

Hydraulisch ontwerp waterscherp

Pilot Krammerjachtensluis



Titel

Hydraulisch ontwerp waterscherm

Opdrachtgever

Rijkswaterstaat Zee en Delta
locatie Middelburg

Project

1207406-003

Kenmerk

1207406-003-HYE-0001

Pagina's

57

Trefwoorden

Waterscherm, PKJS, Krammerjachtensluis, CFD, schaalmodel, bellenscherm, uniformering, drukvat, verdeling

Samenvatting

In de pilot Krammerjachtensluis (PKJS) zal een waterscherm worden toegepast. Het huidige rapport presenteert de ontwikkeling van de waterschermbak die voor dit project is uitgevoerd. Deze ontwikkeling omvatte het vormgeven van een ontwerp op basis van de fysieke randvoorwaardes en gewenste prestatie, het doorontwikkelen van dit ontwerp middels numerieke berekeningen en ten slotte het vaststellen van de prestatie van ontwerpvarianten met fysiek schaalmodelwerk.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	24-07-2014	P.P.D. van der Ven		O.M. Weiler		K.J. Bos	
1	15-02-2015	P.P.D. van der Ven		O.M. Weiler		K.J. Bos	

Status

definitief

Inhoud

1	Inleiding	1
1.1	Achtergrond project	1
1.2	Vraagstelling huidig onderzoek	1
1.3	Scope	1
1.4	Opbouw onderzoek/ rapport	2
1.5	Werking waterscherm als zoutlekreducerende maatregel	2
1.6	Afkortingen rapport	4
2	Concept en criteria	5
2.1	Concept werking waterscherm	5
2.2	Randvoorwaarden	5
2.2.1	Afmetingen	5
2.2.2	Waterstanden en debieten	6
2.2.3	Constructieve eisen	6
2.2.4	Robuustheid	6
2.3	Criteria resultaten	6
2.3.1	Uniformiteit uitstroomsnelheid	6
2.3.2	Energieverlies	7
3	Ontwerp inwendige geometrie	9
3.1	Waterschermbak ontwerp 1	9
3.2	Waterschermbak ontwerp 2	10
4	Numerieke simulaties	13
4.1	Inleiding	13
4.1.1	OpenFoam	13
4.2	Geometrie en rekenrooster	13
4.3	Woelbakontwerp 1	14
4.3.1	Tweedimensionale berekeningen	15
4.3.2	Driedimensionale berekeningen	16
4.3.3	Conclusie	23
4.4	Woelbakontwerp 2	24
4.4.1	1 sectie	24
4.4.2	2 secties	26
4.4.3	Conclusie	28
4.5	Conclusie	28
5	Fysiek schaalmodelwerk	29
5.1	Uitgangspunt	29
5.1.1	Resultaten numerieke berekeningen	29
5.1.2	Voortschrijdend inzicht inpassing in kolk	29
5.1.3	Aanpassing van het ontwerp	30
5.2	Doel van het schaalmodelwerk	30
5.3	Opzet van het schaalmodelwerk	30
5.3.1	Schaling	30
5.3.2	Onafhankelijkheid van weerstand	31
5.3.3	Mogelijk maken van aanpassingen	32

5.3.4	Zichtbaar maken van stroming	33
5.3.5	Verschillen tussen schaalmodel en werkelijk ontwerp	33
5.4	Meetmethode	33
5.5	Meetvarianten en -condities	35
5.5.1	Debieten	35
5.5.2	Ontwerpen	35
5.6	Proevenmatrix	36
5.7	Meetresultaten	38
5.7.1	Drukval als functie van debiet, voor de verschillende varianten	38
5.7.2	Uniformiteit	40
5.8	Robuustheid van de geometrie: gedrag bij verstopping	43
5.9	Nauwkeurigheid van metingen	44
5.9.1	Herhaalbaarheid	44
5.9.2	Spreiding in tijd	44
5.10	Conclusies	45
6	Eindontwerp	47
7	Recapitulatie en conclusies	49
8	Aanvullende inzichten	53
8.1	Verdelende aspecten in het hydraulische ontwerp	53
8.2	Interactie van stralen in numeriek werk	53
8.3	Correctie van drukopnemers	54
9	Referenties	57
	Bijlage(n)	
A	Eisen waterschermbak	A-1
B	Foto's fysiek schaalmodelwerk	B-1
C	Numerieke achtergrond	C-1
C.1	Finite-volume methode	C-1
C.2	Discretisatieschema's	C-2
C.2.1	Central-differencing	C-2
C.2.2	Upwind	C-2
C.2.3	Linear upwind	C-2
C.2.4	Gradiënt discretisatie	C-3
C.2.5	Tijdsdiscretisatie	C-3
C.2.6	Koppeling van druk en momentum	C-3
D	snappyHexMesh	D-1
E	Opzet van het rekenrooster voor de waterschermberekeningen	E-1
E.1	Geometrie	E-1
E.2	Rekenrooster	E-1
E.3	Numerieke overwegingen	E-2
F	Eindontwerp	F-1

1 Inleiding

1.1 Achtergrond project

In de periode mei – oktober 2014 zal in de noordelijke Krammer jachtensluis (JS2) een pilot (pilot Krammerjachtensluis, PKJS) worden uitgevoerd. Hierbij worden verschillende innovatieve zout-zoet scheidingsmethodes beproefd met het oog op de mogelijke toepassing hiervan in de Krammer duwvaartsluizen. Meer achtergrond van dit project wordt o.a. gegeven in [1].

Aan de Oosterscheldezijde van de kolk van JS2 zal een bellenscherm worden gecombineerd met een zoetwaterscherm. Praktijkervaring met deze combinatie is eerder opgedaan tijdens metingen in de Stevinsluizen [2]. Het toepassen van een waterscherm versterkt de reductie van zoutindringing op twee manieren: (1) door over de kolkbreedte zoet water aan te voeren en (2) door de mate van indringing van de zouttong aan de drempel te verminderen door een opwaartse stroming te creëren. Op de werking van het waterscherm wordt dieper ingegaan in Sectie 1.5. Het waterscherm moet een debiet leveren afhankelijk van de waterdiepte.

Een efficiënt en effectief gebruik van zoetwater in het waterscherm vereist een uniforme verdeling van het water. Gezien de vereiste beperking van energieverbruik kan een gelijke verdeling van debiet niet worden bewerkstelligd met het principe van een grote drukval over een beperkte doorlaatflens (een zgn. orifice) maar wordt gevraagd om een vormgeving met minder hydraulische verliezen.

In het voortraject is gekozen voor een concept waarbij het inwendige van de waterschermbak in compartimenten wordt gedeeld. De verdeling over de kolkbreedte is hierin gebaseerd op twee processen. Een eerste ruwe verdeling vindt plaats door een plaat met gaten; vervolgens wordt in de compartimenten een 'wals' gevormd welke een verdere verdeling over de horizontaal teweegbrengt.

De uitgangspunten van de waterschermbak zijn vastgelegd in het definitief ontwerp (DO, [4]) en de vraagspecificatie eisen (VSE, [5]). De interne vormgeving (het hydraulisch ontwerp) is, na gunning, binnen de voorliggende studie uitgewerkt. Met memo 1207406-003-HYE-0002 dd. 19-september 2013 is dit ontwerp toegeleverd aan de aannemer belast met de ombouw van de sluis.

1.2 Vraagstelling huidig onderzoek

Het hydraulisch ontwerp van de waterschermbak dient, op basis van bovengenoemd concept, verder uitgewerkt te worden. Hierbij is van belang de resulterende uniformiteit van het uitstromende debiet, evenals de eisen gesteld in de ontwerpdocumenten. De prestatie van het ontwerp moet vervolgens vastgesteld worden bij verschillende debieten.

1.3 Scope

Het voorliggende onderzoek beschouwt de aanvoer van water vanuit de waterschermbak, m.a.w. de stroming juist boven de waterschermbak. Hiertoe wordt de interne geometrie vastgesteld, waarbij gekeken wordt naar eisen gesteld in de VSE, [5]. Een beschouwing van de effectiviteit of werking van het waterscherm ten bate van het beperken van de zoutindringing is geen deel van dit onderzoek.

1.4 Opbouw onderzoek/ rapport

De lijn in dit onderzoek en deze rapportage is als volgt.

- 1 Inventariseren van relevante eisen en opzetten van een initieel ontwerp;
- 2 Verfijnen van deze geometrie met 2-D en 3-D numerieke berekeningen;
- 3 Vaststellen van de werking van deze geometrie met een fysiek schaalmodel

Taak 1 Inventariseren van relevante eisen en opzetten van een initiële geometrie

Uit [2] en [3] volgt de begrenzing van de uitwendige geometrie van de waterschermbak. Hiervan uitgaande wordt het concept voor de inwendige geometrie ontwikkeld. Hierbij moet rekening worden gehouden met de prestatiecriteria vanuit het pilotproject, met name de gewenste robuustheid van het ontwerp, alsmede de capaciteit van de gekozen pomp. Ook de fysieke inpassing in de kolk is hierbij aandachtspunt. De verspringing in de kolkwand, waarop de waterschermbak in de kolk zal worden bevestigd geeft een lastige verdeling; er wordt voorzien dat dit gedeelte nadere aandacht nodig heeft.

