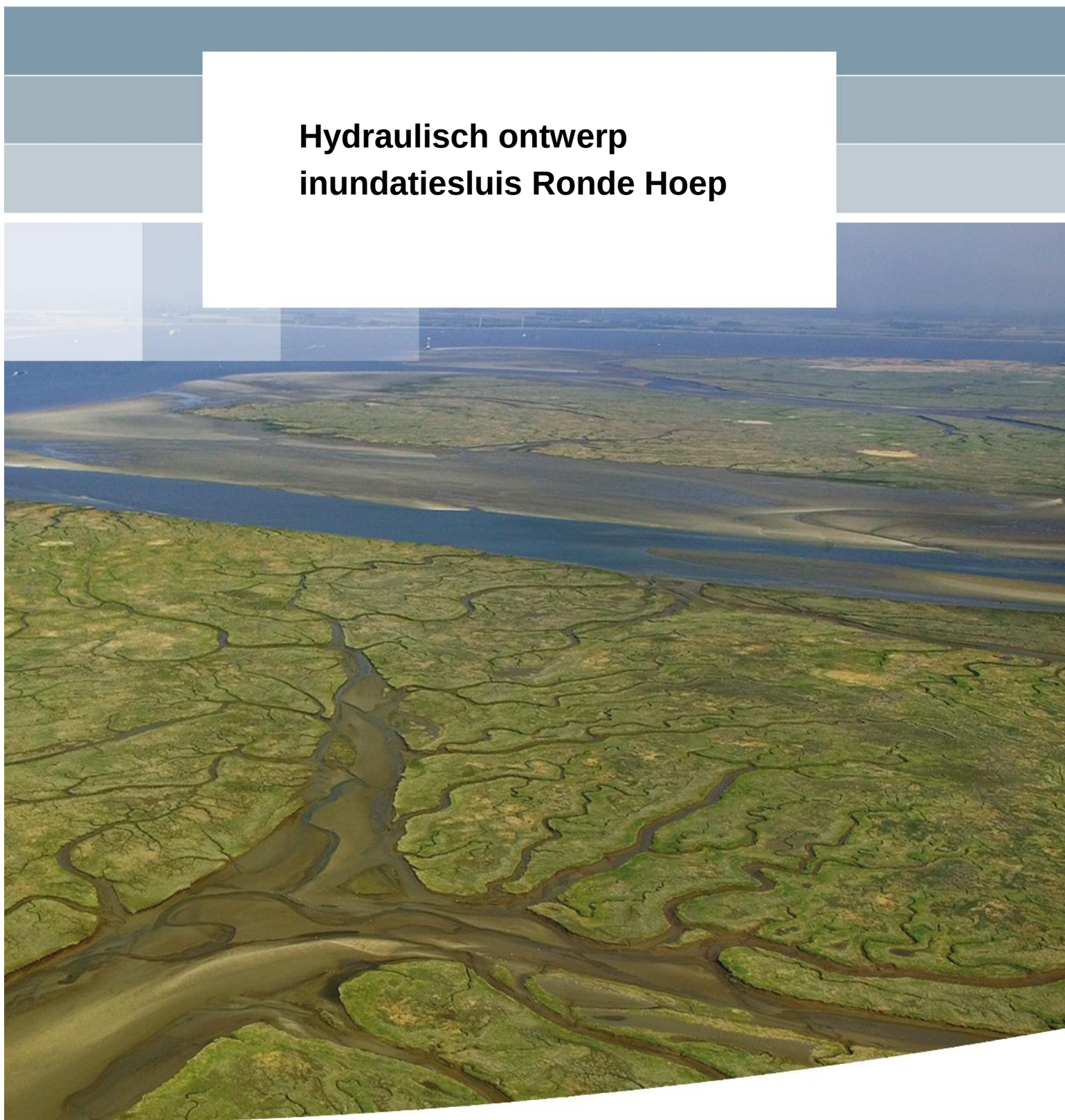


**Hydraulisch ontwerp
inundatiesluis Ronde Hoep**



Hydraulisch ontwerp inundatiesluis Ronde Hoep

P.P.D. van der Ven
A. de Loor

11200705-000

Titel

Hydraulisch ontwerp inundatiesluis Ronde Hoep

Opdrachtgever

Waternet

Project

11200705-000

Kenmerk

11200705-000-HYE-0001

Pagina's

29

Trefwoorden

Ronde Hoep, inundatiesluis, watersprong, bodembescherming, woelbak

Samenvatting

Voor extreme (toekomstige) neerslagcondities heeft Waternet gezocht naar mogelijkheden om de waterstand op de Amstel binnen de gewenste grenzen te houden indien de mogelijkheden voor afvoer richting het IJmeer en het Noordzeekanaal niet meer beschikbaar zijn. Voor deze calamiteitsituatie is gekozen de polder De Ronde Hoep (deels) onder water te zetten middels een inundatiesluis. Waternet heeft Deltares gevraagd bij te dragen aan het vervolg van het ontwerpproces. Hierbij wordt een nadere invulling gegeven aan het ontwerp van de onderstaande, verschillende elementen van de sluis.

- Een inundatiesluis, bestaande uit 3 kokers
- Een woelbak (eigenlijk een woelplaat)
- De bodembescherming

In deze rapportage zijn de berekeningen voor de hydraulische vormgeving van het inlaatwerk in de Ronde Hoep besproken. Hierbij zijn aandachtspunten gegeven voor de verschillende elementen. Een belangrijk aandachtspunt is de vereiste spreiding in het perceel, welke met aanvullende berekeningen zou kunnen worden vastgesteld. Tevens is geconcludeerd dat schade binnen het sluisperceel en aan de naburige percelen zeer waarschijnlijk zal optreden. Dit laatste is, gezien het gewenste inundatiedebiet, eigenlijk niet te voorkomen.

Het ontwerp zoals dat in dit rapport wordt gepresenteerd omvat een drietal kokers met een breedte van 2.5 m, met bodemniveau ('kruinniveau') van NAP-1.85 m. Stroomafwaarts wordt een USBR type IV woelbak voorgesteld, met een bodemniveau van NAP-4.09 m. Een bodembescherming wordt voorgesteld over een lengte van ca. 10 m vanaf de woelbak. Nadere toelichting wordt in de tekst gegeven.

Referenties

Offerte *Inundatiesluis De Ronde Hoep Hydraulisch advies* (ons kenmerk 1230345-006-ZWS-0002)

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	12/4/2017	P.P.D. van der Ven A. de Loor		I. de Groot - Wallast		B. van Vossen	
2	6/7/2017	P.P.D. van der Ven A. de Loor		I. de Groot - Wallast		B. van Vossen	

Status

definitief

Inhoud

1	Introductie	1
1.1	Context	1
1.2	Opdracht	1
2	Randvoorwaardes	2
2.1	Ontwerpscenario	2
2.2	Criteria	2
2.3	Operationele mogelijkheden	2
2.4	Ontwerpvrijheid	2
3	Hydraulisch ontwerp	4
3.1	Spuikokers	4
3.1.1	Uitgangspunten en situatiebeschrijving	4
3.1.2	Berekeningsmethode	4
3.1.3	Berekeningsresultaten	8
3.1.4	Aandachtspunten vormgeving	8
3.2	Woelbak	9
3.2.1	Uitgangspunten en situatiebeschrijving	9
3.2.2	Berekeningsmethode	11
3.2.3	Berekeningsresultaten	12
3.2.4	Aandachtspunten vormgeving	14
3.3	Stroomsnelheden en bodembescherming	14
3.3.1	Uitgangspunten en situatiebeschrijving	14
3.3.2	Berekeningsresultaten snelheden	15
3.3.3	Aandachtspunten bodembescherming	15
3.3.4	Nadere berekening bodemsnelheden	15
3.3.5	Bepaling korreldiameter d_{n50}	17
3.4	Aanvullende CFD-berekening woelbak	17
4	Conclusies	19
5	Referenties	21
	Bijlage(n)	
A	Schetsen vormgeving spuikokers	A-5
B	Schetsen vormgeving woelbak	B-1
C	SAF-basin	C-1

1 Introductie

1.1 Context

Voor extreme (toekomstige) neerslagcondities heeft Waternet gezocht naar mogelijkheden om de waterstand op de Amstel binnen de gewenste grenzen te houden indien de mogelijkheden voor afvoer richting het IJmeer en het Noordzeekanaal niet meer beschikbaar zijn. Voor deze calamiteitensituatie is gekozen de polder De Ronde Hoep (deels) onder water te zetten middels een inundatiesluis. Voor deze sluis heeft Waternet een conceptontwerp opgesteld, dat bestaat uit de volgende elementen.

- een inundatiesluis, bestaande uit 3 kokers van 2.5 x 2.0 meter (BxH)
- woelbak (eigenlijk een woelplaat)
- bodembescherming

Er is gekozen voor een afsluitmiddel van het type segmentschuif, waarmee

- het debiet regelbaar is,
- gesloten kan worden bij stroming,
- "handmatige" bediening mogelijk is,
- een onderhoudbare oplossing wordt verkregen.

Waternet heeft Deltares gevraagd bij te dragen aan het vervolg van het ontwerpproces. Het doel hiervan is om tot een conceptueel ontwerp van de verschillende elementen van de sluis te komen.

1.2 Opdracht

De werkzaamheden zijn beschreven in onze offerte *Inundatiesluis De Ronde Hoep Hydraulisch advies* (ons kenmerk 1230345-006-ZWS-0002, versie 17 januari 2017). Opdracht werd verleend door Nico van der Ploeg, per e-mail dd. 20 januari.

2 Randvoorwaardes

2.1 Ontwerpscenario

Wanneer de inundatiesluis wordt gebruikt, en de polder de Ronde Hoep wordt ingezet, zijn de omliggende waterwegen al afgesloten. Het waterpeil op de Amstel is inmiddels gestegen tot 0.0 mNAP. Het gemaal Zeeburg is actief maar dit kan 28 m³/s minder spuien dan benodigd. Dit verschil (2.4 miljoen m³ in 24 uur) moet worden opgevangen met het inunderen van de Ronde Hoep. Gedurende de inundatie daalt de Amstel 10 cm. De waterstand in de polder bereikt uiteindelijk -2.14 mNAP, de inundatiesluis wordt dan weer gesloten.

2.2 Criteria

In overleg zijn de volgende criteria besproken.

- De vereiste afvoercapaciteit door inlaatconstructie is gemiddeld 28 m³/s over 24 uur.
- Voor de bodemsnelheden boven gras wordt een toelaatbare waarde van 0.5 m/s aangehouden (o.b.v. Cultuurtechnisch Vademecum, Tabel 1.9). Schade ten gevolge van hogere stroomsnelheden wordt, op enige afstand van het dijklichaam, echter onvermijdelijk geacht.

2.3 Operationele mogelijkheden

De schuif wordt standaard ter plaatse elektrisch bediend. In geval van uitval van elektriciteit moet de schuif handmatig bediend kunnen worden. Bij inzet van de inundatiesluis worden de schuiven ononderbroken geheel boven het water geheven. Inzet van kleinere debieten middels gedeeltelijk geheven schuiven hoeft niet in het ontwerp te worden voorzien. De kleppen in de verschillende kokers worden tegelijk of meteen achtereenvolgens geopend, deze afweging hangt af van het benodigde vermogen voor de bewegingswerken.

2.4 Ontwerpvrijheid

- De precieze locatie van de inundatiesluis was bij aanvang van de studie nog vast te stellen. Het perceel (al in eigendom van Waternet) was gegeven, zie Figuur 2.1 en Figuur 2.2.
- Uitgegaan werd van drie kokers van 2.5 x 2.0 meter (BxH). Ook deze afmetingen mochten worden aangepast.
- Gekozen is voor een segmentdeur als kerende deur.
- De maaiveldhoogte op de locatie verloopt van NAP -2.15 m bij de teen van de kering tot NAP -2.35. Uitgegaan wordt van een hoogte van NAP -2.25 m na egalisering. Het maaiveldniveau van de polder verloopt ook enigszins, waarbij het afloopt tot de hoofdsloot in het midden van de polder.
- De grondsoort is (slappe) veen. Het gebruiken van zware elementen behoeft een fundering en is daarom kostbaar.



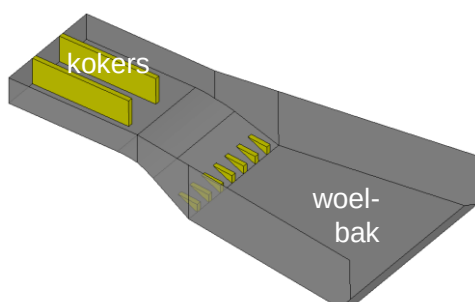
Figuur 2.1 Locatie van de Ronde Hoep en het inlaatwerk (blauwe pijl)



Figuur 2.2 Gebied voor inlaatwerk en stroomgebied. In wit is de omtrek van de uitstroomruimte getekend, met een totale aangegeven lengte van ca. 230 m.

3 Hydraulisch ontwerp

Het hydraulisch ontwerp van de inundatiesluis bestaat uit drie onderdelen, namelijk de spuikokers, de woelbak en de bodembescherming. Onderstaande figuur toont deze spuikokers en de woelbak, vooruitlopend op de beschrijving er van in dit hoofdstuk. Links van het figuur is de Amstel gelegen, rechts de inundatiepolder met aansluitend aan de woelbak de bodembescherming (niet getoond).



