



Vlaanderen
is wetenschap



23_025_1
WL rapporten

Sigmaplan Gecontroleerd overstromingsgebied Vlassenbroek

Ontwerp dissipatiegracht overloopdijk

DEPARTEMENT
MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN

waterbouwkundiglaboratorium.be

Sigmaplan – Gecontroleerd overstromingsgebied Vlassenbroek

Ontwerp dissipatiegracht overloofdijk

Vercruysse, J.; Coen, L.; Verelst, K.

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 2024
D/2024/3241/8

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Vercruysse, J.; Coen, L.; Verelst, K. (2024). Sigmaplan – Gecontroleerd overstromingsgebied Vlassenbroek: Ontwerp dissipatiegracht overloopdijk. Versie 4.0. WL Rapporten, 23_025_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen





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

Documentidentificatie

Opdrachtgever:	De Vlaamse Waterweg nv Afdeling Regio Centraal	Ref.:	WL2024R23_025_1
Trefwoorden (3-5):	Sigmaplan, FCA, energy dissipation structure, overflow levee		
Kennisdomeinen:	Dijken > erosiebescherming Stuwen > Energiedissipatiestructuur > Literatuur- en desktoponderzoek Stuwen > Energiedissipatiestructuur > Schaalmodelproeven		
Tekst (p.):	22	Bijlagen (p.):	/
Vertrouwelijk:	<input checked="" type="checkbox"/> Nee	<input checked="" type="checkbox"/> Online beschikbaar	

Auteur(s):	Vercruysse, J.; Coen, L.
------------	--------------------------

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Verelst, K.	Getekend door:Kristof Verelst (Signature) Getekend op:2024-01-23 16:52:58 +01:0 Reden:Ik keur dit document goed   Vlaamse overheid
Projectleider:	Vercruysse, J.	Getekend door:Jeroen Vercruysse (Signa) Getekend op:2024-01-22 13:03:24 +01:0 Reden:Ik keur dit document goed   Vlaamse overheid

Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Bellafkih, K.	Getekend door:Abdelkarim Bellafkih (Sign) Getekend op:2024-01-22 13:32:38 +01:0 Reden:Ik keur dit document goed   Vlaamse overheid
-----------------	---------------	--

Abstract

In kader van het Sigmaplan worden Gecontroleerde Overstromingsgebieden (GOG) aangelegd langs de Schelde en haar getijgebonden zijrivieren, vaak gecombineerd met gecontroleerd gereduceerd getij (GGG). Het vullen van deze gebieden gebeurt door middel van een overlooppdijk. Bij overloop versnelt het water op het talud naar superkritische stroming. Bij lage waterpeilen in het GOG kan hierdoor een watersprong ontstaan in de polder, bij hoge waterpeilen in het GOG ontstaat deze watersprong op het dijktaalud. Om te vermijden dat de watersprong in de polder ontstaat en zich daar overmatige erosie voordoet, wordt aan de teen van de overlooppdijk een dissipatiegracht voorzien.

Voor de overlooppdijk van het GOG gebied Vlassenbroek vraagt De Vlaamse Waterweg afdeling Regio Centraal aan de afdeling Waterbouwkundig Laboratorium (WL) ondersteuning bij het ontwerp van de dissipatiegracht. Op het ogenblik van het opstellen van dit advies liep op WL een studie voor de verificatie en optimalisatie van de toegepaste methodologie voor het ontwerp van een dissipatiegracht aan de teen van een overlooppdijk. Deze studie was echter nog niet volledig voltooid bij opstellen van dit advies. Voor het bepalen van de grachtdiepte was al een aangepaste ontwerpmethodologie beschikbaar, voor het bepalen van de grachtbreedte was er nog geen ontwerpmethodologie beschikbaar.

Met MIKE11 werd een hydraulische modellering van deze gebieden uitgevoerd en werden tijdreeksen gegenereerd van het waterpeil in de Schelde en het waterpeil in het GOG Vlassenbroek. Gebruik makend van deze rivier- en polderpeilen, van de helling en de ingeschatte ruwheid van het talud van de overlooppdijk werd voor elk tijdstip van overloop bepaald of een dissipatiegracht nodig is en indien positief wat de benodigde grachtdiepte is. Omdat het maaiveldpeil ter hoogte van de teen van de overlooppdijk varieert werd deze berekening uitgevoerd voor een range aan maaiveldpeilen.

Uit de dimensionering van de dissipatiegrachten volgt dat voor de noordwestelijke overlooppdijk van Vlassenbroek geen dissipatiegracht voorzien hoeft te worden omdat de watersprong hier steeds op het talud aanvangt. Voor de noordoostelijke en zuidwestelijke overlooppdijk van Vlassenbroek volstaat het voorgestelde typeprofiel van de dissipatiegracht met een diepte 0.50 m en een breedte 3.50 m. Voor de compartimenteringsdijk volstaat de typegeometrie niet volgens de dimensionering. Vervolgens werd voor de compartimenteringsdijk een rechtstreekse vergelijking uitgevoerd met beschikbare resultaten van schaalmodelproeven. Hieruit volgde dat een grachtdiepte 0.50 m bij een grachtbreedte 3.50 m volstaat. Wel wordt aanbevolen om de GOSA erosiebescherming nog over een breedte van ca. 1.50 m op de berm door te trekken.

Inhoudstafel

Abstract	III
Inhoudstafel.....	IV
Lijst van de tabellen.....	V
Lijst van de figuren	VI
1 Inleiding	1
2 Gegevens	3
2.1 Inrichting gebied.....	3
2.2 Relatie rivierpeil ten opzichte van polderpeil en kruinpeil overlooppdijk	5
2.3 Talud polderzijde	8
3 Methodologie dimensionering energiedissipatiegracht overlooppdijk	9
4 Dimensionering energiedissipatiegracht.....	14
4.1 Bodempeil en grachtbreedte.....	14
4.2 Toetsing dissipatiegracht compartimenteringsdijk op basis van resultaten schaalmodelonderzoek.	16
4.3 Toetsing dissipatiegracht VLB Noord Oost op basis van schaalmodelonderzoek.....	19
5 Conclusies	21
6 Referenties	22

Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Kruinpeil, teenpeil en lengte compartimentering en overlooppdijken	3
Tabel 2 – Maximaal bereikte Schelde peilen [m TAW].....	6
Tabel 3 – VLB I Noord Oost – bepaling grachtdiepte en breedte.....	14
Tabel 4 – VLB II – bepaling grachtdiepte en grachtbreedte	15
Tabel 5 – VLB compartimenteringsdijk– bepaling grachtdiepte en grachtbreedte	15

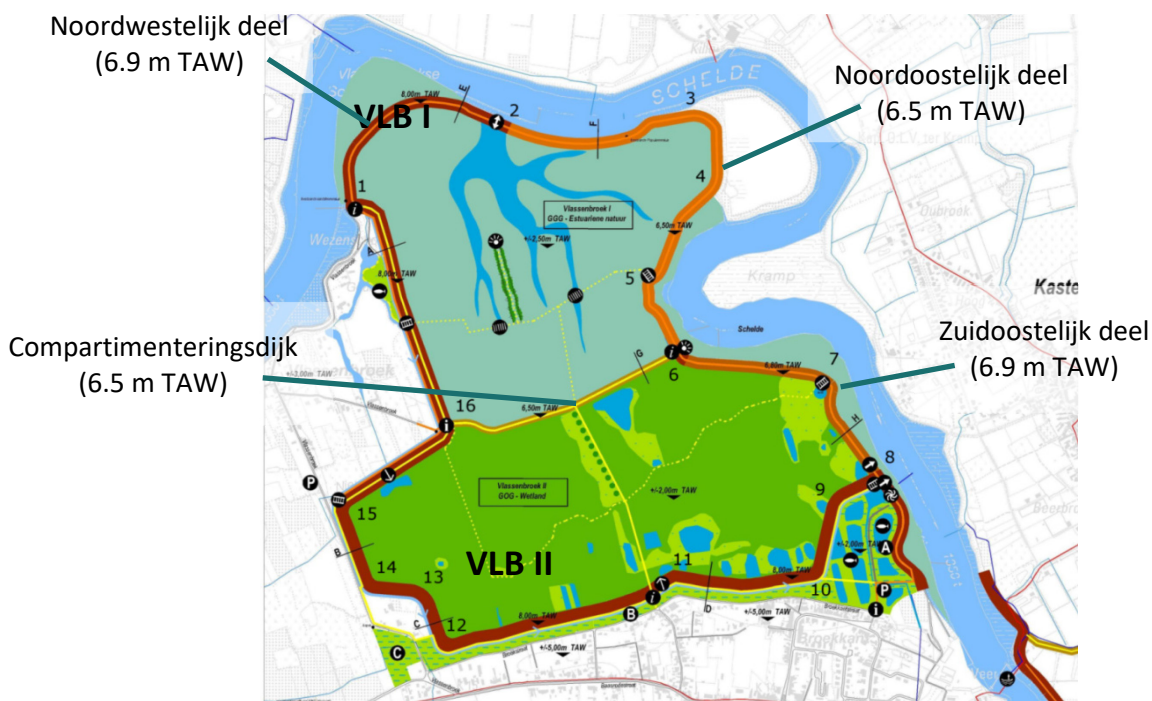
Lijst van de figuren

Figuur 1 – GOG Gebieden Vlassenbroek	1
Figuur 2 – GOG Gebieden Vlassenbroek	4
Figuur 3 – Plot DTM Vlassenbroek DHMV II	5
Figuur 4 – Resultaat numerieke modellering vulling Vlassenbroek	6
Figuur 5 – Maatgevende combinatie van Scheldepeil t.o.v. polderpeil voor de 4 beschouwde overlooppdijken	7
Figuur 6 – Illustratie waterpeilen in Schelde, VLB I en VLB II tijdens een maatgevend event	7
Figuur 7 – Dissipatiegracht compartimenteringsdijk Vlassenbroek	8
Figuur 8 – Typeschets berekening lengte L en diepte d van de dissipatiegracht (Berlamont, 1980).	11
Figuur 9 – Vergelijking corresponderende waterhoogte berekend aan de hand van ontwerpformules (streeplijnen) met corresponderende waterhoogte uit schaalmodelonderzoek (symbolen)	12
Figuur 12 – Beproefde geometrie G7 op schaalmodel project 18_049 (na toepassen schaalfactor 1.5).....	16
Figuur 13 – Vergelijking stromingscondities bij een overloophoogte 0.61 m.....	17
Figuur 14 – Geometrie G7 overloophoogte 0.61 m en laag afwaarts peil stromingspatroon bij grachtbreedte 2.0 m (boven), 3.0 m (midden) en 4.0 m (onder).....	18
Figuur 15 – Lengte GOSA bekleding op verhoogde berm	18
Figuur 10 – Vergelijking stromingscondities teen overlooppdijk VLBI oostelijk bij een overloophoogte 0.35 m	19
Figuur 11 – VLB9 Noordoostelijke overlooppdijk vergelijking proeven	20