Taak 2 Verfijnen van deze geometrie met 2-D en 3-D numerieke berekeningen

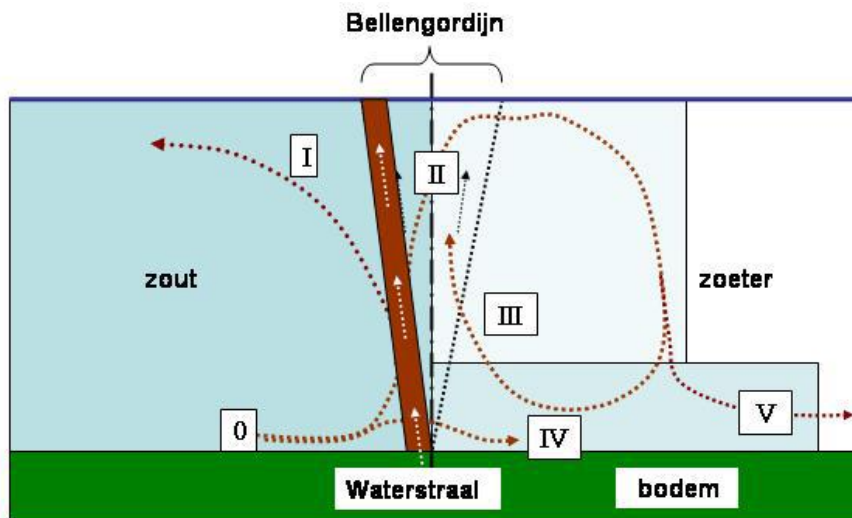
Met behulp van een numeriek (CFD) model wordt de werking van het concept bekeken. Hierbij wordt gekeken naar de interne stroming, eerst in een dwarsdoorsnede en vervolgens volledig 3-dimensionaal. De interne vormgeving van de waterschermbak zal binnen deze taak worden aangepast, gericht op een uniform debiet door de uitstroomopening.

Taak 3 Vaststellen van de werking van deze geometrie met een fysiek schaalmodel

Ter evaluatie van de in Taak 2 ontwikkelde waterbakgeometrie zal deze op schaal worden gebouwd en getest. Hiervoor wordt een model geconstrueerd waarbij de binnenmaten correct geschaald zullen worden. De meting zal één van de twee secties beschouwen, waarbij gekozen wordt voor de minder gunstige van de twee secties. De metingen zullen verschillende debieten omvatten, binnen het bereik van de in werkelijkheid te verwachten debieten. De prestatie van de waterschermbak wordt vastgesteld op basis van de uitstroom juist boven de waterbakspleet.

1.5 Werking waterscherm als zoutlekreducerende maatregel

Onderstaand is de werking van het waterscherm toegelicht, zoals opgenomen in [2]. Hoewel de voorliggende studie niet zozeer ingaat op de werking van het scherm maar op de aanvoer van water naar dit scherm, wordt een begrip van de werking van belang geacht.



Figuur 1.1 Zoutlekbepurende werking luchtbellenscherm met waterscherm (bruine band) op zout-zoet overgang (geopende sluisdeur) in verticale langsdoorsnede van een sluishoofd; uit [2].

In bovenstaand figuur zijn verschillende stromen aangegeven.

0. Aanstromend zout aangedreven door drukverschil door horizontale verschillen in zoutgehalten
- I. Opwaarts transport van zout en loslating naar de zoute zijde.
- II. Menging van zout in zoeter water in het luchtbellenscherm en gedeeltelijk transport van zout naar de zoetere zijde.
- III. Recirculatie van inkomend zout en aangedreven door het luchtbellenscherm.
- IV. Binnendringen van zout aan de teen van het luchtbellenscherm.
- V. De vorming van een zwakkere zouttong door de beperkte levering van zout.

Een belangrijk mechanisme van een luchtbellenscherm als zout-zoet scheiding is de verticale impuls van water dat door het scherm wordt meegetrokken. Over een horizontale zout-zoet scheiding heerst een horizontaal drukverschil. Bij gelijke waterstand wordt het horizontale drukverschil veroorzaakt door het grotere gewicht van de waterkolom aan de zoute zijde in vergelijking met de zoete zijde. Bij toenemende verticale impuls van het meegesleurde water kan een groter horizontaal drukverschil over het luchtbellenscherm heersen voordat het scherm zó sterk ombuigt dat het zijn coherentie verliest en zouter water doorlaat.

Bij dit mechanisme vormt de teen van het alleenstaande luchtbellenscherm de zwakste plek. Immers bij de teen begint het meesleuren van water dat pas hoger in de waterkolom een aanmerkelijke verticale impuls krijgt. Anderzijds heerst bij de teen het grootste horizontale drukverschil. Een goed werkend Δ -luchtbellenscherm versterkt de teen al door meerdere rijen van onderling versprongen diffusers naast elkaar tegen elkaar in blazend op te stellen. Hiermee wordt een dik pakket luchtballen gerealiseerd, dat voor zout minder doordringbaar is dan een smaller of ijler luchtbellenscherm uit een of meer geperforeerde buizen.

Een verdere verbetering van de prestatie van het bellenscherm wordt bewerkstelligd door het toepassen van een waterscherm. Het waterscherm stroomt verticaal uit een spleet met een bepaalde snelheid. Vanaf de uitstroom aan de kolkbodem heeft ons waterscherm dus een verticale impuls. Het waterscherm buigt dan weinig af onder het heersende horizontale drukverschil.

Een tweede werking van het waterscherm, volgend uit numeriek onderzoek [3], is dat een zoetwaterscherm niet alleen de teen van een luchtbellenscherm verdedigt maar ook zoeter water via stroombaan II in Figuur 1.1 naar de kolk voert. Hiermee brengt het water dat alsnog doordringt minder zoutmassa mee.

1.6 Afkortingen rapport

WS	waterscherm
ZY	Zijpe (Oosterschelde)
ZM	Volkerak-Zoommeer
Q	afvoer

2 Concept en criteria

Uit [2] en [3] volgen de eisen welke aan de waterschermbak worden gesteld. Deze worden onderstaand gegeven als randvoorwaarden, waarop het ontwerp is gebaseerd, en toetsingscriteria, waarmee de werking van het ontwerp wordt geëvalueerd.

2.1 Concept werking waterschermbak

In het voortraject is gekozen voor een concept waarbij het inwendige van de waterschermbak in compartimenten wordt gedeeld. Deze compartimenten werken op de volgende wijzen.

- Om te voorkomen dat de stroming een zeer geconcentreerd pad van minimale weerstand kiest, kunnen doorstroomopeningen van beperkte afmetingen deze weerstand verdelen over de baklengte en hiermee de stroming grof verdelen.
- Vernauwingen en verbredingen uniformeren de stroming door deze afwisselend te versnellen en te vertragen.
- In compartimenten met voldoende volume kan de stroming een neer veroorzaken – een ‘wals’ – welke de stroomsnelheden over de baklengte middelt: schuifspanningen remmen lokale stromingen wanneer deze sneller zijn dan de wals-draaiing en versnellen deze stromingen waar ze trager zijn dan de wals-draaiing.

Een combinatie van deze processen wordt toegepast, waarbij wordt opgemerkt dat de eerste wijze in de hoogste mate een energieverlies induceert.

2.2 Randvoorwaarden

2.2.1 Afmetingen

De uitwendige afmetingen van de waterschermbak worden gegeven in [4] (tekening DET-830) en [5].

- De bak bestaat uit twee secties in de kolkbreedte en dient aan te sluiten op de kolkwanden, de lengte van een enkele sectie is daarmee 4,40 m.
- De bak wordt aan de onderzijde begrensd door het plafond van het riool, op NAP-5,2 m, dat onderin de kolk uitkomt. De bovenkant van de waterschermbak dient gelijk te zijn aan NAP-3,8 m, volgend uit de eis dat de vaarwegdiepte (NAP-3,7 m) niet beperkt mag worden en de reservering voor toevoerleidingen van het bellenscherm. Hiermee is de maximale hoogte 1,40 m. De uitstroom van de waterschermbak mag tot NAP-3,7 m komen.
- De breedte van de segmenten (in de lengte van de kolk), ten slotte, is 2,142 m en kent een marge van $\pm 20\%$. Hiermee is de maximale breedte 2,57 m.

In de genoemde documenten zijn verschillende uitsparingen gegeven.

- Over de lengte van de waterschermbak is een uitsparing gereserveerd voor het bellenscherm, juist achter de uitstroomopening. Deze uitsparing is (hxb) ca. 35 cm x 60 cm, d.w.z. de bovenkant van de waterschermbak is hier verlaagd naar NAP-4,15 m.
- De nokken van de sluiswanden, waarop de waterschermbakken geïnstalleerd zullen zijn, liggen op hoogte NAP-4,4 m en verminderen de kolkbreedte daaronder met 0,425 m aan weerszijden van de kolk.

2.2.2 Waterstanden en debieten

Het debiet van het waterscherm is afhankelijk van de waterstand erboven: het peil van de voorhaven aan Zijpe-zijde. Het werkgebied van het waterscherm is gekozen op NAP-1,7 m tot NAP+2,5 m.