Figuur 3.1 Elementen spuikokers en woelbak.

De vormgeving van de spuikokers is in principe onafhankelijk van de woelbak te maken aangezien hier sprake is van een conditie met kritische stroming in de kokers, zoals nader wordt toegelicht in Paragraaf 3.1. De vormgeving van de woelbak is echter wel afhankelijk van de spuikokers aangezien deze bepalen over welke breedte en op welke hoogte het water uit de kokers komt gestroomd. De beschrijving van het hydraulisch ontwerp zal het verloop van de benodigde berekeningen volgen en daarom zullen eerst de spuikokers worden behandeld en daarna de woelbak. Daarna volgen nog enkele opmerkingen aangaande de bodembescherming na de woelbak en overige aandachtspunten.

3.1 Spuikokers

3.1.1 Uitgangspunten en situatiebeschrijving

Er wordt uitgegaan van drie spuikokers met een breedte van 2,5 m, dit levert een totale kokerbreedte van 7,5 m. Voor de spuikokers is ter bescherming een (houten) remmingwerk gepland. Vlak voor de openingen bevindt zich een (grofmazig) vuilrooster om te zorgen dat drijvend afval niet mee zal stromen de kokers in. De spuikokers worden rechthoekig uitgevoerd. Verder wordt uitgegaan van een vlakke bodem om de diepte van de kokerconstructie in de dijk zoveel mogelijk te beperken.

3.1.2 Berekeningsmethode

Gezien de lage benedenstroomse waterstand en de lengte van de kokers kan worden uitgegaan dat de spuikokers zich gedragen als een lange overlaat, specifiek kunnen we spreken van een zogenaamde Type 2 stroming volgens [3]. De gegeven formulering voor het debiet is afgeleid van de bekende overlaatformule, gegeven door

$$Q = \frac{2}{3} E \sqrt{g \frac{2}{3} E} \quad (1)$$

Met Q het debiet over de overlaat, E de energiehogte boven de overlaat (verschil tussen de energiehogte bovenstrooms en de kruinhoogte) en g de zwaartekrachtversnelling. De in

[3] gegeven formulering komt hiermee overeen met inachtneming van instroomverliezen en wrijvingsverliezen. De afvoerformule valt dan te schrijven als

$$Q = C_D \frac{2}{3} E \sqrt{2g \left(\frac{1}{3} E - h_{f1,2} - h_{f2,3} \right)} \quad (2)$$

Hierin zijn Q en E wederom de het debiet en de energiehoogte boven de overlaat, C_D het inlaatverlies en $h_{f1,2}$ en $h_{f2,3}$ de wrijvingsverliezen en g weer de zwaartekrachtversnelling. In de afleiding van het debiet zal worden uitgegaan van deze formulering waarbij de gegevens uit [1] worden gebruikt voor het afleiden van C_D en de wrijvingsverliezen.

Voor het bepalen van de energiehoogte wordt ervan uitgegaan dat de snelheidshoogte van het water op de Amstel verwaarloosbaar is, oftewel de waterstand op de Amstel is gelijk aan de energiehoogte. Gezien de lage stroomsnelheid van 0.2 m/s op de Amstel kan deze aanname gedaan worden.

Voordat het water de kokers in kan stromen moet het eerst door de remmingswerken en het vuilrooster heen. Het remmingswerk heeft een zeer open constructie en het verlies over het remmingswerk kan daarom verwaarloosd worden. Het vuilrooster heeft enige weerstand. Het verlies van energiehoogte door het vuilrooster kan uitgedrukt worden als

$$\Delta H = C_{tr} \frac{v^2}{2g} \quad (3)$$

Hierin is C_{tr} de verliescoëfficiënt door het vuilrooster. Er wordt uitgegaan van een raster van stompe spijlen met een hart-op-hart afstand van ca. 25 cm, een lengte/breedte-verhouding (t/w) van 10, een rechte aanstroming en, aangenomen een materiaaldikte van ca. 2 cm, een blokkering van 10% ($S=0.1$). Dit geeft volgens Figuur 3.2 een verliescoëfficiënt van 0.075. Voor de bepaling van de snelheid wordt het (nog te bepalen) bodemniveau en doorstroombreedte (7.5 m) van de kokers aangehouden. Met de energiehoogte na het vuilrooster wordt de debietberekening (vergelijking (2)) vervolgd.

Uit [1] volgt dat de afvoercoëfficiënt van rechthoekige spuikekers voor een Type 2-stroming gelijk is aan 0.95. Hier bovenop komen nog enkele correctiefactoren. Indien er uitgegaan wordt van een goed afgeronde instroomopening met een ratio tussen afrondingsstraal en kokerbreedte van 0.14 ($r=0.35$ m), kan dit maximaal een afvoercoëfficiënt van 1.0 opleveren. Daarbovenop dient er nog gecorrigeerd te worden voor de contractie van de brede rivier naar de smalle kokers volgens

$$C_D' = 0.98 - \frac{(0.98 - C_D)m}{0.80} \quad (4)$$

$$m = 1 - \frac{A}{A_1}$$

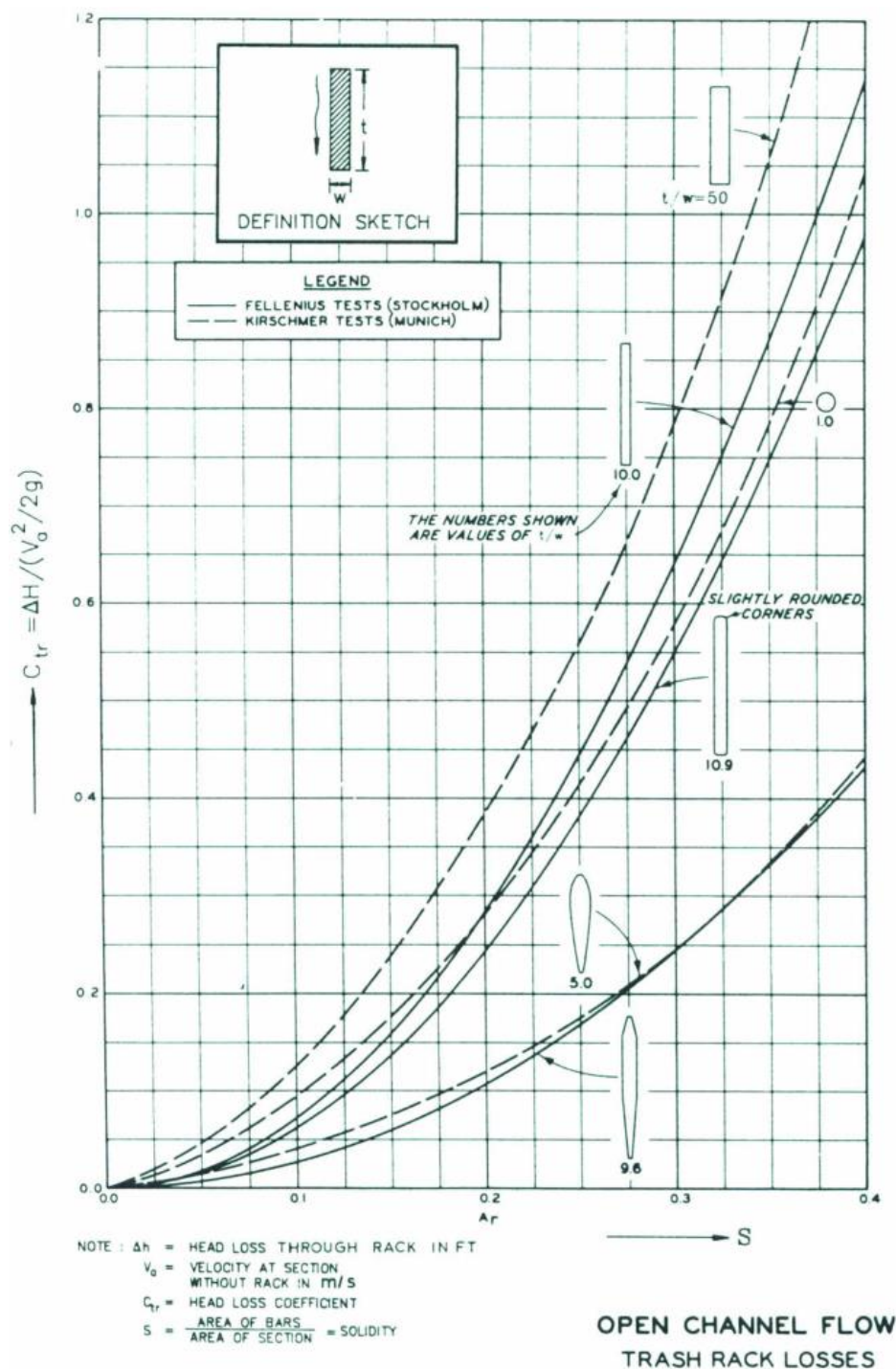
Hierin is A_1 het doorstroomoppervlak in het aanstroomkanaal (in dit geval de Amstel) en A het doorstroomoppervlak nabij de kokers. Als conservatieve aanname kan worden voor m uitgegaan worden van een waarde van 1. Dit geeft voor C_D een waarde van 0.94. Als maximum afvoercoëfficiënt kan een waarde van 1.0 worden aangehouden, maar 0.94 is een realistischer waarde en hiermee zal verder worden gerekend.

Wrijvingseffecten zullen gezien de beperkte lengte van de kokers een kleine rol spelen. Vanwege de lage stroomsnelheden en grote doorsnede van de Amstel worden de

wrijvingseffecten van de rivier naar de kokers ($h_{f1,2}$) verwaarloosd. Het wrijvingsverlies in de koker kan iteratief worden bepaald met behulp van de volgende formuleringen;

$$h_{f2,3} = \frac{Q^2 L}{K_C^2} \quad (5)$$
$$K_C = \frac{1.0}{n} A_C R_C^{2/3}$$

Hierin zijn A_C en R_C het doorstroomoppervlak en hydraulische radius bij de kritische doorsnee in de koker. In de bepaling van R_C wordt rekening gehouden met de tussenwanden tussen de drie kokers. n is Manning's n , voor een goede veldconstructie kan hiervoor een waarde van 0.012 worden aangehouden. Bij een debiet van 28 m³/s levert dit wrijvingsverlies een energiehoogteverlies van ongeveer 0.02 m op.



Figuur 3.2 Verliescoëfficiënten van afvalroosters, volgens [4].

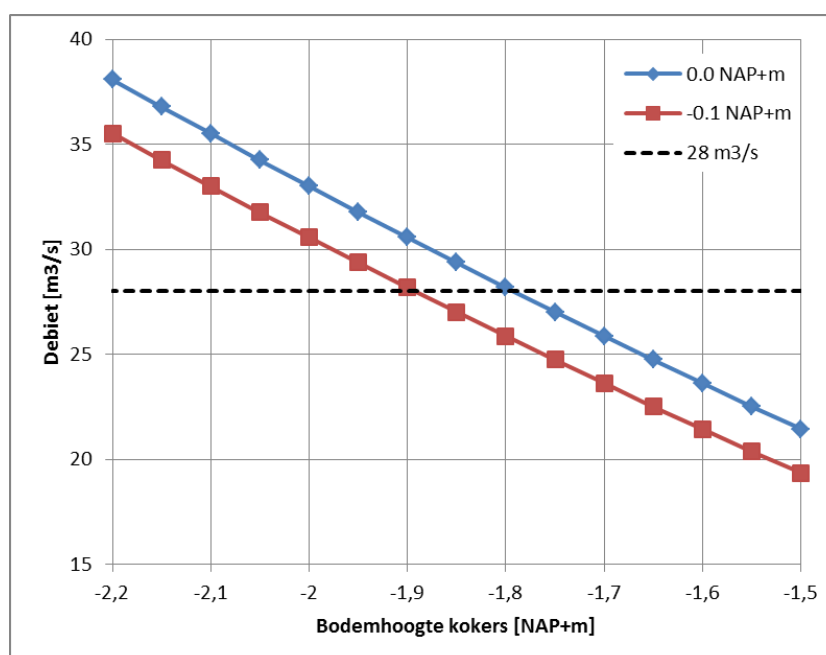
Verliezen door de schuifspanningen worden in deze beschouwing verwaarloosd. Deze verliezen zijn over het algemeen zeer klein en de stroming rond de sponningen wordt pas relevant wanneer er kans is op cavitatie. Daar zal bij de optredende debieten in dit geval geen sprake zijn (cavitatie treedt pas op bij snelheden in de orde van 15 m/s). Eventueel kunnen de randen van de schuifspanningen afgerond worden om het verlies te minimaliseren.

De verwachte nauwkeurigheid van berekeningen gemaakt op onderstaande wijze ligt in de orde van 10-15 %. Voor grotere nauwkeurigheid kan gebruik worden gemaakt van nadere 3D CFD-berekeningen of schaalmodelproeven.