1 Inleiding

De Vlaamse Waterweg nv - Afdeling Regio Centraal (dVW; contactpersoon: Stefaan Nollet) vraagt advies aan het Waterbouwkundig Laboratorium met betrekking tot het hydraulisch ontwerp van de dissipatiegrachten voor het gecontroleerde overstromingsgebied (GOG) Vlassenbroek. In 2012 werd reeds een ontwerp uitgevoerd van de dijkbekledingen en de dissipatiegrachten (Verelst *et al.*, 2012). Sinds dit ontwerp werd een onderzoeksproject uitgevoerd naar de optimalisatie van de ontwerpmethodologie van dergelijke dissipatiegrachten (Vercruyssen & Verelst, 2023a). Binnen dit advies wordt nagegaan of een optimalisatie van de dissipatiegrachten voorgesteld kan worden op basis van de inzichten opgedaan vanuit dit onderzoeksproject.

Het GOG gebied Vlassenbroek behoort tot de cluster Vlassenbroek op de Schelde afwaarts Dendermonde. Een overzichtsfiguur van het inrichtingsontwerp van het gebied wordt gegeven in Figuur 1. Bemerkt hierin dat Vlassenbroek bestaat uit twee delen, een Noordelijk deel VLB I en een zuidelijk deel VLB II. Deze delen worden gescheiden door een compartimenteringsdijk. VLB I heeft ook een Gecontroleerd Gereduceerd Getijde (GGG) functie. Ter hoogte van nr. 2 in Figuur 1 bevindt zich de in- en uitwateringsconstructie van VLB I, ter hoogte van nr. 8 bevindt zich de uitwateringsconstructie van VLB II. De overlooppdijk van VLB I heeft twee verschillende hoogtes. Het deel van de overlooppdijk gelegen aan Oostelijke zijde van de in- en uitwateringsconstructie, tussen punt 1 en 2 op Figuur 1, ligt op 6.9 m TAW, het deel van de overlooppdijk gelegen aan de Westelijke zijde van de in- en uitwateringsconstructie, tussen punt 2 en 6 op Figuur 1, ligt op 6.5 m TAW. Vulling van VLB II kan zowel vanuit de Schelde via de overlooppdijk met kruinpeil op 6.9 m TAW als vanuit VLB I via de compartimenteringsdijk met kruinpeil op 6.5 m TAW.



Bron: (Verelst *et al.*, 2012)

Figuur 1 – GOG Gebieden Vlassenbroek

Om erosie van het talud te voorkomen worden de overlooppdijken aan GOG zijde bekleed met Open Steen Asphalt. Bij lage waterpeilen in het GOG zal de superkritische stroming op het talud aan polderzijde door middel van een watersprong omgezet worden naar subkritische stroming. Om te vermijden dat de watersprong in de polder ontstaat en zich daar overmatige erosie voordoet die uiteindelijk de stabiliteit van de dijk in gevaar kan brengen, wordt aan de teen van de overlooppdijk een dissipatiegracht voorzien.

Onderhavig advies is als volgt opgebouwd:

- de gegevens worden beschreven in hoofdstuk 2,
- de toegepaste methodiek wordt beschreven in hoofdstuk 3,
- het ontwerp van de dissipatiegracht wordt uitgevoerd in hoofdstuk 4,
- de conclusies worden samengevat in hoofdstuk 5.

2 Gegevens

Voor het ontwerp van de dissipatiegracht zijn volgende gegevens nodig:

- De inrichting van het gebied met de lengte en hoogte van de overloopdijken en het maaiveldpeil aan polderzijde, zie paragraaf 2.1.
- relatie rivierpeil ten opzichte van GOG peil bij maatgevende condities, zie paragraaf 2.2.
- het talud aan GOG zijde en het typeprofiel van de dissipatiegracht, zie paragraaf 2.3.

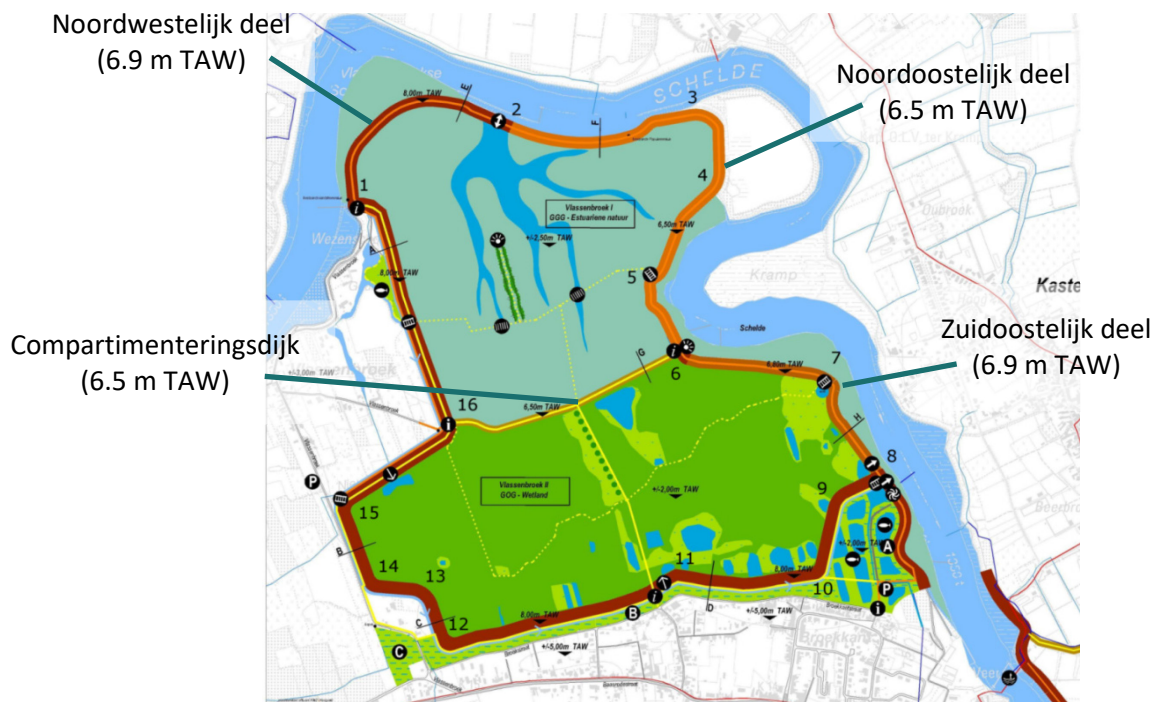
2.1 Inrichting gebied

De lengte en kruinpeil van de overloopdijken en de gewenste grachtdiepte van de dissipatiegracht wordt gegeven in Tabel 1. In Figuur 2 wordt de locatie van deze overloopdijken in het gebied aangeduid.

Tabel 1 – Kruinpeil, teenpeil en lengte compartimentering en overloopdijken

	Kruinpeil	Lengte	Bodempeil dissipatiegracht
VLB I - Noordwestelijk deel	6.90 m TAW	+/- 700 m	1.4 m TAW tot 1.8 m TAW
VLB I - Noordoostelijk deel	6.50 m TAW	+/- 1300 m	2.3 tot 3.0 m TAW
VLB II - Zuidoostelijk deel	6.90 m TAW	+/- 650 m	1.4 m TAW tot 1.8 m TAW
Compartimenteringsdijk	6.50 m TAW	+/- 700 m	1.75 m TAW