Gebaseerd op ervaringen in de Stevinsluis zijn de bijhorende debieten van het waterscherm (beide secties gesommeerd) bepaald, opgenomen in [2] en [3] en hier in onderstaande tabel gegeven. Het debiet verloopt lineair met de waterstand. Dit debiet wordt aangevoerd door twee leidingen met diameter 500 mm, waarop de waterschermbakken moeten aansluiten.

Tabel 2.1 Ontwerpdebieten bij verschillende waterstanden, voor het gehele waterscherm.

Waterstand [mNAP]	Debiet [L/s]
-1,7	600
2,5	1400

De getalswaarden in bovenstaande tabel zijn overgenomen uit de genoemde documenten. Wanneer wordt teruggegrepen naar de brondocumenten volgt dat het bereik van debieten eigenlijk uitkomt op 440 L/s tot 1400 L/s. In het brondocument staan de waardes in de berekening juist gegeven, de gegeven uitkomst volgt hier niet uit. In het voorliggende onderzoek is uitgegaan van de in de ontwerpdocumenten gegeven ondergrens, 600 L/s voor de gehele waterscherm; per sectie 300 L/s.

2.2.3 Constructieve eisen

De waterschermbak wordt geconstrueerd van constructiestaal. Verder is belangrijk op te merken dat de waterschermbak, wanneer geïnstalleerd in de kolk, zal leunen op de nokken in de kolkwanden. Het bellenscherm wordt constructief opgenomen aan de waterschermbak.

2.2.4 Robuustheid

De waterschermbak dient voldoende robuust te zijn. Hierbij kan gedacht worden aan de volgende aspecten.

- Slib, roest of de aangroei van algen in de waterschermbak;
- Verstopping op enige manier;
- Beschadigingen, bijvoorbeeld door een vallend anker op de bak.

In het voorliggende onderzoek is aan dit aspect invulling gegeven door in schaalmodelonderzoek na te gaan wat het effect is van een verstopping van de kleinere doorstroomopeningen binnen de waterschermbak.

2.3 Criteria resultaten

De prestatie van de waterschermbak zal op de volgende punten worden getoetst.

2.3.1 Uniformiteit uitstroomsnelheid

Het debiet dient gelijkmatig verdeeld te zijn over de breedte van de kolk (d.w.z. de lengte van de uitstroomspleet). Het document Definitief Ontwerp [4] geeft aan dat de uniformiteit ca. 5% moet bedragen. Dat wil zeggen, de uitstroomsnelheden langs de uitstroomspleet vallen alle binnen een $\pm 5\%$ bandbreedte van een representatieve waarde. Dit moet gelden voor de verschillende debieten. In het onderzoek zal in de vaststelling van de uniformiteit tijdsmiddeling worden toegepast.

2.3.2 Energieverlies

De wens om energiezuinig te zijn en het te installeren vermogen van de pompen te beperken, is vertaald naar een maximum aan de toepasbare drukval over het systeem van instroom tot uitstroom. Leidend hierbij was de VSE [5] waarin de maximale opvoerdruk van de gekozen pompen bepaald was op 5,5 mwk. In de VSE is de vereiste capaciteit indicatief opgesplitst in het verval en verliezen over de waterschermbak en het leidingwerk. Deze waarden zijn overgenomen in onderstaande tabel. De basis waarop deze waarden zijn vastgesteld is onbekend.

Tabel 2.2 Waarden drukval bij maatgevend debiet (700 L/s per sectie)

Contributie	Drukval [mwk]
Statisch drukverschil	2,5
Waterschermbak	0,5
Leidingwerk	2,0
Onbedeeld	0,5
Uitstroomverlies	-
Som	5,5

Er was nog 0,5 mwk reserve of 'onbedeeld'. Anderzijds was er geen rekening gehouden met het uitstroomverlies van het waterschermbak, wat bij 700 L/s/sectie ca. 0,5 m bedraagt.

3 Ontwerp inwendige geometrie

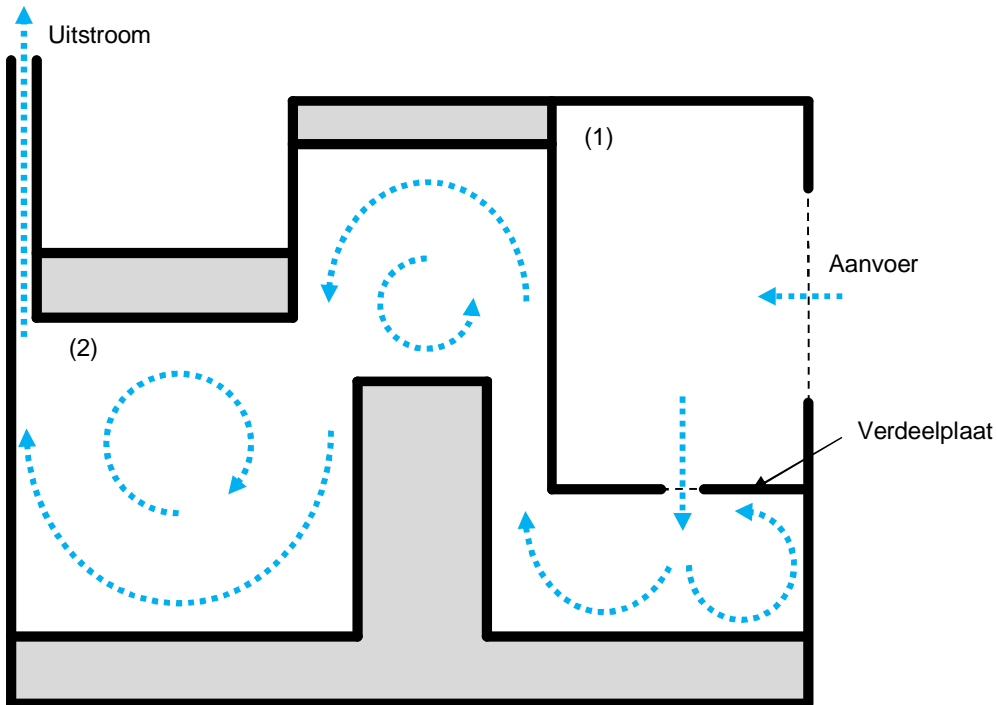
Op basis van het concept beschreven in Sectie 2.1 en de eisen gesteld in [5] zijn achtereenvolgens verschillende ontwerpen gemaakt.

De ontwerpen leunden op hetzelfde principe van verdeling, welke tweeledig is. Een eerste verdeling wordt gemaakt door een plaat met gaten, welke zorgt voor een weerstand en een uniforme druk in het voorgaande compartiment, het zgn. primaire verdeelcompartiment, in de onderstaande figuur gemarkeerd met (1). Vervolgens stroomt het water door het woelcompartiment (2), bestaande uit meerdere kamers, onderling verbonden door vernauwingen. Hierbij verwijdt en vernauwt de stroming meerdere malen, en ontstaat een neer ('wals'). Beide processen hebben een uniformerende werking op de stroming.

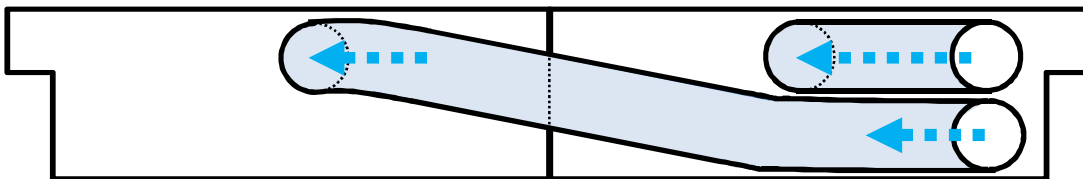
3.1 Waterschermbak ontwerp 1

In de dwarsdoorsnede zijn de twee grootste compartimenten zichtbaar: genoemd het primaire verdeelcompartiment, in onderstaande figuren aangeduid met (1), en het woelcompartiment (2), bestaande uit drie kamers. Het derde compartiment wordt gevormd door de verspringing in de zijanten van de waterschermbak, waarop de waterschermbak constructief leunt na installatie in de kolk. Dit compartiment wordt wel het zijcompartiment genoemd.

Dit ontwerp ging uit van een aanvoer van water in het midden van de waterschermbaksectie. Hiertoe werden de aanvoerleidingen buitenom naar de secties geleid, zoals is geschetst in Figuur 3.2. Het idee hier achter was dat dit de verdeling van het debiet vergemakkelijkte, de stroming werd in dit geval naar twee zijdes verdeeld en daarmee gelijkmatiger dan wanneer het van een uiterste zijde verdeeld dient te worden over de volledige baklengte. Bovendien waren de twee secties gelijk – hoewel gespiegeld.