3.1.3 Berekeningsresultaten

Bovenstaande vergelijkingen worden iteratief opgelost voor een gegeven bodemniveau van de spuikokers (ook wel “kruinhoogte”) en een gegeven waterstand op de Amstel. Bij een bodemniveau van NAP-1.85 m en een waterstand van NAP+0.0 m geeft dit een debiet van 29.4 m³/s. Bij hetzelfde bodemniveau, maar een waterstand van NAP-0.10 m geeft dit een debiet van 27.0 m³/s. Uitgaande van een lineair verloop van de waterstand op de Amstel van NAP+0.0 m tot NAP-0.1 m levert dit een gemiddeld debiet van 28.2 m³/s op gedurende de inundatie van de Ronde Hoep.

Om extra onvoorziene stromingsverliezen op te vangen kan er eventueel voor gekozen worden om de bodem van de kokers nog iets lager te leggen, bijvoorbeeld op NAP-1.90 m. Dit levert voor waterstanden van NAP+0.0 m en NAP-0.10 m respectievelijk 30.6 m³/s en 28.2 m³/s op met bovenstaande rekenmethode. Oftewel een gemiddeld debiet van 29.4 m³/s. Het verloop van het debiet als functie van de bodemhoogte van de kokers is weergegeven in Figuur 3.3. Opgemerkt moet worden dat bij een aanpassing van de kokerbodemhoogte ook de diepte van de woelbak moet worden gecontroleerd en deze wellicht (met dezelfde orde grootte) dient te worden verdiept.



Figuur 3.3 Het berekende debiet bij verschillende bodemhoogtes van de kokers.

3.1.4 Aandachtspunten vormgeving

Hieronder volgen enkele aandachtspunten voor de vormgeving van de spuikokers waar in bovenstaande berekening impliciet vanuit is gegaan. Schetsen van de vormgeving zijn gegeven in Appendix A.

- De bodemligging in de toestroom naar de kokers wordt aangenomen een enigszins vloeiend verloop te hebben, zodat gegarandeerd wordt dat er geen verlies van energiehoogte optreedt aan de inlaat van de kokers. Hierbij kan worden gedacht aan een schuin lopend talud voor de kokerinlaten. Dit hoeft niet geheel door te lopen tot de

bodem van de Amstel. Uitgaande van de tekeningen kan bijvoorbeeld gekozen worden om dit talud tot de remmingswerken te laten lopen of zoals reeds op de tekeningen is aangegeven het talud voor de remmingswerken te plaatsen en daarachter een bodem met constant niveau tot de kokerinlaat;

- Indien ervoor gekozen wordt om de inlaten van de kokers af te ronden dient dit alleen aan de instroomzijde te gebeuren. Afrondingen aan de uitstroomzijde hebben geen effect op de stromingsverliezen en zullen alleen maar een negatief effect hebben op de loslating van de stroming aldaar;
- De bovenzijde van de kokers dient voldoende hoog te liggen dat enige golven die ontstaan op het wateroppervlak in de kokers het plafond niet zullen bereiken. Indien dit wel gebeurt zal dit tot lokaal zeer grote krachten op het plafond leiden. Naast grote lokale krachten leidt dit ook tot hoorbare klappen. Dit voorbereidende CFD-berekening laat bijvoorbeeld zien dat met het plafond op NAP-0.25 m de golven het plafond bijna bereiken. Dit is te zien in Figuur 3.4. Er wordt daarom geadviseerd het kokerplafond enigszins hoger te plaatsen, bijvoorbeeld op NAP+0.0 m;



Figuur 3.4 Het wateroppervlak in een langsdoorsnede van de instroomkokers, op basis van een verkennende CFD-berekening. Blauw geeft lucht aan, rood het water, met links de Amstel en rechts de polder. In het wit is de dijktop en het plafond van de koker getoond, de zwarte lijnen geven grof de geometrie van de inlaatconstructie weer. Te zien is dat het wateroppervlak bijna het plafond van de koker raakt.

- De onderzijde van de schuif dient met een scherpe rand te worden vormgegeven om een duidelijk gedefinieerd loslaatpunt te verkrijgen ter voorkoming van trillingen. Bij voorkeur wordt er een vrij harde rubberen afdichting gebruikt;
- Afhankelijk van de vormgeving van de schuif kan deze een as over de kokerbreedte bevatten. Om de stroming niet te hinderen dient deze zich boven het verwachte waterniveau te bevinden. Een niveau van rond de NAP+0.0 m is een veilige keuze, maar gezien de verwachte kritische diepte van ongeveer 1.2 m zou deze enigszins lager geplaatst kunnen worden. Hierbij moet wel een marge aangehouden worden gezien de verwachte golfbewegingen aan het wateroppervlak.

De Amsteldijk ter plaatse van de inundatiesluis staat op de lijst om versterkt te worden. Het uiteindelijk dijkprofiel is op moment van schrijven nog niet bekend. Er wordt daarom uitgegaan van een benodigde lengte van de spuikokers van zo'n 15 m. Deze lengte kan eventueel aangepast worden om beter in het nieuwe dijkprofiel te passen. De berekeningen laten zien dat wrijving een zeer kleine invloed heeft op het debiet, dus ook bij een afwijking van enkele meters zullen deze resultaten nog geldig zijn.

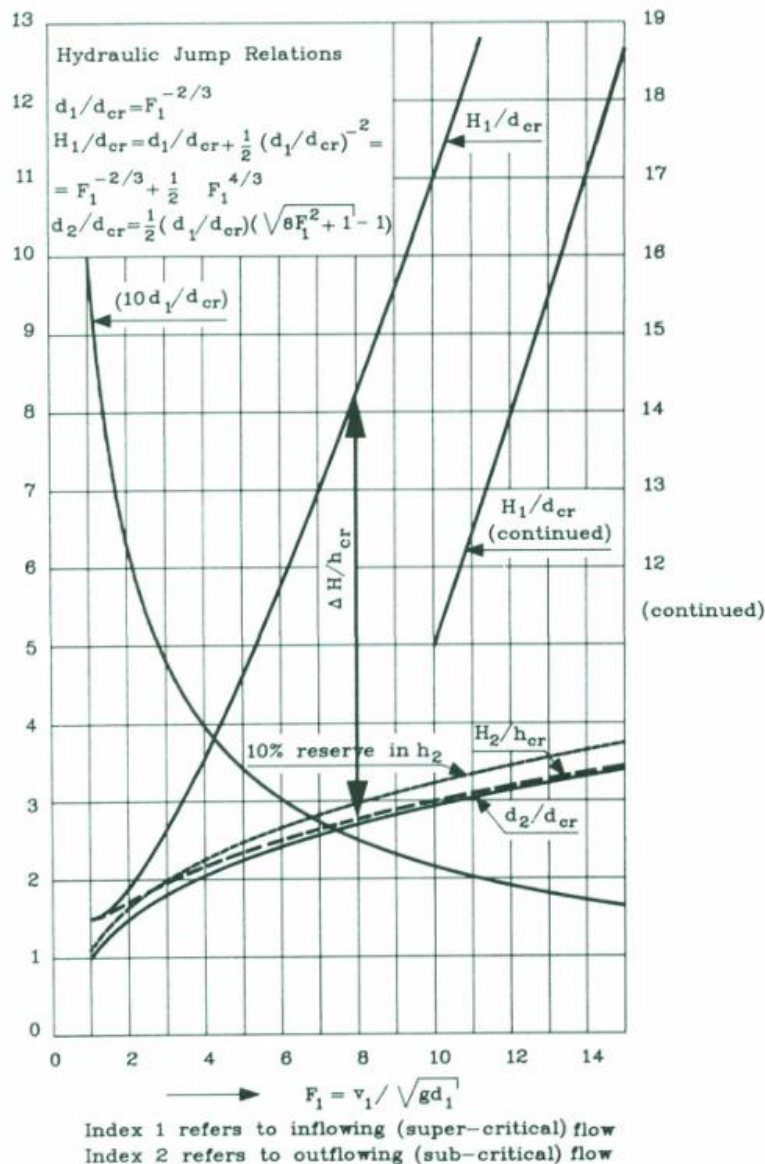
3.2 Woelbak

3.2.1 Uitgangspunten en situatiebeschrijving

Voor een correcte werking van een woelbak is het noodzakelijk dat er de watersprong in de woelbak optreedt zodat zo veel mogelijk energie gedissipeerd is voordat het water de woelbak uitstroomt. Dit zorgt er voor dat de grootste aanval op de bodem in de woelbak plaatsvindt en de stroomsnelheden achter de woelbak zoveel mogelijk beperkt worden.

Om te controleren welke waterdiepte benodigd is om een watersprong te laten optreden is een eenvoudige woelbakrelatie beschikbaar [5]. Deze is een functie van de bovenstroomse

energiehoogte en de beschikbare benedenstroomse waterstand. Het betreft hier echter wel een eenvoudige eendimensionale beschouwing en deze is daarom niet zondermeer toepasbaar voor divergerende woelbakken.



Figuur 3.5 Watersprongrelaties volgens [5].

Naast deze eenvoudige relatie hebben er in de VS uitgebreide schaalmodelonderzoeken plaatsgevonden welke geleid hebben tot enkele standaard vormgevingen van woelbakken voor verschillende toepassingen. Een bekende set woelbakken zijn de USBR basins welke zijn gespecificeerd door de USBR (U.S. Bureau of Reclamation). Een andere bekende standaard is het SAF-basin (Saint Anthony Falls Laboratory) waarbij voor een brede range aan Froude-getallen een ontwerprichtlijn wordt gegeven. Voor het SAF basin wordt ook duidelijk gegeven in hoeverre de woelbak divergerend kan worden uitgevoerd. Dezelfde verwijding kan ook toegepast worden op een USBR-basin, hoewel dit niet specifiek beproefd is door de USBR. Een belangrijk verschil tussen de ontwerpen van het SAF en de USBR voor Froude getallen zoals die in de inundatiesluis van de Ronde Hoep zullen voorkomen, is

dat het SAF-basin gebruik maakt van breekblokken in de woelbak om deze kort te kunnen houden en de USBR niet.

3.2.2 Berekeningsmethode

Voor het bepalen van de afmetingen van de woelbak wordt er van uitgegaan dat er tot voor de watersprong sprake is van energiebehoud, dus de energiehoopte voor de sprong is gelijk aan de energiehoopte in de spuiokers. Hierbij worden effecten door wrijving verwaarloosd, wat gezien de geringe afmetingen van de constructie geoorloofd lijkt. Voor de benedenwaterstand wordt uitgegaan van een maatgevende conditie waarbij een laagdikte van 0.5 m water boven het maaiveld aanwezig is. Dit waterniveau wordt volgens de Lizzard Flooding-berekening, waarvan Waternet de resultaten heeft toegestuurd, na ongeveer 1.5 uur bereikt. In de onderstaande berekening wordt dan uitgegaan van een benedenwaterstand van NAP-1.75 m (NAP-2.25+0.50 m). Verder wordt er uitgegaan van een helling van 2:1 van spuiokers naar woelbak.

Voor het bepalen van de benodigde waterdiepte in de woelbak en de lengte is het nodig om het Froude-getal voor de sprong te kennen. Deze is niet op voorhand te bepalen en wordt iteratief afgeleid met inachtneming van een verwijding van de woelbak. De maximale hoek van de verwijding is ook weer afhankelijk van het Froude-getal en wordt dus aangepast in de iteratie. Als startwaarde wordt een Froude-getal van 1 gebruikt. In de bepaling van de benodigde benedenwaterstand wordt altijd een veiligheidsfactor van 1.10 gebruikt (10% hoger dan door SAF voorgesteld). Dit zal tot een iets diepere woelbak leiden. Hieronder volgt een overzicht van het uit te voeren iteratief proces.

- Opgeven startwaarde Froude-getal (1.0) en startwaarde waterdiepte voor de watersprong (neem deze als waterdiepte in de kokers);
- Bereken benodigde benedenwaterstand (h_2) m.b.v. woelbakrelatie

$$\frac{h_2}{h_1} = 0.5 \left(\sqrt{8Fr_1^2 + 1} - 1 \right) \quad (6)$$

- 10% verhogen van de benodigde waterdiepte benedenstrooms ($h_2^* = 1.1h_2$);
- Bepalen benodigde niveau woelbakbodem m.b.v. benedenwaterstand en benodigde waterdiepte;
- Bepalen horizontale lengte van de helling m.b.v. de opgegeven hellingshoek en bepaalde niveau van de woelbakbodem;
- Bepalen maximale verwijdingshoek van helling en woelbak volgens

$$\alpha = \arctan \left(\frac{1}{1.5Fr_1} \right) \quad (7)$$

- Bepaalde hoek afronden naar beneden;
- Berekenen van de breedte aan het einde van de helling m.b.v. de bepaalde lengte en hoek van de helling;
- Bepalen van de laagdikte van de stroming aan het einde van de helling uitgaande van energiebehoud (Bernoulli) m.b.v. het instromende debiet volgens

$$Q = h_1 b_1 \sqrt{2g(z_0 - z_1 + h_0 - h_1) + v_0^2} \quad (8)$$

- Uit de laagdikte, het debiet en de breedte aan het einde van de helling kunnen de gemiddelde stroomsnelheid en het nieuwe Froude-getal afgeleid worden. Hiermee wordt de volgende iteratie uitgevoerd;
- Dit proces wordt herhaald tot er een evenwicht is bereikt (er wordt uitgegaan van minimaal 10 iteraties).

