00_075_7 WL rapporten

Vlaanderen

is wetenschap

Sigmaplan – Gereduceerde Getijdegebieden – Schaalmodelproeven gecombineerde in- en uitwateringsconstructies

> Deelrapport 7 Inzichten uit schaalmodelproeven

DEPARTEMENT MOBILITEIT & OPENBARE WERKEN

waterbouwkundiglaboratorium.be

Sigmaplan – Gereduceerde Getijdegebieden – Schaalmodelproeven gecombineerde in- en uitwateringsconstructies

Deelrapport 7 – Inzichten uit schaalmodelproeven

Vercruysse, J.; Verelst, K.; Mostaert, F.



Cover figuur © Vlaamse overheid, Departement Mobiliteit en Openbare Werken, Waterbouwkundig Laboratorium

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 2020 D/20120/3241/49

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Vercruysse, J.; Verelst, K.; Mostaert, F. (2020). Sigmaplan – Gereduceerde Getijdegebieden – Schaalmodelproeven gecombineerde in- en uitwateringsconstructies: Deelrapport 7 – Inzichten uit schaalmodelproeven. Versie 4.0. WL Rapporten, 00_075_7. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

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

Documentidentificatie

Opdrachtgever:	Waterbouwkundig Laboratorium		Ref.:	WL2020F	ROO_075_7	
Keywords (3-5):	Sigmaplan, Controlled Reduced Tide (CRT), Inle		t sluice, Stilling basin			
Tekst (p.): 90			Bijlagen	(p.):	4	
Vertrouwelijk:	🖾 Nee	🛛 Online be	schikbaar			

Auteur(s): Vercruysse, J.

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Verelst, K.	Getekend door: Kristof Verelst (Signature) Getekend op: 2020-04-14 08:21:36 +01:00 Reden: Ik keur dit document goed
		K KISTOF V ERELST
Projectleider:	Vercruysse, J.	Getekend door. Jeroen Vercruysse (Signatu Getekend op: 2020-00-914:53:37 +01:00 Reden: Ik keur dit document goed J <i>ehoen VehChrysse</i>

Goedkeuring

		Getekend door: Frank Mostaert (Signature) Getekend op: 2020-04-09 13:38:15 + 01:00 Reden: Ik keur di document goed
Afdelingshoofd:	Mostaert, F.	Frank Hostacat



Abstract

In het kader van het geactualiseerde Sigmaplan worden langsheen de Schelde en haar getijderivieren gecontroleerde overstromingsgebieden gebouwd. Een aantal van deze gebieden wordt ingericht als gereduceerd getijdegebied. De eerste aangelegde gereduceerde getijdegebieden te Lippenbroek en Kruibeke zijn uitgerust met een afzonderlijke in- en uitwateringsconstructie. Voor de nieuwe gereduceerde getijdegebieden wordt de in- en uitwatering gecombineerd in één constructie. Aan rivierzijde wordt de inwateringskoker bovenop de uitwateringskoker geplaatst en aan polderzijde is een woelkom voorzien.

Het ontwerp van deze gebieden en de bijhorende constructies werd door De Vlaamse Waterweg (DVW) uitbesteed. Het ontwerp van de gecombineerde in- en uitwateringsconstructies werd uitgevoerd op basis van door DVW opgegeven richtlijnen. Aan het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) werd gevraagd om door middel van schaalmodelproeven een revisie uit te voeren van de verschillende ontwerpen. In de periode januari 2012 tot december 2013 werd een revisie uitgevoerd van de voorgestelde in- en uitwateringsconstructies van Bergenmeersen, Dijlemonding (Grote Vijver en Zennegat), Vlassenbroek en De Bunt. Omwille van de valhoogte, specifieke randvoorwaarden per gebied en constructieve keuzes zijn deze constructies evenwel in die mate verschillend dat 4 afzonderlijke onderzoeken werden uitgevoerd. Dit rapport tracht de inzichten samen te vatten en aanbevelingen te geven voor toekomstige ontwerpen.

Een eerste belangrijk inzicht is dat voor het laten ontstaan van een watersprong in de woelkom een minimum peil in de polder nodig is. Hoe hoger het rivierpeil hoe hoger dit minimum polderpeil dient te zijn. Bij het onderschrijden van dit minimum polderpeil zal de superkritische stroming na de val niet gedissipeerd worden wat leid tot ontoelaatbare hoge snelheden ter hoogte en afwaartse van de zone met bodembescherming. Uit het onderzoek volgt dat dit minimum peil en bijgevolg ook de bodemligging nauwkeurig bepaald kan worden door middel van formules uit de literatuur.

Om het ontstaan van een watersprong en de energiedissipatie te optimaliseren werden verschillende geometrische varianten onderzocht in schaalmodel. Het verhogen van het peil in de woelkom door het plaatsen van een schanskorfdrempel boven de bodembescherming werd niet effectief bevonden bij maatgevende rivierpeilen. Een lokale verdieping met einddrempel werd wel positief beoordeeld. Hierbij dient enerzijds slechts een beperkte zone verdiept te worden anderzijds spreid de einddrempel de resterende bodemnabije stroming over de waterkolom waardoor de snelheden boven de bodembescherming gereduceerd worden. Door middel van een stootbalk of stootblokken werd getracht de vallende straal geforceerd te dissiperen. Uit het onderzoek volgt dat zowel een stootbalk als stootblokken het minimum polderpeil benodigd voor het laten ontstaan van een watersprong verlagen en de snelheid boven de bodembescherming reduceren. Stootblokken breken de straal open en geven hierdoor een beter resultaat.

Bij een toenemend polderpeil neemt de locatie waar de vallende straal de bodem raakt toe. Bij een ontwerp met een lokaal verdiepte woelkom, een stootbalk of stootblokken bestaat zo het risico dat de vallende straal hier overheen gaat wat kan leiden tot een plotse toename in snelheid. Het plafond boven de woelkom zorgt in deze situaties ervoor dat de straal terug afgebogen wordt naar de bodem van de woelkom en is dus een essentieel hydraulisch element van een gecombineerde in- en uitwateringsconstructie.

Een toekomstig ontwerp voor een gecombineerde in- en uitwateringsconstructie kan uitgevoerd worden op basis van de in dit rapport gegeven aanbevelingen. Ook kan hierbij vertrokken worden van een reeds onderzochte geometrie waarbij de resultaten en geometrie verschaald kunnen worden naar de nieuwe valhoogte.

Inhoudstafel

Abs	Abstract III				
Inh	InhoudstafelV				
Lijs	t var	n de t	abellenVI		
Lijs	t var	n de f	figuren VII		
1	Inl	eidin	g 1		
2	Sch	haalr	nodel 4		
3	Ge	ome	trie ٤		
3	8.1	Ont	werprichtlijnen gecombineerde in- en uitwateringsconstructie		
Э	8.2	Ond	lerzochte aanpassingen aan het ontwerp		
	3.2	2.1	Lokaal diepere woelkom 10		
	3.2	2.2	Schanskorfdrempel		
	3.2	2.3	Stootbalk		
	3.2	2.4	Stootblokken		
	3.2	2.5	Plafond boven woelkom 11		
Э	3.3	Ond	lerzochte geometrieën11		
	3.3	3.1	Bergenmeersen11		
	3.3	3.2	Dijlemonding		
	3.3	3.3	Vlassenbroek		
	3.3	3.4	De Bunt		
	3.3	3.5	Doelpolder		
4	Fo	rmul	es		
Z	1.1	Wa	terhoogte na val 21		
Z	.2	Cor	responderende waterhoogte		
Z	1.3	Wa	terhoogte onder vallende straal		
Z	1.4	Len	gte vallende straal		
Z	1.5	Len	gte watersprong24		
Z	1.6	Dim	ensionering stootblokken		
Z	l.7	Dim	ensieloos weergeven resultaten 29		
5	Re	latie	rivierpeil - inwateringsdebiet		
6	Tra	aject	vallende straal		
e	5.1	Traj	ect vallende straal bij een extreem lage waterhoogte in de polder		
e	5.2	Invl	oed beluchten / niet beluchten uitwateringskoker		

	6.3	Invl	loed schotbalken	. 39
	6.4	Invl	loed stijgend waterhoogte in de polder	. 40
	6.5	Ver	gelijking met literatuurformules	. 43
	6.6	San	nenvatting	. 47
7	Со	rresp	ponderende waterhoogte	. 48
	7.1	Mir	nimum polderpeil bij een gegeven rivierpeil	. 48
	7.2	Cor	responderende waterhoogte bij een vrije watersprong	. 50
	7.3	Cor	responderende waterhoogte bij een lokaal diepere woelkom	. 51
	7.4	Invl	loed schanskorfdrempel	. 53
	7.5	Invl	loed stootbalk	. 54
	7.6	Invl	loed stootblokken	. 56
	7.7	San	nenvatting	. 57
8	Во	dem	nabije snelheid boven bodembescherming en einde watersprong	. 59
	8.1	Вос	demnabije snelheid boven bodembescherming	. 59
	8.1	1	Bodemnabije stroomsnelheid bij een vrije watersprong	. 60
	8.1	.2	Bodemnabije stroomsnelheid bij een lokaal diepere woelkom	. 64
	8.1	.3	Invloed van een stootbalk	. 66
	8.1	4	Invloed van stootblokken	. 67
	8.1	.5	Invloed plafond woelkom	. 69
	8.2	Eind	de watersprong	. 72
	8.2	2.1	Bepaling einde watersprong in schaalmodel	. 72
	8.2	2.2	Vergelijking einde watersprong uit schaalmodelproeven met berekende waarden	. 73
	8.3	San	nenvatting	. 75
9	Ov	erige	e onderzoeksvragen	. 77
	9.1	Ont	tstaan van wervels met een luchtkern	. 77
	9.1	1	Representativiteit schaalmodel op vlak van wervels	. 77
	9.1	.2	Schaalmodelresultaten	. 78
	9.2	Trill	len van de terugslagklep	. 80
	9.3	Ont	tsnappen van een luchtbel in de uitwateringskoker	. 81
	9.4	Ma	ximale waarde voor de bodemnabije snelheid in woelkom	. 81
	9.5	Тур	e watersprong	. 82
	9.6	Cor	nclusie	. 84
1() с	oncl	usies en aanbevelingen	. 86
11	L R	efer	enties	. 88
Bi	jlage:	b	eproefde geometrieën	. B1

Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Schaalfactoren	. 5
Tabel 2 – Assenstelsel gebruikt voor de schaalmodelproeven	7
Tabel 3 – Ontwerpformules woelkom USBR type III	27
Tabel 4 – Valhoogte [m]	29
Tabel 5 – Opgemeten tijdreeksen rivier gebruikt in simulaties numeriek model	49
Tabel 6 – Vergelijking coëfficiënten berekening corresponderende waterhoogte	51
Tabel 7 – Positionering onderzijde EMS probe ten opzichte van bodem	60
Tabel 8 – Gehanteerde visuele definities einde watersprong	72

Lijst van de figuren

Figuur 1 – Principeschets van een gereduceerd getijdegebied	1
Figuur 2 – Principeschets gecombineerde in– en uitwateringsconstructie	1
Figuur 3 – Optredend stromingspatroon bij een stijgend polderpeil	3
Figuur 4 – Bovenaanzicht modelsectie in de grote stroomgoot van het WL	4
Figuur 5 – Instelbaarheid van het schaalmodel	5
Figuur 6 – Assenstelsel gebruikt voor de schaalmodelproeven	7
Figuur 7 – Illustratie gecombineerde in- en uitwateringsconstructie	9
Figuur 8 – Ontwerpgeometrie Bergenmeersen (IMDC)	. 12
Figuur 9 – Voorontwerpgeometrie Grote Vijver	. 14
Figuur 10 – Voorontwerpgeometrie Zennegat	. 15
Figuur 11 – Voorontwerpgeometrie Vlassenbroek	. 16
Figuur 12 – Langsdoorsnede en planzicht voorontwerp gecombineerde in- en uitwateringsconstructie Bunt	De . 18
Figuur 13 – Langsdoorsnede en planzicht aangepast ontwerp gecombineerde in- en uitwateringsconstrue GGG Doelpolder	ctie . 19
Figuur 14 – Lengte watersprong in functie van Froude getal vòòr sprong	. 26
Figuur 15 – Woelkom USBR type III	. 26
Figuur 16 – Toegevoegde lengte woelkom ten gevolge van vallengte straal	. 28
Figuur 17 – Beproefde geometrieën met stootblokken	. 28
Figuur 18 – Parameter a in functie van de overstorthoogte	. 32
Figuur 19 – Illustratie waterspiegelinzinking inwateringskoker	. 33
Figuur 20 – Voorbeeld bepalen van traject vallende straal	. 35
Figuur 21 – Traject beluchte vallende straal	. 35
Figuur 22 – Vergelijking traject vallende straal Bergenmeersen met Grote Vijver en Vlassenbroek	. 36
Figuur 23 – Traject vallende straal bij het al dan niet beluchten van de uitwateringskoker	. 38
Figuur 24 – Traject vallende straal bij het toepassen van schotbalken	. 39
Figuur 25 – Traject vallende straal bij een stijgende waterhoogte in de polder	. 40
Figuur 26 – Traject vallende straal met en zonder plafond woelkom	. 41
Figuur 27 – Oppervlakte jet onder plafond woelkom	. 42
Figuur 28 – Definitie lengte vallende straal	. 43
Figuur 29 – Lengte vallende straal in functie van kritische waterhoogte	. 44
Figuur 30 – Invloed beluchting op vallende straal	. 45
Figuur 31 – Waterpeil in de uitwateringskoker in functie van kritische waterhoogte	. 46

Figuur 32 – Variatie van het polderpeil in het GOG/GGG in functie van het rivierpeil
Figuur 33 – Corresponderende waterhoogte na sprong in functie van kritische waterhoogte
Figuur 34 – Corresponderende waterhoogte na sprong in functie van kritische waterhoogte
Figuur 35 – Beproefde geometrieën met lokaal diepere woelkom voor in- en uitwateringsconstructie voor Vlassenbroek
Figuur 36 – Corresponderende waterhoogte na sprong in functie van kritische waterhoogte voor een lokaal diepere woelkom
Figuur 37 – Beproefde geometrieën met een schanskorfdrempel 53
Figuur 38 – Corresponderende waterhoogte na sprong in functie van kritische waterhoogte bij het gebruik van een schanskorfdrempel voor in- en uitwateringsconstructie voor Bergenmeersen
Figuur 39 – Corresponderende waterhoogte na sprong in functie van kritische waterhoogte bij het gebruik van een stootbalk voor in- en uitwateringsconstructie voor Bergenmeersen
Figuur 40 – Illustratie wisselend sprongpatroon voor Bergenmeersen bij een stootbalk met hoogte 0.250 Δz
Figuur 41 – Corresponderende waterhoogte na sprong in functie van kritische waterhoogte bij het gebruik van stootblokken
Figuur 42 – Variatie van de bodemnabije snelheid in functie van de waterhoogte in de polder Bergenmeersen – geen schotbalken – belucht
Figuur 43 – Variatie van de bodemnabije snelheid in functie van de waterhoogte in de polder Bergenmeersen – dc= 0.645 Δz – geen schotbalken – belucht en niet belucht
Figuur 44 – Variatie van de bodemnabije snelheid in functie van de waterhoogte in de polder Vlassenbroek G2 – geen schotbalken – belucht
Figuur 45 – Variatie van de bodemnabije snelheid in functie van de waterhoogte in de polder Vlassenbroek $G2 - dc= 0.373 \Delta z - geen schotbalken - belucht en niet belucht$
Figuur 46 – Variatie van de bodemnabije snelheid in functie van de waterhoogte in de polder bij gebruik schotbalken – Vlassenbroek G2 – inwateringshoogte $0.610 \Delta z$ – schotbalkhoogte $0.00 \Delta z$, $0.073 \Delta z$ en $0.195 \Delta z$ – belucht
Figuur 47 – Beproefde geometrieën Vlassenbroek met een lokaal diepere woelkom
Figuur 48 – Variatie van de bodemnabije snelheid in functie van de waterhoogte in de polder invloed lokaal diepere woelkom - Vlassenbroek G2 en G4 65
Figuur 49 – Variatie van de bodemnabije snelheid in functie van de waterhoogte in de polder invloed lokaal diepere woelkom - Vlassenbroek G5 en G6 66
Figuur 50 – Bodemnabije snelheid in functie van waterhoogte bij het gebruik van een stootbalk 67
Figuur 51 – Bodemnabije snelheid in functie van waterhoogte in polder bij het gebruik van stootblokken met hoogte 0.250 Δz en 0.375 Δz voor in- en uitwateringsconstructie voor Bergenmeersen
Figuur 52 – Variatie van de bodemnabije snelheid in functie van de waterhoogte in de polder bij het gebruik van stootblokken met hoogte 0.163 Δz voor in- en uitwateringsconstructie voor Vlassenbroek
Figuur 53 – Varianten plafond boven woelkom Dijlemonding70
Figuur 54 – Variatie van de bodemnabije snelheid in functie van de waterhoogte in de polder – Invloed plafond Dijlemonding G3 en G4
Figuur 55 – Vergelijking De Bunt G2 en Vlassenbroek G4

Figuur 56 – Variatie van de bodemnabije snelheid in functie van de waterhoogte in de polder - Vlassenbroek G4 vergeleken met de Bunt G2
Figuur 57 – Stromingspatroon bij een kritische waterhoogte 0.375 Δz links Vlassenbroek G4 met waterhoogte in polder 1.17 Δz / rechts De Bunt G2 met waterhoogte in polder 1.24 Δz
Figuur 58 – Illustratie visuele definities einde watersprong
Figuur 59 – Einde watersprong in functie van kritische waterhoogte
Figuur 60 – Voorkomende stromingsverschijnselen bij een waterhoogte in de polder hoger dan plafondpeil woelkom
Figuur 61 – Wervelvorming Bergenmeersen 79
Figuur 62 – Terugslagklep 80
Figuur 63 – Ontsnappen van lucht in de uitwateringskoker 81
Figuur 64 – Bodemnabije snelheid na val in functie van rivierpeil
Figuur 65 – Type watersprong in functie van Froudegetal vòòr sprong
Figuur 66 – Froudegetal vòòr sprong in functie van rivierpeil 84
Figuur 67 – Bergenmeersen – eerste set geometrieën1
Figuur 68 – Bergenmeersen – tweede set geometrieën 2
Figuur 69 – Dijlemonding – geometrieën
Figuur 70 – Vlassenbroek – geometrieën
Figuur 71 – De Bunt - geometrie

1 Inleiding

In het kader van het geactualiseerde Sigmaplan worden in opdracht van De Vlaamse Waterweg nv - Afdeling Regio Centraal (DVW) Gecontroleerde OverstromingsGebieden (GOG's) langsheen de Schelde en haar getijderivieren gerealiseerd. Een aantal van deze gebieden zal ingericht worden als Gereduceerd GetijdeGebied (GGG). Het werkingsprincipe van een GOG/GGG is voorgesteld in Figuur 1. Bij hoogwater stroomt het water via een inwateringskoker het gebied binnen, bij laagwater wordt het gebied via een uitwaringskoker geledigd.



In 2006 werd als pilootproject het GOG/GGG Lippenbroek in gebruik genomen. In 2016 werd het GOG/GGG Kruibeke in werking gesteld. De in- en uitwatering in deze twee gebieden geschiedt door middel van 2 afzonderlijke constructies (een inwateringsconstructie en een uitwateringsconstructie). Voor de overige GOG/GGG-gebieden zal de in- en uitwatering gecentraliseerd worden in 1 gecombineerde in- en uitwateringsconstructie. Deze constructie bestaat aan rivierzijde uit een inwateringskoker bovenop een uitwateringskoker. Aan polderzijde wordt een woelkom voorzien. Dit concept wordt voorgesteld in Figuur 2.



Per GOG/GGG werd door DVW een studiebureau aangesteld voor het ontwerp en de inrichting van het gebied en de bijhorende gecombineerde in- en uitwateringsconstructie. Op basis van een aantal vooropgestelde richtlijnen hebben deze studiebureaus een voorontwerp gemaakt voor de gecombineerde in- en uitwateringsconstructie.

Daarnaast heeft DVW aan het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) gevraagd om fysisch modelonderzoek uit te voeren met als doel meer inzicht te krijgen in de specifieke werking van de geplande gecombineerde in- en uitwateringsconstructies. Hiervoor werd door WL in 2011 een fysisch schaalmodel ontworpen en gebouwd waarmee het mogelijk was om de hydraulische performantie van de ontwerpen van de verschillende GOG/GGG gebieden af te toetsen. Doordat bij inwatering van het GOG/GGG gebied het peilverschil tussen rivier en polder veel groter is dan bij uitwatering werden de proeven beperkt tot inwatering. Bij inwatering stroomt het water over de vloer van de inwateringskoker en maakt op het einde een val in de woelkom. Het stromingspatroon in de woelkom is afhankelijk van het aanwezige waterpeil in de polder. In functie van een stijgend polderpeil doet zich volgend stromingspatroon voor (zie Figuur 3):

- Bij een extreem laag polderpeil (a) wordt de vallende straal in de woelkom naar de polder toe gericht. De stroming uit de woelkom is superkritisch en de energiedissipatie is beperkt. Een watersprong zal optreden na afname van de impuls, ofwel door wrijvingsverlies ofwel door verwijden van de dwarssectie. Deze situatie is niet toelaatbaar enerzijds omdat de locatie van de watersprong zal wijzigen bij een variatie van het polderpeil en anderzijds omdat de bodembescherming niet bestand is tegen superkritische stroomsnelheden.
- Onmiddellijk na de val ontstaat een watersprong (b). Dit stromingspatroon doet zich voor bij het corresponderend polderpeil, i.e. het peil waarbij er een evenwicht is tussen de impuls na de val en de impuls horende bij de subkritische waterhoogte in de polder. Dit type watersprong wordt een vrije watersprong genoemd.
- Bij een verdronken watersprong (c) wordt de energie van de vallende straal gedissipeerd door middel van een verdronken watersprong. Hierbij ontstaat een neer bovenop de vallende straal. De energiedissipatie bij een verdronken watersprong is minder efficiënt dan bij een vrije watersprong. Ook neemt de afstand tussen de val en het punt waar de vallende straal de bodem raakt toe. Bij een lokaal verdiepte woelkom ontstaat hierbij het risico dat de vallende straal de bodem raakt afwaarts van het einde van de woelkom.
- Bij een verder stijgend polderpeil verandert de vallende straal in een oppervlakte jet (d). De bovenste neer verdwijnt hierbij en de afstand tussen de val en de plaats waar de stroming terug de bodem raakt neemt toe. Bij de meeste beproefde in- en uitwateringsconstructies raakt het plafond van de woelkom verdronken vooraleer een oppervlakte jet optreedt. Bij het verdronken raken van het plafond van de woelkom botst de kern van de straal tegen de verticale muur na de inwateringskoker en wordt de straal gericht naar de bodem van de woelkom.



Figuur 3 – Optredend stromingspatroon bij een stijgend polderpeil

(Vischer & Hager, 1995)

In het voorjaar van 2012 werd de in- en uitwateringsconstructie van het GOG/GGG Bergenmeersen als eerste getoetst in het schaalmodel (Vercruysse et al., 2012). In het najaar van 2012 werden de in- en uitwateringsconstructies van Zennegat en Grote Vijver aan de Dijlemonding getoetst (Vercruysse, et al. 2013). De in-en uitwateringsconstructie van het GOG/GGG Vlassenbroek werd getoetst in het voorjaar van 2013 (Vercruysse *et al.*, 2014b) en de in- en uitwateringsconstructie van de Bunt in het najaar van 2013 (Vercruysse *et al.*, 2014b).

Onderhavig rapport vergelijkt de resultaten van de verschillende proevenreeksen en vat de opgedane inzichten samen.

Het gebruikte schaalmodel wordt besproken in hoofdstuk 2. Hoofdstuk 3 beschrijft de door DVW opgestelde ontwerprichtlijnen voor een gecombineerde in- en uitwateringsconstructie, de in schaalmodel onderzochte varianten en de onderzochte constructies. De toegepaste literatuurformules en de dimensieloze verschaling worden gegeven in hoofdstuk 4.

Hoofdstukken 5 tot en met 9 beschrijven de resultaten van het schaalmodelonderzoek. De uit de proeven volgende relatie tussen debiet door de in- en uitwateringsconstructie en rivierpeil wordt gegeven in hoofdstuk 5. Een grafische analyse van het traject van de vallende straal wordt uitgevoerd in hoofdstuk 6. Een analyse van het benodigd peil in de polder om een watersprong in de woelkom te laten ontstaan wordt besproken in hoofdstuk 7. Voor het dimensioneren van de bodembescherming aan polderzijde dient de bodemnabije snelheid en de lengte van de watersprong gekend te zijn. Deze onderwerpen worden behandeld in hoofdstuk 8. Analyses en besluiten met betrekking tot een aantal overige onderzoeksvragen worden samengevat in hoofdstuk 9.

De conclusies en aanbevelingen worden samengevat in hoofdstuk 10.

2 Schaalmodel

Het schaalmodel wordt ingebouwd in de grote stroomgoot van WL. Deze stroomgoot heeft een lengte van 57.0 m, een breedte van 2.40 m en een hoogte van 1.40 m.

