23.6	6.37	10.32	3.95	93.22	91.73	0.98	10.65	4.28	101.01	82.15	0.81
	2a	7.0	6.37	10.32	3.95	27.65	45.87	1.66	10.65	4.28	29.96	82.15	2.74
	2b	7.0	6.37	10.32	3.95	27.65	45.87	1.66	10.65	4.28	29.96	82.15	2.74
	3a	7.0	5.21	10.23	5.02	35.14	45.87	1.31	10.14	4.93	34.51	82.15	2.38
		7.0	5.50	10.23	4.73	33.11	45.87	1.39	10.14	4.64	32.48	82.15	2.53
	3b	7.0	5.21	10.23	5.02	35.14	45.87	1.31	10.14	4.93	34.51	82.15	2.38
		7.0	5.50	10.23	4.73	33.11	45.87	1.39	10.14	4.64	32.48	82.15	2.53
	4	17.5	5.21	10.23	5.02	87.85	91.73	1.04	10.14	4.93	43.14	82.15	1.90
		17.5	5.50	10.23	4.73	82.78	91.73	1.11	10.14	4.64	40.60	82.15	2.02
	5	19.2	5.21	10.23	5.02	96.38	91.73	0.95	10.14	4.93	47.33	82.15	1.74
		19.2	5.50	10.23	4.73	90.82	91.73	1.01	10.14	4.64	44.54	82.15	1.84
	6	19.0	5.21	10.23	5.02	95.38	91.73	0.96	10.14	4.93	46.84	82.15	1.75
		19.0	5.50	10.23	4.73	89.87	91.73	1.02	10.14	4.64	44.08	82.15	1.86
	7	16.5	5.21	10.23	5.02	82.83	91.73	1.11	10.14	4.93	81.35	82.15	1.01
		16.5	5.50	10.23	4.73	78.05	91.73	1.18	10.14	4.64	76.56	82.15	1.07
	8	17.1	5.21	10.23	5.02	85.84	91.73	1.07	10.14	4.93	84.30	82.15	0.97
		17.1	5.50	10.23	4.73	80.88	91.73	1.13	10.14	4.64	79.34	82.15	1.04
	9	17.5	5.21	10.23	5.02	87.85	91.73	1.04	10.14	4.93	86.28	82.15	0.95
		17.5	5.50	10.23	4.73	82.78	91.73	1.11	10.14	4.64	81.20	82.15	1.01
	10	21.0	5.21	10.23	5.02	105.42	91.73	0.87	10.14	4.93	103.53	82.15	0.79
		21.0	5.50	10.23	4.73	99.33	91.73	0.92	10.14	4.64	97.44	82.15	0.84

Tabel 31 – Berekening sectiegemiddelde stroomsnelheid in gedefinieerde raaien voor was T500 en T1000