Nu het Froude-getal en de laagdikte onderaan de helling en de hoek van de woelbak bekend zijn kunnen eventueel de relaties voor de breekblokken afgeleid worden. Bij woelbakken van dit formaat leert de ervaring dat het aanbrengen van breekblokken relatief duur is en de besparing van de kortere lengte niet opweegt tegen de kosten van het aanbrengen van breekblokken. De lengte van de woelbak (zonder breekblokken) kan gelijk gekozen worden aan de lengte van de watersprong, ongeveer 7 maal het verval over de watersprong;

$$l_{wb} = 7(h_2 - h_1) \quad (9)$$

3.2.2.1 SAF-basin

Nadere toelichting van het SAF-basin is aan dit rapport opgenomen als Appendix C. In het ontwerp wordt gebruik gemaakt van een USBR-basin type, welke in de volgende paragraaf wordt toegelicht.

3.2.2.2 USBR-basin type IV

Wanneer er gekozen wordt voor een USBR-basin wordt afgaande op de te verwachten range aan Froude-getallen geadviseerd om USBR-basin IV te kiezen. Dit ontwerp is geschikt voor Froude-getallen van 2.5 tot 4.5. In het geval van de Ronde Hoep bevindt het Froude getal zich met een waarde van 4.4 (zie Tabel 3.1) aan de bovengrens van dit bereik. In USBR-basin IV worden relatief grote breekblokken aangebracht onderaan de helling richting de woelbak, maar bevinden zich geen breekblokken in de woelbak wat de constructie vereenvoudigt, echter de lengte van de woelbak is wel groter. Verder bevindt er zich een hogere drempel aan het einde van de woelbak.

De breedte van de breekblokken onderaan de helling zijn gelijk aan of kleiner dan h_1

$$h_1 > w_{cb,1} > 0.75h_1 \quad (10)$$

De tussenruimte tussen de blokken is

$$w_{cb,2} = 2.5w_{cb,1} \quad (11)$$

De bovenkant van de breekblokken dient zich $2h_1$ boven de woelbakbodem te bevinden en de bovenzijde heeft een hoek van 5° in de stroomafwaartse richting. De hoogte van de drempel aan het einde van de woelbak wordt gegeven door

$$h_{dr} = h_1 \left(1 + \frac{Fr_1}{18} \right) \quad (12)$$

Zoals eerder aangegeven kan voor de lengte van de woelbak worden uitgegaan van de lengte van de sprong, zie formule (9). Volgens het USBR-basin moet worden uitgegaan van een lengte gegeven door

$$L_{wb} = 6h_2^* = 6.6h_2 \quad (13)$$

Deze laatste formule zal worden toegepast voor het vormgeven van de woelbak.

3.2.3 Berekeningsresultaten

Hoewel het SAF-basin een kortere minimale lengte voorschrijft is reeds in de overleggen aangegeven dat Deltares toch adviseert om voor het USBR-basin te kiezen vanwege de grotere lengte. Het voordeel van de grotere lengte is dat er daarmee meer lengte beschikbaar komt om de stroming te verdelen over de breedte van de woelbak. Dit kan eventueel ook bereikt worden door wel te kiezen voor de SAF-variant, maar met een vergelijkbare lengte als de USBR-variant. Onderstaande berekeningen gelden voor een USBR-basin type IV met als toevoeging dat de woelbak divergerend is uitgevoerd.

Als ontwerpwaterstand benedenstrooms wordt uitgegaan van een waterdiepte van 0.5 m boven maaiveld. Ter vereenvoudiging wordt aangenomen dat dit ook geldt dichtbij de woelbak. Met een maaiveld op gemiddeld ca. NAP-2.25 m levert dit een bekende benedenwaterstand van NAP-1.75 m op. De waterstand en gemiddelde stroomsnelheid in de kokers is gelijk aan de kritische diepte en snelheid welke bekend is uit de afvoerberekening van de spuiokers. Er wordt uitgegaan van een helling met een hoek van 2:1. Het iteratief oplossen van formules (6) t/m (8) geeft de benodigde waterdiepte en daarmee het benodigde niveau van de woelbakbodem. Ook volgen het Froude-getal en geschatte laagdikte beneden de helling uit de berekening waarmee de rest van de woelbak vormgegeven kan worden. De resultaten van deze berekening zijn gegeven in Tabel 3.1.

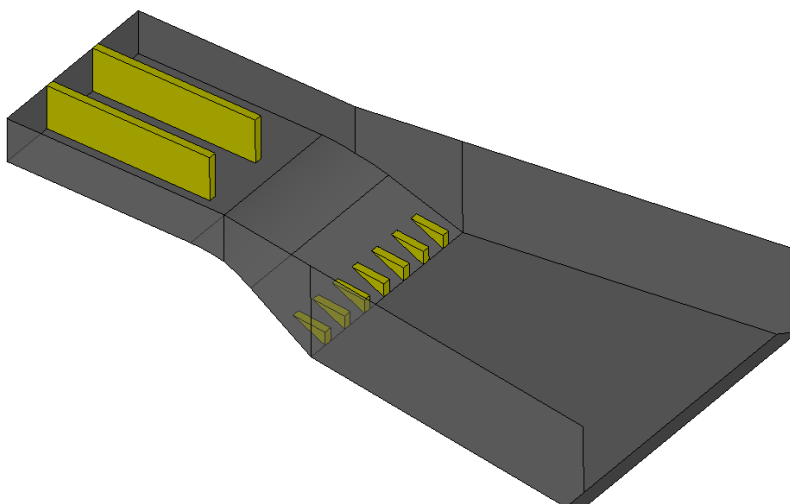
Tabel 3.1 Resultaten woelbakberekening.

Benodigde waterdiepte (h_2^*)	2.34 [m]
Niveau woelbakbodem	-4.09 [NAP+m]
Froude-getal onderaan helling (F_1)	4.43 [-]
Laagdikte onderaan helling (h_1)	0.37 [m]
Verwijdingshoek vleugelwanden	8.0 [°]

Met de bepaling van de verwachte laagdikte van de stroming onderaan de helling kunnen de breekblokken van de woelbak worden gedimensioneerd en met het Froude-getal kan de drempel worden gedimensioneerd. De resultaten van deze dimensionering zijn gegeven in Tabel 3.2. Hierbij is er gekozen voor relatief brede breekblokken om rekening te houden met eventuele grotere laagdiktes onderaan de helling. Een impressie van de resulterende woelbak is gegeven in Figuur 3.6 (de hoogte van de wanden zijn hierin niet correct weergegeven).

Tabel 3.2 Resultaten vormgeving USBR Type IV.

Breedte breekblokken	0.35 [m]
Tussenruimte breekblokken	0.875 [m]
Hoogte breekblokken boven woelbakbodem	0.74 [m]
Drempelhoogte	0.46 [m]
Hoogte vleugelwanden	2.84 [m]



Figuur 3.6 Impressie van de woelbak zoals deze volgt uit de hierboven behandelde berekening.

3.2.4 Aandachtspunten vormgeving

Hieronder volgen enkele aandachtspunten voor de vormgeving van de woelbak waar in bovenstaande berekening impliciet van uit is gegaan. Schetsen van de vormgeving zijn gegeven in Appendix B.

- Tussen de spuikokers en de helling richting de woelbak dient een afronding aangebracht te worden om een goede overgang van de kokers richting de woelbak te garanderen. Uitgaande van bovengenoemde maten kan bijvoorbeeld worden uitgegaan van een afronding met een straal van 6.5 m;
- De vleugelwanden na de woelbak dienen onder een hoek van maximaal 90° met de as van de spuikokers te staan, het wordt echter geadviseerd om ze met dezelfde hoek door te zetten als de wanden langs de woelbak zelf. De hoogte van de vleugelwanden kan onder een helling van 1:1 verlaagd worden. De diepte van de vleugelwanden dient groter te zijn dan de mogelijke ontgrondingsdiepte achter de woelbak (zie Sectie 3.3);
- De bodem van de woelbak dient voldoende sterk te zijn om de drukfluctuaties in de watersprong te weerstaan. Deze drukfluctuaties zullen maximaal in de orde van het verval over de watersprong zijn (ca. 1.9 m).

3.3 Stroomsnelheden en bodembescherming

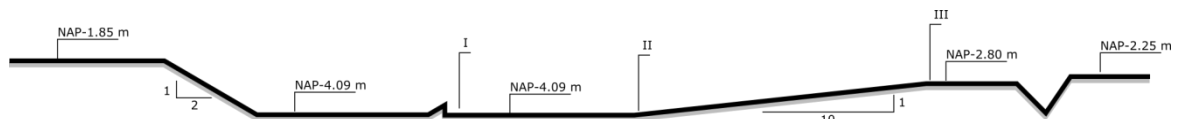
3.3.1 Uitgangspunten en situatiebeschrijving

Op basis van het hierboven gegeven ontwerp van de spuikokers en woelbak wordt een grove inschatting gemaakt van de stroomsnelheden welke benedenstrooms van de woelbak verwacht kunnen worden. Hierbij dient te worden benadrukt dat dit dieptegemiddelde stroomsnelheden betreft en dat de snelheden daarbij (in de horizontaal) uniform verdeeld zijn binnen een aangenomen spreidingshoek. Dit betekent dat er lokaal grotere stroomsnelheden mogelijk zijn. Met behulp van aanvullende berekeningen zou een betere schatting gemaakt kunnen worden van de stroomsnelheden. Met bijvoorbeeld D-Flow FM kunnen de dieptegemiddelde stroomsnelheden worden bepaald gedurende de inundatie en met CFD modellen kunnen lokale stroomsnelheden worden bepaald bij gekozen inundatiedieptes.

In de bepaling van de stroomsnelheden wordt ervan uitgegaan dat de stroming aan de uitlaat van de woelbak goed verdeeld is over de breedte van de woelbak en de waterdiepte. Er wordt geadviseerd om na de woelbak de bodem op dezelfde diepte te leggen als de woelbak over een lengte vergelijkbaar met de lengte van de woelbak, ca. 15 m. Hierna wordt uitgegaan van een flauw talud tot een bodemligging van ongeveer NAP-2.80 m. Dit is net boven het zomerpeil van het grondwater. In de overleggen is naar voren gekomen dat het aanbrengen van een talud vanwege de grondsoort mogelijk moeilijk te realiseren is. Het hoogteverschil kan eventueel stapsgewijs overkomen worden. Het is voordelig om de hoogteverandering over enige lengte te laten plaatsvinden. Dit geeft de stroming de ruimte om over een grotere lengte uit te stromen wat eventuele schade aan naburige percelen kan verminderen. Ook wordt geadviseerd om de bodemverlaging verder richting het zuidoosten uit te voeren dan richting het noordwesten, omdat in het zuidoosten meer uitstrooimengte beschikbaar is. Een extra verlaging in die richting kan mogelijk helpen bij een betere spreiding van het debiet richting de naburige percelen.

In de hieronder gegeven berekening wordt uitgegaan van een vormgeving van de woelbak zoals deze is gegeven in Paragraaf 3.2. Hierachter ligt de bodem over in ieder geval een lengte van 15 m op hetzelfde niveau als de woelbak. Dan volgt een talud van 1:10 tot een niveau van NAP-2.80 m. De resulterende bodemligging is schematisch getoond in Figuur 3.7. Voor de horizontale spreiding van de stroming achter de woelbak (raaien 1 t/m 3) wordt uitgegaan van een spreiding van 1:10, dit is een spreidingshoek die normaliter aangenomen

kan worden voor stromend (d.w.z. niet superkritisch) water. Mogelijk dat de beschikbare waterdiepte in combinatie met het talud zorgt voor extra spreiding, maar dit kan zonder nadere berekeningen niet betrouwbaar afgeschat worden. Voor de stroomsnelheid op de naburige percelen wordt uitgegaan van een spreiding over de gehele uitstroomband, omdat de maaiveldhoogte van deze percelen iets hoger gelegen is dan het eigen perceel.



Figuur 3.7 Schematische doorsnede van de bodemligging benedenstrooms van de spuikokers. Raai III bevindt zich op het Waternet perceel.

3.3.2 Berekeningsresultaten snelheden

De berekende stroomsnelheden op de raaien I, II en III zijn gegeven in Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Gemiddelde stroomsnelheid op raaien I, II en III.

Raai	Dieptegemiddelde stroomsnelheid [m/s]
I	0.93
II	0.77
III	1.31

De stroomsnelheden op de naburige percelen zijn lastig te voorspellen zonder complexere modellen. Wanneer er van wordt uitgegaan dat het beschikbare perceel van de opdrachtgever wordt verlaagd tot NAP-2.80 m en de stroming zich goed spreidt over de beschikbare uitstroomband (ca. 230 m) is de stroomsnelheid net na het opvullen van het perceel ongeveer 1.1 m/s uitgaande van het debiet zoals berekend in Paragraaf 3.1. Bij de aanwezigheid van een waterdiepte van 50 cm is de snelheid gereduceerd tot ca. 0.26 m/s. Let wel, het is zeer waarschijnlijk dat de spreiding niet volledig zal zijn langs de randen van het perceel en dat er recht achter de spuikokers grotere stroomsnelheden zullen optreden.