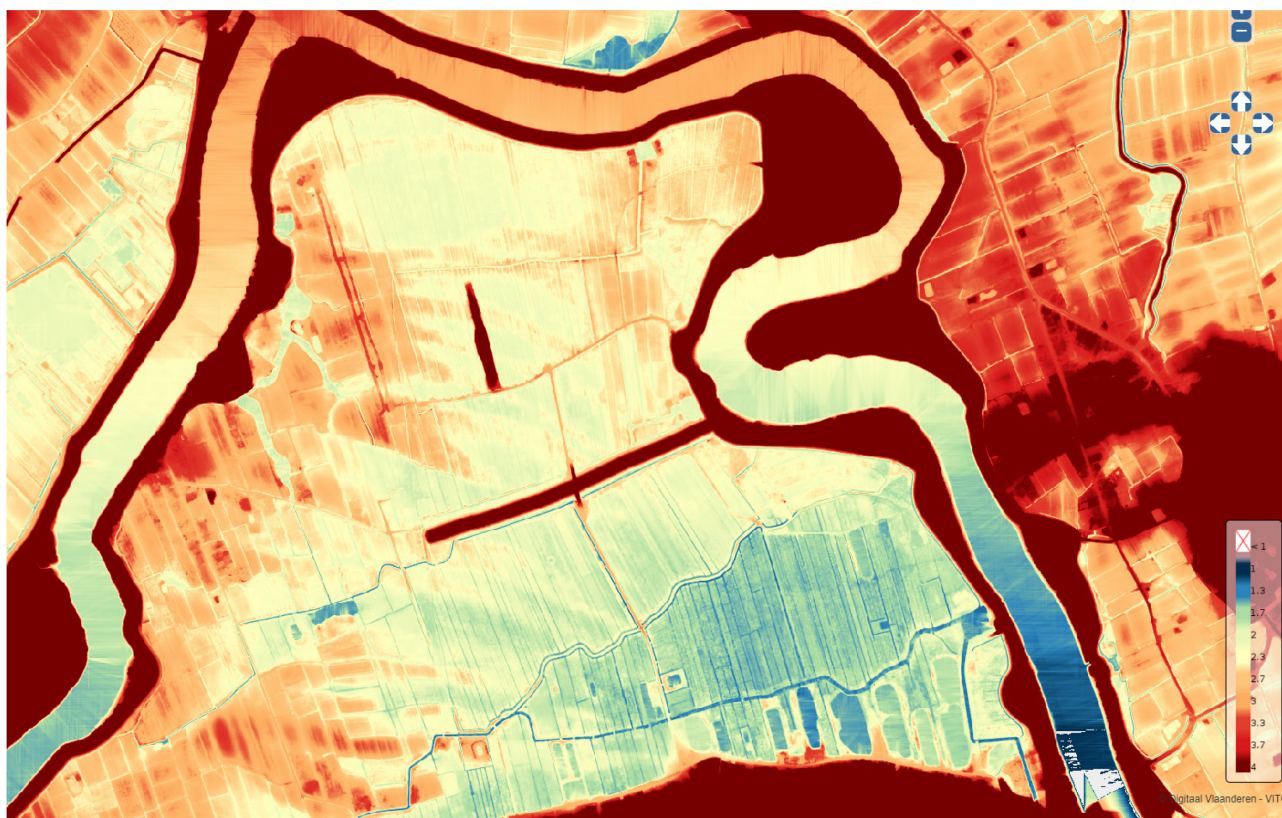
mail Stefaan Nollet dd. 8/2/2023



Bron: (Verelst *et al.*, 2012)

Figuur 2 – GOG Gebieden Vlassenbroek

Het oppervlakprofiel vanuit het Digitaal hoogtemodel Vlaanderen II (DHMVII) met een gridgrootte 1 m wordt gegeven in Figuur 3. Het DHMV II werd in de periode 2013-2015 opgemeten. Bemerkt hierin dat op het moment van de opname de compartimenteringsdijk al aangelegd was, de ringdijk moest nog aangelegd worden. Aan de zijde van VLB II loopt een gracht langsheen de compartimenteringsdijk. Deze gracht werd later nog aangepast.



EODaS Openlidar (vlaanderen.be)

Figuur 3 – Plot DTM Vlassenbroek DHMV II

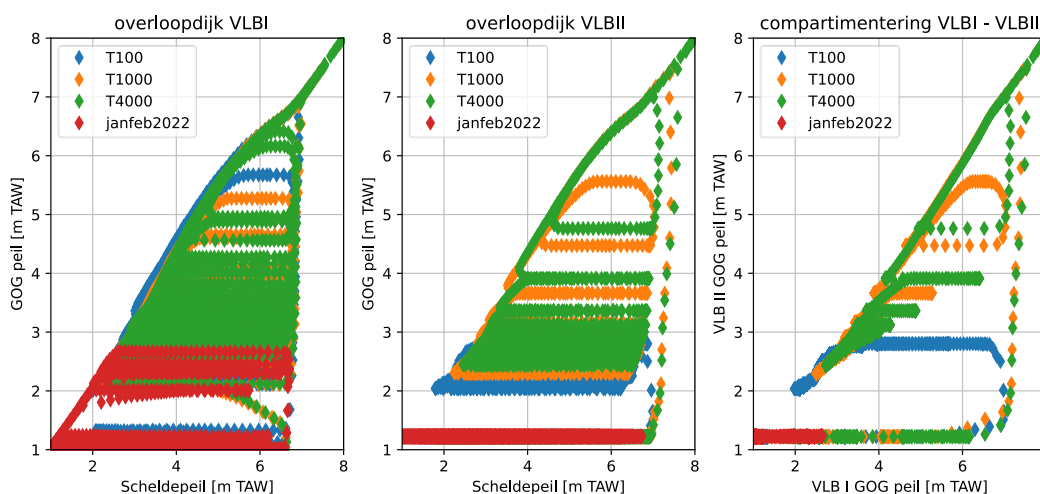
2.2 Relatie rivierpeil ten opzichte van polderpeil en kruinpeil overlooppdijk

Het hydraulisch ontwerp van het GOG gebied Vlassenbroek werd door WL uitgevoerd aan de hand van MIKE11 modellering (Coen *et al.*, 2009). In kader van dit advies werden nieuwe simulaties uitgevoerd. Hierbij werd vertrokken van het basismodel (22023_Zeeschelde_MWeA). Dit basismodel is gebaseerd op het 1D-numeriek referentiemodel van de Zeeschelde dat gebruikt werd voor de hindcast van de stormen van januari en februari 2022 (Coen & Nossent, 2022), waarin de Sigmagebieden van het Meest Wenselijk Alternatief (MWeA) geïmplementeerd werden volgens hun meest recente inrichtingsvoorstel. Specifiek voor het gebied Vlassenbroek werden dwarsdoorsneden opnieuw afgeleid uit het DHMV II en werden de actuele ontwerplengtes en kruinpeilen van de overlooppdijk en compartimenteringsdijk opgevraagd en geïmplementeerd.

Voor het ontwerp van de dissipatiegracht is het scenario met gesloten inwateringskokers maatgevend. Er treedt hierbij geen voorvulling van het gebied op. Om deze reden werden in de modellering de inwateringskokers voor de GGG-werking van VLB I gesloten. De gesimuleerde scenario's betreffen drie synthetische events (T100, T1000 en T4000) en één historisch event (28 januari- 26 februari 2022). Het gebruikte model, de aanpassingen en de gesimuleerde scenario's worden beschreven in (Coen, 2023). De maximaal bereikte peilen op de Schelde te Antwerpen, VLBI en VLB II worden gegeven in Tabel 2. De relatie tussen het peil aan afwaartse zijde van de overlooppdijk ten opzichte van het peil aan opwaartse zijde van de overlooppdijk wordt gegeven in Figuur 4 voor de overlooppdijk van VLB I, de overlooppdijk van VLB II en de compartimenteringsdijk.

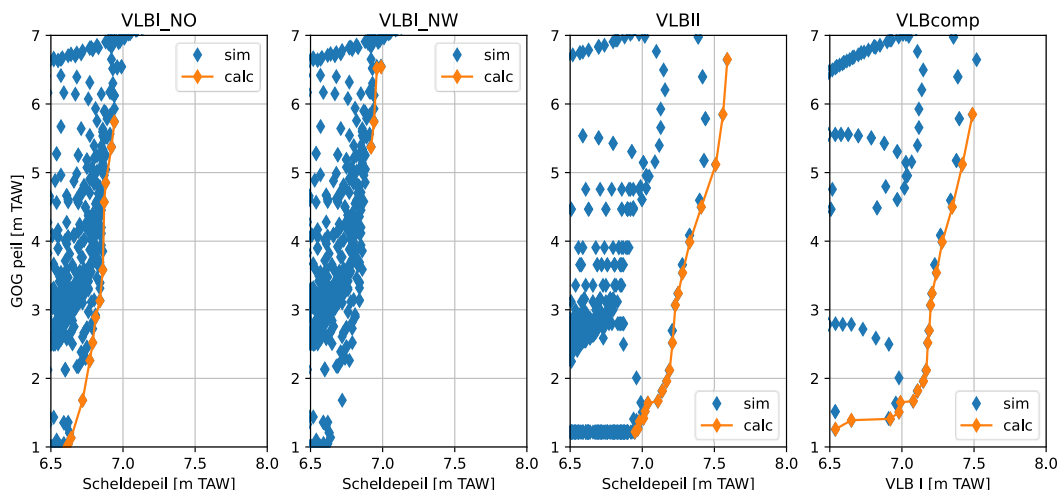
Tabel 2 – Maximaal bereikte Schelde peilen [m TAW]

	Jan-feb 20222	T100	T1000	T4000
Antwerpen	6.81	7.83	8.26	8.53
VLBI	6.71	7.01	7.48	7.95
VLBII	6.74	7.00	7.46	7.95



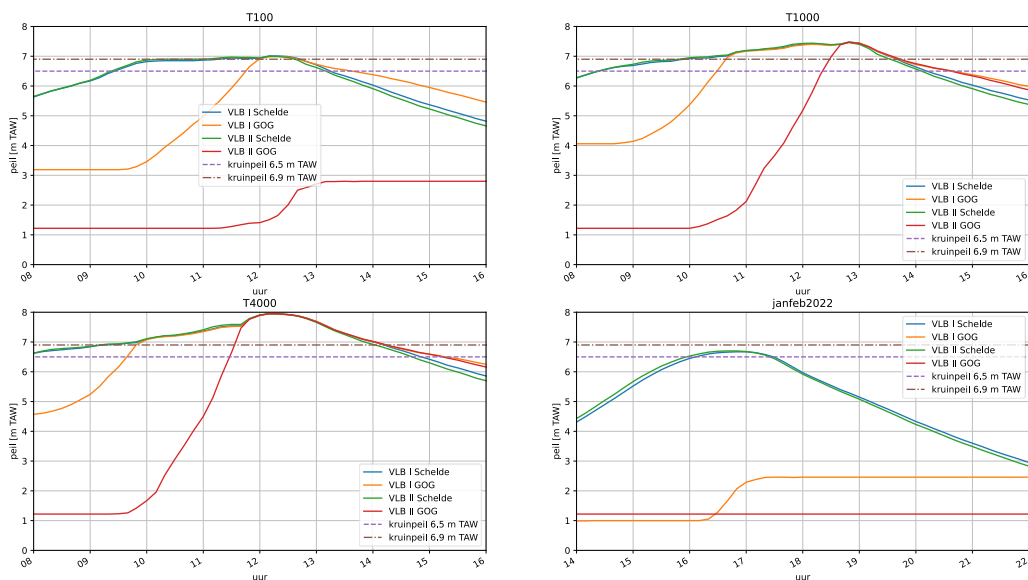
Figuur 4 – Resultaat numerieke modellering vulling Vlassenbroek

Voor de dimensionering van de dissipatiegracht worden de resultaten van de 4 model runs samengevoegd en wordt voor de vier beschouwde overlooppdijken het minimale GOG peil in functie van het Scheldepeil, of het peil in VLB I in het geval van de compartimenteringsdijk, uitgezet voor de momenten waarbij overloop optreedt en het water in het gebied nog onder het kruinpeil van de overlooppdijk ligt. Dit betreft de maatgevende condities voor het ontwerp van de dissipatiegracht. Deze waarden worden in oranje aangeduid in Figuur 5.