De wanden van de stroomgoot zijn opgebouwd uit metselwerk. Met het oog op het visualiseren van het stromingspatroon in de in- en uitwateringsconstructie, is geopteerd om het model in te bouwen in een vernauwde modelsectie. Deze vernauwde modelsectie wordt afgescheiden door middel van een glazen wand, zie Figuur 4.



Merk in Figuur 4 op dat de stroomgoot een vaste stroomrichting heeft die wordt aangeduid met opwaarts en afwaarts. Tijdens de proeven van de gecombineerde in- en uitwateringsconstructies werd enkel en alleen inwatering van rivier naar polder beschouwd. Derhalve zijn de begrippen "opwaarts" en "afwaarts" ook in die zin te begrijpen: opwaarts is aan rivierzijde, en afwaarts is aan polderzijde.

In het schaalmodel is slechts één koker van de in- en uitwateringsconstructie gemodelleerd. Deze ene koker wordt begrensd door twee evenwijdige verticale wanden, waarvan één opgebouwd is als een doorzichtige (glazen) wand. Randeffecten worden hierbij verwaarloosd.

Het betreft bijgevolg een "2DV" model, waarbij de stroming wordt bestudeerd in een 2 Dimensionaal Verticaal vlak. De breedte van de koker - i.e. de afstand tussen de verticale wanden - heeft hierbij geen groot belang. Een kokerbreedte van 3 m op schaal 1:8 zou resulteren in een breedte van 0.375 m in het schaalmodel. Een dergelijke breedte bemoeilijkt de werkzaamheden bij de ombouw van het model. Vandaar dat deze breedte is opgevoerd tot anderhalve kokerbreedte of 0.560 m in het schaalmodel. Bij het rapporteren van de gemeten debieten doorheen de constructie wordt hier rekening mee gehouden door het debiet uit te drukken per eenheidsbreedte.

Door deze vereenvoudiging was het mogelijk om een instelbaar schaalmodel te bouwen waarmee op een efficiënte wijze verschillende geometrieën (zowel verschillende constructies als varianten) beproefd konden worden. De instelmogelijkheden betreffen (zie Figuur 5):

- de lengte en locatie van de plafonds,
- de hoogte en locatie van de schotbalken of spindelschuiven,
- de ligging van de vloer van de woelkom/drempel,
- de locatie van de bodemverhoging van de uitwateringskoker,
- al dan niet beluchten van de uitwateringskoker.



Voor de geometrische verschaling wordt een schaalfactor 8 toegepast. Voor de verschaling van de tijd, snelheid en het debiet zijn de Froude schaalwetten toegepast. Tabel 1 geeft een overzicht van de – op basis van de Froude schaalwetten afgeleide – van toepassing zijnde schaalfactoren voor dit onderzoek.

schaal	schaalfactor	waarde
waterhoogte, lengte, breedte	α_L	8
snelheid	$\alpha_V = {\alpha_L}^{0.5}$	2.83
tijd	$\alpha_T = \alpha_L \cdot \alpha_V^{-1} = \alpha_L^{0.5}$	2.83
debiet	$\alpha_Q = \alpha_V \cdot \alpha_L^2 = \alpha_L^{2.5}$	181.02
debiet per m breedte	$\alpha_q = \alpha_V \cdot \alpha_L^{\ 1} = \alpha_L^{\ 1.5}$	22.63

Met betrekking tot de verschaling wordt het volgende opgemerkt:

• De in deze studie gebruikte Froude verschaling maakt dat enerzijds de oppervlaktespanning van het water en anderzijds de grootte van de luchtbellen niet correct verschaald zijn. Dit maakt dat het niet mogelijk is om het gedrag van de luchtbellen in het schaalmodel om te rekenen naar natuurwaarden (Novak *et al.*, 2010). Hierbij dient rekening gehouden te worden bij de interpretatie van het gedrag van luchtbellen in het schaalmodel, bijvoorbeeld voor het bepalen van de lengte van een watersprong. Om het gedrag van luchtbellen te verschalen zou bij het ontwerp een verschaling op basis van het getal van Weber uitgevoerd moeten worden. Dit is, bij gebruik van dezelfde vloeistoffen (lucht en water) in model en prototype, echter niet mogelijk in combinatie met een geometrische verschaling op basis van Froude (Chanson et al., 2004; Chanson, 2007).

- De wrijvingsverliezen zijn niet verschaald. De bodem van de in- en uitwateringsconstructie bestaat in de woelkom uit beton en vervolgens uit schanskorven. In het schaalmodel is de bodem van deze beide zones uitgevoerd in hetzelfde materiaal. Aangezien het de bedoeling is dat de watersprong zich voordoet in de woelkom wordt de invloed van de hogere bodemruwheid van de schanskorven beperkt geacht.
- Voor het schaalmodelonderzoek van De Bunt werd de woelkomgeometrie van Vlassenbroek gerecupereerd. Omdat de woelkomgeometrie van Vlassenbroek verschaald werd naar de valhoogte van de Bunt zijn de proeven uitgevoerd met een schaalfactor 9.95 in plaats van schaalfactor 8.00.

Tijdens de proeven zijn onderstaande waarden elektronisch geregistreerd met een tijdstap van 0.5 s^[1]:

- het debiet (uitgedrukt per eenheidsbreedte in m²/s) doorheen het model (type elektromagnetische debietmeter, producent Khrone),
- het waterpeil (uitgedrukt in m TAW) op- en afwaarts van de vernauwde modelsectie (type elektronische vlottermeting, producent Balluff),
- het waterpeil (uitgedrukt in m TAW) in de vernauwde modelsectie door middel van 4 variabel te plaatsen waterhoogtemeters (type golvenmeter, producent WL),
- de stroomsnelheid (uitgedrukt in m/s) in X- en Y-richting in de vernauwde modelsectie door middel van 2 variabel te plaatsen 2DH puntsnelheidsmeters (type elektromagnetische stroomsnelheidsmeter, producent Deltares).

Naast de continue metingen zijn volgende visuele waarnemingen uitgevoerd:

- het einde van de vallende straal (uitgedrukt in m),
- het waterpeil in de uitwateringskoker (uitgedrukt in m TAW),
- het einde van de watersprong (uitgedrukt in m).

Voor het vastleggen van het stromingspatroon is gebruik gemaakt van een fototoestel en een filmcamera.

Het in dit rapport gebruikte assenstelsels wordt beschreven Figuur 6 en Tabel 2.

¹ Uitgedrukt in modeleenheid.



Tabel 2 – Assenstelsel gebruikt voor de schaalmodelproeven

as	beschrijving	nulpunt	positieve richting
x	horizontale langs-as	afwaarts einde inwateringskoker	van rivier naar polder
Y	horizontale dwars-as	centerlijn goot	van linker- naar rechteroever
z	verticale as	vloerpeil uitwateringskoker	van onder naar boven

3 Geometrie

DVW heeft voor het hydraulisch ontwerp van een gecombineerde in- en uitwateringsconstructie een aantal richtlijnen opgelegd, deze worden voorgesteld in paragraaf 3.1. Tijdens het schaalmodelonderzoek werden bepaalde wijzigingen aan het ontwerp onderzocht. De onderzochte wijzigingen worden beschreven in paragraaf 3.2. Binnen dit project werd door DVW gevraagd om het ontwerp van 4 constructies te onderzoeken en indien nodig te optimaliseren. Voor deze 4 constructies wordt in paragraaf 3.3 een korte beschrijving gegeven van het ontwerp en het uitgevoerde studiewerk.

3.1 Ontwerprichtlijnen gecombineerde in- en uitwateringsconstructie

De door DVW opgelegde ontwerprichtlijnen zijn opgesteld in samenwerking met de Technisch Ondersteunende Diensten van het Departement Mobiliteit en Openbare Werken (TOD) en het studiebureau IMDC. De hydraulisch relevante richtlijnen betreffen:

- de inwateringskokers worden bovenop de uitwateringskokers geplaatst.
- de uitwateringskokers worden aan Scheldezijde afgesloten door middel van terugslagkleppen.
- de superkritische straal die ontstaat na de val wordt in een woelkom omgezet naar een subkritische stroming met een peil gelijk aan het polderpeil.
- de kokers van de in- en uitwatering zijn elk 3.0 m breed.
- de hoogte van de kokers bedraagt, tenzij anders vermeld, 2.2 m.
- de constructie kan langs beide zijden afgesloten worden door middel van schotbalken, in de inwateringskoker kan ook het drempelpeil geregeld worden met deze schotbalken. Deze schotbalken overspannen maximaal een halve kokerbreedte.
- zowel aan rivier- als aan polderzijde worden vuilroosters geplaatst.
- bij (dreiging) van GOG werking moeten de inwateringskokers gesloten kunnen worden door middel van spindelschuiven, omwille van hanteerbaarheid bedraagt de maximale spindelschuifbreedte de halve kokerbreedte.

Een illustratie van een gecombineerde in- en uitwateringsconstructie wordt gegeven in Figuur 7.



Figuur 7 - Illustratie gecombineerde in- en uitwateringsconstructie

Bij stroming van rivier naar polder is een dergelijke constructie als volgt opgebouwd:

- Bij stroming van rivier naar polder stroomt het water eerst over een breed plateau. Na enkele meter wordt de stroming opgedeeld in de kanalen met elk een breedte van 3.0 m. Net na de opsplitsing in deze kanalen wordt een vuilrooster voorzien voor het tegenhouden van drijvend vuil. Achter de vuilroosters wordt een 0.30 m à 0.40 m brede tussenkolom geplaatst waarin zich de schotbalken en spindelschuiven bevinden. De schotbalken dienen om het inwateringspeil af te regelen. Met behulp van de spindelschuiven kan voorafgaandelijk aan GOG-werking de inwatering afgesloten worden zodat de maximale komberging beschikbaar is. De tussenkolom eindigt op 0.8 m à 2.6 m van het einde van het inwateringsplateau, waardoor de stroming voor de val terug samengevoegd wordt.
- Op het einde van het inwateringsplateau valt het water in de lager gelegen woelkom.
- Voordat de kokers aan polderzijde terug samenkomen wordt een tussenkolom geplaatst met een breedte 0.30 m à 0.40 m voor het plaatsen van schotbalken. Na de tussenkolom worden vuilroosters voorzien voor het tegenhouden van drijvend vuil bij stroming van polder naar rivier.
- Na de vuilroosters komen de kokers terug samen. De vleugelmuren verwijden op een afstand van enkele meter na de vuilroosters. De betonnen vloer in deze zone bevindt zich tussen de vleugelmuren.
- Zowel aan rivierzijde als aan polderzijde wordt een zone met bodembescherming voorzien.

3.2 Onderzochte aanpassingen aan het ontwerp

Uit het onderzoek volgde dat niet voor alle beproefde situaties het peil in de polder voldoende was om een watersprong te laten ontstaan in de woelkom, zie strominstype a in Figuur 3. Hierop werd getracht om de beschikbare waterhoogte in de woelkom te verhogen door de woelkom lokaal te verdiepen, zie paragraaf 3.2.1, of door een schanskorfdrempel toe te voegen aan polderzijde van de constructie, zie paragraaf 3.2.2. Hiernaast werd ook onderzocht of de energie van de vallende straal gedeeltelijk gedissipeerd kan worden zodat de benodigde waterhoogte voor het laten ontstaan van een watersprong gereduceerd kan worden. Voor het geforceerd dissiperen werd zowel een stootbalk, zie paragraaf 3.2.3, als stootblokken, zie paragraaf 3.2.4, onderzocht. Bij hogere rivierpeilen komt de vallende straal in aanraking met het plafond boven de woelkom. Enkele proeven werden uitgevoerd met variante geometrieën voor dit plafond, zie paragraaf 3.2.5.

3.2.1 Lokaal diepere woelkom

Een lokaal diepere woelkom werd onderzocht voor de in- en uitwateringsconstructies van Vlassenbroek, Dijlemonding en De Bunt. Wanneer het bodempeil van de woelkom niet voldoende hoog is om in alle beschouwde condities een watersprong te initiëren kan gekozen worden om de bodem lokaal te verdiepen. Belangrijk hierbij is dat de lokaal verdiepte woelkom voldoende lang is zodat voldoende energie gedissipeerd wordt. Omdat de helling van de vallende straal afneemt bij hogere peilen in de polder ontstaat het risico dat de vallende straal de bodem raakt afwaarts de woelkom. Om deze reden dient een lokaal verdiepte woelkom ook ontworpen te worden voor hogere polderpeilen. Voor de overgang van de lokaal verdiepte woelkom werd een schuine helling 1:1 (V:H) gekozen. Deze helling zorgt ervoor dat de resterende bodemnabije snelheid op het einde van de woelkom van de bodem weggericht wordt. Bemerk dat deze helling steiler is dan de in Peterka (1984) aanbevolen helling 1:2 voor een USBR woelkom.

3.2.2 Schanskorfdrempel

Het verhogen van de waterhoogte in de woelkom door middel van het plaatsen van een schanskorfdrempel in de bodembescherming aan polderzijde van de constructie werd onderzocht voor de in- en uitwateringsconstructie voor Bergenmeersen. Het peil van de deze drempel mag niet hoger zijn dan het bodempeil van de uitwatering. Uit de proeven volgde dat het effect van deze drempel voor de maatgevende condities (de hogere rivierpeilen) verwaarloosbaar was.

3.2.3 Stootbalk

Het geforceerd gedeeltelijk dissiperen van de energie van de vallende straal door deze te laten botsen op een stootbalk werd onderzocht voor de in- en uitwateringsconstructie voor Bergenmeersen. Dit betrof een balk die geplaatst werd ter hoogte van de schotbalknissen aan de polderzijde van de constructie. Het voordeel van een stootbalk is dat dit constructief een relatief eenvoudige toevoeging is. Uit de proeven volgde dat deze balk zorgt voor een verlaging van de bodemnabije snelheid boven de bodembescherming en voor een verlaging van het benodigd corresponderend polderpeil. De stootbalk zorgt ervoor dat de bodemnabije stroming omhoog gericht wordt. De hierbij horende spreiding en hieropvolgende impact zorgt voor een dissipatie van de energie en dus verlaging van de benodigde corresponderende waterhoogte. De dissipatie is evenwel minder efficiënt en gecontroleerd als bij stootblokken. Ook werd bij toename van het polderpeil een onstabiel overgangsregime waargenomen waarbij al dan niet een roller ontstaat opwaarts de stootbalk. Bij een toename van het polderpeil kan het ook voorkomen dat de vallende straal over de stootbalk heen gaat.

3.2.4 Stootblokken

Voor de in- en uitwateringsconstructies voor Bergenmeersen en Vlassenbroek werden stootblokken beproefd. Stootblokken worden frequent toegepast als energiedissipatie in woelkommen bij inwateringsconstructies, stuwen en zo voort. Het doel van stootblokken is het breken van een geconcentreerde stroming. De beproefde stootblokken zijn gedimensioneerd volgens de ontwerpformules voor een woelkom USBR type III. Peterka (1984) en Thompson en Kilgore (2006) bevatten ontwerpformules voor dit type woelkom. Een dergelijke type is ontworpen om te volgen op een schuine helling (V:H, 1:2). Voor de gecombineerde in- en uitwateringsconstructies werd het startpunt van de woelkom bepaald als het eindpunt van de vallende straal (bepaald volgens Chanson (2002)). De conditie van de stroming bij intrede van de woelkom volgde uit de waterhoogte na val (bepaald volgens Chanson (2002) of Rand (1955)). Uit de USBR ontwerpformules volgt de locatie, breedte en hoogte van de stootblokken. Er wordt steeds gekozen om minimum twee stootblokken per koker toe te passen, ook indien uit de USBR ontwerpformules 1 stootblok volgt. Uit de proeven volgde dat stootblokken hydraulisch zeer efficiënt zijn. De benodigde corresponderende waterhoogte wordt verlaagd tot ca. 85 % en de bodemnabije snelheid neemt af in normale

condities maar ook bij waterpeilen lager dan de corresponderende waterhoogte. Stootblokken zijn evenwel relatief complex en dus duur. Ook hebben stootblokken vermoedelijk nadelige effecten op vismigratie via de inwateringskoker.

3.2.5 Plafond boven woelkom

Bij de in- en uitwateringsconstructie voor Dijlemonding werd opgemerkt dat bij hoge rivierpeilen de vallende straal op het plafond boven de woelkom botst. Aangenomen werd dat dit voor de duurzaamheid van de constructie minder wenselijk was waarna een geometrie met een schuine overgang en een geometrie met een verder geplaatste verticale overgang onderzocht werden. Tijdens het uitvoeren van het onderzoek voor de in- en uitwateringsconstructie voor Vlassenbroek werd echter de bedenking gemaakt of het niet voordelig is om de instroming actief in te snoeren bij rivierpeilen die hoger zijn dan het gemiddeld springtij.

3.3 Onderzochte geometrieën

Het onderzoek werd achtereenvolgens uitgevoerd voor de gecombineerde in- en uitwateringsconstructie van:

- GOG/GGG Bergenmeersen zie paragraaf 3.3.1,
- GOG/GGG Dijlemondingen zie paragraaf 3.3.2,
- GOG/GGG Vlassenbroek zie paragraaf 3.3.3,
- GOG/GGG De Bunt zie paragraaf 3.3.4.

Hiernaast werd in 2016 op een ander schaalmodel ook de gecombineerde in- en uitwateringsconstructie van het GGG Doelpolder onderzocht. Dit onderzoek wordt kort toegelicht in paragraaf 3.3.5. De resultaten voor Doelpolder worden evenwel niet meegenomen in de in hoofdstuk 5 tot en met hoofdstuk 9 uitgevoerde analyse.

3.3.1 Bergenmeersen

De gecombineerde in- en uitwateringsconstructie van Bergenmeersen bestaat uit 6 hoge inwateringskokers en 3 lage uitwateringskokers. De MIKE11 modellering van het GOG/GGG Bergenmeersen en de bepaling van het aantal kokers en het drempelpeil van de kokers wordt beschreven in Coen *et al.* (2010a). De inrichting van het GOG/GGG en het ontwerp van de in- en uitwateringsconstructie werd uitgevoerd door het studiebureau IMDC. Voor de revisie werden volgende plannen overgemaakt aan WL:

Zeeschelde R.O. Dijkwerken te Wichelen. Aanpassing bestaand gecontroleerd overstromingsgebied Bergenmeersen. In- en uitwateringsconstructie Bergenmeersen

- Deel 1/4. Bovenaanzicht A-A & Doorsnede F-F. C4 9379–B20 (Technum & W&Z, 2010a)
- Deel 2/4. Doorsnede B-B & Doorsnede E-E. C4 9379–B21 (Technum & W&Z, 2010b)
- Deel 3/4. Doorsnede C-C & Aanzicht kant GGG & kant Schelde. C4 9379–B22 (Technum & W&Z, 2010c)
- Deel 4/4. Doorsnede D-D, H-H & Doorsnede I-I. C4 9379–B23 (Technum & W&Z, 2010d)

De door het studiebureau uitgewerkte ontwerp van Bergenmeersen wordt gegeven in Figuur 8.





op basis van doorgestuurde autocadfile (M. Moeskops, IMDC nv, e-mail, 17 augustus 2010)

Bij aanvang van de proeven in het voorjaar van 2012 was de constructie van de gecombineerde in- en uitwateringsconstructie van Bergenmeersen al in uitvoering. Hierom werd Bergenmeersen prioritair beproefd.

Tijdens de proeven werd vastgesteld dat voor hogere rivierpeilen de marge tussen het minimum voorkomend polderpeil (berekend op basis van MIKE11 simulaties) en het corresponderend polderpeil dat nodig is om een watersprong te laten ontstaan in de woelkom beperkt is. Doordat het niet meer wenselijk/haalbaar was om de geometrie te wijzigen werd het verhogen van de beschikbare afwaartse waterhoogte door middel van een schanskorfdrempel en het gedeeltelijk dissiperen van de energie door middel van een stootbalk of stootblokken onderzocht. Hiervoor werden volgende aanpassingen beproefd op het schaalmodel:

- Het plaatsen van een schanskorfdrempel met een hoogte 0.25 m op 14 m na de val of een hoogte 0.50 m op 14 m of 19 m na de val.
- Het verdiepen van de volledige woelkom met 0.50 m.
- Het plaatsen van een stootbalk met hoogte 0.25 m en hoogte 0.50 m op 5.0 m na de val.
- Het plaatsen van stootblokken met hoogte 0.50 m en hoogte 0.75 m op 5.0 m na de val.

Op basis van de proeven werd besloten om de geometrie te behouden maar om de optie tot het plaatsen van een stootbalk achter de hand te houden. Wanneer in situ vastgesteld zou worden dat het polderpeil te laag is zal worden overgegaan tot het monteren van een stootbalk in de schotbalknissen.

Bijkomend werden ook een aantal testen uitgevoerd voor de situatie waarbij enkel een inwateringskoker aanwezig is en geen uitwateringskoker. Voor Bergenmeersen zijn er namelijk 6 inwateringskokers en slechts 3 uitwateringskokers. Uit de vergelijking volgde dat het al dan niet aanwezig zijn van de uitwateringskoker een verwaarloosbare invloed heeft.

De resultaten van het uitgevoerde onderzoek zijn gerapporteerd in J B Vercruysse et al. (2012).

3.3.2 Dijlemonding

De cluster Dijlemonding omvat het GOG/GGG Grote Vijver en het GOG/GGG Zennegat. De MIKE11modellering van het GGG Dijlemonding, de dimensionering van de kokers en de bepaling van de drempelpeilen wordt beschreven in Coen *et al.* (2008) en Coen, Pereira, *et al.* (2010). De gecombineerde in- en uitwateringsconstructie van Grote Vijver bestaat uit 6 hoge inwateringskokers en 6 lage uitwateringskokers. De gecombineerde in- en uitwateringsconstructie van Zennegat bestaat uit 3 hoge inwateringskokers en 5 lage uitwateringskokers. De inrichting van de cluster Dijlemonding en het ontwerp van de constructies werd uitbesteed aan het studiebureau Royal Haskoning. Voor de revisie van de gecombineerde in- en uitwateringsconstructie werden volgende plannen overgemaakt aan WL:

- Bouw van het gecontroleerde overstromingsgebied Grote vijver deel 1 Gecombineerd in- en uitlaatwerk Plan voor stedenbouwkundige vergunningsaanvraag. (Haskoning & W&Z, 2011a)
- Bouw van het gecontroleerde overstromingsgebied Zennegat Gecombineerd in-en uitlaatwerk Plan voor stedenbouwkundige vergunningsaanvraag. (Haskoning & W&Z, 2011b).

Een doorsnede van de voorontwerpgeometrie van de gecombineerde in- en uitwateringsconstructie van Grote Vijver wordt gegeven in Figuur 9. De gecombineerde in- en uitwateringsconstructie voor Zennegat (Figuur 10) is zo goed als identiek. Merk op dat de constructie aan polderzijde bestaat uit een veel langere koker in vergelijking met de in- en uitwateringsconstructie voor Bergenmeersen. De constructie wordt gebouwd in een beschermd landschap waardoor als voorwaarde werd gesteld dat de visuele hinder ten gevolge van de constructie minimaal moet zijn en deze volledig in de dijk ingewerkt dient te worden.



o.b.v. Haskoning & W&Z (2011a)



o.b.v. Haskoning & W&Z (2011b)

Door de aanwezigheid van een lokaal diepere woelkom en hierop volgend een lange betonnen sectie (ca. 17.5 m) werd bij het uitvoeren van de proeven minder aandacht besteed aan het ontstaan van een goed ontwikkelde watersprong in de woelkom maar werd de focus gelegd op de stroming bij uittrede van de constructie, i.e. de stroming boven de bodembescherming. Op basis van de uitgevoerde proeven werd besloten dat de uitstroming voldoet voor de voorkomende combinaties van rivier- en polderpeilen (afkomstig van de numerieke MIKE11 simulaties). Wel werd opgemerkt dat de vallende straal bij hoge rivierpeilen in aanraking komt met de muur na de inwateringskoker. Doordat dit niet opportuun werd geacht voor de duurzaamheid van de constructie zijn twee volgende alternatieve geometrieën beproefd.

- de muur wordt over een lengte van 1.0 m naar achter verschoven,
- vanaf een afstand van 2.35 m na de val wordt een dakplaat met helling 45° voorzien.

In overleg met de opdrachtgever werd besloten om deze muur 1.0 m naar achter te verschuiven. De resultaten van dit onderzoek zijn gerapporteerd in (Vercruysse *et al.*, 2013).

3.3.3 Vlassenbroek

De MIKE11-modellering van het gebied, de dimensionering van de kokers en de bepaling van de drempelpeilen wordt beschreven in Coen *et al.* (2009). De inrichting van het gebied werd niet uitbesteed aan een studiebureau maar uitgevoerd door DVW in samenwerking met de Technisch Ondersteunende Diensten van het Departement Mobiliteit en Openbare werken. In samenwerking met het Expertisecentrum Beton en Staal (EBS) en WL werd een voorontwerp van de in- en uitwateringsconstructie opgemaakt:

• Afdeling betonstructuren (2010), Zeeschelde R.O. Te Dendermonde (Vlassenbroek) Aanleg gecontroleerd overstromingsgebied Vlassenbroek; In- en uitwateringsconstructie GGG algemene aanzichten – details; plan voor stedenbouwkundige vergunningsaanvraag C4 9388-B07 25-06-2010. (Betonstructuren, 2010).