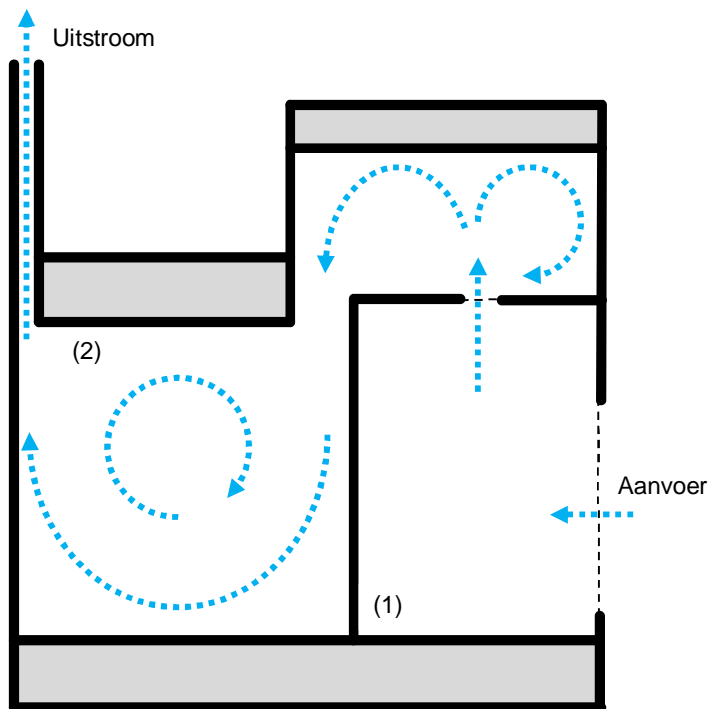
Figuur 3.1 Dwarsdoorsnede van initieel ontwerp 1; bestaande uit een woelcompartiment met drie kamers (2) en een primair verdeelcompartiment (1), gescheiden door een plaat met gaten. In de figuur zijn reserveringen voor verstijving als grijze vlakken weergegeven; blauwe gestippelde lijnen schetsen het gedrag van de stroming.



Figuur 3.2 Aanvoerleidingen en symmetrie van bakken.

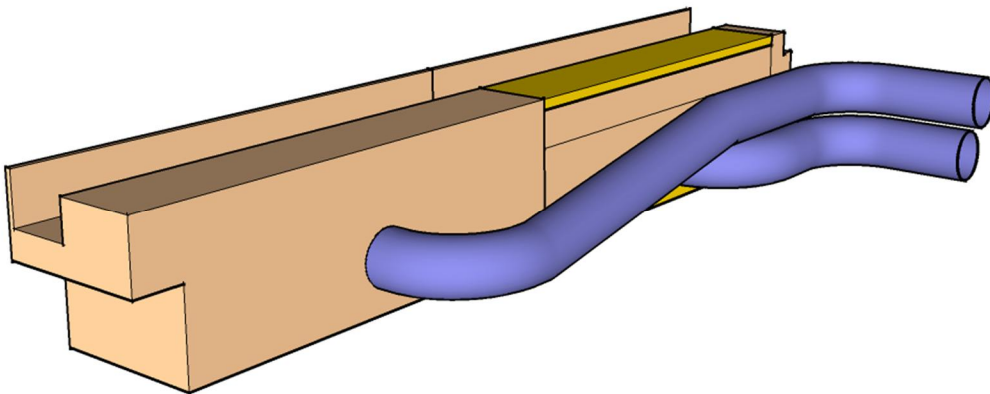
3.2 Waterschermbak ontwerp 2

Het tweede ontwerp is een variant op het eerste, waarbij slechts twee kamers zijn gebruikt. Hiermee is de omvang beperkt; het ontwerp is daarom waarschijnlijk goedkoper.. Waar de aanvoer van water in Ontwerp 1 bovenin het achtervlak van de bak was, is deze nu onderin dit achtervlak.



Figuur 3.3 Dwarsdoorsnede van initieel ontwerp 2. In de figuur zijn reserveringen voor verstijving als grijze vlakken weergegeven; blauwe gestippelde lijnen schetsen het gedrag van de stroming.

Nog steeds is uitgegaan van een centrale aanvoer per sectie en daarmee gelijke, gespiegelde secties, zoals in onderstaande figuur is aangegeven.



Figuur 3.4 Aanvoerleidingen bij Ontwerp 2.

4 Numerieke simulaties

4.1 Inleiding

De initiële ontwerpen zijn numeriek gesimuleerd met een computational fluid dynamics (CFD) model. Hiermee wordt de stroming in de bak, de debietverdeling in de spleet en het energieverlies berekend. Het CFD-pakket dat wordt gebruikt is OpenFoam, versie 2.1.1.

Vanwege de verwachte symmetrie van het probleem rond de middelste gaten zijn er allereerst tweedimensionale berekeningen gemaakt om te controleren of de gewenste wervelingen in de verschillende compartimenten zouden optreden. Vanwege het driedimensionale karakter van het probleem en dus de beperkte representatie door het tweedimensionale model is al snel overgestapt op driedimensionale berekeningen. Hierbij is er weer vanuit gegaan dat de stroming rond een enkel gat redelijk symmetrisch is. Aan de hand van deze berekeningen zijn er enkele aanpassingen gemaakt aan het ontwerp van de woelbak. Uiteindelijk zijn er nog berekeningen uitgevoerd met de volledige geometrie.

De resultaten van de eerste driedimensionale berekeningen zijn gebruikt om het ontwerp verder aan te passen. Aangezien de berekeningen tegelijkertijd plaatsvonden met het opzetten van het model bestaan er nog wel enige verschillen tussen de uiteindelijk (in model) geteste geometrie en de geometrie in de berekeningen.

Een groot aandachtspunt voor deze berekeningen (en in principe alle CFD berekeningen) was het rekenrooster. Met name het maken van een goed rekenrooster voor de gehele bak was uitdagend. De laatste berekeningen omvatten de volledige waterschermbaksectie. Deze berekeningen bleken zeer complex en ontwikkelden instabiliteiten. Hiervan zijn om die reden geen resultaten opgenomen aan dit rapport.

4.1.1 OpenFoam

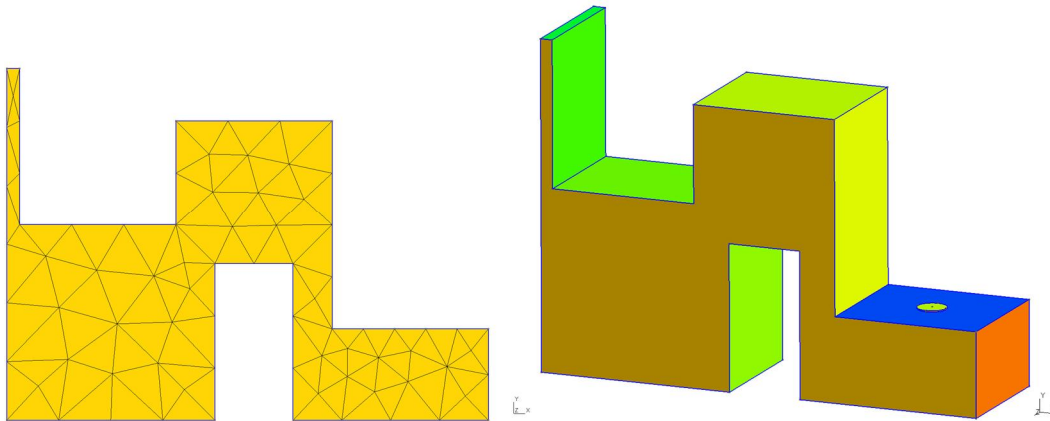
OpenFoam is een open-source pakket ontwikkeld door OpenCFD Ltd. en uitgegeven door de OpenFoam Foundation. Er zijn naast de officiële release verschillende versies van OpenFoam in omloop, waarvan het OpenFoam Extend Project de bekendste is. In dit project is gebruik gemaakt van de officiële release, versie 2.1.1. OpenFoam wordt veelvuldig toegepast voor academische en industriële problemen. OpenFoam bevat een groot aantal zogenaamde *solvers* voor uiteenlopende toepassingen. Voor de hier besproken toepassing wordt gebruik gemaakt van de solver *simplefoam* voor tijdsafhankelijke berekeningen en *pimplefoam* voor tijdsafhankelijke berekeningen.

OpenFoam lost de drie dimensionale Navier-Stokes vergelijkingen op gebruikmakende van de Finite Volume Method (FVM). De numerieke achtergrond wordt gegeven in Appendix C.

4.2 Geometrie en rekenrooster

Voor het maken van de geometrie wordt gebruik gemaakt van het opensource programma Gmsh (Geuzaine and Remacle 2009), versie 2.6. De geometrie wordt opgeslagen in het zogenaamde STL-formaat zodat de geometrie gebruikt kan worden voor het maken van het rekenrooster. Het rekenrooster wordt gemaakt met behulp van snappyHexMesh. Deze meshgenerator is ingebouwd in OpenFoam en genereert een rekenrooster met voornamelijk hexagonale cellen en polyhedra aan de randen om het mesh te fitten naar de vorm van de geometrie. Voorbeelden van de geometrie voor de tweedimensionale en driedimensionale berekeningen van het eerste ontwerp zijn gegeven in Figuur 4.1.

Een nadere beschrijving van snappyHexMesh is opgenomen als Appendix D. Het opzetten van de numerieke geometrieën is beschreven in Appendix E.