Figuur 5 – Maatgevende combinatie van Scheldepeil t.o.v. polderpeil voor de 4 beschouwde overlooppdijken

Voor VLBI en VLB II wordt in Figuur 6 een voorstelling gegeven van de waterpeilen aan Scheldezijde en aan GOG-zijde tijdens het maatgevend overloopevent . Bemerkt dat het peil van de compartimenteringsdijk 0.40 m lager ligt dan het peil van de zuidoostelijke overlooppdijk (6.5 m TAW t.o.v. 6.9 m TAW). Voor de synthetische stormen met een terugkeerperiode 1000 en 4000 jaar benadert het waterpeil in VLB I kort na het in werking treden van de zuidoostelijke overlooppdijk reeds het waterpeil in de Schelde. Het GOG VLB I wordt volledig gevuld waardoor het maximum waterpeil in de Schelde minder afgetopt zal worden. Hierdoor zal ook GOG VLB II aangesproken worden. Door het lager kruinpeil van de compartimenteringsdijk is de overloophoogte over de compartimenteringsdijk op dat moment hoger dan de overloophoogte over de zuidoostelijke overlooppdijk.

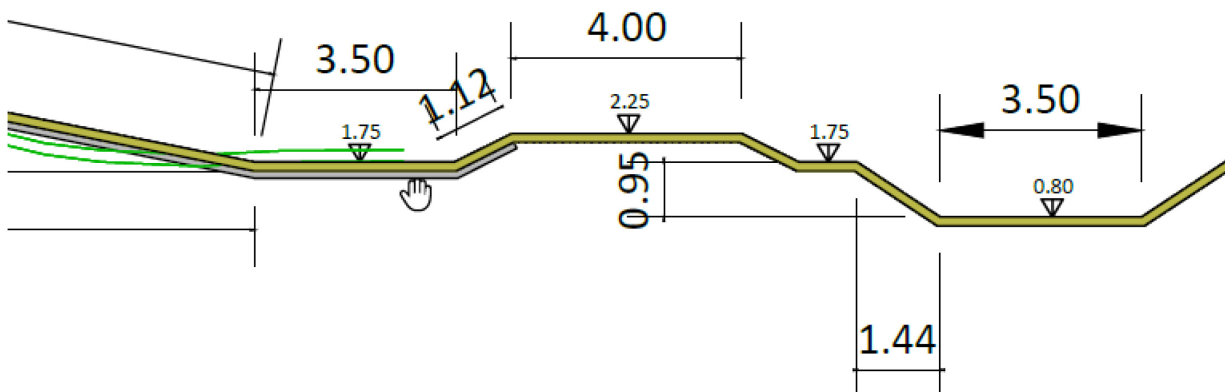


Figuur 6 – Illustratie waterpeilen in Schelde, VLB I en VLB II tijdens een maatgevend event

2.3 Talud polderzijde

De helling van het talud aan polderzijde bedraagt 20/4. Deze helling stemt overeen met het typeprofiel voor een overloopdijk. Voor de ruwheid van (G)OSA wordt door WL een Manning-coëfficiënt $0.017 \text{ s.m}^{-1/3}$ gehanteerd. Bemerk dat de ruwheid van een met gras bekleedde dijk hoger zal zijn. Het is niet duidelijk of bij het maatgevend scenario voor de dimensionering van de dissipatiegracht deze grasbekleding geërodeerd is. Het beschouwen van de Manning-coëfficiënt voor (G)OSA is conservatief omwille van de lagere ruwheid en dus hogere snelheid op het talud.

Bij schrijven van dit advies (voorjaar 2023) werd het westelijk deel van de dissipatiegracht van de compartimenteringsdijk al uitgevoerd. Het typeprofiel van de dissipatiegracht van de compartimenteringsdijk wordt gegeven in Figuur 7. De dissipatiegracht heeft een breedte 3.50 m en een diepte 0.50 m. De breedte van de dissipatiegracht werd onder meer gekozen in functie van de aanleg. Een graafmachine zal de (G)OSA bekleding aan de onderzijde van het talud en de gracht afwaarts rijdend vanuit de gracht afwerken. Bemerk dat de (G)OSA bekleding eindigt op de opstaande rand van de gracht. Rietaangroei in de dissipatiegracht kan de (G)OSA bekleding beschadigen. Hierom wordt het bodempeil van de dissipatiegracht op hetzelfde peil gebracht als het achterliggend maaiveld. Volgend op de dissipatiegracht volgt een berm met breedte 4.00 m. Deze berm zal dienen als platform voor het uitvoeren van onderhoudswerken. De tweede gracht is alleen aanwezig in VLB II en verzorgt de afwatering van het gebied na een vullings-event.



Figuur 7 – Dissipatiegracht compartimenteringsdijk Vlassenbroek

3 Methodologie dimensionering energiedissipatiegracht overlooppdijk

Onderstaand hoofdstuk werd overgenomen uit (Vercruysse & Verelst, 2022).

Het ontwerp van de dissipatiegracht wordt uitgevoerd aan de hand van de methodologie beschreven in THV Sigma Dijle (2008). De ontwerpmethodologie is gebaseerd op de verhanglijntheorie en formules voor een woelkomontwerp uit de literatuur. Bemerkt dat de specifieke situatie van het typeontwerp waarbij een tussenplateau gehanteerd wordt tussen talud en gracht niet overeenkomt met de hydraulische condities uit de literatuurformules. Om die reden heeft WL op vraag van dVW een studie opgestart voor de verificatie en optimalisatie van de ontwerpmethodologie voor een dissipatiegracht aan de teen van een overlooppdijk (Vercruysse & Verelst, 2023a). In kader van deze studie werden proeven uitgevoerd met verschillende types en lengtes van de dissipatiegracht in een schaalmodel. Bij opstellen van dit advies was het proevenprogramma afgerond maar diende de verificatie en optimalisatie van de nieuwe ontwerpmethodologie nog verder uitgewerkt te worden. Op basis van de resultaten uit deze studie werd de bepaling van de benodigde grachtdiepte al geoptimaliseerd. Voor de benodigde breedte van de dissipatiegracht was de verificatie en optimalisatie nog niet voltooid. Hierom zal voor de maatgevende profielen waarbij het typeontwerp niet voldoet ook een rechtstreekse vergelijking uitgevoerd worden met schaalmodelproeven uitgevoerd in kader van WL project 18_049.

Voor de dimensionering van de energiedissipatiegracht aan de teen van de overlooppdijk wordt eerst de verhanglijn op het talud van de overlooppdijk aan GOG -zijde berekend. De berekening van de verhanglijn wordt als volgt uitgevoerd:

1. Aan de hand van de tijdsreeksen van waterstand in de Schelde of de waterstand in VLB I in het geval van de compartimenteringsdijk wordt voor elk beschouwd dwarsprofiel van de overlooppdijk de variatie van het overloopdebiet in functie van de tijd berekend aan de hand van volgende formulering uit IMDC & WL (2010):

$$q = 1.36 (h - h_{kruin})^{1.5}$$

Met:

- q	Overloopdebiet per strekkende meter	[m ³ /s/m]
- h	Waterpeil	[m TAW]
- h _{kruin}	Kruinpeil overlooppdijk	[m TAW]

2. De verhanglijn op het talud aan GOG -zijde betreft een opwaarts bepaalde B2-verhanglijn (Berlamont, 1980). De berekening van de ogenblikkelijke verhanglijn op het landtalud wordt uitgevoerd door integratie van de vergelijking van Bresse (voor een brede rechthoekige sectie) voor elke tijdstap van 10 min in de tijdsreeksen van waterstand in de Schelde en in het GOG -gebied met een constante dh = 0.001 m in de verticale richting . Hierbij wordt volgend randvoorwaardeprobleem opgelost:

$$\varphi(h) = \frac{dh}{ds} = \frac{S_0 - n^2 \frac{q^2}{h^{10/3}}}{\sqrt{1 - S_0^2 - \frac{q^2}{g h^3}}}$$

met: s = s₀ en h = h₀

Met:

-	$\varphi(h)$	Vergelijking	[-]
-	S_0	Helling overlooppdijk	[-]
-	n	Ruwheid ($n = 0.017 \text{ s/m}^{-1/3}$)	$[\text{s/m}^{-1/3}]$
-	q	Overloopdebiet per strekkende meter	$[\text{m}^2/\text{s}]$
-	h	Waterdiepte	$[\text{m}]$
-	s	Afstand op het landtalud tot de kruin van de overlooppdijk	$[\text{m}]$
-	g	Valversnelling ($= 9.81 \text{ m/s}^2$)	$[\text{m/s}^2]$
-	s_0	Initiële waarde voor de afstand tot de kruin ($s_0=0$)	$[\text{m}]$
-	h_0	Initiële waarde voor waterdiepte ter plaatse van $s=s_0$	$[\text{m}]$

Als initialisatie voor de oplossing van dit randvoorwaardeprobleem wordt de kritische waterhoogte op de kruin beschouwd. Deze wordt als volgt berekend:

$$h_0 = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$$

Met:

-	h_0	Initiële waarde voor waterdiepte ter plaatse van $s=s_0$	$[\text{m}]$
-	q	Overloopdebiet per strekkende meter	$[\text{m}^2/\text{s}]$
-	g	Valversnelling ($= 9.81 \text{ m/s}^2$)	$[\text{m/s}^2]$

3. De stroomsnelheid op het talud aan GOG -zijde wordt berekend door op elk punt van het talud het debiet over de overlooppdijk te delen door de natte sectie die volgt uit de berekende verhanglijn.