Een doorsnede van de voorontwerpgeometrie van de in- en uitwateringsconstructie voor Vlassenbroek wordt gegeven in Figuur 11.



o.b.v. (Betonstructuren, 2010).

Op basis van ervaring uit de voorgaande revisies van de in- en uitwateringsconstructies werd een snelle desktop revisie uitgevoerd. Aan de hand van deze revisie werd besloten dat de constructie niet voldeed voor het corresponderend polderpeil. Hierop werden volgende variante geometrieën beproefd:

- Geometrie 2: De woelkom en het bodempeil aan polderzijde worden verdiept met 0.50 m.
- **Geometrie 3**: De woelkom wordt lokaal verdiept met 0.50 m. Na 6.7 m wordt door middel van een drempel overgaan tot het oorspronkelijke bodempeil.
- **Geometrie 4**: De woelkom wordt lokaal verdiept met 0.50 m. Na 11.0 m wordt door middel van een drempel overgaan tot het oorspronkelijke bodempeil.
- **Geometrie 5**: De woelkom wordt lokaal verdiept met 1.00 m. Na 11.0 m wordt door middel van een drempel overgaan tot het oorspronkelijke bodempeil.
- **Geometrie 6**: De woelkom wordt lokaal verdiept met 1.00 m. Na 11.0 m wordt door middel van een drempel overgaan naar een 0.50 m lager bodempeil ten opzichte van het oorspronkelijk bodempeil.
- **Geometrie 7**: Aan Geometrie 6 worden stootblokken met hoogte 0.75 m en breedte 0.50 m toegevoegd.

In overleg met DVW en EBS werd gekozen voor Geometrie 6. De resultaten van dit onderzoek zijn gerapporteerd in Vercruysse *et al.* (2014b) De dimensionering van de schanskorfbodembescherming werd uitgevoerd in een afzonderlijk rapport (Verelst *et al.*, 2014).

3.3.4 De Bunt

De MIKE11-modellering van het gebied, de dimensionering van de kokers en de bepaling van de drempelpeilen wordt beschreven in Coen *et al.* (2011). De gecombineerde in- en uitwateringsconstructie van De Bunt bestaat uit 5 hoge inwateringskokers en 6 lage uitwateringskokers. De inrichting van de cluster Durmevallei werd uitbesteed aan het studiebureau AnteaGroup. Voor de revisie werden volgende plannen overgemaakt aan WL:

Durme R.O. te Hamme GOG/GGG De Bunt

- kunstwerken 1/14 In- en uitwatering N Deel 1/4 C4 9159-A22 (Antea Group, 2011a),
- kunstwerken 2/14 In- en uitwatering N Deel 2/4 C4 9159-A23 (Antea Group, 2011b),
- kunstwerken 3/14 In- en uitwatering N Deel 3/4 C4 9159-A24 (Antea Group, 2011c),
- kunstwerken 4/14 In- en uitwatering N Deel 4/4 C4 9159-A25 (Antea Group, 2011d).

Een doorsnede van de voorontwerpgeometrie van de in- en uitwateringsconstructie voor De Bunt wordt gegeven in Figuur 12. Merk op dat de afstand tussen het einde van de inwateringskoker en de daaropvolgende verticale muur merkelijk groter is dan bij de voorgaande constructies.



Figuur 12 – Langsdoorsnede en planzicht voorontwerp gecombineerde in- en uitwateringsconstructie De Bunt

Op basis van ervaring uit de voorgaande revisies van de in- en uitwateringsconstructies werd een uitgebreide desktop revisie uitgevoerd. Hieruit werd besloten dat de constructie niet voldeed. Gekozen werd om de woelkom aan te passen op basis van een voor de in- en uitwateringsconstructie voor Vlassenbroek beproefd ontwerp. Gekozen werd om Vlassenbroek Geometrie 4 te verschalen naar de valhoogte voor de Bunt. De bodem van de woelkom werd hierbij met 0.5 m verlaagd tot een bodempeil -1.0 m TAW en de lengte van de woelkom werd met 4.7 m verlengd tot 13.70 m. De geometrie van het plafond bleef hierbij behouden. Omdat de geometrie van het plafond bij hogere rivierpeilen een hydraulische invloed heeft werd met deze aangepaste geometrie een beperkte proevenreeks uitgevoerd.

De resultaten van dit onderzoek zijn gerapporteerd in Vercruysse et al. (2014a).

3.3.5 Doelpolder

In 2015 heeft WL op vraag van DVW een revisie uitgevoerd van het ontwerp voor de gecombineerde in- en uitwateringsconstructie van het GGG Doelpolder. In eerste instantie werd gekeken of het mogelijk was om op basis van het reeds uitgevoerde onderzoek een woelkomontwerp voor Doelpolder op te stellen (Vercruysse *et al.*, 2015). Doelpolder verschilt ten opzichte van de voorgaande constructies door het lagere vloerpeil van de inwateringskoker en door de afwezigheid van de GOG functie. Omdat niet gegarandeerd kan worden dat de constructie afgesloten wordt bij stormtij wordt het extreem maatgevend rivierpeil

gelijkgesteld aan de maatgevende waterstand voor de rivierdijken afwaarts Antwerpen, i.e. 9.0 m TAW. De inwateringshoogte voor Doelpolder bedraagt hierdoor 5.7 m (=9.0 m TAW – 3.3 m TAW), wat dubbel zo groot als bij de overige constructies (ca. 3.0 m). Voor de geometrie van de woelkom werd zowel een verschaling van de voor De Bunt beproefde geometrie op basis van de inwateringshoogte overwogen als een woelkomontwerp USBR type IV met einddrempel zonder stootblokken en een woelkomontwerp USBR type III met einddrempel en stootblokken. Door de hogere inwateringshoogte (5.7 m) ten opzichte van de kokerhoogte (2.2 m) zal bij hoge rivierpeilen de koker insnoeren en het debiet afnemen. Voor de woelkom USBR type IV en de woelkom USBR type III werd het ontwerp uitgevoerd voor een debiet horende bij zowel een niet ingesnoerde als bij een ingesnoerde koker. Gekozen werd voor een verschaling van de voor De Bunt beproefde geometrie. Een woelkom USBR type IV bepaald o.b.v. het ingesnoerde debiet zou volgens de ontwerpregels leiden tot een 50 % langere woelkomlengte. Door geen rekening te houden met de debietafname door het insnoeren van de inwateringskoker wordt het overnemen van de geometrie van voor De Bunt beproefde geometrie als voldoende conservatief beschouwd.



Figuur 13 – Langsdoorsnede en planzicht aangepast ontwerp gecombineerde in- en uitwateringsconstructie GGG Doelpolder

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

Omwille van de onzekerheid op de dissipatie bij hogere polderpeilen en de eventuele mogelijkheid tot optimalisatie heeft WL in 2016 een schaalmodelstudie voor de gecombineerde in- en uitwateringsconstructie van Doelpolder uitgevoerd. Hiervoor werd de geometrie van Doelpolder als een 2DV model ingebouwd op schaal 1:15 in de kleine stroomgoot van WL. Tijdens de proeven werden drie varianten beproefd:

- **Geometrie 1**: De geometrie uitgewerkt in het desktopontwerp, zie Figuur 13.
- **Geometrie 2**: De bodem van de woelkom werd met 0.40 m verhoogd ten opzichte van geometrie 1.
- **Geometrie 3**: De bodem van de woelkom werd met 0.40 m verhoogd en de lengte van de woelkom werd met 4.0 m gereduceerd ten opzichte van geometrie 1.

Uit de proeven volgde dat Geometrie 3 voldoet. Bemerk dat de Geometrie 3 vrijwel overeenstemt met het in de desktopstudie (Vercruysse *et al.,* 2015) uitgewerkte ontwerp voor een USBR type III woelkom maar dan zonder stootblokken.

Bijkomend wordt opgemerkt dat het plaatsen van een plafond boven de einddrempel bij hoge polderpeilen de hydraulische werking van deze drempel gedeeltelijk tegenwerkt.

De resultaten van dit onderzoek zijn gerapporteerd in Vercruysse et al. (2016).

4 Formules

Onderhavig hoofdstuk vat de in dit rapport toegepaste formules samen. De beoordeling van de bruikbaarheid van deze formules aan de hand van de schaalmodelproeven wordt uitgevoerd in de volgende hoofdstukken.

De formule voor de hoogte van de stroming na val wordt gegeven in paragraaf 4.1. De superkritische stroming na de val dient in de woelkom omgezet te worden naar een subkritische stroming door middel van een watersprong. De minimum hoogte om deze sprong te laten ontstaan betreft de corresponderende waterhoogte. De formule voor de corresponderende waterhoogte wordt gegeven in paragraaf 4.2. Voor het dimensioneren van de lengte van de woelkom dient ook de vallengte meegenomen te worden. De formules voor de vallengte worden gegeven in paragraaf 4.4. Voor de situatie van een woelkom met vlakke bodem en zonder verwijding in de breedte kan de lengte van de watersprong berekend worden. De formules hiervoor worden gegeven in paragraaf 4.5. De benodigde woelkomlengte en de benodigde corresponderende waterhoogte kan gereduceerd worden door het toepassen van stootblokken in de woelkom. In dit rapport wordt een dimensionering volgens de USBR ontwerpformules toegepast, deze wordt overgenomen in paragraaf 4.6.

Om de verschillende proeven onderling te kunnen vergelijken worden de resultaten in dit rapport zoveel mogelijk dimensieloos weergegeven. De dimensieloze weergave van de resultaten wordt besproken in paragraaf 4.7.

4.1 Waterhoogte na val

De waterhoogte na een val kan berekend worden aan de hand van de formules van Rand (1955) en Chanson (2002). Bemerk dat deze formules uitgaan van de kritische waterhoogte in de inwateringskoker. Wanneer schotbalken toegepast worden in de inwateringskoker, om het drempelpeil te regelen, zal het water op de vloer van de inwateringskoker na de schotbalken versnellen en dus superkritisch worden. Doordat de snelheid van het water al hoger is dan de kritische snelheid zal de met onderstaande formules bepaalde hoogte na val overschat worden.

Formules waterhoogte na val:

• Rand (1955)
$$Y_1 = 0.54 \cdot \left(\frac{d_c}{\Delta_z}\right)^{1.275} \cdot \Delta z$$
 [m]

• Chanson (2002)
$$Y_1 = 0.625 \cdot \left(\frac{d_c}{\Delta_z}\right)^{1.326} \cdot \Delta z$$
 [m]

Formule dikte vallende straal:

• Chanson (2002)
$$t_i = 0.687 \cdot \left(\frac{d_c}{\Delta_z}\right)^{1.483} \cdot \Delta z$$
 [m]

Met:

• Y ₁	Waterhoogte waterstraal na val	[m]
• t _i	Dikte vallende straal	[m]
• d _c	Kritische waterhoogte ($d_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$)	[m]
• Δ_z	Hoogte van de val	[m]
• q	Debiet per eenheidsbreedte (hoofdstuk 4)	[m²/s]
	$V_{\rm ab}$ are alling $l = 0.81 \text{ m}/s^2$	[ma /a ²]

• g Valversnelling (= 9.81 m/s²) [m/s²]

4.2 Corresponderende waterhoogte

De corresponderende waterhoogte betreft de minimum afwaartse waterhoogte waarbij een watersprong ontstaat. Dit is met andere woorden het minimum toelaatbaar polderpeil voor een gegeven conditie (valhoogte en instromingsdebiet). De algemene vergelijking van Bélanger (1828) bepaalt de corresponderende waterhoogte op basis van het Froudegetal en de hoogte van de superkritische stroming voor sprong. De formules van Chanson (2002) en Rand (1955) bepalen de corresponderende waterhoogte voor de specifieke situatie na een val op basis van de kritische waterhoogte en de valhoogte. Bemerk dat de formules van Chanson en Rand uitgaan van de kritische waterhoogte op de kruin en dus strikt gezien niet van toepassing zijn voor de situatie wanneer het drempelpeil geregeld wordt door middel van schotbalken.

 Vergelijking van Bélanger (1828) voor de corresponderende waterhoogte ten gevolge van superkritische stroming:

$$Y_2 = Y_1 \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(\sqrt{1 + 8 \cdot Fr_1^2} - 1 \right)$$

Met:

-	Y_1	Waterhoogte vòòr sprong	[m]
-	Y ₂	Waterhoogte na sprong	[m]
-	Fr_1	Froudegetal vòòr sprong $Fr_1 = \frac{q_{Y_1}}{\sqrt{g \cdot Y_1}}$	[-]
-	q	Debiet per eenheidsbreedte (zie hoofdstuk 4)	[m²/s]
-	g	Valversnelling (= 9.81 m/s ²)	[m/s ²]

• Formule van Rand (1955) voor de corresponderende waterhoogte na een verticale val:

$$\frac{\mathrm{Y}_2}{\mathrm{\Delta z}} = 1.66 \cdot \left(\frac{\mathrm{d}_c}{\mathrm{\Delta}_z}\right)^{0.81}$$

Met:

-	Y_2	Waterhoogte na sprong	[m]
-	d_{c}	Kritische waterhoogte ($d_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$)	[m]

- q Debiet per eenheidsbreedte (zie hoofdstuk 4) [m²/s]
 g Valversnelling (= 9.81 m/s²) [m/s²]
- Δ_z Valhoogte [m]
- Formule van Chanson (2002) voor de corresponderende waterhoogte na een verticale val:

$$\frac{\mathrm{Y}_{2}}{\mathrm{\Delta z}} = 1.565 \cdot \left(\frac{\mathrm{d}_{c}}{\mathrm{\Delta}_{z}}\right)^{0.809}$$

Met:(m)- Y_2 Waterhoogte na sprong[m]- d_c Kritische waterhoogte ($d_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$)[m]- qDebiet per eenheidsbreedte (zie hoofdstuk 4)[m²/s]- gValversnelling (= 9.81 m/s²)[m/s²]

- Δ_z Valkoogte [m]

Merk op dat de formule van Bélanger (1828) een algemene formule betreft voor het bepalen van de corresponderende waterhoogte na een watersprong ten gevolge van superkritische stroming terwijl de formules van Rand en Chanson specifiek opgesteld werden voor de corresponderende waterhoogte na een beluchte verticale val. Om die reden dient voor het toepassen van de vergelijking van Bélanger de waterhoogte voor sprong (Y₁) nog bepaald te worden. De waterhoogte voor sprong kan bepaald worden aan de hand van de formule van Rand (1955) of Chanson (2002), zie paragraaf 4.1.

4.3 Waterhoogte onder vallende straal

In geval van een beluchte vallende straal kan de waterhoogte onder de vallende straal als volgt berekend worden:

$$\frac{Y_p}{\Delta z} = \left(\frac{dc}{\Delta z}\right)^{0.66}$$
 (Rand, 1955)
$$\frac{Y_p}{\Delta z} = 0.998 \cdot \left(\frac{dc}{\Delta z}\right)^{0.675}$$
 (Chanson, 2002)

Met:

-	$\mathbf{Y}_{\mathbf{p}}$	Waterhoogte onder de vallende straal	[m]
-	d_c	Kritische waterhoogte (d _c = $\sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$)	[m]
-	q	Debiet per eenheidsbreedte (zie hoofdstuk 4)	[m²/s]
-	g	Valversnelling (= 9.81 m/s ²)	[m/s²]
-	Δ_{z}	Valhoogte	[m]

Voor het bepalen van het waterpeil onder een vallende straal bij een niet-beluchte vallende straal zijn de auteurs van dit rapport geen formules bekend.

4.4 Lengte vallende straal

Voor een beluchte vallende straal vermeldt de literatuur formules voor de lengte van de vallende straal en het peil onder de vallende straal. Voor de vergelijking met de resultaten van de schaalmodelproeven worden volgende formules uit de literatuur voor de lengte van een beluchte vallende straal beschouwd:

$$\frac{L_D}{\Delta_z} = 4.30 \left(\frac{dc}{\Delta_z}\right)^{0.81} \text{ (Rand, 1955)}$$
$$\frac{L_D}{\Delta_z} = 2.171 \left(\frac{dc}{\Delta_z}\right)^{0.525} \text{ (Chanson, 2002)}$$

Met:

•	L _D	Lengte vallende straal gemeten vanaf het begin van de val tot het punt afwaarts waar de vallende straal omgezet is naar	
		een horizontale stroming.	[m]
•	d _c	Kritische waterhoogte (d _c = $\sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$)	[m]
•	q	Debiet per eenheidsbreedte (zie hoofdstuk 4)	[m²/s]
•	g	Valversnelling (= 9.81 m/s ²)	[m/s²]
•	Δz	Valhoogte	[m]

Bemerk dat er een aanzienlijk verschil is tussen beide formules. Uit de in paragraaf 6.5 gegeven vergelijking volgt dat de formule van Chanson een goede overeenkomst geeft met de op schaalmodel opgemeten lengte. Een verklaring voor de afwijking van de formule van Rand met de formule van Chanson en de metingen in schaalmodel werd niet gevonden.

Wanneer de vallende straal niet belucht wordt zal deze aangezogen worden en zal de lengte dus afnemen. In deze zin is het toepassen van bovenstaande formule voor een beluchte straal een conservatieve aanname voor het dimensioneren van de benodigde woelkomlengte.

4.5 Lengte watersprong

In de literatuur worden formules gegeven voor het bepalen van de lengte van de watersprong en het bepalen van de lengte van de roller:

- 1. Formules voor de lengte van de roller (L_r)
 - Formulering volgens Chanson (2002):

$$\frac{L_r}{Y_1} = 8. \left(\left(\frac{d_c}{Y_1} \right)^{3/2} - 1.5 \right)$$

Met:

- -LrLengte van de roller[m]- Y_1 Waterhoogte voor sprong[m]-dcKritische waterhoogte ($d_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$)[m]- Δ_z Valhoogte[m]
- qDebiet per eenheidsbreedte (zie hoofdstuk 4)[m²/s]- gValversnelling (= 9.81 m/s²)[m/s²]
- Formulering uit Hager *et al.* (1990):

$$\frac{L_r}{Y_1} = -12 + 8 \cdot \alpha_r \cdot \tanh\left(\frac{Fr_1}{\alpha_r}\right)$$

Met:

	- Lr	Lengte van de roller	<i>a</i> .	[m]
	- Fr ₁	Froudegetal voor de sprong	$(Fr_1 = \frac{q_{Y_1}}{\sqrt{q_{Y_1}}})$	[m]
	- Y ₁	Waterhoogte voor sprong	V 0 1	[m]
	- α _r	Coëfficiënt		[-]
		■ α _r =20	Y ₁ /b < 0.1	
		 α_r=12.5 	0.1 <y<sub>1/b < 0.7</y<sub>	
	- Y ₁	Waterhoogte voor sprong		[m]
	- d _c	Kritische waterhoogte (d_c =	$(\sqrt[3]{\frac{q^2}{g}})$	[m]
	- Δ _z	Valhoogte		[m]
	- b	Breedte van kanaal		[m]
	- g	Valversnelling (= 9.81 m/s ²)		[m/s ²]
2.	Formules voo	or de lengte van de sprong (L _j)		
	• Formuler	ing volgens Rand (1955):		
		L _i =	$=6.(Y_2-Y_1)$	
	Met:	,	· _ -·	

-	Lj	Lengte sprong	[m]
-	Y_1	Waterhoogte vòòr sprong	[m]
-	Y_2	Waterhoogte na sprong	[m]
-	d_c	Kritische waterhoogte ($d_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$)	[m]
-	Δ_{z}	Valhoogte	[m]
-	q	Debiet per eenheidsbreedte (zie hoofdstuk 4)	[m²/s]
-	g	Valversnelling (= 9.81 m/s ²)	[m/s ²]

• Formulering volgens Silvester (1964) (bron: French (1986)):

$$\frac{L_j}{\gamma_1}$$
=9.75.(Fr₁-1)^{1.01}

Met:

-	Lj	Lengte sprong	[m]
-	Fr_1	Froudegetal voor de sprong (Fr ₁ = $\frac{q_{Y_1}}{\sqrt{g_Y_1}}$)	[m]
-	Y ₁	Waterhoogte voor sprong	[m]
-	d _c	Kritische waterhoogte ($d_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$)	[m]
-	Δz	Valhoogte	[m]
-	q	Debiet per eenheidsbreedte (zie hoofdstuk 4)	[m²/s]
-	g	Valversnelling (= 9.81 m/s ²)	[m/s²]

• Formulering uit Hager et al. (1990), bepaald op basis van de data van Bradley en Peterka (1975):

$$\frac{L_j}{Y_1} = 10 \cdot \alpha_j \cdot tanh\left(\frac{Fr_1 - 1}{\alpha_j}\right)$$

Met:

-	Lj	Lengte sprong	[m]
-	Fr_1	Froudegetal vòòr sprong (Fr ₁ = $\frac{q'_{Y_1}}{\sqrt{g \cdot Y_1}}$)	[m]
-	Y_1	Waterhoogte vòòr sprong	[m]
		$\frac{\mathrm{Y}_{1}}{\Delta_{z}} = 0.54 \cdot \left(\frac{d_{c}}{\Delta_{z}}\right)^{1.275}$	
-	α_{j}	Coëfficiënt (= 22; voor $4 \le Fr_1 \le 12$)	[-]
-	d_{c}	Kritische waterhoogte ($d_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$)	[m]
-	Δ_{z}	Valhoogte	[m]
-	q	Debiet per eenheidsbreedte (zie hoofdstuk 4)	[m²/s]
-	g	Valversnelling (= 9.81 m/s ²)	[m/s²]

• Formulering volgens USBR: zie Figuur 14 opgesteld op basis van de data van Bradley en Peterka (1975).

Met:

-	Y_1	Waterhoogte vòòr sprong	[m]
-	Fr_1	Froudegetal vòòr sprong (Fr $_1 = \frac{q_{Y_1}}{\sqrt{g \cdot Y_1}}$)	[m]
-	d _c	Kritische waterhoogte ($d_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$)	[m]
-	$\Delta_{\sf z}$	Valhoogte	[m]
-	q	Debiet per eenheidsbreedte (zie hoofdstuk 4)	[m²/s]
-	g	Valversnelling (= 9.81 m/s ²)	[m/s²]




(Thompson en Kilgore, 2006)

Merk hierbij op dat de formules voor de lengte van een watersprong opgesteld zijn voor de situatie van een inkomende superkritische waterstraal evenwijdig met de bodem die vervolgens door middel van een vrije watersprong, zonder einddrempel of stootblokken, wordt omgezet in een subkritische stroming. Het bijhorende peil in de polder is het corresponderend polderpeil. Om het einde van de watersprong te bepalen, ten opzichte van de val, dient de lengte van de straal, zie paragraaf 4.4, opgeteld te worden bij de spronglengte.

4.6 Dimensionering stootblokken

Voor de geometrie Vlassenbroek en Bergenmeersen werden stootblokken in de woelkom beproefd. De dimensionering van de stootblokken is gebaseerd op het ontwerp van een woelkom USBR type III, zie Figuur 15. Peterka (1984) en Thompson en Kilgore (2006) bevatten ontwerpformules voor dit type woelkom. Een voordeel van een dergelijke woelkom is dat de woelkomlengte verkort kan worden en dat de corresponderende waterhoogte verlaagd kan worden tot 85 % van de corresponderende waterhoogte bij een vrije watersprong (Thompson & Kilgore, 2006).



De woelkom USBR type III is als volgt opgebouwd:

- Aan de opwaartse zijde van de woelkom worden "Chute Blocks" voorzien. Deze blokken helpen bij het stabiliseren van de watersprong. Dit type blokken zijn bij het ontwerp van een gecombineerde in- en uitwateringsconstructie niet van toepassing.
- In de woelkom wordt een rij stootblokken geplaatst. Deze stootblokken zorgen voor het breken van de straal en dus voor energiedissipatie.
- Aan het einde van de woelkom wordt een einddrempel voorzien. Deze drempel richt de resterende bodemnabije stroming naar het oppervlak toe. De stroming spreidt zich hierbij uit over de waterhoogte en voorkomt erosie onmiddellijk afwaarts van de betonnen constructie.

Voor het ontwerp van de stootblokken werd bij de in- en uitwateringsconstructies voor Bergenmeersen en Vlassenbroek de maatgevende conditie gezocht, i.e. een hoog rivierpeil waarbij de marge tussen het corresponderend polderpeil en het minimum polderpeil het kleinste is. Voor het uitvoeren van de dimensionering van de woelkom aan de hand van de ontwerprichtlijnen dient eerst het peil voor de watersprong, de corresponderende waterhoogte en het Froudegetal voor de watersprong gekend te zijn. Hiervoor worden de formules uit voorgaande paragrafen toegepast.