Figuur 4.1 Tweedimensionale (links) en driedimensionale (rechts) geometrie van één sectie van het eerste ontwerp van de woelbak zoals gemaakt in Gmsh.

Voor het te berekenen domein is in de eerste instantie gekozen voor de woelbak, omdat in de eerste instantie de focus op het ontwerp van de woelbak lag. Met dit domein kan de stroming in de woelbak bepaald worden en een schatting worden gegeven van de drukval in de woelbak. In een later stadium had dan nog een uitstroomgebied boven de uitstroomspleet geplaatst kunnen worden om het effect van de randvoorwaarde op de stroming in de spleet weg te nemen.

De woelbak bestaat uit gelijke secties, per gat in de verdeelplaat wordt een gelijke stroming verwacht. Om deze reden is in eerste instantie gerekend met een enkele sectie, met een enkele doorstroomopening. Om het effect van de symmetrierandvoorwaarde te onderzoeken zijn er ook berekeningen gedaan met twee secties en een enkele som met 12 secties (de gehele woelbak).

4.3 Woelbakontwerp 1

Voor het eerste woelbakontwerp, bestaande uit drie aan elkaar verbonden kamers, zijn tweedimensionale en driedimensionale sommen gemaakt. Omdat het probleem intrinsiek driedimensionaal is, is al snel overgestapt naar driedimensionale berekeningen. De tweedimensionale sommen vormden meer een testberekening om te zien of het concept van de woelbak leek te werken. De stroombeelden van de tweedimensionale sommen zullen kort vergeleken worden met vergelijkbare driedimensionale sommen alvorens verder wordt ingegaan op de driedimensionale berekeningen, zodat duidelijk wordt waarom de tweedimensionale aanpak niet voldoende is. Verder zullen alleen driedimensionale berekeningen worden beschouwd.

Voor het ontwerp van de woelbak is op basis van eerdere ervaring met stroming in een waterscherm aangenomen dat de vorming van grote neren in de verschillende kamers van belang is voor een goede verdeling. Bij het beoordelen van de stroombeelden wordt er daarom gekeken of dergelijke neren optreden. Vanwege de wens het vermogen van de te gebruiken pompen te beperken is daarnaast de drukval van groot belang. Ten slotte is uiteraard de uiteindelijke verspreiding van het debiet bij de uitlaat van het waterscherm, het hoofddoel van de waterschermbak, een belangrijk aandachtspunt in de evaluatie van de berekeningen.

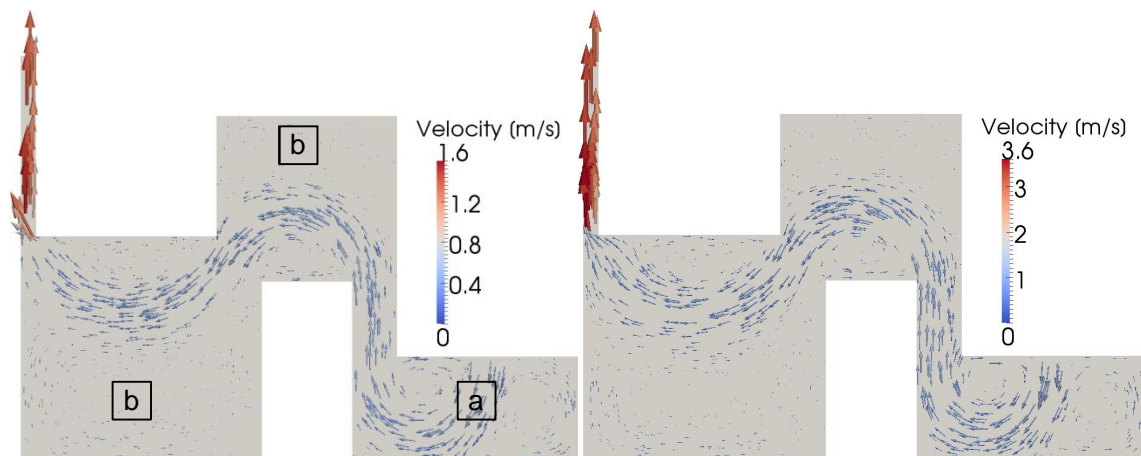
4.3.1 Tweedimensionale berekeningen

De stroombeelden van de tweedimensionale berekeningen bij lage en hoge inlaatsnelheid zijn weergegeven in Figuur 4.2. De inkomende straal buigt snel af (a) en er lijkt geen ontwikkeling van grote neren in de verschillende kamers van de woelbak (b).

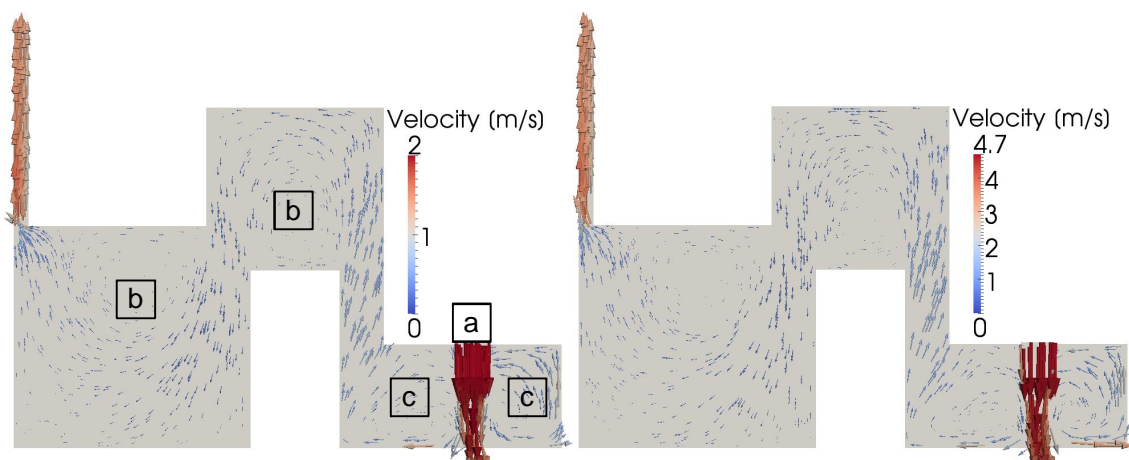
De resultaten uit de driedimensionale berekeningen zijn weergegeven in Figuur 4.3 en tonen een doorsnede door het midden van de sectie, oftewel in het midden van de inlaat, wat min of meer equivalent is aan de tweedimensionale geometrie.

Deze figuur laat een heel ander stromingsbeeld zien, waarbij de inkomende straal rechts niet tot nauwelijks wordt afgebogen (a) en recirculaties in de eerste kamer veroorzaakt (c). Opgemerkt mag worden dat de snelheid van de inkomende straal in de tweedimensionale berekeningen lager is, omdat hierbij het gemiddelde debiet van een enkele sectie is gebruikt; het debiet is gelijk gehouden. Dit maakt het vergelijken van de snelheden slecht mogelijk.

Er ontstaat een draaiende stroming van de eerste naar de tweede kamer. De neren die ontstaan in de tweede en derde kamer (b) zijn bovendien veel groter dan in de tweedimensionale berekeningen. Uit deze eerste resultaten kan worden geconcludeerd dat de tweedimensionale berekeningen een verkeerd beeld van de situatie laten zien en niet bruikbaar zijn voor verdere analyse van het waterscherm.



Figuur 4.2 Vectorplot van de stroming in de tweedimensionale geometrie van het eerste woelbakontwerp bij laag debiet (links) en hoog debiet (rechts).



Figuur 4.3 Vectorplot van de stroming in een doorsnede van de driedimensionale geometrie (mesh 2) van het eerste woelbakontwerp bij laag debiet (links) en hoog debiet (rechts).