3.3.3 Aandachtspunten bodembescherming

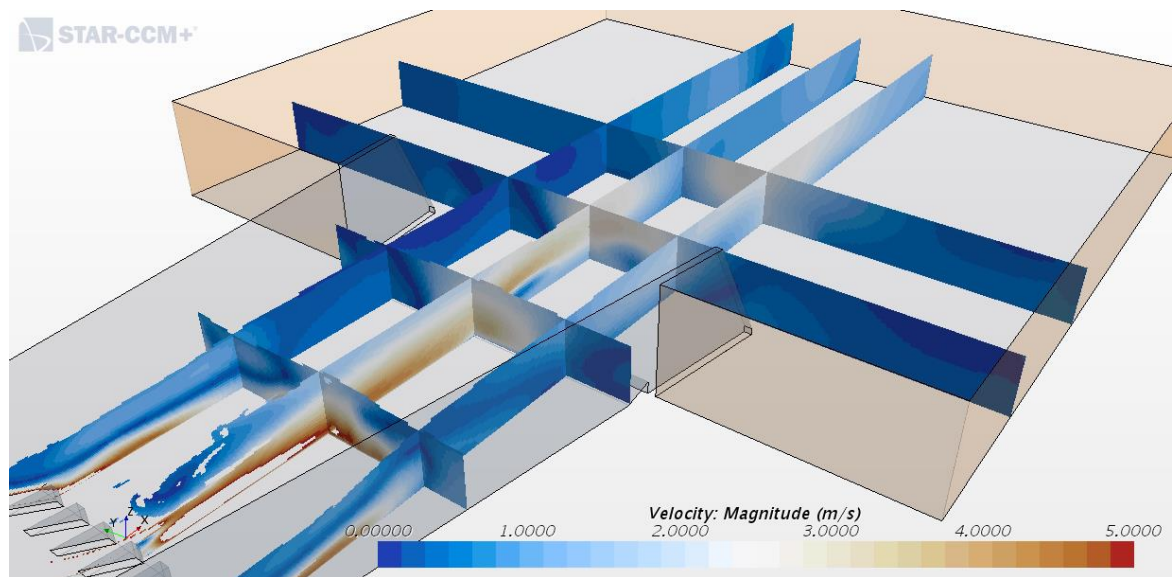
Het wordt geadviseerd om achter de woelbak enige bodembescherming aan te brengen. De in de woelbak aanwezige drempel zal de stroomsnelheden direct achter de woelbak reduceren, maar wanneer de stroming weer aan de bodem gaat aanliggen zullen de stroomsnelheden met name in het begin van het inundatieproces toch zorgen voor ontgroning. Hoewel lokale ontgroningen zeer waarschijnlijk niet voorkómen kan worden is het met name van belang om de constructie te beschermen. Hierbij wordt geadviseerd om bescherming aan te brengen tot ca. 5 m na het einde van de vleugelwanden.

Aangezien de vormgeving van de woelbak is afgestemd op een waterstand van NAP-1.75 m zal deze minder goed presteren in de eerste fase van de inundatie. Om hogere stroomsnelheden en daarmee extra schade in deze fase zoveel mogelijk te beperken wordt voorgesteld om allereerst met een enkele koker het verlaagde deel van het perceel op te vullen totdat een niveau van NAP-2.25 m bereikt wordt alvorens de overige kokers worden geopend.

3.3.4 Nadere berekening bodemsnelheden

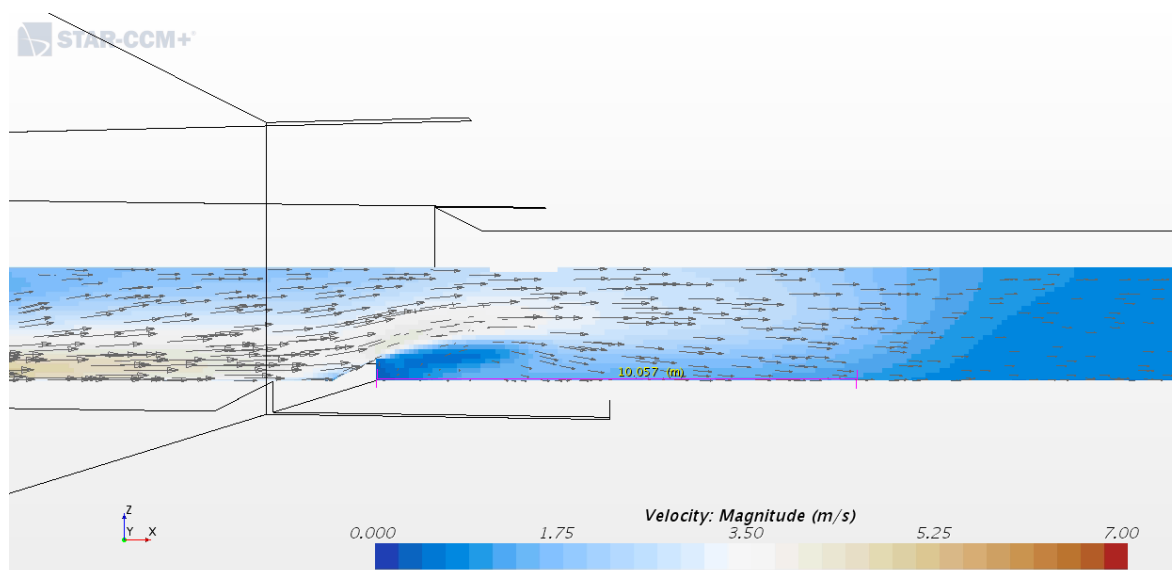
Om meer inzicht te krijgen in de (variatie in de) stroomsnelheden is een CFD-berekening opgezet met een relatief grof rekenrooster, zie ook Sectie 3.4. Hierbij wordt uitgegaan van

een inkomend debiet van $28.5 \text{ m}^3/\text{s}$, een benedenwaterstand van NAP-1.75 m (ontwerpwaterstand) en de vormgeving van de woelbak zoals hierboven gepresenteerd. Figuur 3.9 toont enkele doorsneden van de stroomsnelheid. Deze resultaten laten zien dat de stroomsnelheden aan het einde van de woelbak niet geheel over de breedte gespreid zijn. Er lijkt zich een soort van straal te vormen benedenstrooms van de woelbak die heen weer beweegt in de tijd. Dit zorgt lokaal voor hogere stroomsnelheden dan als de stroming netjes spreidt over de hele constructie. Wel is de stroomsnelheid op enige afstand van de woelbak redelijk goed verdeeld over de waterdiepte. De drempel functioneert goed in de zin dat er vlak achter de drempel een neer ontstaat met lage stroomsnelheden.



Figuur 3.8 Momentopname van stroomsnelheden in en achter de woelbak.

De indicatieve berekening laat zien dat ook kan worden verwacht dat hoewel de gemiddelde snelheden op het opgaande talud tussen de 0.77 en 1.31 m/s liggen, dat deze snelheden lokaal hoger kunnen zijn. Afgaande op de resultaten is enige schade aan het talud te verwachten.



Figuur 3.9 Momentopname van de stroomsnelheden achter de woelbak bij een benedenwaterstand van NAP-1.75 m, d.w.z. een laagdikte van 0.5 m boven maaiveld van de aanliggende percelen.

3.3.5 Bepaling korreldiameter d_{n50}

Voor de bepaling van de maximaal te verwachten snelheden achter de woelbak wordt de hierboven berekende stroomsnelheid vermenigvuldigd met een factor 1.5 om te compenseren voor niet-uniforme uitstroming. Dit geeft een stroomsnelheid van 1.4 m/s. Met gebruik van de formulerings in [6] wordt een benodigde steengrootte voor een bodembescherming afgeleid voor deze stroomsnelheid volgens

$$d_{n50} = \frac{K_v^2 \bar{u}_c^2}{\psi_c \Delta C^2} \quad (14)$$

K_v heeft een waarde van ca. 2.0 voor de turbulentie achter een watersprong. Formule (14) kan iteratief worden opgelost. Dit levert een steengrootte (d_{n50}) op van ongeveer 11 cm. Gebaseerd op een grove CFD-berekening (zie) wordt geadviseerd om de bodembescherming tot zo'n 10 m achter de woelbakdrempel te leggen. Vanaf deze afstand, aangegeven in Figuur 3.9, is de snelheid minder dan ca. 1 m/s.

Vanwege de bodemeigenschappen (veen) is het niet mogelijk om een betrouwbare schatting te doen van eventuele ontgrondingsdiepte, indien gekozen wordt geen bodembescherming aan te leggen.

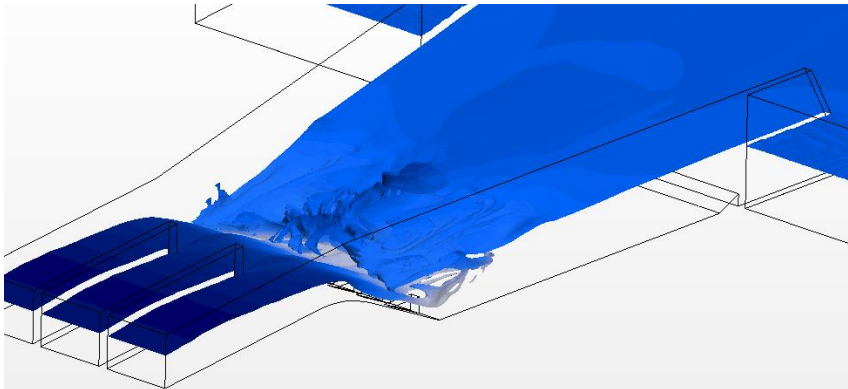
3.4 Aanvullende CFD-berekening woelbak

In de afrondende fase van het project is besloten om een aanvullende CFD-berekening uit te voeren met een relatief grof rooster om de werking van de woelbak te controleren (zie ook 3.3.4). Met name de combinatie van de USBR-vormgeving en een verwijdende woelbak en de periode van lagere waterstanden bij het begin van inundatie gaven aanleiding voor deze aanvullende berekeningen.

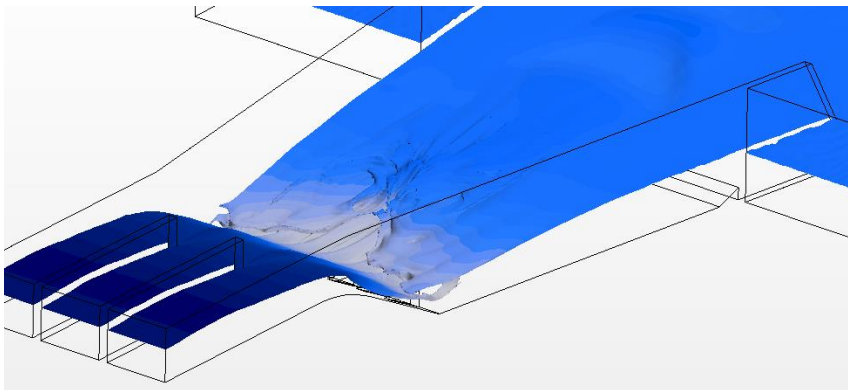
De berekeningen zijn uitgevoerd bij een benedenwaterstand van NAP-1.75 m (overeenkomstig met een waterlaag van 0.5 m boven maaiveld) en bij een benedenwaterstand van NAP-2.25 m (overeenkomstig het moment dat het perceel van Waternet juist gevuld is). Resultaten van de berekening bij een benedenwaterstand van NAP-2.25 m zijn reeds getoond in Figuur 3.8 en Figuur 3.9.

De vergelijking van de berekeningen laat zien dat de woelbak beter functioneert bij de ontwerpwaterstand van NAP-1.75 m. Bij deze waterstand is de positie van de watersprong stabiel en ligt deze dicht bij de helling. Bij de lagere benedenwaterstand zijn tevens meer golven op het wateroppervlak te zien.

Voor beide waterstanden laat CFD zien dat de spreiding van het vuldebiet over de breedte van de woelzone niet uniform is. Er is sprake van een geconcentreerde straal die van locatie wisselt. Aangeraden wordt om hieraan nadere aandacht te besteden.



Figuur 3.10 Woelbak met watersprong bij een benedenwaterstand van NAP-1.75 m.

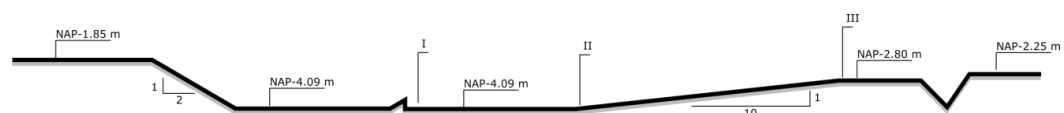


Figuur 3.11 Woelbak met watersprong bij een benedenwaterstand van NAP-2.25 m.

4 Conclusies

In deze rapportage zijn de berekeningen voor de hydraulische vormgeving van het inlaatwerk in de Ronde Hoep besproken. De resulterende vormgeving bestaat uit drie kokers met benedenstrooms een woelbak.