Tabel 3 – Ontwerpformules woelkom USBR type III

Tabel 3 vat de ontwerpregels samen uit Peterka (1984) en Thompson en Kilgore (2006).

	formule
afstand tot blokken	0.8 x Y ₂
hoogte blokken	$h_3 = Y_1 \cdot (0.168 \cdot Fr_1 + 0.58)$
aantal blokken	$Nc = \frac{breedte \ bassin}{2 \cdot Y_1}$
breedte blok = breedte tussen blokken	$breedte = \frac{breedte \ bassin}{2 \cdot Nc}$
hoogte einddrempel	$h_4 = Y_1 \cdot (0.0536 \cdot Fr_1 + 1.04)$
lengte woelkom	$L_b = 2.2 \cdot Y_2$

Het ontwerp van een USBR type III woelkom is van toepassing vanaf het punt waar de onderzijde van de vallende straal de bodem van de woelkom raakt. Aan de lengte van de woelkom moet bijgevolg de afstand waarover de vallende straal valt toegevoegd worden. Deze afstand werd visueel bepaald aan de hand van de proeven (Figuur 16) maar kan ook begroot worden aan de hand van de formule van Chanson (2002) voor de lengte van de watersprong (zie paragraaf 6.5.

Figuur 16 – Toegevoegde lengte woelkom ten gevolge van vallengte straal



Bij de schaalmodelproeven voor de in-en uitwateringsconstructie voor Bergenmeersen zijn de stootblokken geplaatst in de set-up van een vrije watersprong (bovenste en middelste illustratie in Figuur 17). Bij de schaalmodelproeven voor de in-en uitwateringsconstructie voor Vlassenbroek worden de stootblokken toegevoegd aan een geometrie met een lokaal diepere woelkom (Geometrie 6). Deze nieuwe geometrie met stootblokken wordt aangeduid met Geometrie 7.



4.7 Dimensieloos weergeven resultaten

Het dimensieloos maken van resultaten van het schaalmodelonderzoek wordt gebaseerd op de formules van Rand (1955) en Chanson (2002) voor een vallende straal. Bemerk in voorgaande paragrafen dat de formules voor de waterhoogte voor – en na sprong en de lengte van de val als volgt zijn opgebouwd:

$$\frac{x}{\Delta z} = a \cdot \left(\frac{d_c}{\Delta_z}\right)^b$$

Met:

-	Х	Waterhoogte na sprong / waterhoogte vòòr sprong / lengte val	[m]
-	Δ_{z}	Valhoogte	[m]
-	d_{c}	Kritische waterhoogte (d _c = $\sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$)	[m]
-	q	Debiet per eenheidsbreedte	[m²/s]
-	g	Valversnelling (= 9.81 m/s ²)	[m/s²]
-	а	Coëfficiënt 1	[-]
-	b	Coëfficiënt 2	[-]

Hieruit volgt dat zowel de waterhoogtes voor en na sprong, de lengte van de vallende straal en de kritische waterhoogte dimensieloos uitgedrukt kunnen worden door deze te delen door de valhoogte. Om deze reden wordt in dit rapport waar mogelijk de relatie van de kritische waterhoogte ten opzichte van de valhoogte gebruikt om het debiet voor een gegeven scenario te karakteriseren. In de hoofdstukken met betrekking tot het traject van de vallende straal (hoofdstuk 6), de corresponderende waterhoogte (hoofdstuk 7) en de bodemnabije snelheid (hoofdstuk 8) worden hierdoor geen rivierpeilen of inwateringshoogtes gebruikt maar enkel de relatieve kritische waterhoogte (d_c/Δ_z). Om de relatieve kritische waterhoogte om te rekenen naar een rivierpeil dient volgende omrekening toegepast te worden:

- Vermenigvuldigen van de relatieve kritische waterhoogte (d_c/Δ_z) met de valhoogte Δ_z om de kritische waterhoogte d_c te bekomen.
- Berekenen van het debiet uit de kritische waterhoogte.
- Bepalen van de overstorthoogte horende bij het berekende debiet op basis van de in hoofdstuk 5 gegeven relaties.
- De overstorthoogte bij het drempelpeil van de inwateringskoker optellen zodat het rivierpeil bekomen wordt.

De valhoogte van de verschillende beproefde geometrieën wordt gegeven in Tabel 4.

	- · · ·		
Geometrie	vloerpeil	vloerpeil	valhoogte Δz
	inwateringskoker	woelkom	
	[m TAW]	[m TAW]	
Bergenmeersen	4.2	2.2	2.0
Grote Vijver	4.0	0.4	3.6
Vlassenbroek G2,G3 en G4	4.0	-0.1	4.1
Vlassenbroek G5,G6 en G7	4.0	-0.6	4.6
De Bunt	4.1	-1.0	5.1

Tabel 4 – Valhoogte [m]

Om de bodemnabije snelheid dimensieloos weer te geven wordt gekozen om de snelheid te delen door de hoogtegemiddelde snelheid voor sprong bepaald volgens Rand (1955):

$$\mathbf{v}_{Y1} = \frac{q}{Y_1} = \frac{d_c^{3/2} \cdot \sqrt{g}}{0.54 \cdot \left(\frac{d_c}{\Delta_z}\right)^{1.275} \cdot \Delta_z} = \frac{d_c^{0.225} \cdot \Delta_z^{0.275} \cdot \sqrt{g}}{0.54}$$

Met:

-
$$v_{Y1}$$
Hoogtegemiddelde snelheid na val[m/s]-qDebiet per eenheidsbreedte[m²/s]-Y1Waterhoogte vòòr sprong bepaald aan de hand van Rand (1955): $\frac{Y_1}{\Delta_z} = 0.54 \cdot \left(\frac{d_c}{\Delta_z}\right)^{1.275}$ [m]-d_cKritische waterhoogte ($d_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$)[m]-gValversnelling (= 9.81 m/s²)[m/s²]- Δ_z Valhoogte[m]

Bemerk dat hier gekozen wordt voor de hoogte vòòr sprong berekend volgens Rand. De hoogte vòòr sprong werd evenwel niet opgemeten in het schaalmodel waardoor het niet mogelijk is om een objectieve keuze te maken.

5 Relatie rivierpeil - inwateringsdebiet

In de schaalmodelproeven wordt het opwaarts peil opgelegd. Bijkomend werd ook het debiet opgemeten. Uit het opgemeten opwaarts peil, het debiet doorheen de constructie en het drempelpeil kan de relatie tussen het rivierpeil en het inwateringsdebiet bepaald worden.

Bij de afvoer door kokers wordt in de hydraulische literatuur onderscheid gemaakt tussen diverse stromingsregimes (zie bijv. Bodhaine (1988)). Daarnaast kan de stroming door de inwateringskoker ook beschouwd worden als stroming over een brede overlaat wanneer geen schotbalken toegepast worden, als stroming over een scherpe overlaat bij gebruik schotbalken en een relatief beperkte inwateringshoogte ten opzichte van de schotbalkhoogte of een situatie tussen beide types in. Voor een stroming over een brede of scherpe overlaat wordt volgende formule toegepast:

$$q = a \Delta H^{1.5}$$
,

waarbij de overstorthoogte gedefinieerd wordt als:

$$\Delta H = P_{opw} - (P_{vloer} + s),$$

met P_{opw} [in m TAW] het rivierpeil, P_{vloer} [in m TAW] het vloerpeil van de inwateringskoker en s [in m natuur] de hoogte van de schotbalkenwand. Dit is de standaard debietsformule voor een overlaat (zie bijv. Bos (1989)). Een vergelijking van debieten berekend met deze formulering voor de inwateringskokers van het GOG/GGG Lippenbroek leverde een goede overeenkomst op met debieten opgemeten tijdens een terreinmeting (Peeters *et al.*, 2009). Merk op dat de stroming afwijkt van deze formule indien de stroming insnoert aan het plafond van de inwateringskoker of het waterpeil aan polderzijde dermate boven het bodempeil van de inwateringskoker komt zodat opstuwing optreedt. Uit de proeven volgde dat bij de proeven zonder schotbalken enkel voor Bergenmeersen bij uitzonderlijke rivierpeilen het plafond van de inwateringskokers ingesnoerd werd. Opstuwing door een te hoog afwaarts peil zal pas optreden vanaf dat het polderpeil merkelijk hoger is (ca. 1/3 van de kritische waterhoogte) dan het bodempeil van de inwateringskoker. Ook dit is een uitzonderlijke situatie.

De parameter a in de overlaatformule werd bepaald uit de schaalmodelmetingen. Voor de in- en uitwateringsconstructies van Bergenmeersen, Dijlemonding en Vlassenbroek wordt de relatie tussen de parameter a en de relatieve overstorthoogte gegeven in Figuur 18. Merk op dat voor deze grafische voorstellingen alleen resultaten gebruikt zijn waarbij de overstort vrij gebeurt, dit wil zeggen een voldoende laag peil in de polder en een vrij bovenoppervlak (geen aanraking met plafond inwateringskoker en muur na woelkom).



Figuur 18 – Parameter a in functie van de overstorthoogte



Merk in Figuur 18 op dat voor de proeven zonder schotbalken de parameter a een vrijwel constante waarde betreft. Dit met uitzondering van de laagste overstorthoogtes waar een toename vastgesteld wordt. Deze toename is vermoedelijk te wijten aan onderloopsheid van het model. De relatieve invloed van deze onderloopsheid neemt af bij een toename van het debiet over de inwateringskoker en dus de inwateringshoogte. De parameter a is het hoogste bij Bergenmeersen, ca. 1.6, en het laagste bij Vlassenbroek ca. 1.5. De vermoedelijke verklaring ligt hiervoor in de lagere hoogte van de inwateringskoker van Bergenmeersen. Door de lagere hoogte van de inwateringskoker heeft het water opwaarts van de inwateringskoker een hogere snelheid wat zich weerspiegelt in een iets hoger debiet over de inwateringsconstructie en dus iets hogere waarde voor de parameter a. Bij het toepassen van schotbalken neemt de waarde van de parameter a toe. Bemerk uit de figuren dat deze toename evenwel afneemt bij een toename van het opwaarts peil de invloed van de schotbalken op de stroming relatief kleiner wordt. Bij Bergenmeersen en Dijlemonding lijkt bij een schotbalkhoogte 0.5 m en 0.3 m voor de hogere inwateringshoogte de parameter a te evolueren naar een nieuwe constante waarde.

De analyse werd enkel uitgevoerd voor de situatie waarbij geen insnoering aan het plafond van de inwateringskoker optreedt. Door het versnellen van het water in de inwateringskoker naar de kritische snelheid werd, voor de situatie zonder schotbalken, vastgesteld dat het plafond ook voor de meest extreme beproefde rivierpeilen (tot ca. +7.0 m TAW) niet verdronken wordt, zie Figuur 19. Wanneer de schotbalken net opwaarts van het plafond van de inwateringskoker geplaatst worden, werd wel vastgesteld dat bij hoge rivierpeilen het plafond van de inwateringskoker verdronken wordt.



Figuur 19 – Illustratie waterspiegelinzinking inwateringskoker

Bergenmeersen / rivierpeil +6.70 m TAW / polderpeil = HK

Merk op dat in bovenstaande formules geen rekening gehouden wordt met de invloed van vuilroosters en de vernauwing van de kokers omwille van de tussenmuur. Doordat deze geplaatst zijn op een locatie waar de stroming zich al aan het vormen is, is het onmogelijk om de invloed op het debiet te begroten aan de hand van specifieke formules voor vuilroosters of vernauwing van de stroming.

6 Traject vallende straal

Het traject van een beluchte vallende straal bij een kleine waterhoogte in de polder wordt beschreven in paragraaf 6.1. De invloed van het al dan niet beluchten van de uitwateringskoker, respectievelijk het plaatsen van schotbalken in de inwateringskoker wordt beschreven in paragraaf 6.2, respectievelijk paragraaf 6.3. Bij een gegeven rivierpeil kan een range van mogelijke polderpeilen optreden. Het traject van de vallende straal bij hogere waterhoogtes in de polder dan de corresponderende waterhoogte wordt beschreven in paragraaf 6.4. Voor een beluchte vallende straal met een laag afwaarts peil worden in de literatuur formules gegeven voor de lengte van de vallende straal en het peil onder de vallende straal. In paragraaf 6.5 wordt de berekende lengte van de vallende straal en het peil onder de vallende straal vergeleken met de metingen.

In paragraaf 6.1 tot en met paragraaf 6.4 worden grafische voorstellingen gegeven van het traject van de vallende straal. Deze zijn als volgt gegenereerd:

- Met behulp van een fototoestel wordt een opname gemaakt van de vallende straal. Het fototoestel was loodrecht op de wand geplaatst met het center ter hoogte van het middelpunt van het beeld met de vallende straal en ca. 1.5 m verwijderd van de glazen wand van het schaalmodel.
- In Autocad wordt de foto achtereenvolgens geroteerd en verschaald op basis van de verticale maataanduiding op het glas na de val en vervolgens geprojecteerd op een geometrie van de constructie zodat het einde van de inwateringskoker samenvalt. Verder werden geen bijkomende correcties op de foto uitgevoerd.
- Vervolgens werd in Autocad op basis van visuele interpretatie een lijn getekend die de uiterste begrenzingen van de vallende straal aanduidt.

Hierbij wordt opgemerkt dat dit een benaderende techniek is om het traject van de vallende straal te bepalen. De vallengte en het peil in de uitwateringskoker zijn tijdens de proeven afgelezen van de op het glas bevestigde maataanduidingen.

Sinds het uitvoeren van dit onderzoek heeft WL aanzienlijke stappen vooruit gezet in het uitvoeren van dergelijke opnames. Sinds dit onderzoek werd overgeschakeld naar industriële camera's. Dit laat toe om de beelden met vooraf gedefinieerde instellingen te maken en om de opnames te synchroniseren met het uitvoeren van de metingen. Ook werden belangrijke stappen gezet in het voorzien van een uniforme belichting. Aan de hand van markers met gekende coördinaten wordt een projectieve transformatie op de beelden uitgevoerd, hierbij worden de opnames geometrisch getransformeerd naar het assenstelsel van het model. Vervolgens kan een automatische waterlijndetectie uitgevoerd worden. Het is praktisch niet mogelijk om deze technieken toe te passen op de voor dit project uitgevoerde opnames.

Figuur 20 – Voorbeeld bepalen van traject vallende straal



Bemerk dat de resultaten in dit hoofdstuk dimensieloos weergegeven worden. De dimensies van de constructie, het traject van de vallende straal en de waterpeilen aan polderzijde worden dimensieloos gemaakt door deze te delen door de valhoogte. Het rivierpeil en het debiet worden gekarakteriseerd door de relatieve kritische waterhoogte, zijnde de kritische waterhoogte gedeeld door de valhoogte. De toegepaste dimensieloze verschaling wordt verder verduidelijkt in paragraaf 4.7.

6.1 Traject vallende straal bij een extreem lage waterhoogte in de polder

Figuur 21 toont het traject van de vallende straal bij verschillende opwaartse waterhoogtes en een laag peil in de polder opgemeten voor de in- en uitwateringsconstructie voor Bergenmeersen.



extreem lage waterhoogte in de polder- belucht

Uit Figuur 21 volgt dat de lengte van de vallende straal toeneemt bij toenemende kritische waterhoogte en dus bij een toename van het rivierpeil. Tot en met een kritische waterhoogte 0.645 Δz blijft er lucht in de uitwateringskoker. Doordat de beluchting voorzien wordt met buizen met een zekere diameter raakt deze beluchting verdronken voor het water het plafond van de uitwateringskoker bereikt. Nadat de beluchting verdronken is wordt geen nieuwe lucht meer aangezogen waardoor de uitwateringskoker in korte tijd verdronken raakt.

In Figuur 22 wordt een vergelijking gemaakt tussen het traject van de vallende straal voor de in- en uitwaringsconstructie van Bergenmeersen met deze voor Grote Vijver enerzijds en met deze voor Vlassenbroek anderzijds. Deze vergelijking wordt bemoeilijkt doordat de opgemeten kritische waterhoogtes relatief niet gelijk zijn. Om die reden wordt het traject van de vallende straal bij Grote Vijver of Vlassenbroek bij een zekere kritische waterhoogte vergeleken met het traject van de vallende straal voor Bergenmeersen bij een quasi gelijke kritische waterhoogte of bij een kritische waterhoogtes juist hoger of lager dan deze waarde.



Links: Grote Vijver / Rechts: Vlassenbroek extreem lage waterhoogte in de polder - belucht Bij het vergelijken van het traject van de vallende straal voor de in- en uitwateringsconstructies voor Bergenmeersen, Grote Vijver en Vlassenbroek in Figuur 22 valt op:

- Het verloop van de vallende straal is vrij goed gelijkend tussen de in- en uitwateringsconstructies voor Bergemeersen, Vlassenbroek en Grote Vijver.
- Het peil in de uitwateringskoker is beperkt hoger bij de in- en uitwateringsconstructie voor Grote Vijver en Vlassenbroek in vergelijking met deze voor Bergenmeersen. Een mogelijke oorzaak is de lokaal diepere woelkom bij Grote Vijver en het gebruik van proeven met de corresponderende waterhoogte, in plaats van, een extreem lage waterhoogte bij Vlassenbroek.

6.2 Invloed beluchten / niet beluchten uitwateringskoker

Wanneer de vallende straal de waterlijn in de uitwateringskoker snijdt worden kleine pakketjes lucht meegezogen. Indien dit niet gecompenseerd wordt door het aanvoeren van nieuwe lucht zal een onderdruk ontstaan waardoor de waterhoogte in de uitwateringskoker hoger zal komen liggen. Dit heeft een duidelijke invloed op het traject van de vallende straal. In Figuur 23 wordt het traject van de vallende straal bij beluchten van de uitwateringskoker vergeleken met het traject bij niet beluchten van de vallende straal. In deze figuur werden twee opnames getoond van de proeven voor Bergenmeersen en vier opnames van de proeven voor Grote Vijver. Indien in de uitwateringskoker geen lijn getekend is, betekent dit dat de uitwateringskoker verdronken is.



Figuur 23 – Traject vallende straal bij het al dan niet beluchten van de uitwateringskoker

Boven: Bergenmeersen / midden en onder: Grote Vijver

Uit Figuur 23 volgt dat het niet beluchten van de uitwateringskoker resulteert in een aanzuiging van de vallende straal en een verhoging van het peil in de uitwateringskoker, met uitzondering van volgende proeven:

- Bij de voor Bergenmeersen uitgevoerde proef met een kritische waterhoogte 0.645 Δz wordt geen aanzuiging van de vallende straal opgemerkt maar wordt toch een verhoging van het peil in de uitwateringskoker tot het plafondpeil vastgesteld. Een verklaring hiervoor werd niet gevonden.
- Bij de voor Grote Vijver uitgevoerde proef met een kritische waterhoogte 0.260 Δz wordt geen invloed opgemerkt op het peil in de uitwateringskoker. De oorzaak hiervan is dat bij relatief lage, kritische waterhoogtes het peil in de uitwateringskoker voornamelijk bepaald wordt door het peil in de lokaal diepere woelkom.

6.3 Invloed schotbalken

In Figuur 24 wordt het traject van de vallende straal getoond bij gebruik van schotbalken in de inwateringskoker. De voor de figuren gebruikte opnames zijn afkomstig van de proeven voor Grote Vijver. Merk hierbij op dat deze geometrie een einddrempel heeft op ca. 2.8 Δz (gelegen buiten de zone waar de opnames zijn gebeurd). De resultaten worden vergeleken voor een gelijk rivierpeil. Het debiet door de inwateringskoker en bijgevolg ook de kritische waterhoogte neemt evenwel af met de schotbalkhoogte. Alle proeven betreffen proeven met beluchting van de uitwateringskoker.



proeven Grote Vijver – variërend rivierpeil – extreem lage waterhoogte in de polder – beluchte uitwateringskoker; s = hoogte schotbalken.

Merk in Figuur 24 op:

- Het plaatsen van een schotbalk in de inwateringskoker heeft bij een beluchte uitwateringskoker geen invloed op de lengte van de vallende straal.
- De invloed van schotbalken met hoogte 0.083 ∆z op het traject van de vallende straal en het peil in de uitwateringskoker is verwaarloosbaar. Bemerk dat deze schotbalken slechts een beperkte invloed hebben op de kritische waterhoogte.
- Bij een schotbakhoogte 0.222 Δz wordt wel een merkbare verlaging vastgesteld van het waterpeil in de in- en uitwateringskoker. De oorzaak voor dit verschil ligt in de merkelijk lagere kritische waterhoogte en dus het merkelijke lagere debiet.

6.4 Invloed stijgend waterhoogte in de polder

In Figuur 25 wordt het traject van de vallende straal getoond bij een stijgende waterhoogte in de polder. Hiervoor wordt een proef voor Bergenmeersen en een proef voor Grote Vijver gebruikt. Deze proeven zijn uitgevoerd met een beluchte uitwateringskoker. Om het stromingspatroon niet te hinderen werd het plafond boven de woelkom verwijderd.



boven: Bergenmeersen / onder: Grote Vijver - beluchte uitwateringskoker

Merk in Figuur 25 op:

- De vastgestelde stromingspatronen zijn analoog als deze beschreven in Vischer & Hager (1995), zie Figuur 3.
- Het peil in de uitwateringskoker stijgt met het peil in de polder en is verdronken bij een waterhoogte in de polder juist lager dan 1.0 Δz.

In de gecombineerde in- en uitwateringsconstructies komt een oppervlakte jet slechts zelden voor omdat het plafond van de woelkom verdronken raakt. Dit wordt geïllustreerd in Figuur 26.

waterhoogte in de polder	zonder plafond boven woelkom	met plafond boven woelkom op een afstand 0.93 Δz na val en hoogte 0.861 Δz		
1.42 Δz				
1.56 Δz				

Figuur 26 – Traject vallende straal met en zonder plafond woelkom

Door de toename van de lengte van de vallende straal bij een stijgende waterhoogte in de polder komt de vallende straal in aanraking met het plafond boven de woelkom. Hierdoor wordt de straal terug naar de bodem van de woelkom toe gericht. Het mechanisme waarmee de energie van de vallende straal gedissipeerd wordt, verandert hierbij van een verdronken watersprong naar een uittredende jet.

Bij de proeven voor Vlassenbroek werd bij enkele beproefde situaties het volgende vastgesteld: voordat het plafond van de woelkom verdronken raakt, ontstaat een stromingspatroon waarbij de vallende straal onder het plafond van de woelkom doorschiet en waarbij de vallende straal afwaarts van de lokaal diepere woelkom de bodem raakt. Dit wordt geïllustreerd in Figuur 27.

Grote Vijver – kritische waterhoogte dc = 0.471 Δz

waterhoogte in de polder	
1.109 ∆z	straal raakt vloer lokaal diepere woelkom
1.141 Δz	straal raakt vloer lokaal diepere woelkom niet
1.163 ∆z	straal raakt vloer lokaal diepere woelkom

Figuur 27 – Oppervlakte jet onder plafond woelkom

Vlassenbroek G5 kritische waterhoogte dc=0.373 Δz – plafond woelkom op 0.804 Δz – schotbalkhoogte 0.065 Δz

6.5 Vergelijking met literatuurformules

Figuur 28 geeft een voorstelling van de tijdens de proeven toegepaste definitie voor de lengte van de vallende straal. Het einde van de vallende straal wordt bepaald als het, visueel bepaalde, punt waar de overgang van de helling van de hellende straal naar de horizontale bodemnabije stroming voor de helft werd uitgevoerd.



Figuur 29 toont de variatie van de lengte van de vallende straal in functie van de kritische waterhoogte bij een beluchte en een niet beluchte uitwateringskoker.



Figuur 29 – Lengte vallende straal in functie van kritische waterhoogte

Boven: beluchte uitwateringskoker / onder: niet beluchte uitwateringskoker

Merk in Figuur 29 op:

- De in het schaalmodel opgemeten lengte van een beluchte vallende straal komt goed overeen met de lengte berekend aan de hand van de formule van Chanson (2002). De overeenkomst tussen de proeven en de formules is het beste voor de proeven voor Vlassenbroek. De proeven voor Bergenmeersen wijken enigszins af. Wel dient opgemerkt te worden dat de proeven voor Bergenmeersen zijn uitgevoerd met een minder performantere beluchting dan de overige proeven. Na het uitvoeren van de proeven voor Bergenmeersen werd de beluchting van de uitwaringskoker in het schaalmodel aangepast.
- De lengte van de vallende straal wordt overschat met de formule van Rand (1955). Hiervoor werd geen verklaring gevonden.
- Bij het niet beluchten van de vallende straal neemt de lengte van de vallende straal af.
- De invloed van het niet beluchten van de vallende straal wijzigt duidelijk per constructie. Zo neemt de lengte van de vallende straal het sterkste af bij Bergenmeersen en het minst bij Vlassenbroek. Hiervoor werd geen verklaring gevonden.

Ter plaatse van het snijpunt van de vallende straal en het wateroppervlak van de uitwateringskoker worden pakketjes lucht meegezogen. Bij het niet beluchten van de uitwateringskoker zal ten gevolge van deze meegezogen lucht een onderdruk ontstaan in de uitwateringskoker. Deze onderdruk resulteert in een aanzuiging van de vallende straal en een hoger peil in de uitwateringskoker. Een vergelijking van het waterpeil in de uitwateringskoker bij een beluchte vallende straal met dit bij een niet beluchte vallende straal wordt gegeven in Figuur 30.