Daarna wordt de dimensionering van de energiedissipatiegracht uitgevoerd. Hiervoor wordt eerst gecontroleerd of zich een watersprong voordoet op het talud van de overlooppdijk of dat deze zich voordoet in het GOG. Na de berekening van de verhanglijn wordt voor elke punt i op het dijktaalud de bijbehorende waterhoogte na sprong berekend aan de hand van de volgende uitdrukking (Bélanger, 1828):

$$h_{HNS,i} = h_i \left[\frac{-1 + \sqrt{1 + 8 Fr_i^2}}{2} \right]$$

Met:

-	$h_{HNS,i}$	Waterhoogte na sprong in punt i van het dijktaalud	$[\text{m}]$
-	h_i	Waterhoogte in punt i van het dijktaalud	$[\text{m}]$
-	Fr_i	Waarde van het Froudegetal in punt i van het dijktaalud	[-]

Voor een brede rechthoekige sectie geldt:

$$Fr_i^2 = \frac{U_i^2}{g h_i} = \frac{q^2}{g h_i^3}$$

-	U_i	Stroomsnelheid in punt i van het dijktaalud	$[\text{m/s}]$
-	g	Valversnelling ($= 9.81 \text{ m/s}^2$)	$[\text{m/s}^2]$
-	q	Debiet in punt i op het dijktaalud	$[\text{m}^2/\text{s}]$

Op basis van het verloop van de waterhoogte na sprong op het dijktaalud en de waterhoogte in het GOG kan daarna bepaald worden of de watersprong zich voordoet op het dijktaalud zelf of in het GOG.

Wanneer de waterhoogte na sprong ter plaatse van de teen van de dijk hoger is dan de waterhoogte in het GOG, doet de watersprong zich voor in het GOG (i.e. afwaarts van de gracht). Voor deze tijdstippen wordt de dimensionering van de energiedissipatiegracht uitgevoerd. In het initieel ontwerp werd hiervoor een formule uit Berlamont (1980) toegepast. Voor het bijgewerkte ontwerp wordt een formule uit Novak *et al.* (2007) toegepast. Bemerk dat beide formules afgeleid zijn voor een geometrie zoals in Figuur 8, waarbij het talud doorloopt tot in de bodem van de gracht.

a. Berlamont (1980)

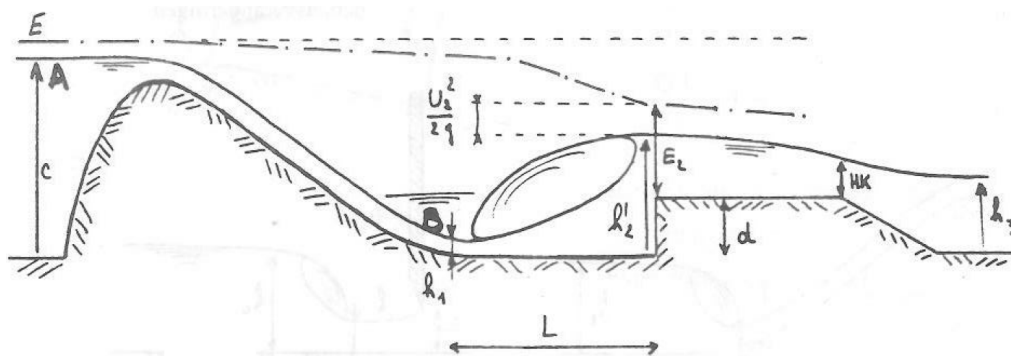
$$d = h_1 \left(-\frac{3}{2} (Fr_1)^{\frac{2}{3}} + \frac{h_2}{h_1} \left(m + \frac{1}{2m^2} \left(\frac{h_1}{h_2} \right)^3 Fr_1^2 \right) \right)$$

b. Novak (2007)

$$d = h'_2 - h_{afw} = mh_2 - h_{afw}$$

Met:

-	d	Diepte gracht / hoogte drempel	[m]
-	h_1	Waterdiepte opwaarts van watersprong	[m]
-	h_2	Waterdiepte afwaarts van de watersprong	[m]
-	Fr_1	Froudegetal opwaarts van watersprong	[-]
-	h_{afw}	Waterhoogte afwaarts ten opzichte van maaiveldpeil	[m]
-	m	Parameter; de waterhoogte na een ontaarde watersprong wordt gegeven door $h'_2 = m h_2$ Berlamont (1980) $m = 1.20$ Novak <i>et al.</i> (2007) $1.10 < m < 1.25$	[-]

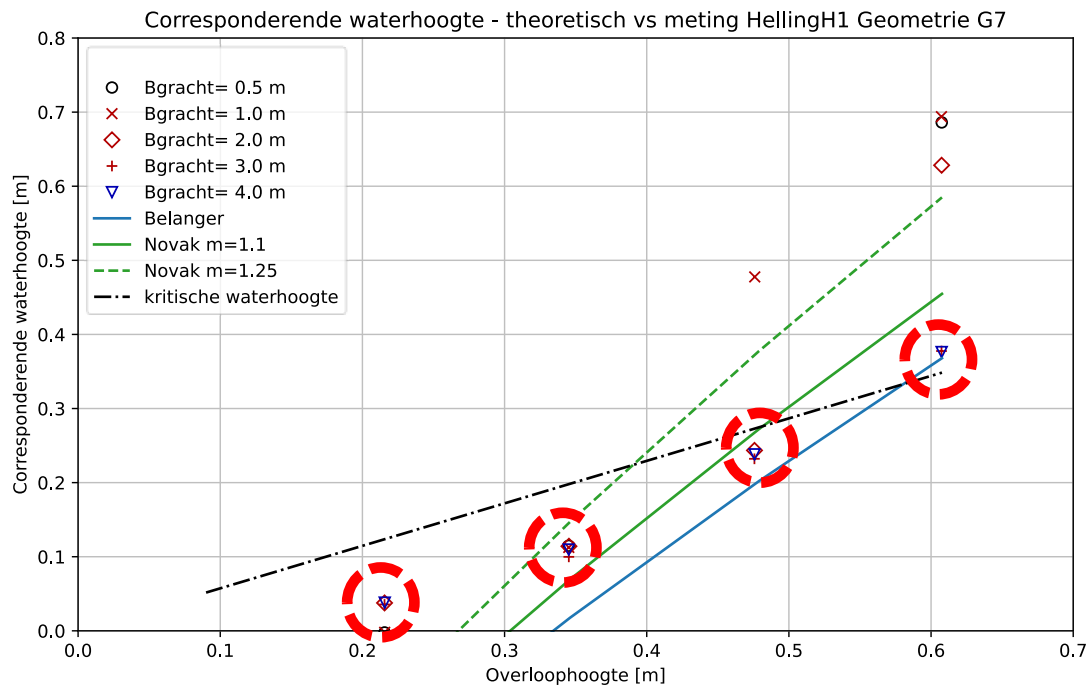


Figuur 8 – Typeschets berekening lengte L en diepte d van de dissipatiegracht (Berlamont, 1980).

In het WL onderzoeksproject voor het optimaliseren van de dissipatiegracht werd door middel van schaalmodelproeven de corresponderende waterhoogte bepaald. De corresponderende waterhoogte betreft de minimum waterhoogte in de polder waarbij voor een gegeven geometrie van de overlooppdijk en gracht en een gegeven overloopdebiëet de watersprong in de gracht ontstaat. Tijdens het onderzoeksproject werden verschillende geometrieën voor de dissipatiegracht beproefd. Geometrie G7 uit het onderzoeksproject komt wat de vorm betreft overeen met het in Figuur 7 gegeven typeprofiel van de dissipatiegracht van de compartimenteringsdijk. De proeven werden op schaal 1:3 uitgevoerd waarbij de grachtdiepte 1.00 m bedroeg en de beproefde grachtbreedtes 1.00 m, 2.00 m, 4.00 m, 6.00 m en 8.00 m.

Uit Verduyven & Verelst (2023) wordt Figuur 9 overgenomen waarbij een verscaling 1.5 wordt toegepast zodat een grachtdiepte 0.50 m en een grachtbreedte tussen 0.50 m en 4.00 m bekomen wordt. Ook wordt de theoretische bepaling van de benodigde corresponderende waterhoogte volgens Belamont (1980) niet verder beschouwd omwille van de mindere overeenkomst met de resultaten van de schaalmodelproeven. De proeven waarbij een sprong in de gracht ontstaat onafhankelijk van het peil in de polder worden in Figuur 9 omtrokken door middel van een cirkel. Het binnen deze cirkels gegeven afwaarts peil betreft het hoogste peil in de polder waarbij er geen invloed is op het stromingspatroon in de gracht. Voor de twee hoogste overloophoogtes is voor een aantal smallere grachtbreedtes wel een peil in de polder nodig. Uit Figuur 9 volgt dat de benodigde corresponderende waterhoogte hierbij hoger is dan volgt uit Novak en Bélanger. Uit een visuele appreciatie van het opgenomen stromingspatroon volgde dat de grachtbreedte in deze gevallen niet volstaat.

Voor onderstaand advies zal in hoofdstuk 4 een eerste inschatting van de grachtdiepte bepaald worden op basis van Belanger (coëfficiënt $m = 1.0$). Voor VLB I noordoostelijke overloophoofd en voor de compartimenteringsdijk zal hiernaast ook een rechtstreekse vergelijking uitgevoerd worden met de schaalmodelresultaten.