- De benodigde diepteligging van de spuikokers is gebaseerd op een overlaatberekening waarbij er, vanwege de geldende randvoorwaarden, een kritische stroming zal optreden in de spuikokers;
- Verliezen als gevolg van een vuilrooster aan de inlaat en wrijving langs de wanden zijn in deze berekening meegenomen;
- Bij gebruik van drie spuikokers met een breedte van 2,5 m dient de bodem van de spuikokers op NAP-1.85 m te liggen om een over 24 uur gemiddeld debiet van ongeveer 28 m³/s te leveren;
- Wrijving heeft een zeer kleine invloed op de grootte van de afvoer;
- Uitgaande van een spreidingshoek van de vleugelwanden van 8° en tussenwanden van 0.35 m dient de woelbakbodem een niveau van NAP-4.09 m te hebben (gebaseerd op de principes van het USBR-basin);
- De woelbak dient te worden uitgevoerd met breekblokken onderaan het talud tussen spuikokers en woelbak en aan het einde van de woelbak dient een drempel geplaatst te worden;
- Achter de woelbak wordt een bodembescherming over een lengte van 10 m geadviseerd met een d_{n50} van 11 cm.
- Uitgaande van een waterstand in de polder van NAP-2.25 m (d.w.z. op het moment dat de verdiepte zone net is gevuld) geeft onderstaande tabel de snelheden op de verschillende in de figuur aangegeven raai. Raai III bevindt zich binnen het Waternet perceel.



Raai	Dieptegemiddelde stroomsnelheid [m/s]
I	0.93
II	0.77
III	1.31

- De stroomsnelheid juist bovenstrooms van de watersprong, onderaan het talud tussen de kokers en de woelplaat, bedraagt ca. 8 m/s.
- De stroomsnelheid op de naburige percelen (rechts in bovenstaand figuur) verloopt van 1.1 m/s bij een waterstand van NAP-2.25 m naar 0.26 m/s bij een waterstand van NAP-1.75 m.
- Omdat het ontwerp een combinatie van de USBR-vormgeving en een verwijdende woelbak betreft en gezien de periode aan het begin van inundatie, waarbij sprake is van lagere waterstanden dan de ontwerpwaterstand, is een tweetal aanvullende CFD-berekeningen uitgevoerd. Deze laten een minder goede werking zien van de woelbak bij lagere waterstanden: de locatie van de watersprong is minder stabiel en verder van de

helling af gelegen. Ook zijn bij de lagere benedenwaterstand meer golven op het wateroppervlak te zien. Bij beide situaties is de spreiding van het vuldebiet over de breedte van de woelbak niet uniform, hoewel dat in de ontwerpberekeningen wel is aangenomen.

Uitgaande van de randvoorwaarden en de uitgangspunten besproken in de overleggen lijkt bovenstaande vormgeving de beste keus om het debiet zoveel mogelijk te spreiden voordat dit de polder in stroomt. Hierbij kan hoogstwaarschijnlijk niet voorkomen worden dat er na de bodembescherming en op het talud schade zal ontstaan. Ook is er tijdens het begin van de inundatie kans dat er enige schade aan de omliggende percelen zal plaatsvinden. Dit laatste is echter, gezien het gewenste inundatiedebiet, eigenlijk niet te voorkomen. Schade aan het perceel van de opdrachtgever is echter alleen te voorkomen met kostbare bodembescherming, over een grotere lengte dan de aangegeven 10 m. Anderzijds blijft, gezien de relatief korte duur van gebruik, de schade wellicht beperkt.

5 Referenties

- [1] *Inundatiesluis De Ronde Hoep – Ontwerptraject*
Deltares
14 oktober 2016
- [2] *Inundatiesluis De Ronde Hoep – Hydraulisch Advies*
Deltares
17 januari 2017
Kenmerk: 1230345-006-ZWS-0002 (offerte)
- [3] *Open-Channel Hydraulics*
R.H. French
1994
Singapore: McGraw-Hill Book Co.
- [4] *Hydraulic Design Criteria*
US Army Waterways Experiment Station, Corps of Engineers
1977
- [5] *Discharge relations for hydraulic structures and head losses from different components*
Deltares (destijds WL|Delft Hydraulics)
1989
- [6] *Introduction to Bed, bank and shore protection*
G.J. Schiereck
2004
VSSD

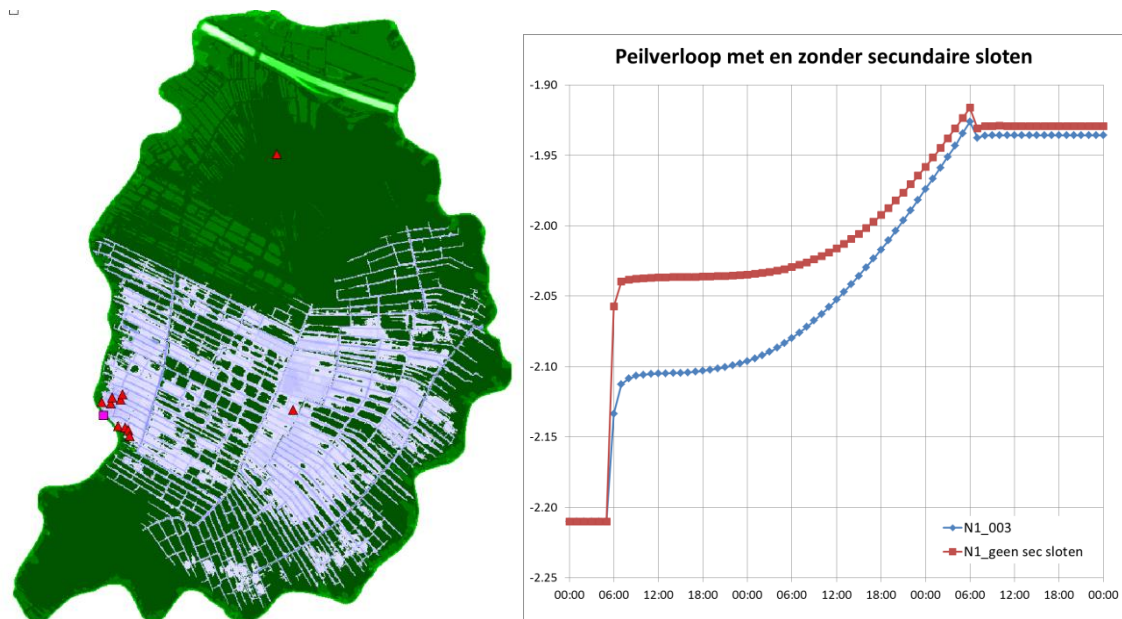
6 Herziene flooding berekening

6.1 Verslag van de bespreking

Op 31 mei 2017 hebben Deltares en Waternet gesproken over de overstromingsberekeningen die door Waternet (dhr. Rob Thijssen) in de periode daarvoor zijn uitgevoerd.

Eerdere berekeningen waren uitgevoerd middels het programma Lizzard Flooding. Dit is in feite een user interface welke een SOBEK-berekening aanstuurt. Deze SOBEK-berekening heeft Waternet als basis gebruikt om vervolgberekeningen rechtstreeks met SOBEK uit te voeren. Hiermee werd het mogelijk om de invloed van verschillende instellingen op de resultaten van de berekeningen te toetsen.

Voorafgaand aan het overleg heeft Waternet aan Deltares resultaten van de berekening doorgestuurd in powerpoint-bestand RH-Res3.pptx. Gedurende het overleg is een nieuwere, aangevulde versie van dit bestand als basis voor de bespreking gebruikt.



Figuur 6.1 Links: voorbeelduitvoer van de SOBEK flooding berekening. Rechts: de invloed de aanpassing van de schematisatie van de sloten op het verloop van de waterstand in de polder nabij de bebouwing.

Het doel van het overleg was om mogelijke aanpassingen in de SOBEK-schematisatie te bespreken. Daartoe was vanuit Deltares SOBEK-expert Govert Verhoeven betrokken. De focus van de berekeningen, en het aandachtspunt in het overleg, was de voorspelling van de maximale waterstand nabij de bebouwing langs de dijk, ten noorden en ten zuiden van de inlaat. Ter plaatse van deze bebouwing geldt een iets hoger bodemniveau dan het aangehouden maaiveldniveau bij de inlaat en in het uitstroomgebied van de polder. Het verschil in hoogteligging is echter beperkt, bij een hoge waterstand in de polder zal sprake zijn van schade aan deze bebouwing. De invloed van een viertal aanpassingen van de schematisatie zijn doorerekend:

- Een voorgestelde aanpassing omvat het expliciet opnemen van de sloten tussen de inlaat en de primaire watergang als een *layer* van 1D knooppunten onder het 2D

overstromingsgebied in de SOBEK berekening. Het resultaat hiervan laat zien dat dit de voorspelde doorstroom verbetert: het peilverloop gedurende het instromen wordt over het algemeen sterk verlaagd: 5 tot 8 cm. Het maximum peil vindt echter plaats aan het einde van de instroomperiode en het verschil in deze maximale waarde is zeer beperkt (orde een centimeter).

- Een andere voorgestelde wijziging van de instellingen betreft de aanpassing van de aangehouden Manning waarde voor de ruwheid van de bodem. Hierbij is een range genomen van braak liggen terrein tot de hoogst mogelijke aannemelijke begroeiing: Manning waardes van 0.02 tot 0.05. Het effect hier van is orde grootte 3 a 4 centimeter.
- Bovenstaande berekeningen hadden als uitgangspunt een instroomduur van 48 uur, dit dient 24 uur te zijn en opvolgende berekeningen gaan dan ook van de correcte instroomduur uit. In dat geval is duidelijk te zien dat het waterpeil nabij de bebouwing tijdens het instroomproces relatief hoog is door de opstuwings van het instromende water. Nadat de inlaat is gesloten verspreidt het water zich over de polder en daalt het peil nabij de woningen ca. 8 a 9 cm.
- Als initiële (grond-)waterstand werd NAP-2.83 m aangenomen. Ten gevolge van regenval en het dichtzetten van het poldergemaal voorafgaand aan het gebruiken van de inlaat is het niet ondenkbaar dat de waterstand in de polder hoger ligt. Een berekening met een initiële waarde van NAP-2.45 m laat zien dat dit resulteert in een toename van de uiteindelijke waterstand met ca. 1 cm. De maximale waterstand, zoals aangegeven aan het einde van het instroomproces, is echter onveranderd. Dat betekent dat de laagdikte van de instroom gelijk blijft.

Naast bovenstaande aanpassingen van de schematisatie zijn onderstaande suggesties of opmerkingen tijdens het overleg aan bod gekomen:

- Een verdere verfijning van het rekenrooster, met toepassing van *nested grids*, om de nauwkeurigheid van de berekeningen te verbeteren.
- Ten aanzien van de schematisatie van de sloten is genoemd dat enkele van de sloten wellicht (vrijwel geheel) zijn geblokkeerd en enkel met kleine duikers zijn verbonden. Dit heeft een effect op de doorstroombaarheid. De toegenomen doorstroombaarheid van de sloten die eerder is genoemd is daarmee wellicht een overschatting en een te gunstige aanname. Bij de eerdere bespreking werd opgemerkt dat de doorstroombaarheid weinig effect had op de maximale waterstand. Dit sloeg echter op een berekening waar de aangenomen instroomduur 48 uur besloeg; wanneer 24 uur wordt gehanteerd kan op basis van de plot een sterkere afhankelijkheid van de doorstroombaarheid van de sloten worden verondersteld.
- Tevens is gesproken over het verwachte effect van een afnemend instromend debiet ten gevolge van het gedurende instromen veranderende Amstelveil. Wellicht neemt hierop de piek aan het einde van het instroomproces af.
- Ten slotte is gesuggereerd om de stroomsnelheden uit SOBEK nader te bekijken, met als doel dat dit inzicht geeft in de te verwachten stroomsnelheden in de polder en de schade die op basis hiervan wordt verwacht.

Los van bovenstaande opmerkingen laten de tijdens de bespreking getoonde berekeningen zien dat de verwachte polderwaterstand de NAP-2.10 m niet overschrijdt. Dit is ruim onder de grens die ten behoeve van de bebouwing rondom de inlaat wordt toegepast.

De verwachte polderwaterstand betekent echter ook dat de maximale laagdikte van het inkomende debiet beperkt is. Met een aangenomen maaiveldniveau van NAP-2.25 m is de laagdikte slechts 15 cm. Dit wijkt af van de gehanteerde aanname in Hoofdstukken 1 t/m 4 van dit rapport. De gevolgen voor het ontwerp van de inlaatconstructie worden in de volgende paragraaf toegelicht

6.2 Gevolgen herziene floodingberekening voor het ontwerp

In de voorgaande hoofdstukken is voor het woelbakontwerp uitgegaan van een waterstand in de polder van (NAP-2.25 m + 0.50 m) NAP-1.75 m. Nu geeft de herziene flooding berekening een benedenwaterstand van (NAP-2.25 m + 0.15 m) NAP-2.10 m. Dit verschil heeft invloed op het ontwerp. Dit heeft gevolgen voor zowel de benodigde afmetingen van de woelbak als de stroomsnelheden in en buiten het perceel:

Afmetingen woelbak

De afmetingen, met name de diepte van de woelbak is zo gekozen dat de benedenstroomse laagdikte een watersprong teweegbrengt en daarmee een energieverlies in de stroming optreedt. Bij een lagere waterdiepte benedenstrooms (geen of slechts weinig water) schiet het water simpelweg door de woelbak heen. Met het gecorrigeerde uiteindelijke benedenstroomse waterpeil van NAP-2.10 m is er een behoorlijke waterdiepte aanwezig, maar minder dan waarop de woelbak is ontworpen. De watersprong zal daarmee minder effectief zijn, het energieverlies is kleiner dan gewenst.