Figuur 30 – Invloed beluchting op vallende straal



Grote Vijver – schotbalkhoogte 0.0 m – rivierpeil 0.434 Δz – extreem lage waterhoogte in de polder links belucht / rechts niet belucht

Figuur 31 toont de variatie van het waterpeil in de uitwateringskoker in functie van de kritische waterhoogte bij een beluchte en een niet beluchte uitwateringskoker.



boven: belucht / onder: niet belucht

Merk in Figuur 31 op:

- In het geval van een beluchte uitwateringskoker ligt het opgemeten waterpeil in de uitwateringskoker beperkt hoger dan berekend aan de hand van de formules van Rand (1955) en Chanson (2002). Een mogelijke verklaring is dat de toegepaste beluchting niet performant genoeg was.
- Bij een niet beluchte uitwateringskoker neemt het peil in de uitwateringskokers vanaf een kritische waterhoogte 0.3 Δz plots toe waarna de uitwateringskoker verdronken raakt bij een kritische waterhoogte 0.4 Δz. Dit patroon is gelijkaardig voor de drie beproefde geometrieën.

6.6 Samenvatting

Voor de proeven uitgevoerd voor de verschillende geometrieën, werd het traject van de vallende straal opgemeten met behulp van een videocamera zonder het toepassen van geavanceerde image processing technieken. Niettegenstaande deze benaderende methode werden toch representatieve resultaten bekomen welke onderling – tussen de verschillende beproefde geometrieën – vergeleken kunnen worden. Vooreerst werd het traject van een beluchte vallende straal bij een extreem lage waterhoogte in de polder onderzocht voor verschillende kritische waterhoogtes. Daarna werd de invloed van beluchten van de uitwateringskoker, de aanwezigheid van schotbalken, de invloed van de waterhoogte in de polder op het traject van de vallende straal onderzocht en werd de opgemeten lengte van de vallende straal vergeleken met de lengte die volgt uit literatuurformules.

Hieruit wordt het volgende besloten:

- Voor de in- en uitwateringsconstructies voor Bergemeersen, Vlassenbroek en Grote Vijver is het verloop van de vallende straal vrij goed gelijkend. Wat de waterhoogte in de uitwateringskoker betreft worden enkele verschillen waargenomen tussen de uitgevoerde proeven. Deze verschillen kunnen verklaard worden door het al dan niet aanwezig zijn van een woelkom met een einddrempel, het gebruik van proeven met de corresponderend waterhoogte in plaats van een extreem lage waterhoogte in de polder en door een wijziging van de methode van beluchten.
- Het niet beluchten van de ruimte onder de vallende straal resulteert in een aanzuiging van de vallende straal en een verhoging van het peil in de uitwateringskoker.
- Het plaatsen van schotbalken in de inwateringskoker heeft geen invloed op lengte van de vallende straal.
- Wanneer de vrije watersprong bij een stijgende waterhoogte in de polder overgaat in een verdronken watersprong neemt de lengte van de vallende straal toe. Hierdoor neemt de helling van de vallende straal af en raakte deze de bodem meer naar afwaarts. Hiermee dient rekening gehouden te worden bij de dimensionering van de woelkom. Bij een verdere stijging van de waterhoogte in de polder gaat de vallende straal over in een oppervlaktejet. Deze situatie is bij zowat alle beproefde geometrieën niet voorgekomen omdat in deze toestand de vallende straal reeds in aanraking is gekomen met de verticale muur na de inwateringskoker. Hierdoor wordt de straal terug naar de bodem van de woelkom toe gericht.
- De lengte van de vallende straal kan in het geval van een beluchte uitwateringskoker op een goede manier bepaald worden met de formule van Chanson (2002). De formule van Rand (1955) overschat de lengte van de vallende straal. In het geval van een beluchte uitwateringskoker onderschatten de formules van Rand (1955) en Chanson (2002) het peil onder de uitwateringskoker beperkt. In het geval van een niet-beluchte uitwateringskoker werden geen formules teruggevonden in de literatuur voor de lengte van de vallende straal en het waterpeil onder de vallende straal.

7 Corresponderende waterhoogte

Door het vallen van het instromende water op de bodem van de woelkom ontstaat een bodemnabije stroming in de richting van de polder met superkritische snelheid. De corresponderende waterhoogte betreft de waterhoogte in de polder waarbij er een evenwicht is tussen de impuls van de superkritische stroming na de val en de impuls horende bij de subkritische waterhoogte in de polder. De corresponderende waterhoogte is een belangrijke parameter voor het ontwerp van de gecombineerde in- en uitwateringsconstructies omdat dit de minimaal toelaatbare waterhoogte in de polder betreft voor een gegeven inwateringsconditie. De corresponderende waterhoogte in het schaalmodel wordt bepaald door vertrekkend vanaf een extreem lage waterhoogte in de polder met superkritische stroming na de val het afwaarts peil geleidelijk te verhogen tot de watersprong (visueel) onmiddellijk na de val begint.

Bij een toename van het rivierpeil zal enerzijds de corresponderende waterhoogte toenemen maar zal anderzijds ook de waterhoogte in de polder toegenomen zijn dankzij het vullen van het gebied. De relatie tussen het polderpeil in het gebied en het rivierpeil volgt uit numerieke modellering, zie paragraaf 7.1.

De uit de schaalmodelproeven volgende corresponderende waterhoogte voor een woelkom met doorgaande vloer wordt besproken in paragraaf 7.2. Vervolgens wordt de invloed van volgende varianten op de corresponderende waterhoogte onderzocht:

- Lokaal diepere woelkom, zie paragraaf 7.3,
- Schanskorfdrempel, zie paragraaf 7.4,
- Stootbalk, zie paragraaf 7.5,
- Stootblokken zie paragraaf 7.6.

Paragraaf 7.7 vat de conclusies van dit hoofdstuk nog eens samen.

Bemerk dat de resultaten in dit hoofdstuk dimensieloos weergegeven worden. De dimensies van de constructie, het traject van de vallende straal en de waterpeilen aan polderzijde worden dimensieloos gemaakt door deze te delen door de valhoogte. Het rivierpeil en het debiet worden gekarakteriseerd door de relatieve kritische waterhoogte, zijnde de kritische waterhoogte gedeeld door de valhoogte. De toegepaste dimensieloze verschaling wordt verder verduidelijkt in paragraaf 4.7.

7.1 Minimum polderpeil bij een gegeven rivierpeil

De inrichting van de GOG/GGG's en de dimensionering van het benodigd aantal in- en uitwateringskokers wordt uitgevoerd door middel van numerieke modellering van het in- en uitgaand debiet en de vulling van het gebied. Voor de gebieden Bergenmeersen, Dijlemonding, Vlassenbroek en De Bunt werd deze dimensionering door WL uitgevoerd aan de hand van MIKE11 simulaties.

Voor de inrichting van het gebied en de dimensionering van de kokers werden een karakteristiek doodtij, gemiddeld tij, springtij en hoog springtij gebruikt. Voor de dimensionering van de woelkom wordt uitgegaan van een extreem peil waarbij de kokers niet afgesloten worden. Voor het rivierpeil wordt zowel een karakteristieke reeks van 5 maand als drie historische stormen gebruikt als randvoorwaarde in het bestaande numeriek model van het GOG/GGG. Bemerk hierbij dat deze modellen ook de overloopdijk bevatten. Vanaf het moment dat het rivierpeil boven het peil van de overloopdijk komt wordt het gebied ook via de overloopdijk gevuld.

	start	eind	
GGG werking	1-01-2000	1-06-2000	
	25-02-1990	3-03-1990	
GOG werking	24-02-2002	4-03-2002	
	7-02-2009	14-02-2009	

Tabel 5 – Opgemeten tijdreeksen rivier gebruikt in simulaties numeriek model

(Coen et al., 2008)

In deze simulaties wordt het waterpeil in een knoop nabij de in-en uitwateringsconstructie aan rivier- en polderzijde met een tijdstap van 10 min weggeschreven. Het resultaat voor Bergenmeersen wordt gegeven in Figuur 32. Deze figuur geeft voor de in Tabel 5 gegeven tijdreeksen het polderpeil in functie van het rivierpeil weer. Bemerk hierin dat vanaf een rivierpeil ca. +4.30 m TAW inwatering optreedt en het polderpeil begint te stijgen. In de eerste fase wordt een sterke toename van het polderpeil waargenomen van ca. +2.70 m TAW tot ca.+ 3.70 m TAW bij een beperkte toename van het rivierpeil van ca. +4.30m TAW tot ca. +4.60 m TAW. Vanaf een polderpeil +3.70m TAW gebeurt de toename van het polderpeil veel langzamer. Dit wordt verklaard door de topografie van een GOG/GGG. In een eerste fase worden de diepere zones nabij de in- en uitwateringsconstructie en de grachten opgevuld. Deze zones hebben een beperkt oppervlak wat de snelle toename van het polderpeil verklaart. Wanneer het maaiveldpeil bereikt wordt dient een veel groter oppervlak gevuld te worden wat de tragere toename van het polderpeil verklaart. Vanaf ca. +6.40 m TAW wordt vervolgens terug een sterke toename van het polderpeil waargenomen bij een beperkte toename van het rivierpeil. Dit heeft te maken met het niveau van de overloopdijk op +6.40 m TAW. Vanaf het moment dat het rivierpeil deze waarde overschrijdt wordt het gebied gevuld langsheen de overloopdijk. Ter vergelijking worden in Figuur 32 ook de karakteristieke polderpeilen gegeven voor enkele type getijden, respectievelijk een doodtij, een gemiddeld tij, een springtij en een extreem springtij (voorkomen 3 per jaar) uit de rapporten van de numerieke modellering, (Coen et al., 2010a). Aangezien deze peilen niet op hetzelfde ogenblik beschouwd zijn, het polderpeil in het gebied zal namelijk nog verder toenemen nadat het maximum rivierpeil bereikt wordt, zijn deze waarden dus niet toepasbaar voor de dimensionering van de in- en uitwateringsconstructie.





⁽voorbeeld Bergenmeersen)

7.2 Corresponderende waterhoogte bij een vrije watersprong

Als eerste wordt de toestand van een 'vrije watersprong' behandeld. In deze toestand kan zich "vrij" een watersprong ontwikkelen zonder dat de energiedissipatie geholpen wordt door een lokaal diepere woelkom met een einddrempel, stootbalk en/of stootblokken. Van alle onderzochte in- en uitwateringsconstructies werd een dergelijke geometrie enkel beproefd voor Bergenmeersen en Vlassenbroek G2. Wanneer de vallende straal belucht wordt kan de corresponderende waterhoogte berekend worden met de formules van Rand (1955) en Chanson (2002), zie paragraaf 4.2.

In Figuur 33 wordt de corresponderende waterhoogte in functie van de kritische waterhoogte voor de verschillende proeven voor Bergenmeersen (bij meerdere valhoogtes) en Vlassenbroek (Geometrie 2) vergeleken. In de figuur is voor de meetgegevens van de beluchte uitwateringskoker ook een trendlijn opgesteld. In Figuur 34 wordt deze trendlijn vergeleken met de formules van Rand (1955) en Chanson (2002).



Figuur 34 – Corresponderende waterhoogte na sprong in functie van kritische waterhoogte vergelijking meetgegevens en resultaten literatuurformules



Merk in Figuur 33 en Figuur 34 op:

- De variatie van de corresponderende waterhoogte na sprong in functie van kritische waterhoogte is voor alle meetgegevens dezelfde. Wat betreft de valhoogte, het al dan niet beluchten en de aanwezigheid van de uitwateringskoker wordt geen merkbare invloed vastgesteld op de relatie tussen de corresponderende waterhoogte na sprong en de kritische waterhoogte.
- De coëfficiënten van de trendlijn voor de beluchte watersprong worden in Tabel 6 vergeleken met de coëfficiënten van de formules van Rand en Chanson. Merk op dat de trendlijn beduidend steiler is in verhouding tot de lijn berekend met de formules van Rand en Chanson.
- De corresponderende waterhoogte kan op een goede wijze bepaald worden door middel van het toepassen van de formule van Rand. Bij een relatieve kritische waterhoogte boven 0.50 onderschat de formule van Rand de corresponderende waterhoogte beperkt. De overeenkomst tussen de formule van Chanson en de meetgegevens is iets minder goed bij kritische waterhoogtes boven 0.4.

	$\frac{Y_2}{\Delta z} = a \cdot \left(\frac{d_c}{\Delta_z}\right)^b$	Trendlijn		Dand (1055)	Chansen (2002)
		niet belucht	belucht	- Kand (1955)	Chanson (2002)
	а	1.85	1.82	1.66	1.565
	b	0.94	0.92	0.81	0.809

Tabel 6 – Vergelijking coëfficiënten berekening corresponderende waterhoogte

7.3 Corresponderende waterhoogte bij een lokaal diepere woelkom

Een lokaal diepere woelkom heeft als voordeel dat een hogere beschikbare waterhoogte aanwezig is na de val zonder het bodempeil aan polderzijde over een grote zone te moeten verlagen.

Voor Vlassenbroek zijn 4 geometrieën met een lokaal diepere woelkom beproefd (G3, G4, G5 en G6). Een illustratie wordt gegeven in Figuur 35. Bij Vlassenbroek G3, G4 en G6 is voor rivierpeilen boven +5.00 m TAW de corresponderende waterhoogte in de polder nodig om een ontwikkelde watersprong te laten ontstaan in de woelkom. Bij Vlassenbroek G5 ontstaat onafhankelijk van de waterhoogte in de polder, voor de beproefde range van rivierpeilen, een ontwikkelde watersprong in de woelkom. Voor de situaties waarbij de corresponderende waterhoogte in de polder nodig is wordt in Figuur 36 de corresponderend waterhoogte gegeven in functie van de kritische waterhoogte. Ter vergelijking wordt ook de in vorige paragraaf bepaalde trendlijn voor een vrije watersprong gegeven op basis van het bodempeil van de lokaal diepere woelkom.

Ook de beproefde geometrieën voor Dijlemonding bevatten een lokaal verdiepte woelkom. Na de lokaal verdiepte woelkom met lengte 10 m volgde een 12 m lange ingekokerde sectie en een 6 m lange zone met een betonnen bodemplaat. Bij de proeven werd vastgesteld dat bij lagere rivierpeilen steeds een watersprong ontstond in de woelkom. Bij extreme rivierpeilen voldeed de woelkom niet en schoot de superkritische stroming uit de woelkom. Omdat dit enkel optrad bij extreme condities werd dit toelaatbaar geacht indien vervolgens nog een watersprong gevormd werd in de uit beton bestaande zone na de woelkom. Om deze reden werd tijdens de proeven niet gefocust op het exacte afwaarts peil waarop de watersprong zich onmiddellijk na de vallende straal ontwikkelde.

Figuur 35 – Beproefde geometrieën met lokaal diepere woelkom voor in- en uitwateringsconstructie voor Vlassenbroek



Figuur 36 – Corresponderende waterhoogte na sprong in functie van kritische waterhoogte voor een lokaal diepere woelkom



Uit Figuur 36 volgt dat de corresponderende waterhoogte voor VLB G4 en VLB G6 vrijwel samenvalt met de trendlijn voor een vrije watersprong. Dit betekent dat voor deze geometrieën eenzelfde corresponderende waterhoogte nodig is als bij de vrije watersprong. De woelkom is met andere woorden voldoende ruim. Voor VLB G3 wordt opgemerkt dat bij hogere kritische waterpeilen een hogere corresponderende waterhoogte nodig is. Op basis van een visuele interpretatie van het sprongpatroon in de verdiepte woelkom bij VLB G3 werd geoordeeld dat de woelkom te kort was.

7.4 Invloed schanskorfdrempel

Bij Bergenmeersen werd door de opdrachtgever voorgesteld om een schanskorfdrempel aan polderzijde van de constructie te plaatsen. Het doel van deze drempel is om voor een verhoging van de waterhoogte na de val te zorgen. Proeven werden uitgevoerd met een schanskorfdrempel met hoogte $0.125\Delta z$ op $7.0\Delta z$ na de val en een schanskorfdrempel met hoogte $0.250\Delta z$ op $7.0\Delta z$ en $0.250\Delta z$ op $9.5\Delta z$ na de val, zie Figuur 37. De hoogte van de schanskorfdrempel is, voor Bergenmeersen, beperkt tot $0.250\Delta z$ omdat deze niet boven de vloer van uitwateringskoker mag uitkomen. De invloed van deze schanskorfdrempels op de variatie van de corresponderende waterhoogte in functie van de kritische waterhoogte wordt gegeven in Figuur 38.



Figuur 38 – Corresponderende waterhoogte na sprong in functie van kritische waterhoogte bij het gebruik van een schanskorfdrempel voor in- en uitwateringsconstructie voor Bergenmeersen



Merk in Figuur 37 en Figuur 38 op:

- Een schanskorfdrempel met hoogte 0.125∆z heeft zo goed als geen invloed op de variatie van de corresponderende waterhoogte in functie van de kritische waterhoogte.
- Alleen bij lage kritische waterhoogtes heeft een schanskorfdrempel met hoogte 0.250∆z een positieve invloed op de corresponderende waterhoogte. Uit het onderzoek voor Bergenmeersen (Vercruysse et al., 2012), Vlassenbroek (Vercruysse et al., 2014b) en De Bunt (Vercruysse et al., 2014a) volgde echter dat de meest kritieke situatie voor het onderschrijden van de corresponderende waterhoogte voorkomt bij hoge rivierpeilen (en dus hoge kritische waterhoogtes) waardoor de positieve invloed van een schanskorfdrempel verwaarloosbaar is.

7.5 Invloed stootbalk

Het geforceerd dissiperen van de vallende straal door deze te laten botsen met een stootbalk werd enkel bestudeerd bij Bergenmeersen. Een stootbalk met een hoogte 0.125 Δz en een stootbalk met een hoogte 0.250 Δz beide op een afstand 2.50 Δz na de val zijn beproefd. De afstand 2.50 Δz komt overeen met de locatie van de schotbalknissen aan polderzijde bij Bergenmeersen.

De corresponderende waterhoogte in functie van de kritische waterhoogte bij toepassen van een stootbalk wordt gegeven in Figuur 39. Ter vergelijking wordt in deze grafiek ook de trendlijn voor een vrije watersprong gegeven.



Merk in Figuur 39 op:

- Een stootbalk verlaagt de corresponderende waterhoogte bij een gegeven kritische waterhoogte boven de inwatering.
- Het verschil tussen een stootbalkhoogte 0.250 Δz en 0.125 Δz is beperkt.
- Door het verstoorde sprongpatroon bij het toepassen van een stootbalk neemt de nauwkeurigheid waarmee de corresponderende waterhoogte bepaald wordt af. Voor de drie laagste kritische waterhoogtes werd de corresponderende waterhoogte in de polder visueel bepaald op basis van het sprongpatroon na de drempel. Voor de twee hoogste kritische waterhoogtes werd in Vercruysse *et al.* (2012) de corresponderende waterhoogte in de polder bepaald op basis van het afwaarts peil

waarbij de bodemnabije snelheid boven de bodembescherming gelijk is aan de bodemnabije snelheid bij een vrije watersprong.

Bij het gebruik van een stootbalk wordt voor enkele stromingscondities een wisselend (onstabiel) sprongpatroon opgemerkt waarbij de vallende straal enerzijds door de stootbalk omhoog geleid wordt en anderzijds over de stootbalk heen gaat. Dit is opgemerkt bij relatieve kritische waterhoogtes 0.48 Δz en hoger. Bij een stootbalk met hoogte 0.250 Δz en een kritische waterhoogte boven de inwatering 0.64 Δz komt dit onstabiel sprongpatroon voor bij een waterhoogte in de polder tussen 1.15 Δz en 1.35 Δz , zie Figuur 40. Bij een stootbalk met hoogte 0.125 Δz en een zelfde kritische waterhoogte (0.64 Δz) is de range van waterhoogtes in de polder waarbij dit onstabiel sprongpatroon voorkomt beperkter.

Figuur 40 – Illustratie wisselend sprongpatroon voor Bergenmeersen bij een stootbalk met hoogte 0.250 Δz



kritische waterhoogte 0.64 Δz en afwaartse waterhoogte 1.15 Δz

7.6 Invloed stootblokken

Stootblokken zijn een middel om geforceerd de energie van de vallende straal te dissiperen. Door deze geforceerde dissipatie zal een lagere corresponderende waterhoogte nodig zijn. Zowel voor Bergenmeersen als voor Vlassenbroek werd een geometrie met stootblokken beproefd. De dimensionering van deze stootblokken wordt besproken in paragraaf 4.6.

Voor Vlassenbroek G7 werd uit de schaalmodelproeven besloten dat, met uitzondering van het hoogste beproefde rivierpeil (0.45 Δz), onafhankelijk van het peil in de polder een ontwikkelde watersprong in de woelkom ontstaat. Bij Bergenmeersen dient nog een corresponderende waterhoogte in de polder aanwezig te zijn om een watersprong te laten ontstaan. Voor Bergenmeersen wordt de variatie van de corresponderende waterhoogte in functie van de kritische waterhoogte gegeven in Figuur 41. In deze figuur zijn ook de trendlijnen voor de vrije watersprong en de uit de literatuur volgende reductie van de corresponderende waterhoogte met 15% (Thompson & Kilgore, 2006) weergegeven.



Uit de proeven met stootblokken kan het volgende besloten worden:

- Bij het toepassen van stootblokken verlaagt de corresponderende waterhoogte.
- Bij Bergenmeersen met de kritische waterhoogte 0.64 Δz die overeenkomt met het rivierpeil waarop de blokken gedimensioneerd zijn wordt de corresponderende waterhoogte gereduceerd tot ca. 85 %, overeenkomstig de literatuur.
- Het verschil hierbij tussen de twee stootblokhoogtes is beperkt. Bij een kritische waterhoogte 0.8 Δz wordt wel vastgesteld dat een schotbalhoogte 0.38 Δz aanleiding geeft tot een lagere corresponderende waterhoogte. Bij een schotbalkhoogte 0.25 Δz gaat de vallende straal deels over de stootblokken.
- De voor de in- en uitwateringsconstructie voor Vlassenbroek beproefde stootblokken zorgden, op één uitzondering na, voor een watersprong in de woelkom onafhankelijk van het afwaarts peil. Bij het hoogste rivierpeil (0.45 Δz) en een beluchte uitwateringskoker was wel nog een corresponderende waterhoogte in de polder nodig om een gefixeerde watersprong te laten ontstaan.
- De schaalmodelproeven voor beide constructies tonen dat de corresponderende waterhoogte verlaagd kan worden tot ca. 85 % en dat de formules voor een USBR type III woelkom toepasbaar zijn wanneer rekening wordt gehouden met een toegevoegde lengte voor de vallende straal.

7.7 Samenvatting

Voor het merendeel van de beproefde geometrieën is een minimale corresponderende waterhoogte in de polder nodig om een watersprong te laten ontstaan in de woelkom. Wanneer het peil in de polder lager is dan deze corresponderende waterhoogte zal de door de val gecreëerde superkritische stroming niet in de woelkom omgezet worden naar subkritische stroming. De superkritische stroming zal in dit geval aan polderzijde van de constructie door wrijvingsverliezen en/of verwijding van de stroming omgezet worden naar subkritische stroming met het peil van de polder. Dit resulteert in ontoelaatbare bodemnabije snelheden en dus erosie afwaarts van de betonnen vloerplaat.

De bij een gegeven rivierpeil horende minimum voorkomende waterhoogte in de polder volgt uit numerieke simulaties van de vulling van het GOG/GGG. De minimum voorkomend waterhoogte in de polder bij een gegeven rivierpiel moet steeds hoger zijn dan de corresponderende waterhoogte horende bij dit rivierpeil. Hierbij moet opgelet worden om niet de bij een bepaald typegetij horende polderpeil toe te passen. Deze polderpeilen zijn namelijk het maximaal polderpeil gedurende dit typegetij. Doordat het GOG/GGG verder vult na het voorkomen van hoogwater op de rivier zal het voorkomend polderpeil op het tijdstip van het maximum rivierpeil lager zijn.

De corresponderende waterhoogte kan, in het geval van een vrije watersprong, met een goede nauwkeurigheid berekend worden aan de hand van de formule van Rand (1955).