4.3.2 Driedimensionale berekeningen

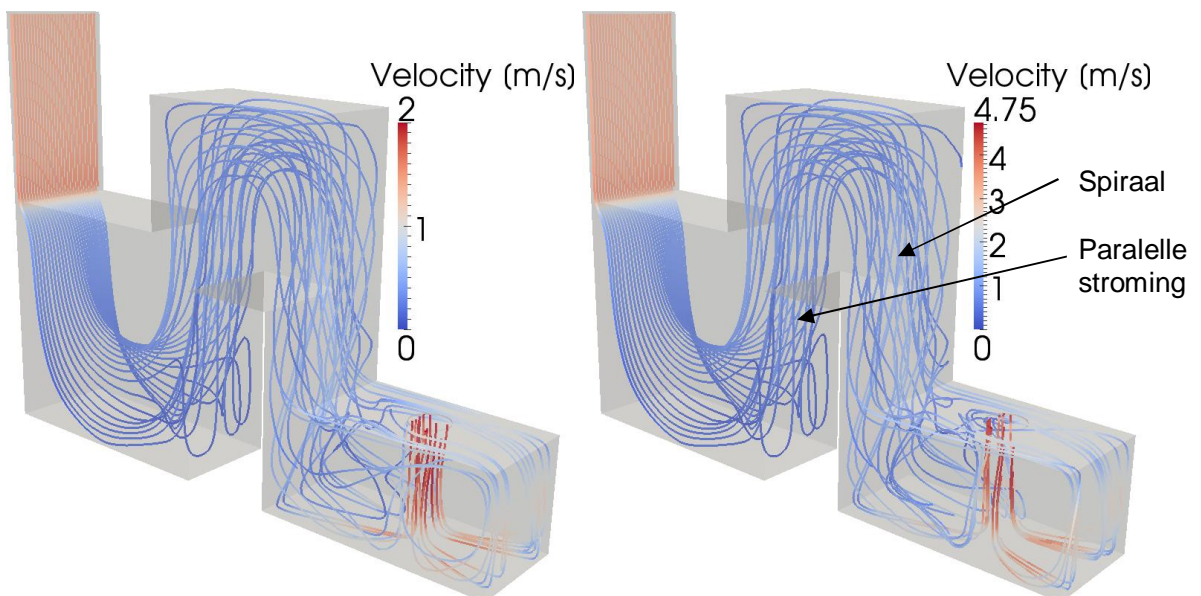
In de driedimensionale berekeningen is een gedeelte van het woelcompartiment gemodelleerd. Op de zijvlakken is een symmetrievoorwaarde toegepast. Stroming door deze vlakken is dan niet mogelijk. Alternatief kan gekozen worden voor periodieke randvoorwaarden. Periodiek wil hierbij zeggen dat uitgaande stromingen aan de ene zijde overeenkomen met inkomende stromingen aan de andere zijde. In deze fase van het onderzoek geeft de symmetrievoorwaarde voldoende inzicht en deze is daarom toegepast.

4.3.2.1 1 sectie (segment van de woelbak met één van de twaalf openingen beschouwd)

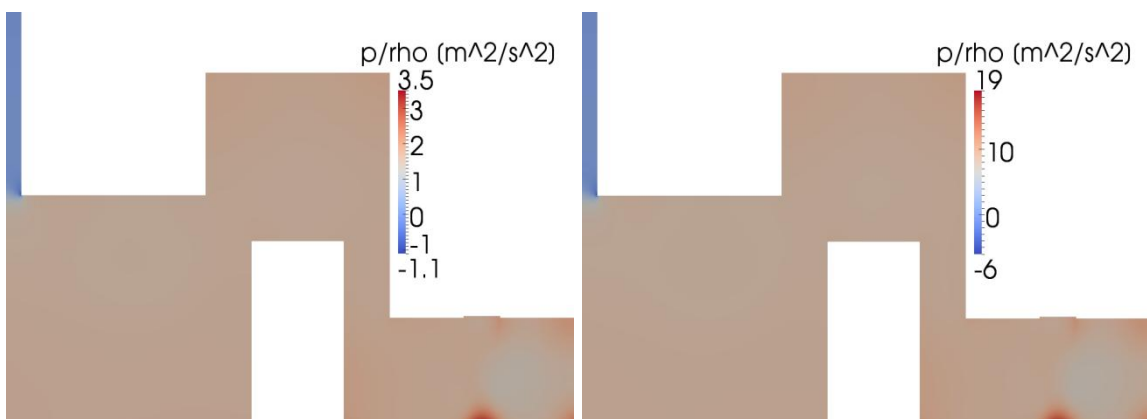
Voor het visualiseren van de stroming wordt gebruik gemaakt van stroomlijnen, die een indicatie geven van hoe het water door het domein stroomt. Figuur 4.4 toont de stroomlijnen voor de berekeningen aan één sectie voor hoog en laag debiet. Goed zichtbaar is de recirculatie in de eerste kamer door het verspreiden van de geconcentreerde straal. Ook is de spiraalvormige stroming van de eerste naar de tweede kamer zichtbaar. Dit spiraalvormige gedrag is grotendeels uitgedempt in de stroming van de tweede naar de derde kamer. De gebieden in de tweede en derde kamer waar geen stroomlijnen zichtbaar zijn, zijn de recirculaties die zichtbaar zijn in Figuur 4.3.

De grootste drukval vindt plaats bij de instroom van de verticale spleet. Dit is niet verwonderlijk aangezien de doorstroomopening significant kleiner wordt op dit punt en de snelheid daar flink toeneemt. De druk in de rest van de woelbak is redelijk constant, op een piek waar de straal tegen de onderkant botst na (zie Figuur 4.5). In de berekening van de druk wordt geen rekening gehouden met de hydrostatische druk. De drukhoogte tussen in- en uitlaat bedraagt ongeveer een meter. Dit opgeteld bij de opvoerhoogte uit de berekende waarden levert;

- Berekende drukval hoog debiet 8,30 kPa
- Opvoerhoogte inclusief hydrostatische druk hoog debiet 1,85 m
- Drukval laag debiet 1,54 kPa
- Opvoerhoogte inclusief hydrostatische druk laag debiet 1,16 m



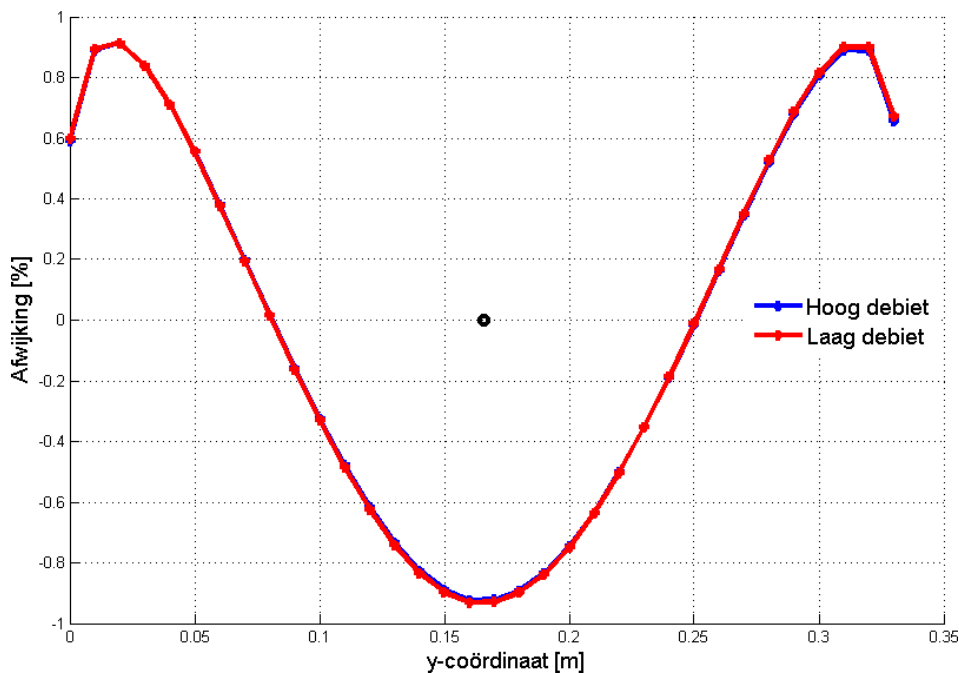
Figuur 4.4 Stroomlijnen van de stroming in het eerste woelbakontwerp (1 sectie) bij laag debiet (links) en hoog debiet (rechts).



Figuur 4.5 Dwarsdoorsnede van de drukverdeling in het eerste woelbakontwerp (1 sectie) bij laag debiet (links) en hoog debiet (rechts).

Om te onderzoeken of het debiet goed verdeeld wordt over de breedte wordt op een hoogte van 1,25 m (10 cm onder de uitlaat) het profiel van het debiet per strekkende meter bepaald. Er wordt voor gekozen om ruim onder de uitlaat de data uit te voeren, omdat er dan minder invloed is van de randvoorwaarde aan de uitstroomrand. De afwijking van het gemiddelde debiet is weergegeven in Figuur 4.6. De positieve en negatieve afwijkingen blijven onder de 1%.

Enigszins verrassend is te zien dat het uitstroomdebiet op dezelfde y-coördinaat als de instroomopening lager is dan aan de rand. Dit kan verklaard worden door het feit dat de inkomende straal zich richting de randen verspreidt wanneer deze tegen de bodem van de woelkamer botst. Dit veroorzaakt blijkbaar een hoger debiet aan de randen dan in het midden.

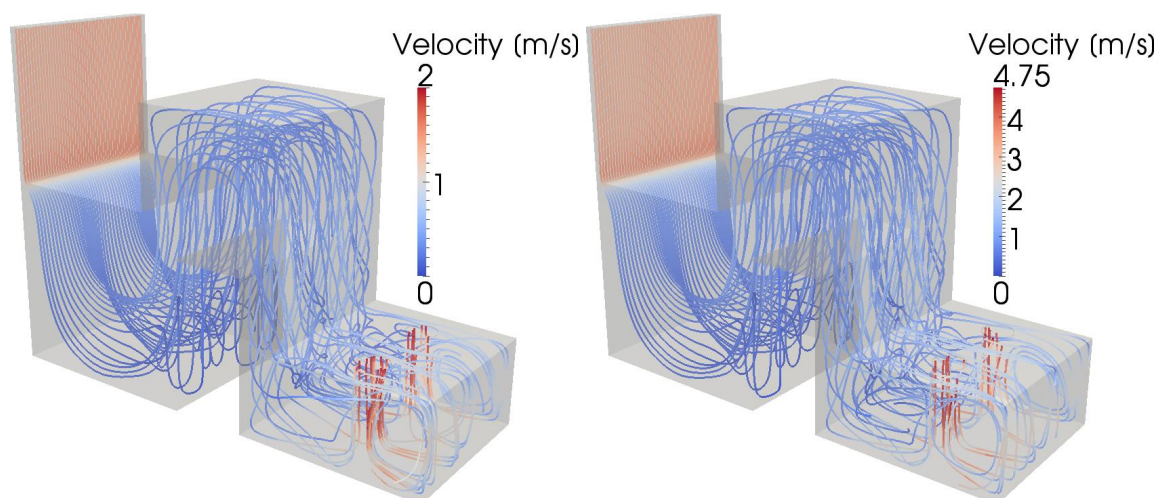


Figuur 4.6 Procentuele afwijking van het gemiddelde debiet over de breedte van een sectie. De zwarte cirkel toont de locatie van de inlaat in de breedte.