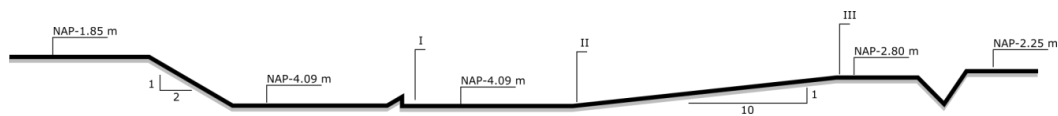
In Sectie 3.4 is bovendien gebleken dat de stroming in de woelbak ongunstiger presteert wanneer deze een kleinere benedenstroomse laagdikte kent: de stroming veroorzaakt veel golven en spreidt slechter dan gewenst. Dit bleek bij een waterstand van NAP 2.25 m maar zal waarschijnlijk ook gelden bij een waterstand van NAP-2.10.

Uitgaande van een benedenstroomse waterstand van NAP-2.10 m geeft een nieuwe aanvullende berekening aan dat een woelbak met bodemniveau van ca. NAP-4.54 m nodig is (i.p.v. de huidige NAP-4.09 m).

Stroomsnelheden in het perceel

Door de kleinere waterdiepte op de rand van het perceel van Waternet zullen de stroomsnelheden groter moeten zijn om hetzelfde debiet door te laten. Dit effect is nabij de watersprong relatief beperkt. Gebaseerd op de in Hoofdstuk 1 t/m 4 vormgegeven geometrie verandert de waterdiepte daar van 2.34 m naar 1.99 m en is de gemiddelde stroomsnelheid dus 17% hoger. Bij raai 3 in het onderstaande figuur is het bodemniveau hoger, de gemiddelde stroomsnelheid moet dan al 50% hoger liggen in het geval van een waterniveau van NAP-2.10 m. Dit leidt tot de in onderstaande tabel gegeven verwachte snelheden in de raaien. Opgemerkt moet wel worden dat in deze berekening, net als in Paragraaf 3.3.1, uit is gegaan van een spreiding in de breedte van 1:10, de stroming. Omdat de stroming een talud op loopt is de spreiding in werkelijkheid wellicht groter en zullen de snelheden dan kleiner zijn.

Raai	Dieptegemiddelde stroom- snelheid [m/s]	
	<i>bij 50 cm laagdikte</i>	<i>bij 15 cm laagdikte</i>
I	0.93	1.09
II	0.77	0.91
III	1.31	1.96



Stroomsnelheden op naburige percelen

Voor de stroming op de naburige percelen, met maaiveldniveau NAP-2.25 m is het relatieve verschil in waterstand het grootst. Een gecorrigeerde laagdikte van 15 cm i.p.v. 50 cm leidt tot een gemiddelde stroomsnelheid die maar liefst een factor 3.3 zo hoog is. De stroomsnelheid hier is slechts 0.26 m/s (zie Paragraaf 3.3.2) en met de gecorrigeerde laagdikte zal deze dan 0.87 m/s zijn.

Opgemerkt kan worden dat bij aanvang van de inundatie er nog geen sprake is van enige waterlaag. De minimale laagdikte waarbij het volledige debiet over het maaiveld kan stromen kan worden geschat aan de hand van een lange overlaat-berekening. Dit resulteert in een benodigde laagdikte van 12 cm, de snelheid daarbij bedraagt 1.1 m/s. Dit is de maximale (ruimtelijk gemiddelde) stroomsnelheid en deze treedt op aan het begin van het inundatieproces. Tevens wordt opgemerkt dat, net als eerder, voor deze berekende snelheden een spreiding over de volledige perceelgrens van 230 m is verondersteld. De stroming zal waarschijnlijk niet perfect geüniformeerd zijn, lokaal kunnen dan hogere snelheden worden verwacht.

Voor een nauwkeuriger berekening van de te verwachten stroomsnelheden in de polder en op het perceel, bij een lagere benedenstroomse waterstand en uitgaande van het voorliggende ontwerp, worden nadere berekeningen aangeraden. Wellicht voorzien de momenteel lopende SOBEK berekeningen hierin.

Beperken van de stroomsnelheden

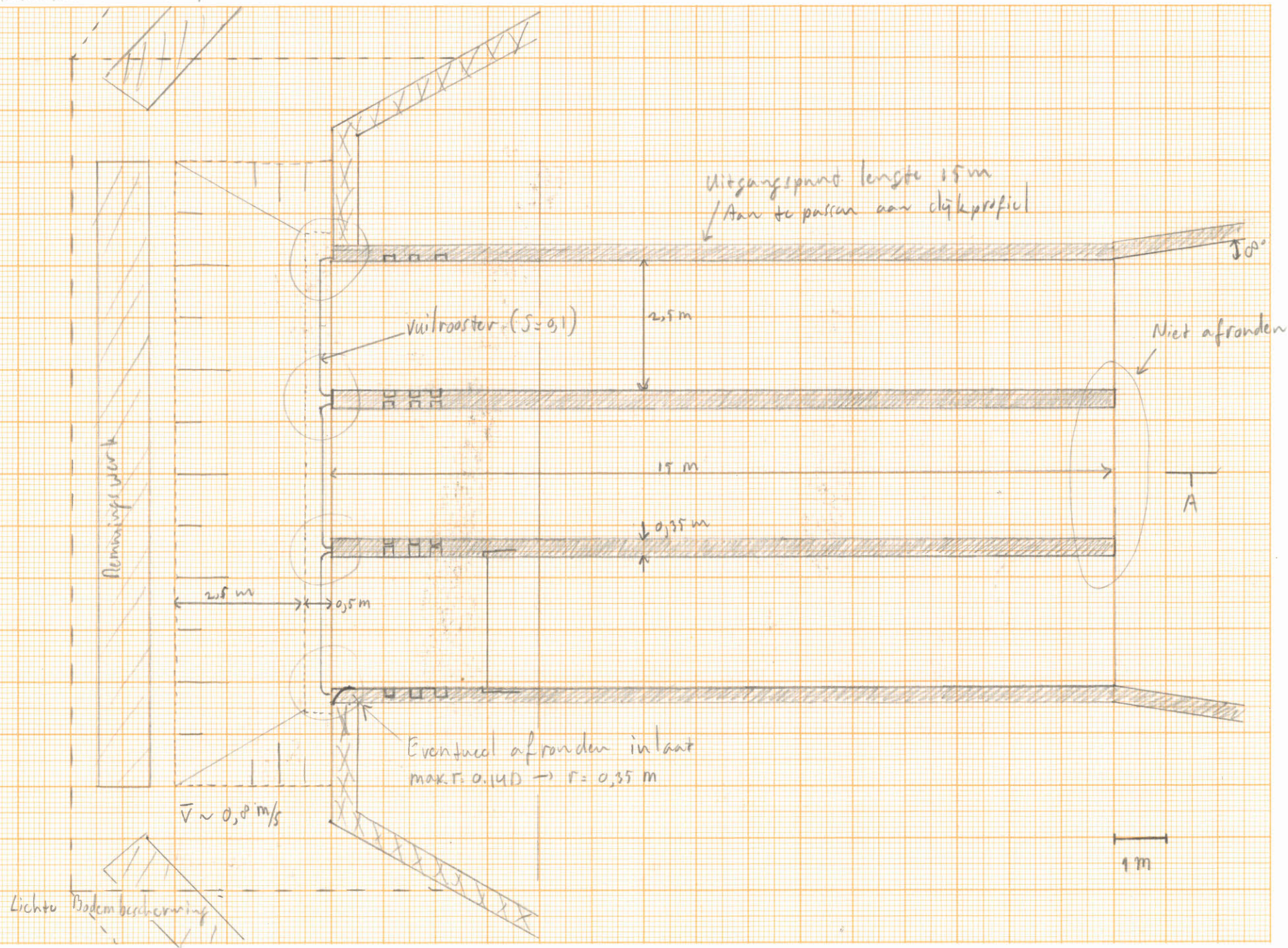
Om de stroomsnelheden op het Waternet perceel en daar omheen te beperken kan er voor gekozen worden een inlaatregime toe te passen: het één voor één openen van de verschillende openingen. Zo kan de woelbak en woelzone met een kleiner debiet, en beperkte (bodem)stroomsnelheden worden gevuld. Pas wanneer in de woelbak sprake is van een voldoende waterdiepte (d.w.z. na de tijd benodigd om het volume van de woelbak te vullen) wordt het volledige inlaatdebiet toegestaan.

Het verloop van de stroomsnelheden in de naburige percelen is dan als volgt. Wanneer één schuif is geopend loopt het waterniveau op tot ca. 6 cm boven maaiveld. Pas dan zal het volledige debiet vanuit deze ene inlaatkoker het perceel uit stromen (tot die tijd neemt het waterniveau op het perceel toe en stroomt een kleiner deel uit). De maximale stroomsnelheid is dan 0.75 m/s. Na het openen van de tweede schuif loopt de laagdikte op tot 9 cm, met snelheden tot 0,95 m/s. Bij drie actieve inlaten is, zoals bovenstaand genoemd, de stroomsnelheid 1.1 m/s met een laagdikte van 12 cm. Eventuele opstuwning van het waterpeil in de polder is in deze berekening niet meegenomen. Wanneer hiervan sprake is zal de stroomsnelheid afnemen; om de stroomsnelheden te beperken moet dus een beperkt aantal actieve openingen worden gehanteerd totdat de laagdikte door opstuwning is toegenomen. Dit zou moeten volgen uit SOBEK berekeningen op basis van één of twee actieve openingen.