Om de benodigde corresponderend waterhoogte te verlagen zijn volgende opties onderzocht:

- Globaal verdiepen van de woelkom: de beschikbare waterhoogte na de val kan verhoogd worden door het toepassen van een globale verdieping van de bodem na de val. De benodigde verdieping kan berekend worden aan de hand van de formule van Rand (1955).
- Lokaal verdiepen van de woelkom: op voorwaarde dat de lokale verdieping goed gedimensioneerd is, is het lokaal verdiepen van de woelkom net zo effectief als het verdiepen van een grote zone na de constructie. De benodigde diepte kan berekend worden aan de hand van de formules van Rand (1955). De dimensionering van de lokaal diepere woelkom wordt verder besproken in paragraaf 8.1.2.
- Plaatsen van een schanskorfdrempel: Voor de in- en uitwateringsconstructie voor Bergenmeersen werd getracht om de waterhoogte na de val te verhogen door middel van het plaatsen van een schanskorfdrempel aan polderzijde van de constructie. Om de uitstroming van het gebied niet te hinderen is de hoogte van de schanskorfdrempel beperkt tot het vloerpeil van de uitwateringskoker. De schaalmodelproeven tonen aan dat een schanskorfdrempel enkel een positieve invloed heeft bij lagere kritische waterhoogtes (en dus lagere rivierpeilen). Uit de numerieke simulaties van de vulling van het GOG/GGG volgt dat deze zone minder kritiek is voor het onderschrijden van de corresponderende waterhoogte.
- Plaatsen van een stootbalk: Voor de in- en uitwateringsconstructie voor Bergenmeersen werd onderzocht of het geforceerd dissiperen van de energie van de vallende straal mogelijk is door net na de omzetting naar een horizontale bodemnabije stroming deze straal te laten botsen op een stootbalk. De schaalmodelproeven tonen dat een stootbalk de corresponderende waterhoogte verlaagt. Visueel werd vastgesteld dat deze stootbalk de volledige stroming omhoog leidt waarna na het neerkomen een soort watersprong ontstaat. Bij een range van waterhoogtes in de polder werd een wisselend sprongpatroon vastgesteld, wat als niet wenselijk wordt beschouwd.
- Plaatsen van stootblokken: Voor de in- en uitwateringsconstructies voor Bergenmeersen en Vlassenbroek werd onderzocht of Het geforceerd dissiperen van de superkritische stroming mogelijk is door de vallende straal open te breken door middel van stootblokken. De stootblokken zijn gedimensioneerd aan de hand van de in de literatuur gegeven formules voor een USBR type III woelkom. De schaalmodelproeven voor deze beide constructies tonen dat de corresponderende

waterhoogte verlaagd kan worden tot ca. 85 % en dat de formules voor een USBR type III woelkom toepasbaar zijn wanneer rekening wordt gehouden met een toegevoegde lengte gelijk aan de lengte van de vallende straal. In vergelijking met een stootbalk is de energiedissipatie door stootblokken effectiever. Daarnaast wordt vastgesteld dat zich door het opbreken van de straal in plaats van deze omhoog te geleiden geen wisselend sprongpatroon voordoet bij het gebruik van stootblokken.

8 Bodemnabije snelheid boven bodembescherming en einde watersprong

Bij een niet goed functionerende woelkom zal de geconcentreerde stroming die ontstaat ten gevolge van de val onvoldoende gedissipeerd zijn waardoor hoge bodemnabije snelheden ontstaan afwaarts van de betonnen vloerplaat boven de bodembescherming. Deze hoge snelheden kunnen de bodembescherming beschadigen en vervolgens resulteren in erosiekuilen aan polderzijde van de constructie die de stabiliteit van de constructie kunnen bedreigen. Om ervoor te zorgen dat enerzijds de hydraulische belasting op en net na de bodembescherming toelaatbaar is, moet de dissipatie van de geconcentreerde stroming in belangrijke mate gebeuren in de zone met de vloerplaat uit beton.

In paragraaf 8.1 wordt de bodemnabije snelheid boven en na de bodembescherming behandeld en in paragraaf 8.2 wordt de lengte van de watersprong behandeld. Conclusies worden samengevat in paragraaf 8.3.

Bemerk dat de resultaten in dit hoofdstuk dimensieloos weergegeven worden. De dimensies van de constructie, het traject van de vallende straal en de waterpeilen aan polderzijde worden dimensieloos gemaakt door deze te delen door de valhoogte. Het rivierpeil en het debiet worden gekarakteriseerd door de relatieve kritische waterhoogte, zijnde de kritische waterhoogte gedeeld door de valhoogte. De bodemnabije snelheid wordt dimensieloos weergegeven door deze te delen door de theoretische bodemnabije snelheid na val. De toegepaste dimensieloze verschaling wordt verder verduidelijkt in paragraaf 4.7.

8.1 Bodemnabije snelheid boven bodembescherming

De proeven zijn steeds uitgevoerd met een constant rivierpeil en een langzaam stijgende waterhoogte in de polder. Voor de rivierpeilen wordt een range met vaste stapgrootte gekozen tussen het peil van de inwateringskoker en het hoogste peil volgend uit de MIKE11-simulaties voor GOG werking (zie Tabel 5). De bodemnabije snelheid wordt dimensieloos uitgedrukt ten opzichte van de berekende hoogtegemiddelde snelheid na val, zie paragraaf 4.1.

Analoog als in hoofdstuk 7 (corresponderende waterhoogte in de polder) worden in deze paragraaf achtereenvolgens volgende configuraties behandeld:

- Bodemnabije snelheid bij een vrije watersprong: paragraaf 8.1.1,
- Bodemnabije snelheid bij een lokaal diepere woelkom: paragraaf 8.1.2,
- Invloed van een stootbalk: paragraaf 8.1.3,
- Invloed van stootblokken: paragraaf 8.1.4.

Doordat in paragraaf 7.4 werd geconcludeerd dat een schanskorfdrempel aan polderzijde geen invloed heeft op het verlagen van de corresponderende waterhoogte wordt deze in dit hoofdstuk niet beschouwd.

Het plafond van de woelkom heeft een invloed op de bodemnabije snelheid. Dit wordt in paragraaf 8.1.5 geïllustreerd voor de in- en uitwateringsconstructies voor Dijlemonding, Vlassenbroek en De Bunt. Tijdens de proeven wordt standaard de bodemnabije snelheid opgemeten ter plaatse van het begin en het einde van de in het voorontwerpplan voorziene zone met bodembescherming. De (relatieve) locatie van begin en einde van de bodembescherming is voor de vier beproefde geometrieën verschillend wat een onderlinge vergelijking bemoeilijkt.

Voor het opmeten van de bodemnabije snelheid wordt een elektromagnetische snelheidsmeter (type EMS van Deltares) gebruikt. Dit type snelheidsmeter moet minimum 1.0 cm (modeleenheid) boven de bodem gepositioneerd worden. Aangezien de bodemnabije snelheid gewenst was werd voor de drie beproefde geometrieën het EMS toestel steeds op de minimum afstand van 1.0 cm (modeleenheid) boven de bodem gepositioneerd. Aangezien de bodemnabije hoogte dimensieloos voorgesteld wordt door te delen door de valhoogte is voor elke beschouwde geometrie de relatieve bodemnabije hoogte verschillend, zie Tabel 7. Uit de tabel volgt dat de bodemnabije snelheid opgemeten is tussen 0.017 Δz en 0.040 Δz boven de bodem.

	eenheid	Bergenmeersen	Grote Vijver	Vlassenbroek G2,G3 en G4	Vlassenbroek G5,G6 en G7	De Bunt
valhoogte – in situ	[m]	2.0	3.6	4.1	4.6	5.1
schaalfactor	[-]	8.00			9.95	
valhoogte – modeleenheid	[m]	0.25	0.45	0.51	0.58	0.51
positionering EMS boven	[m]	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
bodem	[-]	0.040 ∆z	0.022∆z	0.020 ∆z	0.017 ∆z	0.020∆z

Tabel 7 – Positionering onderzijde EMS probe ten opzichte van bodem

Het meetbereik van de ingezette snelheidsmeter bedroeg +/- 2.5 m/s. Bij een schaal 8 komt dit overeen met een snelheid ca. 7.0 m/s in situ. Bij hogere rivierpeilen waarbij er geen ontwikkelde sprong voorkwam in de woelkom topte de meting af op een snelheid ca. 2.7 m/s. Aangezien een snelheid 7.0 m/s als ontoelaatbaar wordt beschouwd voor de schanskorfbodembescherming aan polderzijde van de constructie was dit voor de resultaten geen probleem. In de in onderhavige paragraaf gegeven figuren met resultaten worden metingen waarbij de opgemeten snelheid hoger was dan 2.5 m/s niet weergegeven.

De locatie van de bodemnabije snelheidsmetingen wordt bepaald ten opzichte van het einde van de inwateringskokers. Analoog met de overige afmetingen wordt deze afstand relatief uitgedrukt ten opzichte van de valhoogte. Bemerk dat de locatie van de bodemnabije snelheidsmetingen verschilt per geometrie. Dit omdat bij het uitvoeren van de proeven gekozen werd om de bodemnabije snelheid op te meten aan het begin en einde van de zone met bodembescherming. Hierbij wordt aangenomen dat de opwaartse snelheidsmeting representatief is voor de maatgevende snelheid boven de bodembescherming en dat de afwaartse snelheidsmeting representatief is voor de maatgevende snelheid voor de niet beschermde bodem onmiddellijk na de constructie. Deze afstand wordt in volgende subparagrafen aangeduid door middel van 'x'.

8.1.1 Bodemnabije stroomsnelheid bij een vrije watersprong

Als eerste wordt de situatie van een 'vrije watersprong' behandeld, dit is een geometrie waarbij de watersprong "vrij" kan ontwikkelen. Dit wil zeggen zonder een lokaal diepere woelkom met een einddrempel, stootbalk en/of stootblokken. Een dergelijke geometrie werd beproefd tijdens de proeven voor Bergenmeersen en Vlassenbroek G2. De variatie van de relatieve bodemnabije snelheid in functie van het relatieve waterhoogte in de polder wordt gegeven in:

- Figuur 42: voor verschillende kritische waterhoogtes bij Bergenmeersen met een beluchte uitwateringskoker.
- Figuur 43: voor een kritische waterhoogte 0.645 Δz bij Bergenmeersen met enerzijds een beluchte en anderzijds een niet beluchte uitwateringskoker.

- Figuur 44: voor verschillende kritische waterhoogtes bij Vlassenbroek G2 met een beluchte uitwateringskoker.
- Figuur 45: voor een kritische waterhoogte 0.373 Δz bij Vlassenbroek G2 met enerzijds een beluchte en anderzijds een niet beluchte uitwateringskoker.
- Figuur 46: voor een kritische waterhoogte 0.373 Δz en voor twee verschillende schotbalkhoogtes bij Vlassenbroek G2.

Figuur 42 – Variatie van de bodemnabije snelheid in functie van de waterhoogte in de polder Bergenmeersen – geen schotbalken – belucht








Figuur 44 – Variatie van de bodemnabije snelheid in functie van de waterhoogte in de polder Vlassenbroek G2 – geen schotbalken – belucht

Figuur 45 – Variatie van de bodemnabije snelheid in functie van de waterhoogte in de polder Vlassenbroek G2 – dc= 0.373 Δz – geen schotbalken – belucht en niet belucht







Merk in Figuur 42 tot en met Figuur 46 op:

- De figuren tonen een plotse afname van de bodemnabije snelheid. Dit is de overgang van superkritische naar subkritische stroming bij de corresponderende waterhoogte.
- Bij Bergenmeersen doet zich op 5 Δz na de val bij een bepaalde range van (vooral hogere) waterhoogtes in de polder een terugstroming voor. Door de toenemende waterhoogte in de polder neemt de helling van de vallende straal af en neemt de afstand tussen de locatie waar de vallende straal de bodem bereikt na de val toe tot voorbij 5 Δz na de val. Het meetpunt is bijgevolg gelegen in de zone met terugstroming onder de vallende straal, zie ook Figuur 3. Bij een verder stijgende waterhoogte in de polder wordt vastgesteld dat de stroomsnelheden terug een positief teken krijgen. Bij een stijgende waterhoogte in de polder raakt de vallende straal op een bepaald moment de verticale muur na de inwateringskoker, waardoor de stromingsrichting wijzigt en de locatie waar de vallende straal de bodem raakt zich terug in de woelkom bevindt. Dit werd niet vastgesteld bij Vlassenbroek. Het plafond boven de woelkom is bij Vlassenbroek relatief lager waardoor dit bij lagere waterhoogtes in de polder dan bij Bergenmeersen het stromingspatroon beïnvloedt.
- Bij Vlassenbroek doet de minimale stroomsnelheid aan de bodem zich voor onmiddellijk na de plotse overgang van superkritische naar subkritische stroming. Bij een verder stijgende waterhoogte in de polder neemt de snelheid terug toe. De vermoedelijke verklaring hiervoor is dat bij een stijgende waterhoogte in de polder de helling van de straal afneemt waardoor deze op een verdere locatie, dichter bij het begin van de bodembescherming en dus ook dichter bij de meetlocatie, de bodem raakt.
- De energiedissipatie is het meest effectief bij een vrije watersprong en neemt dus af bij het verdronken raken van de sprong (Vischer & Hager, 1995). Dit is vermoedelijke waar te nemen in de meest afwaartse snelheidsmeting. Net na de overgang van superkritische naar subkritische stroming wordt hier een inzinking waargenomen in de snelheid.
- Het beluchten van de vallende straal zorgt ervoor dat deze meer naar afwaarts de bodem van de woelkom raakt (zie paragraaf 6.2). De zone met de hoge superkritische stroming onmiddellijk na de val verplaatst zich dus naar de polder toe. Bij Vlassenbroek G2 wordt op 3.7 Δz na de val een aanzienlijke toename van de bodemnabije snelheid vastgesteld bij het beluchten van de vallende straal. Dit effect wordt op 6.0 Δz na de val niet waargenomen. De vermoedelijke verklaring hiervoor is dat bij het beluchten van de vallende straal de helling van de straal afneemt waardoor deze op een verdere locatie, dichter bij het begin van de bodembescherming en dus ook dichter bij de meetlocatie, de bodem raakt. Bij de in- en uitwateringsconstructie voor Bergenmeersen wordt de bodemnabije snelheid pas opgemeten vanaf 5.0 Δz na de val. Voor deze constructie wordt geen invloed van het al dan niet beluchten van de vallende straal op de bodemnabije snelheid opgemerkt. Bemerk hierbij dat het rivierpeil bij Bergenmeersen hoger is dan dit voor Vlassenbroek.
- De proeven werden uitgevoerd voor een gegeven range van rivierpeilen. Het debiet en dus ook de kritische waterhoogte volgen hierdoor uit de geometrie, en dus ook de schotbalkhoogte, en het rivierpeil. Dit maakt dat een configuratie zonder en met schotbalken niet vergeleken kunnen worden voor een zelfde kritische waterhoogte. Bij een inwateringshoogte 0.610 Δz bij Vlassenbroek G2 is de invloed van een schotbalkhoogte 0.073 Δz op het debiet, en de kritische waterhoogte, evenwel verwaarloosbaar. Uit de metingen volgt dat de snelheid bij een schotbalkhoogte 0.073 Δz hier beperkt lager is in vergelijking met de meting zonder schotbalken. Een schotbalkhoogte 0.195 Δz resulteert in een merkelijke verlaging van de bodemnabije snelheid, maar het is niet mogelijk om uit te maken of dit enkel te wijten is aan de afname van het debiet en dus de kritische waterhoogte of dat hier nog andere factoren een invloed hebben.

- Een rechtstreekse vergelijking op vlak van de bodemnabije snelheid tussen Bergenmeersen en Vlassenbroek is niet mogelijk:
 - De locaties waarop de bodemnabije snelheid werd gemeten zijn niet dezelfde.
 - De beproefde rivierpeilen verschillen.

8.1.2 Bodemnabije stroomsnelheid bij een lokaal diepere woelkom

Bij de proeven voor de in- en uitwateringsconstructies voor Dijlemonding, Vlassenbroek en De Bunt werden geometrieën met een lokaal diepere woelkom beproefd. Resultaten voor Dijlemonding en De Bunt worden evenwel niet beschouwd in deze paragraaf. Voor Dijlemonding werden enkel varianten voor het plafond onderzocht. Doordat na de zone met de verdiepte woelkom nog over een lengte van 19 m beton voorzien was werd enkel gefocust op het stromingspatroon boven de bodembescherming. De in- en uitwateringsconstructie voor De Bunt is enkel op vlak van de geometrie van het plafond verschillend met Vlassenbroek G4 en wordt hierom ook niet verder beschouwd in deze paragraaf. Voor de invloed van het plafond op de bodemnabije snelheid boven de bodembescherming, zie paragraaf 8.1.5, worden de proeven voor Dijlemonding en De Bunt wel gebruikt.



Tijdens de proeven werd bij Vlassenbroek G3 bij hogere rivierpeilen opgemerkt dat de lengte van de lokaal verdiepte woelkom te beperkt was en dat de vallende straal uit de woelkom trad. Om die reden wordt deze geometrie niet verder beschouwd. De valhoogte bij Vlassenbroek G2en G4 bedraagt 4.1 m, bij Vlassenbroek G5 en G6 bedraagt de valhoogte 4.6 m. Hierdoor zijn de – dimensieloos weergegeven – beproefde rivierpeilen en meetlocaties van de bodemnabije snelheid onderling verschillend.

In Figuur 48 wordt de variatie van de relatieve bodemnabije snelheid in functie van de waterhoogte in de polder voor een geometrie met een globaal diepere woelkom (Vlassenbroek G2) vergeleken met deze voor een geometrie met een lokaal diepere woelkom (Vlassenbroek G4).



Figuur 48 – Variatie van de bodemnabije snelheid in functie van de waterhoogte in de polder invloed lokaal diepere woelkom - Vlassenbroek G2 en G4

kritische waterhoogte 0.373 Δz bovenste figuur belucht / onderste figuur niet belucht

Uit de figuur volgt dat voor de geometrie met einddrempel, G4, de bodemnabije snelheid boven de bodembescherming lager is dan voor de geometrie zonder einddrempel, G2. Dit niettegenstaande dat de waterdiepte voor G4 0.12 Δz lager ligt en bijgevolg de sectiegemiddelde snelheid hoger zal zijn. De einddrempel zorgt voor spreiding in de hoogte van de bodemnabije snelheid op het einde van de woelkom. Bij een toename van de afwaartse waterhoogte is er meer hoogte beschikbaar waarover de stroming gespreid kan worden. Bij G4 ontstaat zo een range van afwaartse peilen waarbij de straal zodanig naar het oppervlak toe gespreid wordt dat op 3.7 Δz na de val terugstroming ontstaat. Deze terugstroming verdwijnt terug na het verdronken raken van het plafond van de woelkom.

Om de invloed van de diepte van de lokaal diepere woelkom na te gaan wordt in Figuur 49 de variatie van de bodemnabije snelheid in functie van de waterhoogte in de polder vergeleken voor Vlassenbroek G5 (diepte 0.22 Δz) en Vlassenbroek G6 (diepte 0.11 Δz) bij een kritische waterhoogte 0.331 Δz .



Figuur 49 – Variatie van de bodemnabije snelheid in functie van de waterhoogte in de polder invloed lokaal diepere woelkom - Vlassenbroek G5 en G6

kritische waterhoogte 0.331 Δz bovenste figuur niet belucht / onderste figuur belucht

In geval van Vlassenbroek G5 ontstond voor elk van de beproefde rivierpeilen een ontwikkelde watersprong in de woelkom. In Figuur 49 is dit waar te nemen door het ontbreken van een plotse overgang van superkritische naar subkritische stroming. Op 3.3 Δz na de val wordt zowel voor G5 als voor G6 een zone met terugstroming, i.e. negatieve stroomsnelheden, vastgesteld. Tussen de corresponderende waterhoogte (ca. 0.4 Δz) en het peil waarop de woelkom verdronken raakt (0.8 Δz) is de bodemnabije snelheid op 5.3 Δz na de val merkelijk hoger bij Vlassenbroek G5 dan bij Vlassenbroek G6. De oorzaak hiervan is de lagere waterdekking bij Vlassenbroek G5.

8.1.3 Invloed van een stootbalk

De invloed van een stootbalk werd enkel onderzocht bij de proeven die uitgevoerd werden voor de in- en uitwateringsconstructie voor Bergenmeersen. Voor deze proeven werd enerzijds een stootbalk met hoogte 0.125 Δz en anderzijds een stootbalk met hoogte 0.250 Δz beproefd. Beide op een afstand 2.50 Δz van de val. In Figuur 50 wordt de variatie van de bodemnabije snelheid in functie van de waterhoogte in de polder grafisch voorgesteld voor een kritische waterhoogte 0.645 Δz en een stootbalkhoogte 0.125 Δz en 0.250 Δz . Ter vergelijking is hierbij ook de variatie van de bodemnabije snelheid in functie van de afwaartse waterhoogte voor een vrije watersprong voorgesteld.



Figuur 50 – Bodemnabije snelheid in functie van waterhoogte bij het gebruik van een stootbalk

Bergenmeersen – belucht – kritische waterhoogte 0.645 Δz Boven: stootbalkhoogte 0.125 Δz / onder: stootbalkhoogte 0.250 Δz

De bodemnabije snelheid voor de proeven met een stootbalk is lager tot gelijk aan de bodemnabije snelheid zonder stootbalk. De overgang van superkritische naar subkritische stroming verloopt geleidelijker en doet zich voor bij een lagere afwaartse waterhoogte. De grafieken tonen bij hogere afwaartse waterhoogtes een plotse tijdelijke toename van de bodemnabije snelheid tot een waarde gelijk aan de situatie zonder stootbalken. Bij hogere afwaartse waterhoogtes neemt de locatie waar de vallende straal de bodem raakt toe waardoor de vallende straal op een gegeven moment over de stootbalk heen gaat. Bij een verder stijgende afwaartse waterhoogte raakt het plafond van de woelkom verdronken waardoor de straal van richting verandert en terug in aanraking komt met de stootbalk, dit zorgt terug voor een plotse afname van de bodemnabije snelheid. Tijdens de proeven werd voor een bepaalde range van waterhoogtes in de polder vastgesteld dat een wisselend sprongpatroon ontstond. Figuur 40 toont beide stromingspatronen voor een stootbalkhoogte 0.250 Δz en een kritische waterhoogte 0.645 Δz en afwaarts waterhoogte 1.15 Δz .

8.1.4 Invloed van stootblokken

Uit paragraaf 7.6 volgt dat de corresponderende waterhoogte verlaagd kan worden door middel van stootblokken. Stootblokken werden toegepast bij de proeven voor Bergenmeersen en Vlassenbroek. De beproefde geometrieën zijn beschreven in Figuur 17.

Voor de proeven voor Bergenmeersen wordt de variatie van de bodemnabije snelheid in functie van de waterhoogte in de polder voor een kritische waterhoogte 0.645 Δz gegeven in Figuur 51, voor een stootblokhoogte 0.250 Δz en een stootblokhoogte 0.375 Δz . Voor Vlassenbroek wordt in Figuur 52 de variatie van de bodemnabije snelheid in functie van de waterhoogte in de polder gegeven voor een stootblokhoogte 0.163 Δz en een kritische waterhoogte 0.333 Δz .

Figuur 51 – Bodemnabije snelheid in functie van waterhoogte in polder bij het gebruik van stootblokken met hoogte 0.250 Δz



belucht – kritische waterhoogte 0.645 Δz Boven: stootblokhoogte 0.250 Δz / onder: stootblokhoogte 0.375 Δz

Voor Bergenmeersen wordt opgemerkt dat de stootblokken voor alle beproefde peilen voor een verlaging van de bodemnabije snelheid zorgen in vergelijking met deze voor een vrije watersprong. De stootblokken zorgen voor een spreiding in hoogte. Bij lage afwaartse waterhoogtes zal na deze spreiding in hoogte de stroming terug samenvoegen en versnellen. Dit is voor Bergenmeersen waar te nemen in de toename van de snelheid met de afstand voor de laagste afwaartse waterhoogtes. De toename van de snelheid bij een afwaartse waterhoogte van ca. 1.4 Δz voor Bergenmeersen wordt verklaard doordat de vallende straal hierbij over de stootblokken heen gaat. Bij een verdere toename van de afwaartse waterhoogte botst de vallende straal met het plafond boven de woelkom. Doordat de straal hierbij opnieuw gericht wordt naar de bodem van de woelkom toe, botst de stroming terug op de stootblokken.





belucht – kritische waterhoogte 0.332 Δz

Voor Vlassenbroek wordt een lokaal verdiepte woelkom zonder stootblokken, G6, vergeleken met een lokaal verdiepte woelkom met stootblokken, G7. Uit de vergelijking volgt dat de variatie in snelheid voor de geometrie met stootblokken merkelijk lager is, zowel de spreiding in functie van de afwaartse waterhoogte als de spreiding tussen de snelheidsmetingen op $3.3 \Delta z$ en $5.3 \Delta z$ na de val. Bemerk dat de combinatie van de stootblokken met de einddrempel ook bij de laagste afwaartse waterhoogtes zorgt voor een reductie van de snelheid na de val tot ca. 30 %. De range van afwaartse waterhoogtes waarbij terugstroming op $3.3 \Delta z$ waargenomen werd verdwijnt na het plaatsen van stootblokken. Doordat de stootblokken zorgen voor een spreiding in hoogte heeft de einddrempel een kleinere invloed op de stroming op het einde van de woelkom. Door de toename van de vallengte bij een toename van de afwaartse waterhoogte gaat bij een afwaartse waterhoogte rond $0.80 \Delta z$ de vallende straal, deels over de stootblokken waardoor deze minder efficiënt worden.

Merk op dat zelfs als de stootblokken bij lage waterhoogtes in de polder niet optimaal werken ze toch nog zorgen voor een sterke reductie van de bodemnabije snelheid.