4.3.2.2 2 secties

De stroming en spreiding van het debiet in voorgaande berekeningen lijken beïnvloed te worden door de symmetrierandvoorwaarde, vooral bij het spreiden van de inkomende straal. Er is namelijk geen transport mogelijk door de randen. Mogelijk beïnvloedt dit de resultaten bij de uitstroom. Om dit te onderzoeken zijn dezelfde berekeningen uitgevoerd, maar dan met twee secties. Hierbij is er nog steeds een symmetrierandvoorwaarde aan de wanden, maar tussen de twee inlaten is geen rand aanwezig zijn en is er transport tussen de twee secties mogelijk.

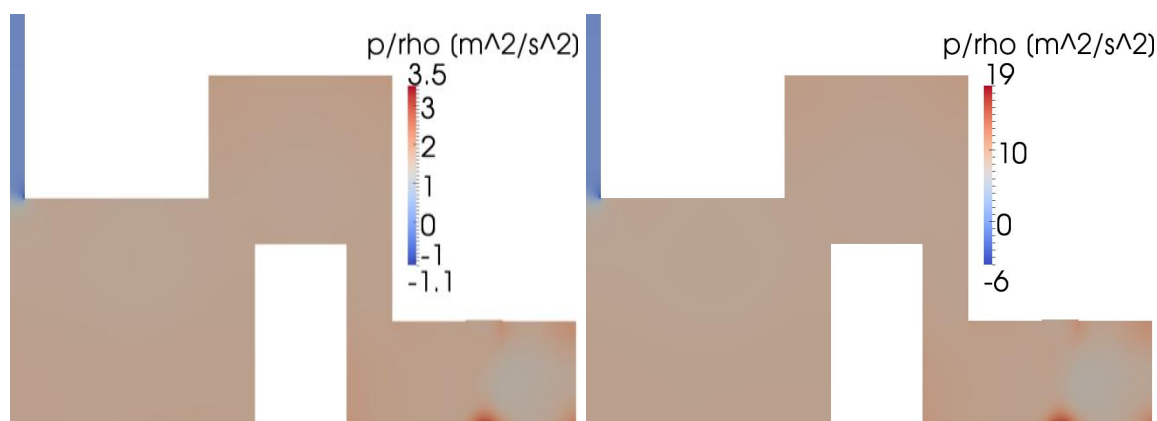
De stroomlijnen in Figuur 4.7 laten een vergelijkbaar beeld zien als bij de berekeningen met een enkele sectie, al zijn er wel stroomlijnen zichtbaar die van de ene sectie naar de andere lopen. Nog steeds is de helische stroming van de eerste naar de tweede kamer aanwezig. Ook is deze helische stroming significant uitgedempt wanneer het water van de tweede naar de derde kamer stroomt.



Figuur 4.7 Stroomlijnen van de stroming in het eerste woelbakontwerp (2 secties) bij laag debiet (links) en hoog debiet (rechts).

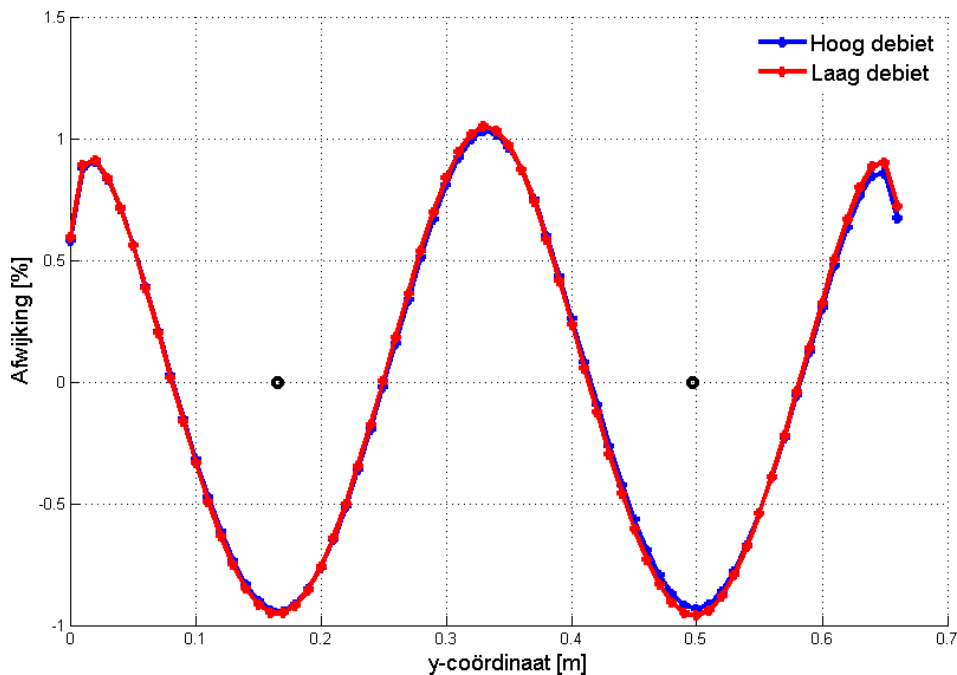
Het globale beeld van de drukken is zeer vergelijkbaar met de berekeningen aan een enkele sectie zoals Figuur 4.8 laat zien. De berekende drukvallen van instroom naar uitstroom zijn vergelijkbaar;

- Berekende drukval hoog debiet 8,31 kPa
 - Opvoerhoogte inclusief hydrostatische druk hoog debiet 1,85 m
- Drukval laag debiet 1,55 kPa
 - Opvoerhoogte inclusief hydrostatische druk laag debiet 1,16 m



Figuur 4.8 Dwarsdoorsnede van de drukverdeling in het eerste woelbakontwerp (2 secties) bij laag debiet (links) en hoog debiet (rechts).

De verspreiding van het gemiddelde debiet voor twee secties is getoond in Figuur 4.9. Hier wordt duidelijk de invloed van de symmetrierandvoorwaarde in de berekening voor een enkele sectie zichtbaar. De randvoorwaarde geeft een lichte onderschatting van de afwijking. Wel is hetzelfde gedrag in het verloop van het debiet zichtbaar. Een lager debiet op dezelfde y-coördinaten van de instroomopeningen en een hoger debiet aan de randen en tussen de twee secties in. Deze berekening bevestigt dus wel het beeld dat wordt geschetst door de berekening van één sectie.

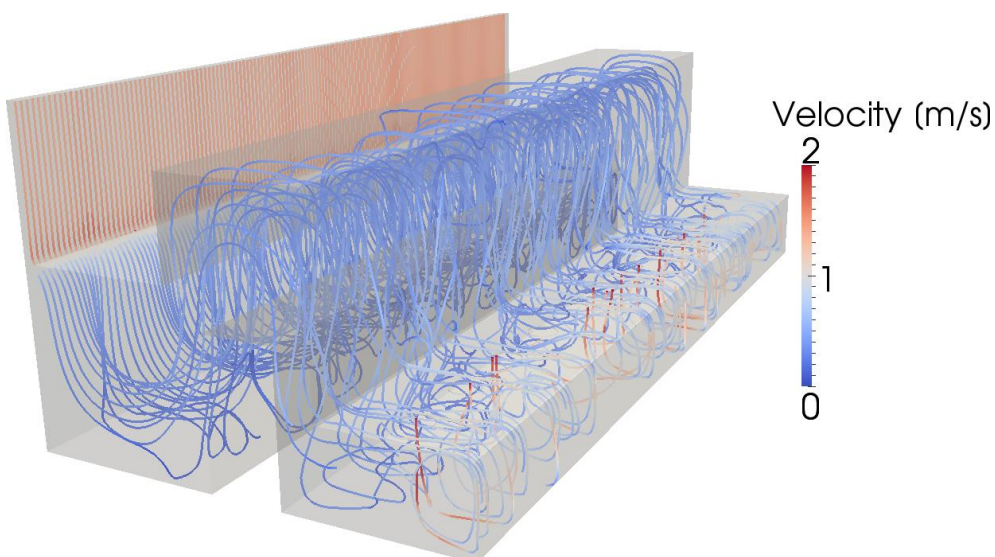


Figuur 4.9 Procentuele afwijking van het gemiddelde debiet over de breedte van een sectie. De zwarte cirkels tonen de locaties van de inlaten in de breedte.