A Schetsen vormgeving spuikokers

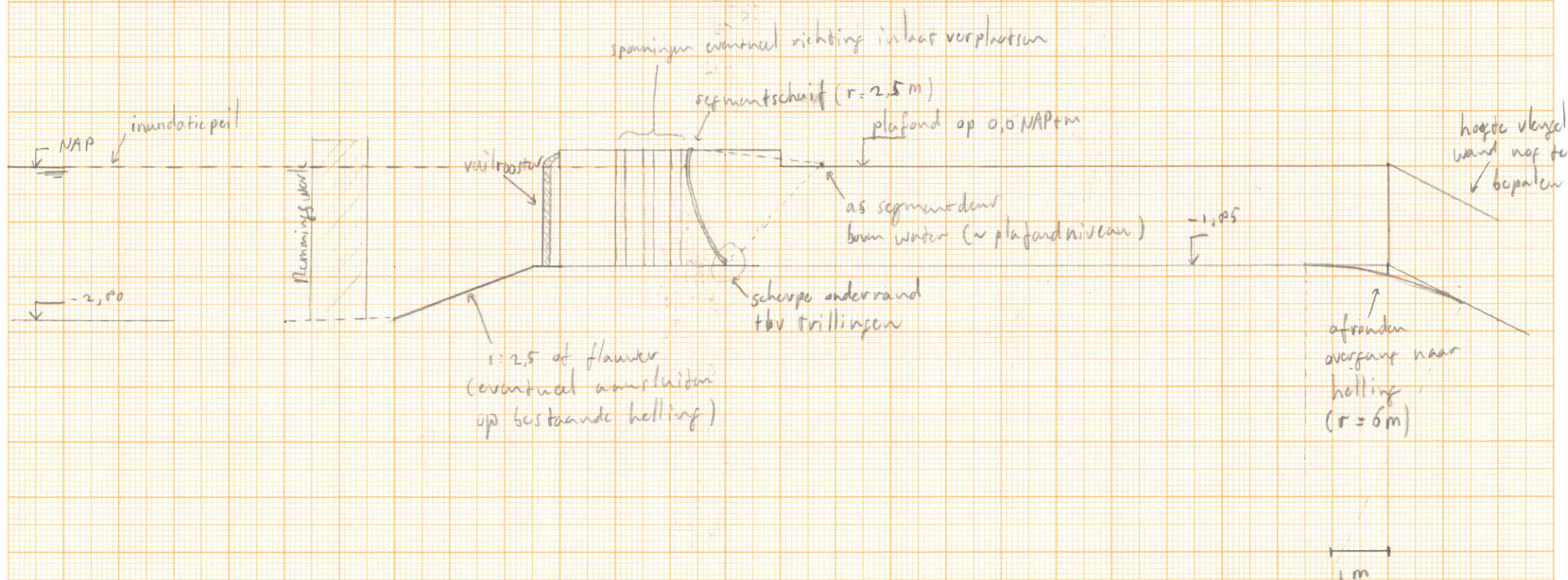
11200705 - Inundatiehuis Ronde Hoop

Boven aan zicht



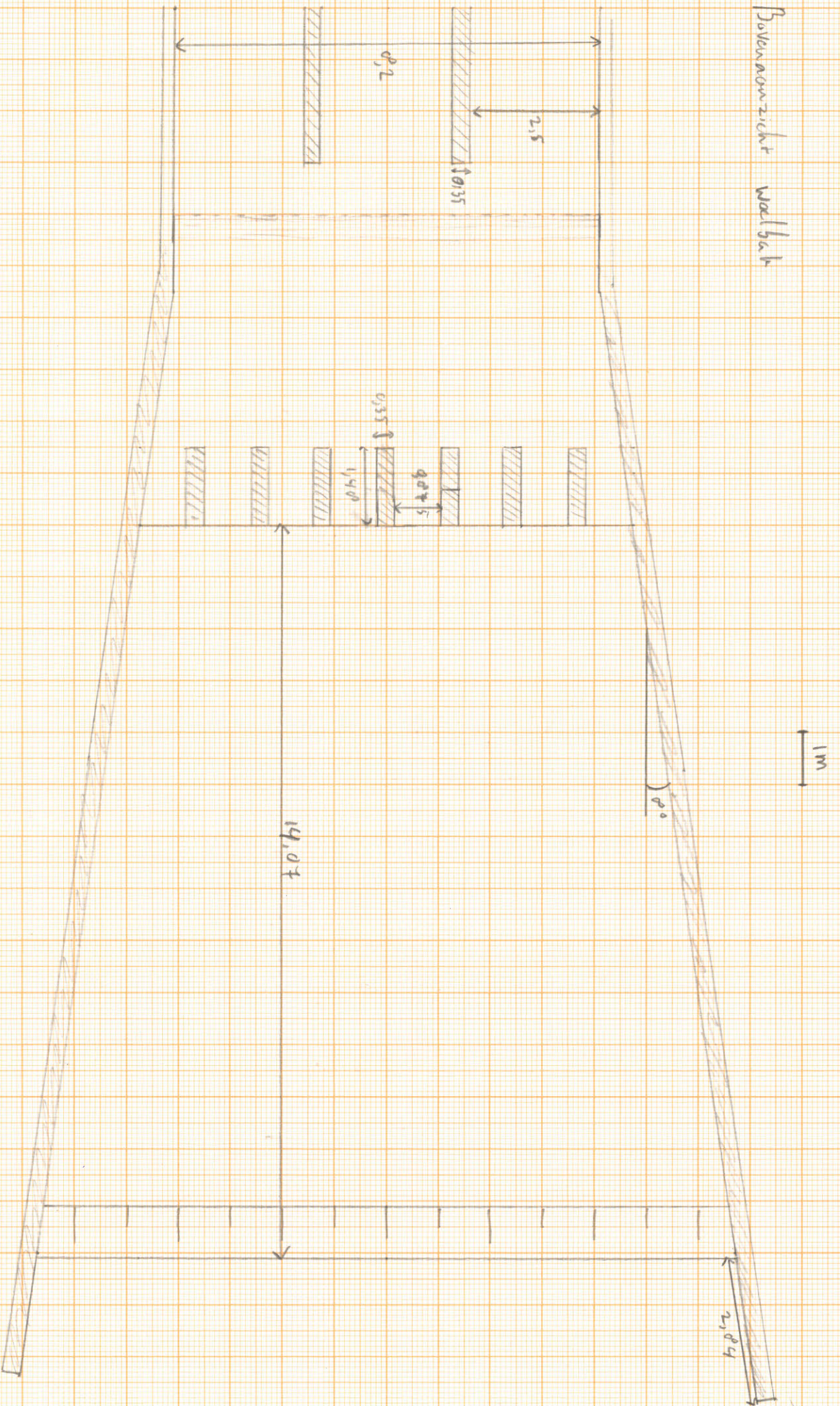
11200705- Inundatiehuis Ronde Moer

Doorsnede A-A

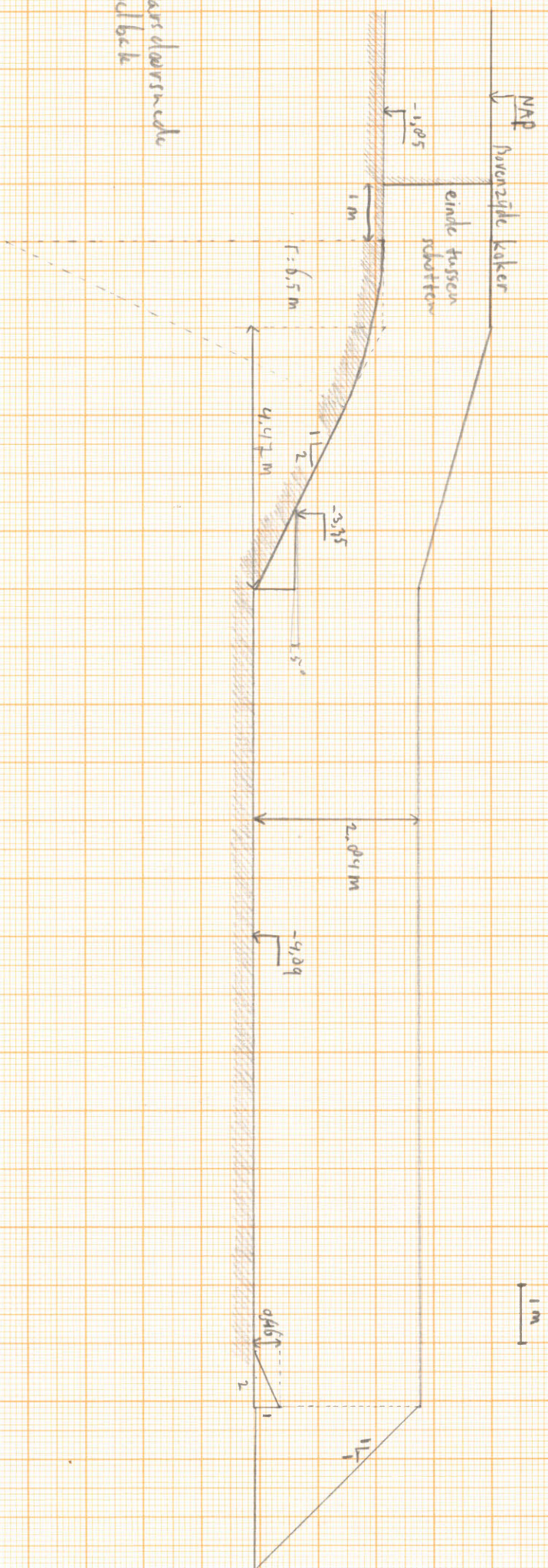


B Schetsen vormgeving woelbak

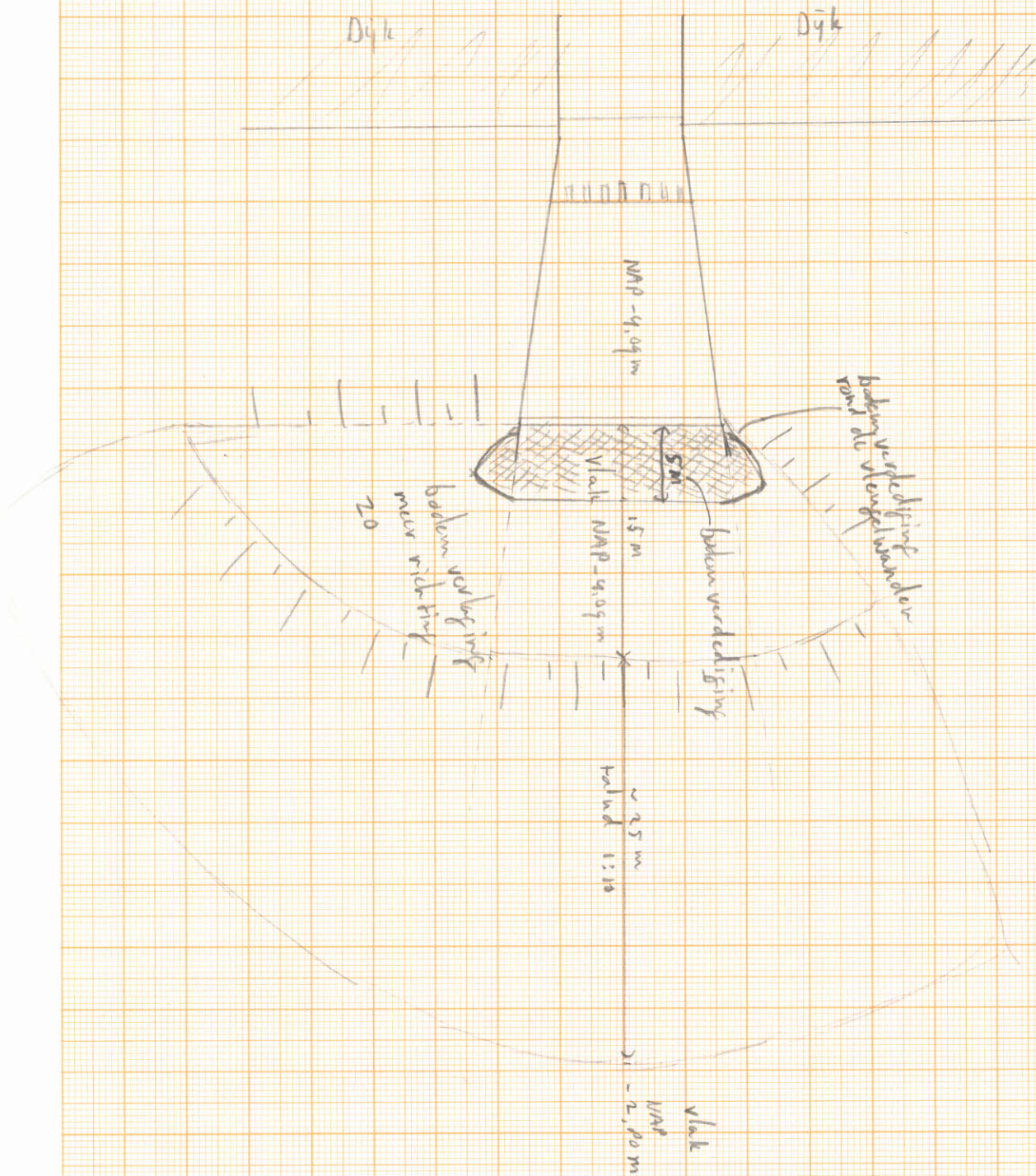
Bodenansicht waldb



11200705 - Involutielijn Rinde Hiep



Dwaars doorsnede
vuelbek



C SAF-basin

Indien er toch gekozen wordt voor het aanbrengen van breekblokken wordt geadviseerd om de volgende relaties voor de lengte en de breekblokken aan te houden. Onderstaande relaties zijn afgeleid voor SAF-basins.

Voor de minimale lengte van de woelbak kan worden uitgegaan van

$$l_{wb} = 4.5h_2^*Fr_1^{-0.46}, Fr_1 < 12 \quad (1)$$

De USBR geeft aan dat dit wordt beschouwd als een zeer minimale lengte. Er wordt daarom geadviseerd om deze lengte te vermenigvuldigen met een veiligheidsfactor van 1.5 tot 2. Het aantal breekblokken aan het einde van de helling is gegeven door

$$N_{cb} = \frac{b_{cb}}{1.5h_1} \quad (2)$$

Met b_{cb} de breedte van de woelbak onderaan de helling en N_{cb} het op gehele aantallen afgeronde aantal breekblokken. De breedte en tussenruimte van de breekblokken wordt dan gegeven door

$$w_{cb,1} = w_{cb,2} = \frac{b_{cb}}{2N_{cb}} \quad (3)$$

De hoogte van de breekblokken is gelijk aan de waterdiepte onderaan de helling, h_1 .

Voor de breedte en tussenruimte van de breekblokken op de bodem van de woelbak moet rekening gehouden worden in de bepaling van de verwijding van de woelbak. Uitgaande van de specificatie voor het SAF-basin bevinden de breekblokken zich op een derde van de woelbaklengte na de overgang van helling naar woelbakbodem. De breedte van de woelbak op deze locatie is dus gelijk aan

$$b_{bb} = b_{cb} + \frac{2l_{wb}}{3 \tan \alpha} \quad (4)$$

Met α de hoek van de woelbakwanden. Het aantal breekblokken is dan (afgerond op een geheel getal)

$$N_{bb} = \frac{b_{bb}}{1.5h_1} \quad (5)$$

en de breedte en tussenruimte is

$$w_{bb,1} = w_{bb,2} = \frac{b_{bb}}{2N_{bb}} \quad (6)$$

De breekblokken worden uitgevoerd met een platte bovenzijde en aan de achterzijde een 1:1 helling. De lengte van de platte bovenzijde is gegeven door

$$l_{bb,top} = 0.2h_1 \quad (7)$$

Met een hoogte van de breekblokken gelijk aan h_1 geeft dit een lengte van de breekblokken van

$$l_{bb} = 1.2h_1 \quad (8)$$

Verder dient er voor gezorgd te worden dat de breekblokken in de woelbak (niet die aan het einde van de helling) minimaal een afstand van $\frac{3}{8}h_1$ van de zijwanden staan.

Aan het einde van de woelbak dient een drempel geplaatst te worden. De breedte van de drempel wordt gegeven door de breedte van de woelbak,

$$b_{dr} = b_{cb} + \frac{2l_{wb}}{\tan \alpha} \quad (9)$$

De hoogte van de drempel is

$$h_{dr} = \frac{0.07h_2}{c_{saf}} \quad (10)$$

c_{saf} is een correctiefactor afhankelijk van het Froude-getal en wordt gegeven door

$$\begin{aligned} c_{saf} &= 1.1, & Fr < 1.7 \\ c_{saf} &= 1.1 - \frac{Fr^2}{120}, & Fr < 5.5 \\ c_{saf} &= 0.85, & Fr < 11 \\ c_{saf} &= 1.0 - \frac{Fr^2}{800}, & Fr < 17 \end{aligned} \quad (11)$$