8.1.5 Invloed plafond woelkom

Uit paragraaf 3.3.2 volgt dat bij de proeven voor Dijlemonding ook het plafond van de woelkom werd gewijzigd. Deze paragraaf beschrijft de invloed van deze wijziging op de opgemeten bodemnabije stroomsnelheden. Daarnaast wordt in deze paragraaf voor de schaalmodelproeven voor De Bunt de invloed van de gewijzigde geometrie van het plafond, ten opzichte van Vlassenbroek G2, op de bodemnabije stroomsnelheid nagegaan.

Bij de proeven voor Dijlemonding werd vastgesteld dat voor de voorgestelde geometrie bij hoge rivierpeilen de vallende straal de verticale muur na de inwateringskoker raakt. Omdat dit als ongewenst werd beschouwd voor de duurzaamheid van de betonnen constructie zijn voor deze constructie twee varianten voorgesteld, zie Figuur 53.



Tijdens de proeven voor Dijlemonding zijn geen metingen uitgevoerd met een langzaam variërend waterpeil in de polder. Daarentegen zijn voor elk rivierpeil een groot aantal waterhoogtes in de polder beproefd. De variatie van de bodemnabije snelheid in functie van de waterhoogte in de polder bij een kritische waterhoogte 0.52 Δz wordt voor deze proeven grafisch voorgesteld in Figuur 54.



inwateringshoogte 0.52 Δz – geen schotbalken – belucht

Uit de figuur volgt dat de opgemeten bodemnabije stroomsnelheden voor Dijlemonding G3 en G4 bij waterhoogtes in de polder lager dan 1.0 Δz identiek zijn. Bij deze rivierpeilen raakt de vallende straal de verticale muur van het plafond boven de woelkom niet. Bij hogere waterhoogtes in de polder wordt voor Dijlemonding G4 een merkelijk hogere snelheid vastgesteld dan bij Dijlemonding G3. De reden hiervoor is dat het plafond van Dijlemonding G4 de stroming beter geleidt, waardoor minder dissipatie optreedt. Dit is zeer uitgesproken op 7.8 Δz na de val maar ook nog waarneembaar op 11.1 Δz na de val.

Voor de in het schaalmodel beproefde geometrie van De Bunt werd de woelkom uit Vlassenbroek G4 overgenomen, zie paragraaf 3.3.4. Voor het plafond boven de woelkom werd het oorspronkelijke ontwerp van de Bunt behouden, zie Figuur 55. Aangezien uit de proeven voor Dijlemonding volgt dat het plafond van de woelkom een invloed heeft op de opgemeten bodemnabije stroomsnelheid, is deze invloed door middel van een beperkte reeks schaalmodelproeven gecontroleerd. Figuur 56 vergelijkt de opgemeten bodemnabije snelheid in functie van de waterhoogte in de polder voor Vlassenbroek G4 en de Bunt. Bemerk dat ook hier de afstanden waarop de snelheid gemeten werd gekozen is in functie van het begin en einde van de bodembescherming op het ontwerpplan van de betreffende constructie en dus onderling verschilt.



kritische waterhoogte 0.375 Δz

Voor waterhoogtes lager dan 1.15 Δz wordt een gelijkaardige variatie van de bodemnabije snelheid opgemeten voor Vlassenbroek G4 en de Bunt G2 bij een kritische waterhoogte 0.375 Δz . Bij Vlassenbroek G4 raakt de vallende straal de verticale muur na de inwateringskoker bij een waterhoogte in de polder van ca. 1.15 Δz , wat aanleiding geeft tot een verlaging van de bodemnabije stroomsnelheid. Bij de Bunt G2 doet zich tot een afwaartse waterhoogte ca. 1.25 Δz nog een stijging van de bodemnabije stroomsnelheid voor, wegens de toename van de lengte van de vallende straal bij stijgende waterhoogte in de polder. Figuur 57 vergelijkt het stromingspatroon voor Vlassenbroek G4 bij een waterhoogte in de polder 1.17 Δz en dit voor de Bunt G2 bij een waterhoogte in de polder 1.24 Δz . Merk ook op dat nadat de inwateringskoker volledig verdronken is, bij een waterhoogte in de polder hoger dan 1.30 Δz , de opgemeten bodemnabije stroomsnelheid bij de Bunt G2 merkelijk hoger is dan de opgemeten bodemnabije snelheid bij Vlassenbroek G4.

Figuur 57 – Stromingspatroon bij een kritische waterhoogte 0.375 Δz links Vlassenbroek G4 met waterhoogte in polder 1.17 Δz / rechts De Bunt G2 met waterhoogte in polder 1.24 Δz



8.2 Einde watersprong

De locatie van het einde van de optredende watersprong kan een criterium zijn voor het definiëren van de lengte van de benodigde bodembescherming. De in het schaalmodel gebruikte visuele methode voor het bepalen van het einde van de watersprong is beschreven in paragraaf 8.2.1. In de literatuur worden een aantal formules vermeld voor de berekening van de lengte van de watersprong. Deze werden beschreven in paragraaf 4.5. In paragraaf 8.2.2 wordt het in het schaalmodel bepaalde einde van de watersprong vergeleken met deze berekend aan de hand van literatuurformules. Voor deze vergelijking worden alleen situaties met het corresponderend peil in de polder beschouwd. Bij hogere peilen zijn zowel de in het schaalmodel gehanteerde definities voor het einde van de watersprong als de standaard formules uit de literatuur niet meer van toepassing.

8.2.1 Bepaling einde watersprong in schaalmodel

Afwaarts de watersprong doet zich uniforme stroming voor. De meest logische manier voor het bepalen van het einde van de watersprong is het bepalen van de locatie waar opnieuw een uniform stromingspatroon voorkomt. Dit kan enkel uitgevoerd worden met behulp van een 2DV snelheidsmeettechniek of aan de hand van een voldoende groot aantal puntmetingen van de stroomsnelheid. Omwille van praktische redenen was het niet mogelijk om deze methodes toe te passen tijdens de schaalmodelproeven en is ervoor gekozen om het einde van de watersprong te bepalen aan de hand van een visuele methode.

Tabel 8 geeft de gebruikte visuele definities waarmee het einde van de watersprong werd bepaald, een illustratie wordt gegeven in Figuur 58. Om de lengte van de watersprong te berekenen wordt de afstand tussen het einde van de inwateringskoker en het einde van de watersprong beschouwd.

Tabel 8 – Gehanteerde visuele definities einde watersprong						
	Definitie 1	De watersprong eindigt op de locatie waar de waterhoogte gelijk is aan de afwaartse waterhoogte				
	Definitie 2	De watersprong eindigt op de locatie waar de beweging van de luchtbellen aan het oppervlak gedomineerd wordt door de afwaartse component.				
	Definitie 3	De watersprong eindigt op de locatie waar de luchtbellen gestegen zijn tot aan het wateroppervlak.				

Figuur 58 – Illustratie visuele definities einde watersprong



(voorbeeldfoto onderzoek Bergenmeersen)

8.2.2 Vergelijking einde watersprong uit schaalmodelproeven met berekende waarden

Enkel voor de in- en uitwateringsconstructies van Bergenmeersen en Vlassenbroek werd tijdens de schaalmodelproeven het einde van de watersprong bij de corresponderende waterhoogte bepaald. Dit werd niet gedaan voor de constructie van Dijlemonding omdat dit door de lange betonnen koker die hier voorzien was dit geen meerwaarde had voor de revisie van het ontwerp.

Bemerk dat het einde van de watersprong bepaald wordt ten opzichte van het einde van de inwateringskoker. Het einde van de sprong dient hierdoor berekend te worden als de som van de lengte van de vallende straal en de lengte van de watersprong. De formules voor de lengte van de vallende straal worden gegeven in paragraaf 4.4 en de formules voor de lengte van de watersprong worden gegeven in paragraaf 4.5.

Uit de rapporten voor de schaalmodelproeven voor Bergenmeersen en Vlassenbroek volgen volgende algemene conclusies met betrekking tot de drie toegepaste visuele definities voor het bepalen van het einde van de watersprong in het schaalmodel:

- Bij een vrije watersprong wordt een goede overeenkomst bekomen tussen de aan de hand van visuele definitie 2 bepaalde spronglengte en de met de formules uit de literatuur berekende waarden van de totale lengte van de watersprong. Bij de proeven voor Vlassenbroek G3 en G4 met een einddrempel met hoogte 0.122 Δz en Vlassenbroek G6 met een einddrempel met hoogte 0.109 Δz werd ook een goede overeenkomst bekomen tussen het einde van de watersprong in het schaalmodel en deze berekend op basis van de literatuurformules.
- In het geval van een vrije watersprong wordt een goede overeenkomst bekomen tussen het einde van de watersprong bepaald aan de hand van visuele definitie 1 en de formules uit de literatuur voor de lengte van de roller.
- Het einde van de watersprong in het schaalmodel opgemeten volgens visuele definitie 3 overschat de spronglengte berekend aan de hand van de literatuurformules. Uit hoofdstuk 2 volgt dat de toegepaste verschaling maakt dat luchtbellen niet correct verschaald zijn in het schaalmodel.

Hieruit volgt dat aan de hand van visuele definitie 1 eerder de lengte van de roller bepaald wordt en dat de totale lengte van de watersprong meer overeenkomt met visuele definitie 2. Bijgevolg wordt voor het vergelijken van het einde van de watersprong uit het schaalmodel met de berekende waarde uit de literatuur

in deze pararaaf enkel visuele definitie 2 beschouwd. Voor de in- en uitwateringsconstructie voor Bergenmeersen en Vlassenbroek wordt deze vergelijking gegeven in Figuur 59. Hierbij wordt opgemerkt dat de lengte van de watersprong uit de proeven voor Bergenmeersen enkel vergeleken wordt met de berekeningsresultaten voor een vrije watersprong. Voor de in- en uitwateringsconstructie voor Vlassenbroek wordt vergeleken met schaalmodelproeven voor een vrije watersprong en met schaalmodelproeven met een lokaal diepere woelkom.



bovenste figuur Bergenmeersen / onderste figuur Vlassenbroek

Het einde van de watersprong neemt toe met een stijgende kritische waterhoogte. Bij Bergenmeersen wordt aan de hand van literatuurformules een grotere lengte van de watersprong berekend in vergelijking met het visueel bepaalde einde van de watersprong. Bij Vlassenbroek wordt een goede overeenkomst bekomen tussen de op basis van literatuurformules berekende lengte van de watersprong en de visueel bepaalde lengte van de watersprong.

Daarnaast wordt vastgesteld dat zowel het al dan niet beluchten als het gebruik van een lokaal diepere woelkom in plaats van een globale verdieping geen invloed hebben op de locatie van het einde van de watersprong.

Voor Bergenmeersen eindigt de betonnen vloerplaat op 4.65 Δz na de val en is tot 11.7 Δz na de val bodembescherming voorzien. Voor kritische waterhoogtes vanaf 0.3 Δz ligt het einde van de watersprong boven de bodembescherming. Voor Vlassenbroek eindigt de betonnen vloerplaat op 3.6 Δz (G2 en G4) of 3.2 Δz (G6) na de val en eindigt de bodembescherming op 6.0 Δz (G2 en G4) of 5.4 Δz (G6) na de val. Ook hier wordt opgemerkt dat voor de grootste range van kritische waterhoogtes het einde van de watersprong boven de bodembescherming eindigt. Voor de hoogste kritische waterhoogtes eindigt de watersprong zelf na het einde van de bodembescherming.

De onzekerheid op de bepaling van het einde van de watersprong in het schaalmodel is relatief groot enerzijds omwille van het feit dat de corresponderend waterhoogte visueel ingesteld werd. Anderzijds wordt het einde van een watersprong visueel bepaald bij een continu wijzigend stromingsbeeld, wat ook een onnauwkeurigheid introduceert. In het rapport van Bergenmeersen werd een bandbreedte van +/- 1 Δz beschouwd op het in het schaalmodel bepaalde einde van de watersprong.

8.3 Samenvatting

Om te voorkomen dat onmiddellijk na de betonnen constructie een erosiekuil ontstaat wordt nog een overgangszone met bodembescherming voorzien. Tijdens de proeven werd een snelheidsmeting uitgevoerd aan het begin en einde van de voorgestelde zone met bodembescherming. De eerste snelheidsmeting diende voor het dimensioneren van de erosiebescherming, de tweede snelheidsmeting betrof een controle of de snelheid op het einde van de bodembescherming al voldoende is afgenomen. Het begin en einde van de zone met bodembescherming werd bepaald door het studiebureau dat het constructief ontwerp uitvoerde en is verschillend per constructie. Hierdoor is het niet mogelijk om een éénduidige vergelijking te maken tussen de verschillende geometrieën.

Voor de geometrieën waarbij een vrije watersprong optreedt wordt bij een stijgende waterhoogte in de polder een plotse afname van de bodemnabije stroomsnelheid vastgesteld wanneer het stromingspatroon overgaat van superkritische stroming naar subkritische stroming. Voor een vrije watersprong werd getracht het einde van de sprong visueel te bepalen. De gevolgde bepaling op basis van de uniformiteit van het stromingspatroon aan het oppervlak komt goed overeen met de in literatuur gegeven formules voor het einde van de watersprong. Uit een vergelijking van de optredende spronglengtes met het einde van de zone met betonnen woelkom volgt dat voor de in- en uitwateringsconstructies van Bergenmeersen, Vlassenbroek en De Bunt bij hogere rivierpeilen het einde van de watersprong boven de zone met bodembescherming valt.

Uit de proeven met een lokaal verdiepte woelkom volgt dat de bodemnabije snelheid boven de bodembescherming verlaagt ten opzichte van een vrije watersprong. De lokaal verdiepte woelkom is merkelijk korter dan de spronglengte waardoor aan het einde van de woelkom de stroming nog geconcentreerd was aan de bodem. De einddrempel zorgt ervoor dat deze geconcentreerde bodemnabije stroming bij het verlaten van de woelkom in de hoogte spreidt. Dit zorgt voor een aanzienlijke verlaging van de bodemnabije snelheden boven de bodembescherming.

Vervolgens werd het geforceerd dissiperen van de energie in de bodemnabije stroming na de val onderzocht. Hiervoor worden zowel stootbalken als stootblokken beschouwd. Uit de proeven volgt dat een stootbalk zorgt voor een lagere tot gelijke bodemnabije snelheid en voor een verlaging van de corresponderende waterhoogte. De beproefde stootblokken werden gedimensioneerd volgens de formules voor een USBR type III woelkom. Zowel uit de proeven voor Bergenmeersen als voor Vlassenbroek volgt dat deze zorgen voor een reductie van de corresponderende waterhoogte en een verlaging van de bodemnabije snelheid. In vergelijking met een stootbalk zorgen de stootblokken voor een betere en stabielere dissipatie van de stroming na de val.

Bij een toename van de afwaartse waterhoogte werd in hoofdstuk 6 opgemerkt dat de lengte van de vallende straal toeneemt. De afstand tussen de locatie waar de vallende straal de bodem raakt en de locatie waar de snelheidsmetingen uitgevoerd wordt neemt hierdoor af. Voor de in- en uitwateringsconstructie voor Vlassenbroek waar op x= 3.6 Δz de snelheid opgemeten wordt zorgt dit voor een verhoging van de bodemnabije snelheid bij een toename van de afwaartse waterhoogte. Voor de geometrieën met een lokaal verdiepte woelkom, een stootbalk en stootblokken bestaat het risico dat bij een stijgende waterhoogte de helling van de vallende straal afneemt en deze afwaarts de einddrempel, stootbalk of stootblokken de bodem raakt. De energiedissipatie werkt hierbij niet optimaal en de bodemnabije stroomsnelheid neemt toe. Bij een toenemende afwaartse waterhoogte raakt de vallende straal het plafond boven de woelkom. De stroming wordt hierbij terug naar de bodem van de woelkom gericht. Voor de in- en uitwateringsconstructie van Dijlemonding is een geometrie beproefd waarbij de verticale muur die het niveauverschil tussen het plafond boven de inwateringskoker en het plafond boven de woelkom overbrugt vervangen is door een muur onder een hoek van 45°. Uit de resultaten volgt dat bij hoge afwaartse waterpeilen de energiedissipatie merkelijk minder is bij een overgangsmuur onder een hoek 45°. Het plafond boven de woelkom is een belangrijk element voor het controleren van de stroming bij hogere afwaartse waterhoogtes. Zeker bij toepassen van een lokaal verdiepte woelkom, een stootbalk of stootblokken is dit plafond noodzakelijk om te voorkomen dat de vallende straal over de woelkom of dissipatiestructuur heen gaat. Bij toekomstige ontwerpen kan getracht worden deze muur zo te dimensioneren dat bij rivierpeilen buiten de gewenste range voor GGG werking de stroming ingesnoerd wordt.

9 Overige onderzoeksvragen

Achtereenvolgens worden in dit hoofdstuk de volgende gestelde onderzoeksvragen of tijdens de schaalmodelproeven waargenomen verschijnselen behandeld:

- Het ontstaan van wervels met een luchtkern (paragraaf 9.1),
- Trillen van de terugslagklep (paragraaf 9.2),
- Het ontsnappen van een luchtbel in de uitwateringskoker (paragraaf 9.3),
- De maximale waarde van de bodemnabije snelheid in de woelkom (paragraaf 9.4),
- Het type watersprong (paragraaf 9.5).

9.1 Ontstaan van wervels met een luchtkern

Wanneer het plafond van de woelkom verdronken raakt kunnen wervels met een luchtkern ontstaan. Bij een verder toenemende waterhoogte in de polder verdwijnen deze wervels vanwege de toenemende waterdekking en het afnemend debiet. De representativiteit van het schaalmodel op vlak van wervels met een luchtkern wordt nagegaan in paragraaf 9.1.1. De schaalmodelresultaten worden besproken in paragraaf 9.1.2.

9.1.1 Representativiteit schaalmodel op vlak van wervels

De gebruikte Froude-verschaling houdt geen rekening met de oppervlaktespanning en de viscositeit van het water. Om met behulp van een Froude-schaalmodel toch het gedrag van wervels te bestuderen geeft Knauss (1987) volgende criteria waaraan voldaan moet zijn:

1. Anwar & Amphlett (1980) en Anwar et al. (1978) stellen dat Froude-schaalmodellen directe bruikbare resultaten geven indien voldaan wordt aan:

$$\frac{\mathsf{Q}}{\upsilon \cdot d} > 3 \cdot 10^4$$

Met:

•	Q	Debiet in het schaalmodel	[m³/s,mod]
•	υ	Kinematische viscositeit	[m²/s]
•	d	Onderdompeldiepte	[m,mod]

2. Jain et al. (1978) (gecontroleerd door Bhargava (1981)) stelt dat Froude-schaalmodellen direct bruikbare resultaten geven indien voldaan wordt aan:

$$\frac{g^{\frac{1}{2}} \cdot d^{\frac{3}{2}}}{v} > 5 \cdot 10^4$$

Met:

•	g	Valversnelling (= 9.81 m/s ²)	[m/s²]
•	d	Diameter of kenmerkende hoogte van de inlaat	[m,mod]
•	υ	Kinematische viscositeit	[m²/s]

Na het uitwerken van bovenstaande vergelijking werd geconcludeerd dat zowel voor de in- en uitwateringsconstructies voor Bergenmeersen, Dijlemonding als Vlassenbroek de in het schaalmodel voorkomende wervels geïnterpreteerd mogen worden zonder het toepassen van een bijkomende correctie voor de schaaleffecten.

Hiernaast dient opgemerkt te worden dat bij het simuleren van wervels grote aandacht besteed moet worden aan het correct instellen van het aanstromingspatroon. Een kleine stromingsverstoring kan al een grote invloed hebben op het al dan niet ontstaan van wervels. Aangezien het hier een 2DV model zonder tussenwanden betreft is het aanstromingspatroon uniformer dan te verwachten valt in natuur. In de natuur doet zich namelijk loslaten en samenvoegen van de stroming ter hoogte van de tussenwanden voor.

9.1.2 Schaalmodelresultaten

Bij een waterhoogte in de polder boven het plafondpeil van de woelkom zullen zich niet onmiddellijk wervels met een luchtkern voordoen. De verschillende stromingstypes bij een stijgende waterhoogte in de polder worden in Figuur 60 voorgesteld voor Vlassenbroek.

Figuur 60 – Voorkomende stromingsverschijnselen bij een waterhoogte in de polder hoger dan plafondpeil woelkom Beschrijving Vlassenbroek Type opwaartse punt 1 plafond uitlaat niet verdronken kern vallende straal botst niet tegen muur 2 na val geen wervels met luchtkern kern vallende straal botst tegen muur na 3 val wervels met luchtkern kern vallende straal botst tegen muur na 4 val geen wervels met luchtkern

Vlassenbroek G6 - schotbalkhoogte 0.00 m

De combinatie van op- en afwaartse peilen waarbij wervels met een luchtkern worden waargenomen, wordt voor de in- en uitwateringsconstructies voor Bergenmeersen, Dijlemonding en Vlassenbroek gegeven in Figuur 61. Het rivierpeil wordt in deze grafieken dimensieloos voorgesteld door het rivierpeil ten opzichte van het inwateringsplateau te delen door de valhoogte. Bij het verdronken raken van de constructie zal het debiet afnemen. Om deze reden wordt, in tegenstelling tot de rest van dit rapport, het rivierpeil niet uitgedrukt aan de hand van de kritische waterhoogte.



boven: Bergenmeersen / midden Dijlemonding / onder Vlassenbroek G6

Merk in Figuur 61 op:

 Wervels met luchtkern ontstaan wanneer het peil in de polder hoger is dan een bepaalde hoogte boven het plafondpeil van de woelkom. Bij Vlassenbroek G6 en Dijlemonding is dit bij een waterhoogte in de polder hoger dan ca. 1.1 Δz, bij Bergenmeersen bij een waterhoogte in de polder hoger dan ca. 1.5 Δz. Bij hoge waterhoogtes in de polder verdwijnen wervels met een luchtkern omwille van de toenemende waterdekking en het afnemende debiet.

Uit de figuren wordt voor een gegeven rivierpeil een bandbreedte van ca. 0.2 Δz afgeleid voor de waterhoogtes in de polder waarbij wervels met een luchtkern ontstaan.

• Voor de drie beproefde constructies komen wervels met een luchtkern enkel voor tijdens GOG-werking van het gebied.

Voor Dijlemonding G3 heeft WL aan de afdeling Expertise Beton en Staal (EBS) de vraag gesteld of het enkele keren per jaar optreden van wervelvorming met een luchtkern gevaarlijk is voor de duurzaamheid van de betonnen constructie, en in het bijzonder voor de hoek tussen de muur na de inwateringskoker en het plafond van de woelkom. Na het bekijken van de opnames van het stromingspatroon adviseerde EBS dat:

- Dijlemonding G3 behouden kan blijven.
- De vereiste betonkwaliteit veiligheidshalve best opgetrokken wordt van C30/37-EE3 naar C35/45-EE4. Hierdoor wordt de betondekking voor plaatvormige elementen ter plaatste gestort nominaal 60 mm (minimaal 50 mm).

9.2 Trillen van de terugslagklep

Door het vallende water en de hierop volgende watersprong kunnen drukschommelingen ontstaan in de uitwateringskoker. Om na te gaan of deze drukschommelingen aanleiding geven tot trillingen van de terugslagklep werd het gewicht (per m breedte) en de ophanging van de terugslagklep verschaald, zie Figuur 62. Tijdens de proeven is voor geen enkele geometrie en opgelegde randvoorwaarde (visueel) opgemerkt dat de terugslagklep onderhevig was aan trillingen.





9.3 Ontsnappen van een luchtbel in de uitwateringskoker

Indien de uitwateringskoker niet belucht wordt zal – bij een stijgende waterhoogte in de polder – de aanwezige lucht onder druk komen te staan. Tijdens de proeven werd steeds opgemerkt dat de lucht in de uitwateringskoker in pakketjes onder de vallende waterstraal werd meegevoerd, zie Figuur 63. Bij geen enkele uitgevoerde proef werd opgemerkt dat een luchtpakket doorheen de vallende straal breekt.

Figuur 63 – Ontsnappen van lucht in de uitwateringskoker



9.4 Maximale waarde voor de bodemnabije snelheid in woelkom

In het schaalmodel is de bodemnabije stroomsnelheid opgemeten met behulp van elektromagnetische stroomsnelheidsmeters. Met behulp van deze stroomsnelheidsmeters kan een maximale stroomsnelheid van 2.5 m/s (modeleenheid) opgemeten worden. Boven de betonnen vloer in de woelkom komen stroomsnelheden voor die hoger zijn dan deze 2.5 m/s en bijgevolg niet op te meten zijn. Om die reden wordt getracht om de stroomsnelheid boven de betonnen vloer van de woelkom te begroten aan de hand van de formules van Rand (1955) en Chanson (2002) voor de waterhoogte na de val en de formule van Chanson (2002) voor de dikte van de vallende straal.

Indien het debiet (per eenheidsbreedte) gedeeld wordt door de op deze wijze bekomen hoogte na val of dikte van de vallende straal wordt een hoogtegemiddelde snelheid bekomen. Voor de berekening van de bodemnabije snelheid in de woelkom wordt verondersteld dat zich op de locatie waar de vallende straal de bodem raakt een uniform stromingsprofiel voordoet. In de veronderstelling van een uniforme stromingspatroon is de bodemnabije snelheid gelijk aan de aan de hand van bovenstaande formuleringen berekende hoogtegemiddelde snelheid.