Opgesteld op basis van een voorlopige verwerking van resultaten uit WL onderzoeksproject 18_049

Figuur 9 – Vergelijking corresponderende waterhoogte berekend aan de hand van ontwerpformules (streeplijnen) met corresponderende waterhoogte uit schaalmodelonderzoek (symbolen)

De breedte van de gracht wordt berekend door toepassen van de formules van Certussov en Smetana (Berlamont, 1980), Bradley en Peterka (1957) en Novak (2007):

a. Certussov:

$$L = 5.4h_1(Fr_1 - 1)$$

b. Smetana:

$$L = 5(h_2 - h_1) \quad \text{als } Fr_1 > 6$$

$$L = 8(h_2 - h_1) \quad \text{als } Fr_1 \leq 6$$

c. Bradley en Peterka:

$$L = 220 h_1 \tanh\left(\frac{(Fr_1 - 1)}{22}\right)$$

d. Novak

$$L = K \cdot (h_2 - h_1)$$

$$K = 4.5 \text{ tot } 5.5$$

Met:

-	L	Breedte gracht	[m]
-	h_1	Waterdiepte opwaarts van watersprong	[m]
-	h_2	Waterdiepte afwaarts van de watersprong	[m]
-	Fr_1	Froudegetal opwaarts van watersprong	[-]

De formules van Certussov en Smetana (Berlamont, 1980), Bradley en Peterka (1957) werden ook toegepast bij het initiële ontwerp. De formule van Novak is opgesteld geweest voor de specifieke situatie waarbij het talud aansluit op de bodem van de gracht, zie Figuur 8.

4 Dimensionering energiedissipatiegracht

Op basis van de methodologie beschreven in hoofdstuk 3 wordt in paragraaf 4.1 de benodigde grachtdiepte en -breedte bepaald. Bij de compartimenteringsdijk waar het typeontwerp niet voldoet volgens de dimensionering, wordt in paragraaf 4.2 ook een vergelijking uitgevoerd met resultaten van schaalmodelproeven van project 18_049. Voor Vlassenbroek I noordoostelijke overlooppdijk wordt door middel van een vergelijking met schaalmodelresultaten onderzocht of optimalisatie van de grachtdiepte mogelijk is.

4.1 Bodempeil en grachtbreedte

De volgens de in hoofdstuk 3 beschreven methodologie bepaalde grachtdieptes en -breedtes in functie van het peil van de berm volgend op de dissipatiegracht worden gegeven in:

- Tabel 2 VLB I noordoostelijke overlooppdijk,
- Tabel 3 VLB II overlooppdijk,
- Tabel 4 compartimenteringsdijk tussen VLB I en VLB II

Voor VLB I noordwestelijke overlooppdijk volgt uit de dimensionering dat de watersprong steeds op het talud aanvangt. Bij aanvang van overloop via de noordwestelijke overlooppdijk is het gebied al voldoende gevuld via de 0.40 m lager gelegen noordoostelijke overlooppdijk.

Tabel 3 – VLB I Noord Oost – bepaling grachtdiepte en breedte

Peil berm	grachtdiepte			grachtbreedte					
	Overloop hoogte	Gracht diepte	Bodem peil gracht	Overloop hoogte (Novak K=4.5)	Certussov	Smetana	Bradley & Peterka	Novak K=4.5	Novak K=5.5
[m TAW]	[m]	[m]	[m TAW]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
2.7	0.29	0.38	2.32	0.29	1.25	2.6	2.29	1.46	1.79
2.8	0.29	0.38	2.42	0.29	1.25	2.6	2.29	1.46	1.79
2.9	0.31	0.41	2.49	0.29	1.25	2.6	2.29	1.46	1.79
3.0	0.31	0.41	2.59	0.29	1.25	2.6	2.29	1.46	1.79
3.1	0.34	0.42	2.68	0.29	1.25	2.6	2.3	1.46	1.79
3.2	0.34	0.45	2.75	0.29	1.25	2.6	2.3	1.46	1.79
3.3	0.34	0.45	2.85	0.29	1.25	2.6	2.3	1.46	1.79
3.4	0.34	0.45	2.95	0.29	1.25	2.6	2.3	1.46	1.79
3.5	0.34	0.45	3.05	0.29	1.25	2.6	2.3	1.46	1.79

Tabel 4 – VLB II – bepaling grachtdiepte en grachtbreedte

Peil berm	grachtdiepte			grachtbreedte					
	Overloop hoogte	Gracht diepte	Bodem peil gracht	Overloop hoogte (Novak K=4.5)	Certussov	Smetana	Bradley & Peterka	Novak K=4.5	Novak K=5.5
[m TAW]	[m]	[m]	[m TAW]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
1.5	0.11	0.14	1.36	0.21	0.88	1.83	1.62	1.03	1.26
1.6	0.21	0.20	1.40	0.21	0.88	1.83	1.62	1.03	1.26
1.7	0.21	0.27	1.43	0.21	0.88	1.83	1.62	1.03	1.26
1.8	0.24	0.29	1.51	0.21	0.88	1.83	1.62	1.03	1.26
1.9	0.24	0.31	1.59	0.21	0.88	1.83	1.62	1.03	1.26
2.0	0.27	0.35	1.65	0.21	0.88	1.83	1.62	1.03	1.26
2.1	0.29	0.36	1.74	0.21	0.88	1.83	1.62	1.03	1.26
2.2	0.29	0.38	1.82	0.21	0.88	1.83	1.62	1.03	1.26
2.3	0.29	0.38	1.92	0.21	0.88	1.83	1.62	1.03	1.26

Tabel 5 – VLB compartimenteringsdijk– bepaling grachtdiepte en grachtbreedte

Drempel peil	grachtdiepte			grachtbreedte					
	Overloop hoogte	Gracht diepte	Bodem-peil gracht	Overloop hoogte (Novak K=4.5)	Certussov	Smetana	Bradley & Peterka	Novak K=4.5	Nova k K=5.5
[m TAW]	[m]	[m]	[m TAW]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
2.3	0.67	0.94	1.36	0.68	3.13	6.5	5.71	3.66	4.47
2.4	0.67	0.94	1.46	0.68	3.13	6.5	5.71	3.66	4.47
2.5	0.67	0.94	1.56	0.68	3.13	6.5	5.71	3.66	4.47
2.6	0.68	0.96	1.64	0.68	3.14	6.5	5.72	3.66	4.47
2.7	0.69	0.97	1.73	0.68	3.14	6.51	5.72	3.66	4.47
2.8	0.69	0.98	1.82	0.68	3.14	6.51	5.73	3.66	4.48

Het typeontwerp voor de dissipatiegracht van Vlassenbroek heeft een diepte 0.50 m en een breedte 3.5 m, zie Figuur 10.

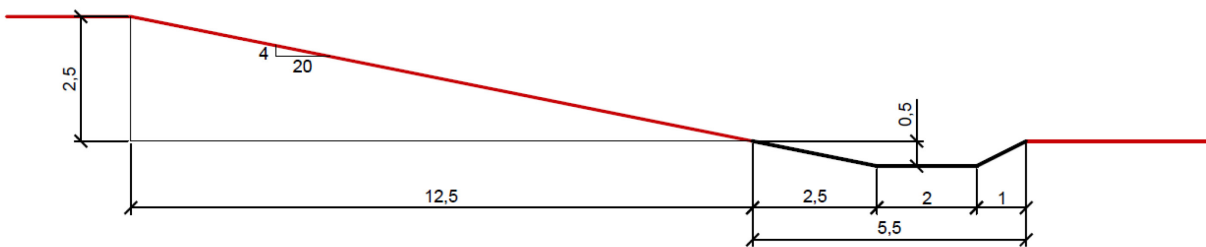
Uit de vergelijking van dit typeontwerp met de resultaten uit de dimensionering volgt:

- VLB I NO: de maximum benodigde grachtdiepte bedraagt 0.45 m en de maximum grachtbreedte bedraagt 2.6 m. Het type ontwerp met een diepte 0.50 m en een breedte 3.50 m voldoet.
- VLB II: de maximum grachtdiepte bedraagt 0.38 m en de maximum grachtbreedte 1.8 m. Het type ontwerp met een diepte 0.50 m en een breedte 3.50 m voldoet.
- VLB Compartimenteringsdijk: de maximum benodigde grachtdiepte uit de dimensionering betreft 0.98 m, de maximum benodigde grachtbreedte ligt tussen 3.1 m en 6.5 m.

Enkel voor de dissipatiegracht van de compartimenteringsdijk voldoet het typeontwerp niet aan de grachtdiepte en grachtbreedte volgend uit de dimensionering.

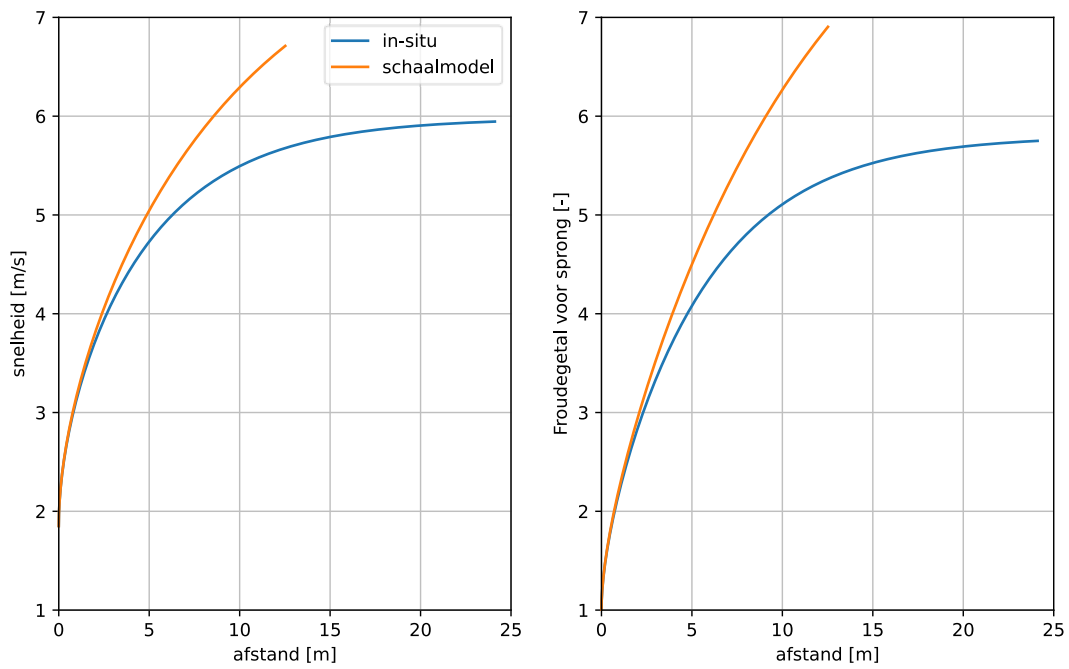
4.2 Toetsing dissipatiegracht compartimenteringsdijk op basis van resultaten schaalmodelonderzoek