Was	Raai nr	Breedte	Bodem-peil	2 stuwen in gebruik					1 stuw in gebruik				
				Water-peil	Water-diepte	Natte sectie	Debiet	Stroom-snelheid	Water-peil	Water-diepte	Natte sectie	Debiet	Stroom-snelheid
		m	mTAW	mTAW	m	m ²	m ³ /s	m/s	mTAW	m	m ²	m ³ /s	m/s
T500	1	23.6	6.37	10.59	4.22	99.59	111.48	1.12	11.26	4.89	115.40	106.02	0.92
	2a	7.0	6.37	10.59	4.22	29.54	55.74	1.89	11.26	4.89	34.23	106.02	3.10
	2b	7.0	6.37	10.59	4.22	29.54	55.74	1.89	11.26	4.89	34.23	106.02	3.10
	3a	7.0	5.21	10.47	5.26	36.82	55.74	1.51	10.49	5.28	36.96	106.02	2.87
		7.0	5.50	10.47	4.97	34.79	55.74	1.60	10.49	4.99	34.93	106.02	3.04
	3b	7.0	5.21	10.47	5.26	36.82	55.74	1.51	10.49	5.28	36.96	106.02	2.87
		7.0	5.50	10.47	4.97	34.79	55.74	1.60	10.49	4.99	34.93	106.02	3.04
	4	17.5	5.21	10.47	5.26	92.05	111.48	1.21	10.49	5.28	46.20	106.02	2.29
		17.5	5.50	10.47	4.97	86.98	111.48	1.28	10.49	4.99	43.66	106.02	2.43
	5	19.2	5.21	10.47	5.26	100.99	111.48	1.10	10.49	5.28	50.69	106.02	2.09
		19.2	5.50	10.47	4.97	95.42	111.48	1.17	10.49	4.99	47.90	106.02	2.21
	6	19.0	5.21	10.47	5.26	99.94	111.48	1.12	10.49	5.28	50.16	106.02	2.11
		19.0	5.50	10.47	4.97	94.43	111.48	1.18	10.49	4.99	47.41	106.02	2.24
	7	16.5	5.21	10.47	5.26	86.79	111.48	1.28	10.49	5.28	87.12	106.02	1.22
		16.5	5.50	10.47	4.97	82.01	111.48	1.36	10.49	4.99	82.34	106.02	1.29
	8	17.1	5.21	10.47	5.26	89.95	111.48	1.24	10.49	5.28	90.29	106.02	1.17
		17.1	5.50	10.47	4.97	84.99	111.48	1.31	10.49	4.99	85.33	106.02	1.24
	9	17.5	5.21	10.47	5.26	92.05	111.48	1.21	10.49	5.28	92.40	106.02	1.15
		17.5	5.50	10.47	4.97	86.98	111.48	1.28	10.49	4.99	87.33	106.02	1.21
	10	21.0	5.21	10.47	5.26	110.46	111.48	1.01	10.49	5.28	110.88	106.02	0.96
		21.0	5.50	10.47	4.97	104.37	111.48	1.07	10.49	4.99	104.79	106.02	1.01
T1000	1	23.6	6.37	10.73	4.36	102.90	123.42	1.20	11.49	5.12	120.83	114.36	0.95
	2a	7.0	6.37	10.73	4.36	30.52	61.71	2.02	11.49	5.12	35.84	114.36	3.19
	2b	7.0	6.37	10.73	4.36	30.52	61.71	2.02	11.49	5.12	35.84	114.36	3.19
	3a	7.0	5.21	10.60	5.39	37.73	61.71	1.64	10.62	5.41	37.87	114.36	3.02
		7.0	5.50	10.60	5.10	35.70	61.71	1.73	10.62	5.12	35.84	114.36	3.19
	3b	7.0	5.21	10.60	5.39	37.73	61.71	1.64	10.62	5.41	37.87	114.36	3.02
		7.0	5.50	10.60	5.10	35.70	61.71	1.73	10.62	5.12	35.84	114.36	3.19
	4	17.5	5.21	10.60	5.39	94.33	123.42	1.31	10.62	5.41	47.34	114.36	2.42
		17.5	5.50	10.60	5.10	89.25	123.42	1.38	10.62	5.12	44.80	114.36	2.55
	5	19.2	5.21	10.60	5.39	103.49	123.42	1.19	10.62	5.41	51.94	114.36	2.20
		19.2	5.50	10.60	5.10	97.92	123.42	1.26	10.62	5.12	49.15	114.36	2.33
	6	19.0	5.21	10.60	5.39	102.41	123.42	1.21	10.62	5.41	51.40	114.36	2.23
		19.0	5.50	10.60	5.10	96.90	123.42	1.27	10.62	5.12	48.64	114.36	2.35
	7	16.5	5.21	10.60	5.39	88.94	123.42	1.39	10.62	5.41	89.27	114.36	1.28
		16.5	5.50	10.60	5.10	84.15	123.42	1.47	10.62	5.12	84.48	114.36	1.35
	8	17.1	5.21	10.60	5.39	92.17	123.42	1.34	10.62	5.41	92.51	114.36	1.24
		17.1	5.50	10.60	5.10	87.21	123.42	1.42	10.62	5.12	87.55	114.36	1.31
	9	17.5	5.21	10.60	5.39	94.33	123.42	1.31	10.62	5.41	94.68	114.36	1.21
		17.5	5.50	10.60	5.10	89.25	123.42	1.38	10.62	5.12	89.60	114.36	1.28
	10	21.0	5.21	10.60	5.39	113.19	123.42	1.09	10.62	5.41	113.61	114.36	1.01
		21.0	5.50	10.60	5.10	107.10	123.42	1.15	10.62	5.12	107.52	114.36	1.06