De variatie van de op deze wijze berekende bodemnabije snelheid in functie van het rivierpeil bij inwatering wordt in Figuur 64 grafisch voorgesteld voor de in- en uitwateringsconstructies voor Bergenmeersen (laagste valhoogte) en De Bunt (hoogste valhoogte). De grafische voorstellingen voor de tussenliggende valhoogtes (Dijlemonding en Vlassenbroek) zullen tussen de twee in Figuur 64 gegeven curves gelegen zijn.



Figuur 64 – Bodemnabije snelheid na val in functie van rivierpeil

Uit Figuur 64 volgt dat boven de betonnen vloer in de woelkom maximale (hoogtegemiddelde) stroomsnelheden worden berekend

- tot 8.0 m/s voor Bergenmeersen,
- tot 10.0 m/s voor De Bunt.

Met betrekking tot de maximaal toegelaten stroomsnelheden voor beton kan het volgende vermeld worden:

- Bij het ontwerp van de nieuwe Post-Panamax sluizen voor het Panamakanaal werd de sectiegemiddelde stroomsnelheid in de omloopriolen door de opdrachtgever beperkt tot 7 m/s. Later werd deze waarde opgetrokken tot 8 m/s.
- Bij het ontwerp van regenwaterrioleringen in Vlaanderen wordt een maximale waarde van de sectiegemiddelde stroomsnelheid van 6 m/s beschouwd (Berlamont, 2004).
- Beton kan bij een gepaste samenstelling, verdichting en afwerkingsgraad van het oppervlak een nog veel hogere snelheid aan dan de hoger vermelde waarden suggereren. De vermelde waarden hebben trouwens betrekking op riolen, waar de maximaal toegelaten sectiegemiddelde stroomsnelheid bewust laag gehouden wordt, omdat bij het hydraulisch ontwerp een aantal hydraulische verschijnselen verwaarloosd worden.

9.5 Type watersprong

Het voorkomende type watersprong is afhankelijk van het Froudegetal voor sprong. In Bradley & Peterka, (1957) worden de in Figuur 65 beschreven sprongtypes gegeven in functie van het Froudegetal voor sprong. Bij deze types wordt volgende beschrijving gegeven.

- Bij een Froudegetal voor sprong tussen 1.7 en 2.5 treden weinig problemen op, het wateroppervlak is vrij rustig, de snelheidsverdeling is vrij uniform en het energieverlies is beperkt.
- Voor structuren met een laag verval ligt het Froudegetal voor sprong veelal tussen 2.5 en 4.5. Het bij deze Frougetallen horende sprongtype is nadelig omdat een oscillerende patroon optreed waarbij de jet zich afwisselend aan de bodem en het oppervlak bevindt. De hierbij opgewerkte golven kunnen schade veroorzaken aan oevers.

- Een sprong horende bij een Froudegetal voor sprong tussen 4.5 en 9.0 geeft een stabiel stromingspatroon en een goede dissipatie. Deze range wordt beschouwd als de preferentiële conditie.
- Bij hogere Froudegetallen voor sprong treed een effectieve maar ruwe sprong op. Door de ruwheid van de sprong kunnen golven opgewerkt worden.



(Bradley & Peterka, 1957)

Het Froudegetal voor sprong wordt berekend met volgende formule:

$$Fr_1 = \frac{v_1}{\sqrt{g \cdot Y_1}}$$

Met:

- ${\sf Fr}_1$ [-] Froudegetal vòòr sprong Hoogtegemiddelde snelheid vòòr sprong bepaald volgens [m/s] **V**1 $v_1 = \frac{q}{Y_1}$ Waterhoogte vòòr sprong bepaald volgens Rand (1955) Y_1 [m] $\frac{\mathrm{Y}_{1}}{\mathrm{\Delta}_{z}} = 0.54 \cdot \left(\frac{d_{c}}{\mathrm{\Delta}_{z}}\right)^{1.275}$ Kritische waterhoogte (d_c = $\sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$) d_{c} [m] Valhoogte [m] Δ_z Debiet per eenheidsbreedte (zie hoofdstuk 4) $[m^2/s]$ q
- g Valversnelling (= 9.81 m/s²)

 $[m/s^2]$

In Figuur 66 wordt voor Bergenmeersen (laagste valhoogte) en De Bunt (hoogste valhoogte), een overzicht gegeven van de variatie van de in het schaalmodel voorkomende Froudegetallen voor sprong in functie van het rivierpeil. Voor tussenliggende valhoogtes, zoals bij Dijlemonding en Vlassenbroek, zal het Froudegetal voor sprong tussen de twee curves in de figuur gelegen zijn.



Merk in Figuur 66 op:

- Het Froudegetal voor sprong neemt af bij een toename van de inwateringshoogte.
- Bij rivierhoogtes tot 1 à 2 m ten opzichte van de vloer inwateringskoker komen Froudegetallen voor sprong voor in de range 4.5 9.0. De optredende watersprongen zijn hierbij van het meest gewenste type.
- Bij hogere rivierpeilen ligt het Froudegetal voor sprong in de range 2.5 4.5. De optredende watersprongen zijn van het overgangstype. Bij Bergenmeersen doet zich dit al voor bij een gemiddeld tij en bij De Bunt bij een gemiddeld springtij. Dit wil zeggen dat de dissipatie minder efficiënt gebeurt. Het ontstaan van golven na de sprong zal voornamelijk een probleem vormen op een kanaal of een rivier en minder of niet bij een GOG/GGG waar verwacht wordt dat de golven uitgedempt worden.

9.6 Conclusie

Wanneer het plafond van de woelkom verdronken raakt kunnen wervels met een luchtkern optreden. Deze situatie komt slechts voor bij een beperkte combinatie van rivier- en waterhoogtes in de polder en wordt hierom niet hinderlijk geacht voor de constructie. Voor de duurzaamheid werd door EBS voor Dijlemonding evenwel geadviseerd om de hoek van de verticale muur na de inwateringskoker met het plafond boven de woelkom uit te voeren in een iets hogere betonkwaliteit (C35/45-EE4 in plaats van C30/37-EE3).

Tijdens de proeven werd op geen enkel moment vastgesteld dat de terugslagklep van de inwatering onderhevig was aan trillingen.

Bij een (snel) stijgende waterhoogte in de polder en een niet beluchte vallende straal komt de uitwateringskoker onder druk te staan. Bij een proef met een snel stijgende waterhoogte in de polder werd vastgesteld dat deze druk steeds afgebouwd wordt door middel van luchtbellen welke meegezogen worden onder de vallende straal.

De hoogste bodemnabije snelheden boven de betonnen vloer van de woelkom zullen bij het neerkomen van de vallende straal voorkomen. De hier optredende snelheden waren te hoog voor de beschikbare meetapparatuur en zijn hierom berekend. De maximale bodemnabije snelheid bedraagt bij Bergenmeersen 8 m/s en bij De Bunt 10 m/s.

Uit een analyse van het Froudegetal vòòr sprong volgt dat de optredende watersprong bij Bergenmeersen tot een gemiddeld tij en bij Vlassenbroek tot een springtij van het optimale (lees veel energieverlies) type is. Bij hogere rivierpeilen is de optredende watersprong minder effectief en ontstaat een golvende watersprong.

10 Conclusies en aanbevelingen

In het kader van het geactualiseerde Sigmaplan worden in opdracht van De Vlaamse Waterweg nv - Afdeling Regio Centraal (DVW) Gecontroleerde OverstromingsGebieden (GOG's) langsheen de Schelde en haar getijderivieren gebouwd. Een aantal van deze gebieden zal ingericht worden als Gereduceerd GetijdeGebied (GGG). De in- en uitwatering van de recent gebouwde en ontworpen gebieden gebeurd via een gecombineerde in- en uitwateringsconstructie. Deze constructie bestaat aan rivierzijde uit een inwateringskoker bovenop een uitwateringskoker en aan polderzijde uit een woelkom. Per GOG/GGG is door DVW een studiebureau aangesteld voor het ontwerp en de inrichting van het gebied en de bijhorende gecombineerde in- en uitwateringsconstructie. Op basis van een aantal vooropgestelde richtlijnen hebben deze studiebureaus een voorontwerp gemaakt voor de gecombineerde in- en uitwateringsconstructie. Daarnaast werd door DVW aan het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) gevraagd fysisch modelonderzoek uit te voeren met als doel meer inzicht te krijgen in de specifieke werking van de geplande gecombineerde in- en uitwateringsconstructies.

Voor het beproeven van de gecombineerde in- en uitwateringsconstructies heeft het WL in 2011 een fysisch schaalmodel ontworpen en gebouwd waarmee het mogelijk is om de hydraulische performantie van de ontwerpen van de verschillende GOG/GGG gebieden af te toetsen. Doordat bij inwatering van het GOG/GGG gebied het energieverschil tussen rivier en polder veel groter is dan bij uitwatering worden de proeven beperkt tot inwatering. Met dit schaalmodel zijn de in- en uitwateringsconstructies van het GOG/GGG Bergenmeersen, van de GOG/GGG's Zennegat en Grote Vijver aan de Dijlemonding, van het GOG/GGG Vlassenbroek en van het GOG/GGG De Bunt getoetst. Voor deze beproefde constructies werd een groot aantal schaalmodelproeven uitgevoerd.

Het doel van deze proeven was om na te gaan of bij de voorkomende combinaties van rivier- en polderpeilen steeds voldoende energiedissipatie optreedt in de woelkom. Bij een te laag peil in de polder zal ten gevolge van de val superkritische stroming ontstaan in de woelkom die pas aan polderzijde van de constructie door middel van een watersprong omgezet wordt naar subkritische stroming. Hierbij treden te hoge stroomsnelheden op boven de bodembescherming en boven de bodem aan polderzijde van de constructie. De minimum waterhoogte in de polder waarbij een sprong ontstaat, de zogenaamde corresponderende waterhoogte in de polder, werd voor elke geometrie bepaald in functie van het rivierpeil. Bij hogere polderpeilen is de energiedissipatie lager dan bij het corresponderend polderpeil. Ook bestaat hier het risico dat de stroming vanuit de inwateringskoker rechtstreeks de bodembescherming raakt. Terwijl deze mogelijks bij lagere peilen van de bodem weggeleid werd door middel van een einddrempel of geforceerd gedissipeerd werd door middel van stootblokken. Hierom werd steeds zowel een range aan rivierpeilen als een range aan polderpeilen onderzocht.

Dit rapport bundelt de opgedane inzichten uit dit schaalmodelonderzoek.

Algemeen kan uit het uitgevoerde schaalmodelonderzoek het volgende besloten worden met betrekking tot het ontwerp van een gecombineerde in- en uitwateringsconstructie:

Om een watersprong te laten ontstaan in de woelkom is een minimum peil in de polder nodig, het zogenaamd corresponderend polderpeil. Hoe hoger het rivierpeil hoe hoger dit minimum polderpeil dient te zijn. Dit sluit goed aan bij het concept van een GOG/GGG. Bij een stijgend rivierpeil treedt een toename van het polderpeil op door de vulling van het gebied. De hydraulische randvoorwaarden, het polderpeil in functie van het rivierpeil, dienen te volgen uit numerieke modellering van de vulling en lediging van het gebied, zowel voor dagdagelijkse als voor extreme condities. In rapporten waarin het resultaat van deze numerieke modellering beschreven wordt, wordt veelal het maximum polderpeil bij een bepaald hoogwater gegeven. Bemerk dat de gebieden na het optreden van het hoogwater verder vullen waardoor op het tijdstip van hoogwater het peil in de polder nog niet maximaal zal zijn. De hydraulische randvoorwaarden dienen hierom te volgen uit een analyse van de tijdreeksen waarbij het minimum polderpeil in functie van het rivierpeil uitgezet wordt. Om deze reden moet ook opgelet worden met grote aanpassingen aan de

inwateringscondities, het plaatsen van hoge schotbalken of het afsluiten van één of meerdere inwateringskokers, omdat deze zorgen voor een mindere vulling van het GOG/GGG.

- Het bodempeil van de woelkom kan nauwkeurig bepaald worden door middel van de formule van Rand of Chanson voor de benodigde waterhoogte na een vallende straal. Hierbij dient nagegaan te worden of bij een gegeven bodempeil van de woelkom voor de range van optredende rivierpeilen het bijhorende minimum polderpeil steeds hoger is dan het berekende corresponderend polderpeil, i.e. het minimum peil in de polder waarbij een sprong ontstaat. Indien dit niet het geval is dient het bodempeil van de woelkom aangepast te worden.
- Een lokaal diepere woelkom is een goede optie om de benodigde corresponderend waterhoogte te verlagen zonder globale verdieping van de zone na de constructie. Een bijkomende voordeel van een lokaal diepere woelkom is de einddrempel die ervoor zorgt dat de resterende bodemnabije stroming op het einde van de woelkom weggericht wordt van het begin van de bodembescherming.
- De vallende straal kan geforceerd gedissipeerd worden door middel van een stootbalk of stootblokken. Stootblokken geven een beter resultaat omdat deze de vallende straal openbreken terwijl de stootbalk de kern van de jet omhoog leidt. Een woelkom met stootblokken kan met goed resultaat ontworpen worden volgens de ontwerprichtlijnen van een USBR type III woelkom. Het plaatsen van een stootbalk of stootblokken resulteert in lagere bodemnabije stroomsnelheden bij corresponderend polderpeil. Wanneer de vallende straal bij hogere polderpeilen over de stootbalk of stootblokken heengaat worden gelijkaardige snelheden opgemeten als bij de configuratie zonder stootbalk of stootblokken. Bemerk dat bij de implementatie van een stootbalk of stootblokken ook rekening gehouden dient te worden met de mogelijk nadelige invloed op vismigratie naar het gebied via de inwateringskoker.
- Bij de hogere rivierpeilen valt het einde van de watersprong boven de zone met bodembescherming. De betonnen vloerplaat is hierbij noodzakelijk voor het eerste deel na de val waar zeer hoge bodemnabije snelheden optreden. Tijdens de proeven werden op het begin en einde van de zone met bodembescherming snelheidsmetingen uitgevoerd waardoor geen info gegeven kan worden over de minimale benodigde lengte van deze betonnen vloerplaat. Het einde van een vrije watersprong kan op een goede manier benaderd worden door middel van formules uit de literatuur.
- Door het versnellen van het water boven de vloerplaat van de inwateringskoker raakt het plafond boven de inwateringskoker enkel bij een hoge schotbalkopbouw vlak voor de inlaatopening verdronken. Dit maakt dat het debiet bepaald kan worden door middel van een overlaatformule.
- Bij stijgend polderpeil gaat het gedrag van een vallende straal over van een superkritische stroming via een vrije watersprong en een verdronken watersprong naar een oppervlaktejet. Hierbij is de locatie waar de vallende straal de bodem raakt telkens verder verwijderd van de val en dus dichter nabij het einde van de betonnen vloerplaat de bodem. Bij een ontwerp met een lokaal verdiepte woelkom, een stootbalk of stootblokken bestaat zo het risico dat de vallende straal hier overheen gaat wat kan leiden tot een plotse toename in snelheid. Voor de meeste beproefde cases kwam dit niet voor doordat de vallende straal op dit moment tegen de verticale muur botst die de overgang maakt tussen het plafond boven de inwateringskoker en het plafond boven de woelkom. Dit plafond is een essentieel hydraulisch element bij hogere rivierpielen. Voor toekomstige ontworpen kan dit plafond eventueel zo gedimensioneerd worden dat deze buiten de gewenste rivierpeilen voor GOG/GGG werking zorgt voor insnoering van de stroming.
- Bij het niet beluchten van de vallende straal zal onder de vallende straal een onderdruk ontstaan. De literatuur adviseert om een vallende straal steeds te beluchten. Tijdens de proeven zijn geen nadelige effecten vastgesteld van het niet beluchten van de vallende straal.
- Een toekomstig ontwerp voor een gecombineerde in- en uitwateringsconstructie kan uitgevoerd worden op basis van de hierboven gegeven aanbevelingen. Ook kan hierbij een reeds beproefd ontwerp verschaald worden naar de betreffende valhoogte.

11 Referenties

Antea Group. (2011a). Durme R.O. Te Hamme GGG/GOG De Bunt Kunstwerken 1/14 In- en uitwatering N Deel 1/4 C4 9159-A22. pp.1

Antea Group. (2011b). Durme R.O. Te Hamme GGG/GOG De Bunt Kunstwerken 2/14 In- en uitwatering N Deel 2/4 C4 9159-A23. pp.1

Antea Group. (2011c). Durme R.O. Te Hamme GGG/GOG De Bunt Kunstwerken 3/14 In- en uitwatering N Deel 3/4 C4 9159-A24. pp.1

Antea Group. (2011d). Durme R.O. Te Hamme GGG/GOG De Bunt Kunstwerken 4/14 In- en uitwatering N Deel 4/4 C4 9159-A25. pp.1

Arcadis. (2014a). ZEESCHELDE L.O. Inrichtingsstudie en technisch ontwerp GGG Doelpolder Kunstwerk Constructie bovenaanzicht deel 2 Draft dd. 17/12/2014

Arcadis. (2014b). ZEESCHELDE L.O. Inrichtingsstudie en technisch ontwerp GGG Doelpolder Kunstwerk Constructie snedes deel 3 Draft dd. 17/12/2014

Bélanger, J.B. (1828). Essai sur la Solution Numérique de quelques Problèmes Relatifs au Mouvement Permanent des Eaux Courantes.

Betonstructuren, A. (2010). Zeeschelde R.O. Te Dendermonde (Vlassenbroek) Aanleg gecontroleerd overstromingsgebied Vlassenbroek; In- en uitwateringsconstructie GGG algemene aanzichten – details; plan voor stedenbouwkundige vergunningsaanvraag C4 9388-B07. pp.1

Bodhaine, G.L. (1988). MEASUREMENT OF PEAK DISCHARGE AT CULVERTS BY INDIRECT METHODS, *in*: (1988). *Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey*. pp.69

Bradley; Peterka. (1957). The hydraulic design of stilling basins: hydraulic jumps on an horizontal apron (Basin I). *Asce J. Hydraul. Div.* (83)

Chanson, H. (2002). The hydraulics of stepped chutes and spillways. Swets & Zeitlinger: Lisse. ISBN 90-5809-352-2

Chanson, H. (2007). Dynamic similarity and scale effects affecting air bubble entrainment in hydraulic jumps. *6th Int. Conf. Multiph. flow*

Chanson, H.; AOKI, S.; Hoque, A. (2004). Pysical modelling and similitude of air bubble entrainment at vertical circular plunging jets. *Chem. Eng. Sci.* 59(4): 747–754

Coen, L.; D'Haeseleer, E.; Peeters, P.; Mostaert, F. (2011). Studie ten behoeve van aanleg van overstromingsgebieden en natuurgebieden in het kader van het Sigmaplan: addendum bij ondersteunende studies: Durmevallei. Versie 2.0. *WL Rapporten*, 713_15. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

Coen, L.; D'Haeseleer, E.; Pereira, F.; Peeters, P.; Mostaert, F. (2008). Studie ten behoeve van aanleg van overstromingsgebieden en natuurgebieden in het kader van het Sigmaplan - Ondersteunende studies: cluster Kalkense meersen. *WL Rapporten,* 713_15. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

Coen, L.; D'Haeseleer, E.; Verelst, K.; Pereira, F.; Peeters, P.; Mostaert, F. (2009). Studie ten behoeve van aanleg van overstromingsgebieden en natuurgebieden in het kader van het Sigmaplan - Ondersteunende studies: cluster Vlassenbroek. *WL Rapporten*, 713_15. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. 83 pp.

Coen, L.; Peeters, P.; Mostaert, F. (2010a). Studies ten behoeve van aanleg van overstromingsgebieden en natuurgebieden in het kader van het Sigmaplan: addendum bij ondersteunende studies: cluster Kalkense meersen. *WL Rapporten,* 713_15. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. 9 pp.

Coen, L.; Pereira, F.; Peeters, P.; Mostaert, F. (2010b). Studie ten behoeve van aanleg van overstromingsgebieden en natuurgebieden in het kader van het Sigmaplan: addendum bij ondersteunende studies: Dijlemonding. *WL Rapporten*, 713_15. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

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

Haskoning, R.; W&Z, A.Z. (2011a). Beneden Dijle L.O. te Mechelen Bouw van het gecontroleerde overstromingsgebied Grote vijver deel 1 Gecombineerd in- en uitlaatwerk Plan voor stedenbouwkundige vergunningsaanvraag. C4 4427-B09.

Haskoning, R.; W&Z, A.Z. (2011b). Beneden Dijle L.O. te Mechelen Bouw van het gecontroleerde overstromingsgebied Zennegat Gecombineerd in-en uitlaatwerk Plan voor stedenbouwkundige vergunningsaanvraag. C4 4428-B04.

Knauss, J. (Ed.). (1987). Swirling flow problems at intakes. *Hydraulic Structures Design Manual: Hydraulic Design Considerations*, 1. Taylor & Francis: New York. ISBN 90-6191-643-7

Novak, P.; Guinot, V.; Jeffrey, A.; Reeve, D.E. (2010). Hydraulic modelling - an introduction: principles, methods and applications. Spon: Oxon. ISBN 978-0-419-25010-7

Peeters, P.; Claeys, S.; De Schutter, J.; Mostaert, F. (2009). Water- en sedimentbalans proefproject Lippenbroek: periode 2006-2008, 613_09. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

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

Rand, W. (1955). Flow geometry at straight drop spillways. Proc. Am. Soc. Civ. Eng. 81: 1–13

Technum; W&Z, A.Z. (2010a). Zeeschelde R.O. Dijkwerken te Wichelen. Aanpassing bestaand gecontroleerd overstromingsgebied Bergenmeersen. In- en uitwateringsconstructie Bergenmeersen 1/4. Bovenaanzicht A-A & Doorsnede F-F. Plan voor stedenbouwkundige vergunningsaanvraag. C49379-B20. pp.1

Technum; W&Z, A.Z. (2010b). Zeeschelde R.O. Dijkwerken te Wichelen. Aanpassing bestaand gecontroleerd overstromingsgebied Bergenmeersen. In- en uitwateringsconstructie Bergenmeersen 2/4 Doorsnede B-B & Doorsnede E-E. Plan voor stedenbouwkundige vergunningsaanvraag. C49379-B21.

Technum; W&Z, A.Z. (2010c). Zeeschelde R.O. Dijkwerken te Wichelen. Aanpassing bestaand gecontroleerd overstromingsgebied Bergenmeersen. In- en uitwateringsconstructie Bergenmeersen 3/4 Doorsnede C-C & Aanzicht kant GGG & kant Schelde. Plan voor stedenbouwkundige vergunningsaanvraag

Technum; W&Z, A.Z. (2010d). Zeeschelde R.O. Dijkwerken te Wichelen. Aanpassing bestaand gecontroleerd overstromingsgebied Bergenmeersen. In- en uitwateringsconstructie Bergenmeersen 4/4 Doorsnede D-D, H-H & Doorsnede I-I. Plan voor stedenbouwkundige vergunningsaanvraag. C49379-B23.

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. (2014a). Sigmaplan – Gereduceerde Getijdegebieden – Schaalmodelproeven gecombineerde in- en uitwateringsconstructies: deelrapport 5. De Bunt. *WL Rapporten*, 00_075. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

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

Vercruysse, J.B.; Verelst, K.; Taverniers, E.; Peeters, P.; Mostaert, F. (2012). Sigmaplan - gereduceerde getijdegebieden - schaalmodelproeven gecombineerde in- en uitwateringsconstructies: deelrapport 1. Bergenmeersen. *WL Rapporten*, 00_075. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

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

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

Vercruysse, J.B.; Visser, K.P.; Peeters, P.; Mostaert, F. (2016). Gereduceerd getijdegebied Doelpolder: schaalmodelproeven gecombineerde in- en uitwateringsconstructie. Versie 4.0. *WL Rapporten*, 15_073_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. IX, 37 + 19 p. bijlagen pp.

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

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

Bijlage: beproefde geometrieën

Onderhavige bijlage bevat voor de in dit rapport behandelde geometrieën een schets met de karakteristieke afmetingen. De getoonde afmetingen in deze bijlage worden dimensieloos weergegeven ten opzichte van de valhoogte, zoals beschreven in paragraaf 4.7. De valhoogte bedraagt hierdoor steeds 1 Δz en wordt hierom niet bemaat. Voor de afmetingen in situ wordt verwezen naar de betreffende rapporten. Bemerk dat voor Vlassenbroek en De Bunt in de betreffende rapporten nog een bijkomende geometrie wordt gegeven. Deze werden echter enkel theoretisch behandeld.

De uit schanskorven bestaande bodembescherming wordt in onderstaande figuren weergegeven door middel van een grijze stippellijn.





∎ t—∎	
 <u></u>	



Sigmaplan – Gereduceerde Getijdegebieden – Schaalmodelproeven gecombineerde in- en uitwateringsconstructies - Deelrapport 7 – Inzichten uit schaalmodelproeven



Figuur 71 – De Bunt - geometrie



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