Het voorgestelde typeprofiel komt overeen met de tijdens het project 18_049 op schaal beproefde geometrie G7, zie Figuur 10. Namelijk een doorgaand talud tot de bodem van de dissipatiegracht en hieropvolgend een drempel onder hoek 2/1. In schaalmodel werden proeven uitgevoerd met een grachtdiepte 0.33 m en een debiet tot 0.353 m³/s per meter. Bij verscalen met een schaalfactor 1.5 wordt een grachtdiepte 0.50 m bekomen en een overloophoogte 0.61 m, wat beperkt lager is dan de overloophoogte 0.67 m tot 0.69 m die overeenkomt met de maatgevende overloophoogte bij bepaling van de grachtdiepte van de compartimenteringsdijk, zie Tabel 5.



Figuur 10 – Beproefde geometrie G7 op schaalmodel project 18_049 (na toepassen schaalfactor 1.5)

Bij toepassen van een schaalfactor 1.5 bedraagt de dijkhoogte in schaalmodel 2.5 m. Doordat in schaalmodel werd gekozen voor een gladde bodem is de ruwheid lager dan in situ. Uit de schaalmodelproeven werd een Manning coëfficiënt 0.010 s.m^{-1/3} afgeleid. Voor een overloophoofd wordt een Manning coëfficiënt 0.017 s.m^{-1/3} verondersteld. De snelheid en het Froudegetal op het talud wordt voor het schaalmodel, na toepassing van de schaalfactor 1.5, en de overloophoofd in situ vergeleken in Figuur 13. Bemerkt hierin dat niettemin de lagere dijkhoogte in het schaalmodel de snelheid en het Froude getal tijdens de schaalmodelproeven hoger zijn dan verwacht wordt in situ. Voor een gegeven overloophoogte zijn de schaalmodelproeven hierdoor conservatief.



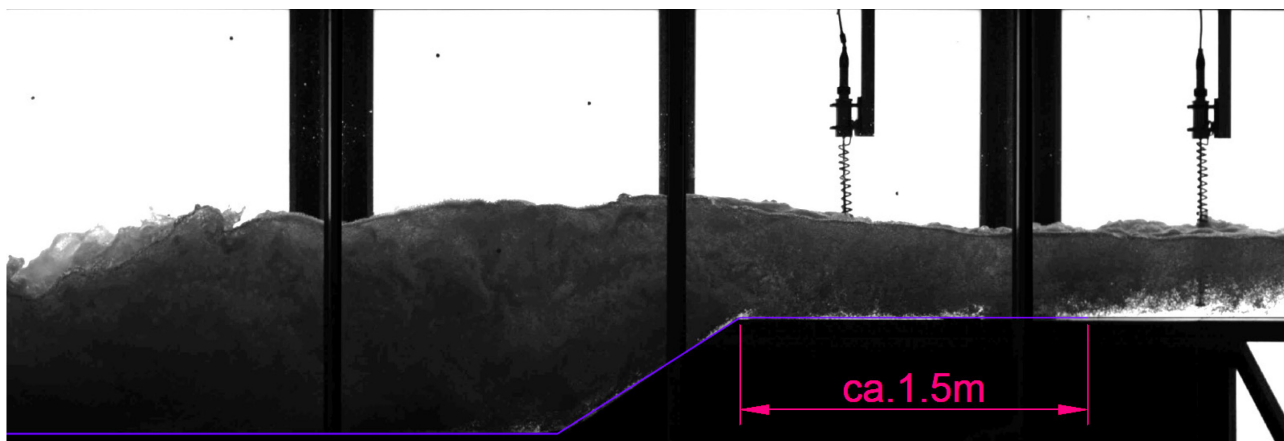
Figuur 11 – Vergelijking stromingscondities bij een overloophoogte 0.61 m

Voor een overloophoogte 0.61 m en een grachtbreedte 2.0 m, 3.0 m en 4.0 m bij een grachtdiepte 0.50 m wordt in Figuur 14 een opname van het stromingspatroon gegeven. Bemerkt dat zich bij een grachtbreedte 3.0 m en 4.0 m een sprong ontwikkelt in de gracht onafhankelijk van het afwaarts peil. Op basis van een visuele interpretatie van de opname lijkt een grachtbreedte 4.0 m optimaler dan een grachtbreedte 3.0 m. Een gracht breedte 2.0 m wordt op basis van een visuele interpretatie te kort beschouwd voor een goede dissipatie en volstaat niet in combinatie met een extreem laag peil in de polder.



Figuur 12 – Geometrie G7 overloophoogte 0.61 m en laag afwaarts peil stromingspatroon bij grachtbreedte 2.0 m (boven), 3.0 m (midden) en 4.0 m (onder)

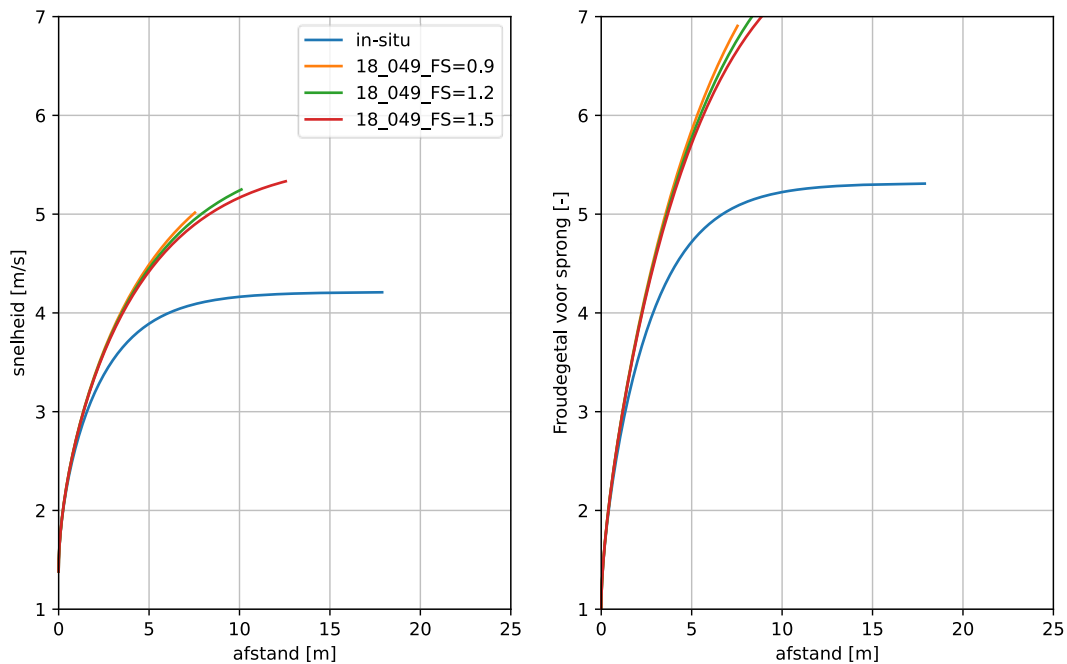
Op basis van bovenstaande wordt besloten dat het typeontwerp van de dissipatiegracht voor de compartimenteringsdijk, een grachtdiepte 0.50 m en een grachtbreedte 3.50 m, volstaat. Wel wordt aanbevolen om de GOSA bekleding op de berm door te trekken tot waar de stroming genormaliseerd is. Op basis van de proeven wordt een bijkomende breedte van ca. 1.50 m aanbevolen voor de dissipatiegracht van de compartimenteringsdijk, zie Figuur 13.