Bepaling breuksteensortering

Tabel 32 – Breuksteensortering voor raaien 4a, 4b, 5 en 6 in de normale toestand

Raai nr	D50 [m]	M50 [kg]	breuksteen-sortering
4	8.02	1367295	*
5	0.20	21.4	5 – 40 kg
6	0.08	1.3	45/125 mm

* = geen breuksteen mogelijk;

Tabel 33 – Bepaling breuksteensortering voor gedefinieerde raaien voor wascondities

Raai nr	Bodem-peil	T10			T100			T500			T1000		
		D50 [m]	M50 [kg]	breuksteen-sortering	D50 [m]	M50 [kg]	breuksteen-sortering	D50 [m]	M50 [kg]	breuksteen-sortering	D50 [m]	M50 [kg]	breuksteen-sortering
1	+6.37	0.01	< 0.1	32/90 mm	0.01	< 0.1	32/90 mm	0.02	< 0.1	32/90 mm	0.02	< 0.1	32/90 mm
2a/2b	+6.37	0.16	10.5	5 – 40 kg	0.18	16.7	5 – 40 kg	0.24	38.3	10 – 60 kg	0.26	46.5	10 – 60 kg
3a/3b	+5.21	0.09	2.24	45/125 mm	0.12	5.16	63/180 mm	0.20	20.7	5-40 kg	0.22	29.3	10-60 kg
	+5.50	0.11	4.0	63/180 mm	0.15	8.8	63/180 mm	0.23	32.8	10-60 kg	0.26	46.5	10-60 kg
4	+5.21	0.05	0.42	32/90 mm	0.07	0.97	32/90 mm	0.11	3.7	63/180 mm	0.13	5.7	63/180 mm
	+5.50	0.07	0.8	32/90 mm	0.08	1.6	45/125 mm	0.13	6.1	63/180 mm	0.15	8.7	63/180 mm
5	+5.21	0.04	0.2	32/90 mm	0.06	0.5	32/90 mm	0.09	1.9	45/125 mm	0.12	4.8	63/180 mm
	+5.50	0.05	0.4	32/90 mm	0.07	0.8	32/90 mm	0.10	2.9	45/125 mm	0.15	8.8	63/180 mm
6	+5.21	0.04	0.2	32/90 mm	0.06	0.5	32/90 mm	0.09	2.0	45/125 mm	0.13	5.4	63/180 mm
	+5.50	0.05	0.4	32/90 mm	0.07	0.9	32/90 mm	0.11	3.4	63/180 mm	0.15	9.5	90/250 mm
7	+5.21	0.01	< 0.1	32/90 mm	0.02	< 0.1	32/90 mm	0.02	< 0.1	32/90 mm	0.03	0.1	32/90 mm
	+5.50	0.01	< 0.1	32/90 mm	0.02	< 0.1	32/90 mm	0.03	0.1	32/90 mm	0.04	0.1	32/90 mm
8	+5.21	0.01	< 0.1	32/90 mm	0.02	< 0.1	32/90 mm	0.02	< 0.1	32/90 mm	0.03	0.1	32/90 mm
	+5.50	0.01	< 0.1	32/90 mm	0.02	< 0.1	32/90 mm	0.03	0.1	32/90 mm	0.03	0.1	32/90 mm
9	+5.21	0.01	< 0.1	32/90 mm	0.01	< 0.1	32/90 mm	0.02	< 0.1	32/90 mm	0.03	0.1	32/90 mm
	+5.50	0.01	< 0.1	32/90 mm	0.02	< 0.1	32/90 mm	0.03	0.1	32/90 mm	0.03	0.1	32/90 mm
10	+5.21	0.01	< 0.1	32/90 mm	0.01	< 0.1	32/90 mm	0.01	< 0.1	32/90 mm	0.02	< 0.1	32/90 mm
	+5.50	0.01	< 0.1	32/90 mm	0.01	< 0.1	32/90 mm	0.02	< 0.1	32/90 mm	0.02	< 0.1	32/90 mm

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

www.waterbouwkundiglaboratorium.be