Figuur 13 – Lengte GOSA bekleding op verhoogde berm

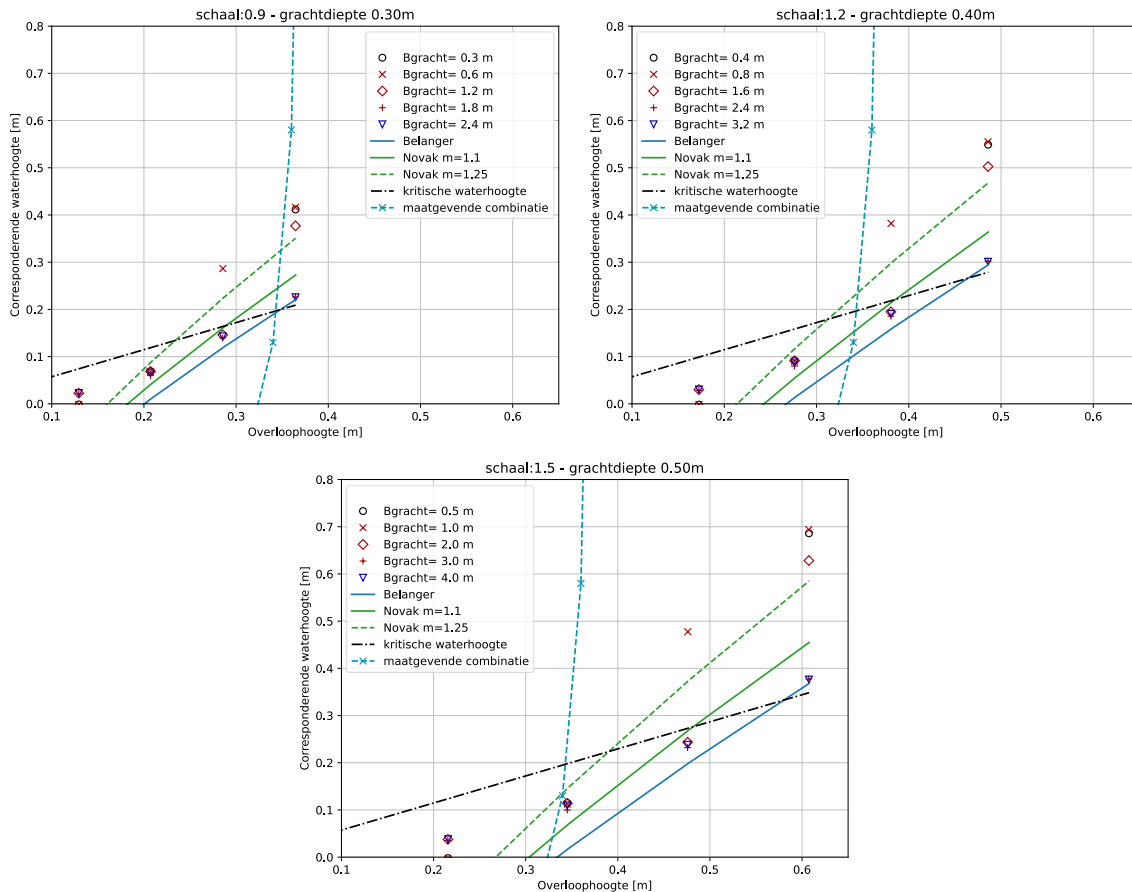
4.3 Toetsing dissipatiegracht VLB Noord Oost op basis van schaalmodelonderzoek.

Voor Vlassenbroek I noordoostelijk overloepdijk volgde uit de dimensionering dat het typeprofiel voldoet. Om te kijken of de grachtdiepte nog geoptimaliseerd kan worden wordt in deze paragraaf vergeleken met de schaalmodelresultaten, zie Figuur 9. Door toepassen van een schaalfactor 0.9, 1.2 en 1.5 wordt een grachtdiepte 0.30 m, 0.40 m en 0.50 m bekomen. Voor deze drie schaalfactoren worden in Figuur 10 de stromingscondities aan de teen van de overloepdijk vergeleken met de berekende condities in situ. Bemerkt hierin dat de snelheid in schaalmodel na verschaling, niettegenstaande de hogere dijkhoogte in situ hoger is ten gevolge van de lagere bodemruwheid. Het gebruiken van de schaalmodelresultaten op basis van de verschaalde overloophoogte is bijgevolg conservatief voor het ontwerp van de gracht.



Figuur 14 – Vergelijking stromingscondities teen overloepdijk VLBI oostelijk bij een overloophoogte 0.35 m

Voor de drie beschouwde schaalfactoren - 0.9, 1.2 en 1.5 - worden in Figuur 11 de maatgevende combinaties van rivier- en polderpeilen, zie Figuur 5, geplott op de figuur met de schaalmodelresultaten, zie Figuur 9.



Figuur 15 – VLB9 Noordoostelijke overlooppdijk vergelijking proeven

Uit de bij Figuur 9 gegeven bespreking volgt dat voor G7 enkel bij de hoogste beproefde overloophoogtes in combinatie met een smallere grachtbreedte een bepaalde waterdekking in het gebied nodig is om een watersprong te laten ontstaan in de gracht. Dit betreft de grachtbreedtes waarbij de corresponderende waterhoogte hoger ligt dan de schuin oplopende groene stippellijn. De overige markers geven het laagste peil aan waarvoor het afwaarts peil de stroming in de gracht beïnvloedt. Uit de proeven volgde dat een grachtdiepte 0.30 m bij een grachtbreedte vanaf 1.8 m in principe volstaat. Om nog enige marge o.a. op uitvoering van de peilen van kruin en gracht aan te houden wordt aanbevolen om de gracht niet ondieper te maken dan 0.40 m.

5 Conclusies

Op vraag van de Vlaamse Waterweg afdeling regio Centraal heeft afdeling Waterbouwkundig Laboratorium (WL) onderzocht of het ontwerp van de dissipatiegrachten van de overlooppdijken van het Gecontroleerd Overstromingsgebied Vlassenbroek geoptimaliseerd kan worden. Hiervoor werd beroep gedaan op de inzichten vanuit het onderzoeksproject (project 18_049) dat WL heeft uitgevoerd om de ontwerpmethodologie van dergelijke dissipatiegrachten te optimaliseren.

Vooreerst werd het gebied Vlassenbroek in het 1D Sigmamodel bijgewerkt naar de meest actuele kruinlengte en hoogtes en werden ook de dwarsdoorsneden in het gebied bijgewerkt. Met dit model werden vervolgens drie synthetische (composiet)stormen en één historische storm doorgerekend. Vanuit deze vier simulaties werden de ontwerpcndities voor de dissipatiegrachten van VLB afgeleid.

Uit de dimensionering van de dissipatiegrachten volgt dat:

- Voor de Noordwestelijke overlooppdijk van Vlassenbroek geen dissipatiegracht voorzien hoeft te worden omdat de watersprong hier steeds op het talud aanvangt.
- Voor de Noordoostelijke en Zuidwestelijke overlooppdijk van Vlassenbroek volstaan het voorgestelde typeprofiel van de dissipatiegracht met een diepte 0.50 m en een breedte 3.50 m.
- Voor de compartimenteringsdijk volstaat de typegeometrie niet volgens de dimensionering.

Vervolgens werd voor de compartimenteringsdijk een rechtstreekse vergelijking uitgevoerd met de schaalmodelproeven uit project 18_049. Hieruit volgde dat een grachtdiepte 0.50 m bij een grachtbreedte 3.50 m volstaat. Wel wordt aanbevolen om de GOSA erosiebescherming nog over een breedte van ca. 1.50 m op de berm door te trekken.

Ook voor de Noordoostelijke Overlooppdijk van Vlassenbroek zijn de resultaten van het ontwerp van de energiedissipatiegracht vergeleken met schaalmodelproeven uit project 18_049. Concreet wordt de op schaalmodel beproefde geometrie G7 hiervoor herschaald naar een grachtdiepte 0.30 m, 0.40 m en 0.50 m. Uit de proeven volgde dat een grachtdiepte 0.30 m bij een grachtbreedte vanaf 1.8 m in principe volstaat. Om nog enige marge o.a. op uitvoering van de peilen van kruin en gracht aan te houden wordt aanbevolen om de gracht niet ondieper te maken dan 0.40 m.

6 Referenties

- Bélanger, J.B.** (1828). Essai sur la Solution Numérique de quelques Problèmes Relatifs au Mouvement Permanent des Eaux Courantes.
- Berlamont, J.** (1980). Theorie van de verhanglijnen: de permanente, turbulente stroming in open kanalen met vaste bodem [CURSUS], 2de uitgav. Katholieke Universiteit Leuven. Afdeling Bouwkunde: Leuven. 224 pp.
- Bradley; Peterka.** (1957). The hydraulic design of stilling basins: hydraulic jumps on an horizontal apron (Basin I). *Asce J. Hydraul. Div.* (83)
- Coen, L.** (2023). Vlassenbroek Ontwerp Dissipatiegracht – Rekennota 1Dsims. Versie 4.0. WL Memo's 23_025_1. 7 pp.
- Coen, L.; Nossent, J.** (2022). Numeriek model Zeeschelde en tijgebonden zijrivieren: hindcast stormen eind januari en februari 2022. Versie 4.0. *WL Rapporten*, 22_034_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen
- Coen, L.; Pereira, F.; Taverniers, E.; Peeters, P.; Mostaert, F.** (2009). Studie ten behoeve van aanleg van overstromingsgebieden en natuurgebieden in het kader van het Sigmaplan - Ondersteunende studies: bijkomende informatie t.b.v. MER's van de 2010-Sigma-gebieden. *WL Rapporten*, 713_15. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen
- International Marine and Dredging Consultants; Waterbouwkundig Laboratorium.** (2010). Onderzoek naar de bresgevoeligheid van de Vlaamse winterdijken: deelopdracht 2. Literatuuronderzoek van de grondmechanische faalmechanismen met beschrijving van de relevante parameters. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen
- Novak, P.; Moffat, A.I.B.; Nalluri, C.; Narayanan, R.** (2007). Hydraulic structures. E & FN Spon: London. ISBN 978-0-415-38626-5
- THV Sigma Dijle.** (2008). Sigmaplan. Studie t.b.v. aanleg van overstromings- en natuurgebieden i.h.k.v. het Geactualiseerde Sigmaplan. Bestek nr. 16/EI/06/16: Deelopdracht 11 Onderzoek naar bekledingen van waterkeringen.
- Vercruyse, J.; Verelst, K.** (2022). Sigmaplan – Gereduceerde Getijdegebieden – Wal Zwijn: ontwerp dissipatiegracht. Versie 4.0. *WL Rapporten*, 21_010_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. Available at: <https://documentatiecentrum.watlab.be/owa/imis.php?module=ref&refid=351620>
- Vercruyse, J.; Verelst, K.** (2023a). Sigmaplan – dissipatiegracht overloopdijk gecontroleerde overstromingsgebieden Rapportage modelonderzoek en geoptimaliseerde ontwerpmethodiek, WL rapporten, 18_049 [CONCEPT]
- Vercruyse, J.; Verelst, K.** (2023b). Sigmaplan – dissipatiegracht overloopdijk gecontroleerde overstromingsgebieden Rapportage modelonderzoek en geoptimaliseerde ontwerpmethodiek [CONCEPT]
- Verelst, K.; Peeters, P.; De Mulder, T.; Mostaert, F.** (2012). Studie ten behoeve van aanleg van overstromingsgebieden en natuurgebieden in het kader van het Sigmaplan: ontwerp dijkbekleding Vlassenbroek. *WL Rapporten*, 713_15e. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

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