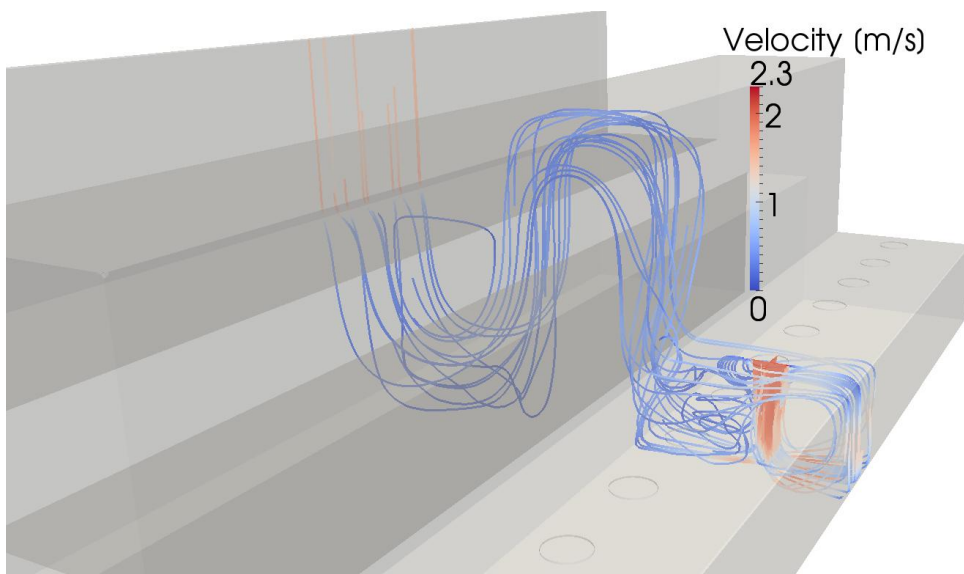
4.3.2.3 12 secties

Voor het lage debiet is er ook nog een berekening uitgevoerd met 12 secties, waarbij er wel een symmetrierandvoorwaarde gold aan de buitenste randen. Deze berekening is uitgevoerd om het effect van de symmetrierandvoorwaarde verder te onderzoeken.

De stroomlijnen in Figuur 4.10 en Figuur 4.11 laten een vergelijkbaar beeld zien. Een helische stroming van de eerste naar de tweede kamer en een grote neer in de tweede en derde kamers.



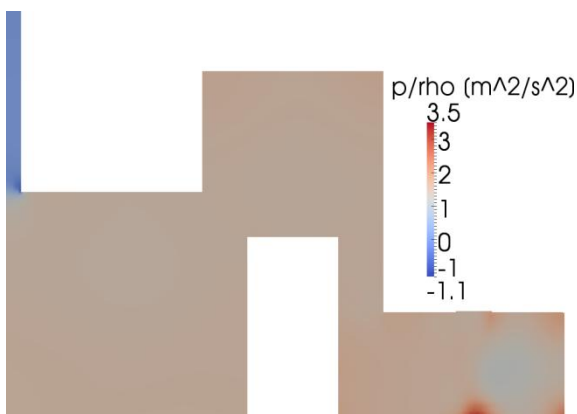
Figuur 4.10 Stroomlijnen van de stroming in het eerste woelbakontwerp (12 secties) bij laag debiet.



Figuur 4.11 Stroomlijnen van de stroming in het eerste woelbakontwerp (12 secties) bij laag debiet vanuit een enkele inlaat.

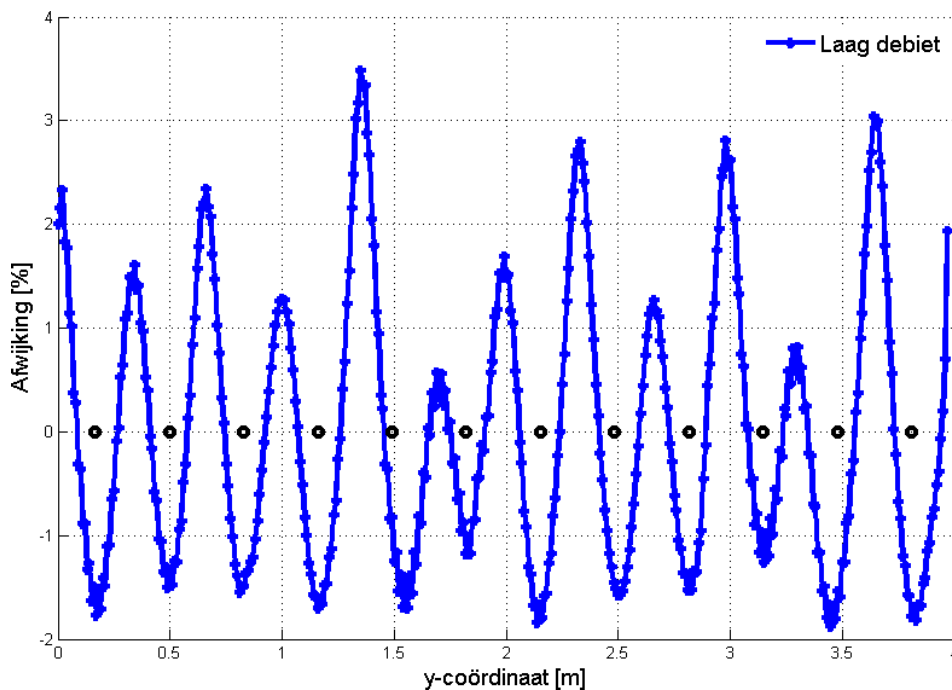
Ook de drukverdeling lijkt vergelijkbaar te zijn zoals is te zien in Figuur 4.12. De gemiddelde drukval van alle twaalf de gaten naar de uitstroom bedraagt;

- Berekende drukval laag debiet 1,42 kPa
- Opvoerhoogte inclusief hydrostatische druk laagdebiet 1,14 m



Figuur 4.12 Dwarsdoorsnede van de drukverdeling in het eerste woelbakontwerp (12 secties) bij laag debiet.

De verdeling van het debiet over de breedte laat echter een ander beeld zien. Waar dit in de vorige berekeningen een symmetrisch beeld laat zien, mede door de randvoorwaarde, zijn er nu grote variaties zichtbaar langs de breedte van het waterscherm (zie Figuur 4.13). Hierdoor zijn ook de afwijkingen van het gemiddelde debiet groter. Vreemd genoeg fluctueert de afwijking in de positieve richting het meest. Wat wel overeenkomt met de eerdere berekeningen is dat er negatieve afwijkingen aanwezig zijn bij dezelfde y-coördinaten als de inlaatopeningen. De afwijkingen van het gemiddelde debiet zijn tussen de -2% en 3,5%.

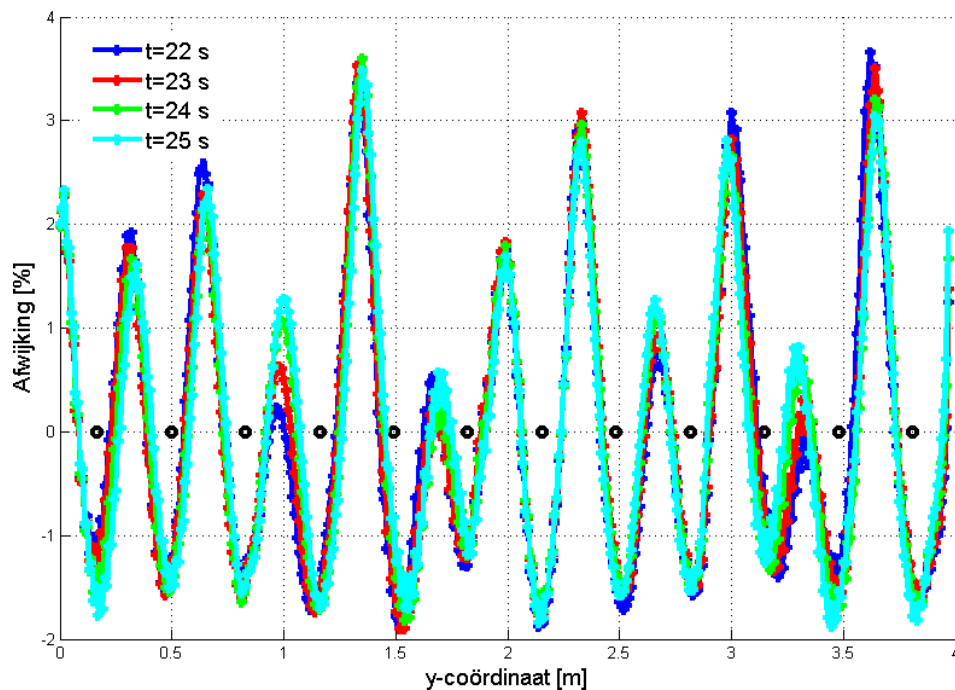


Figuur 4.13 Procentuele afwijking van het gemiddelde debiet over de breedte. De zwarte cirkels tonen de locaties van de inlaten in de breedte.

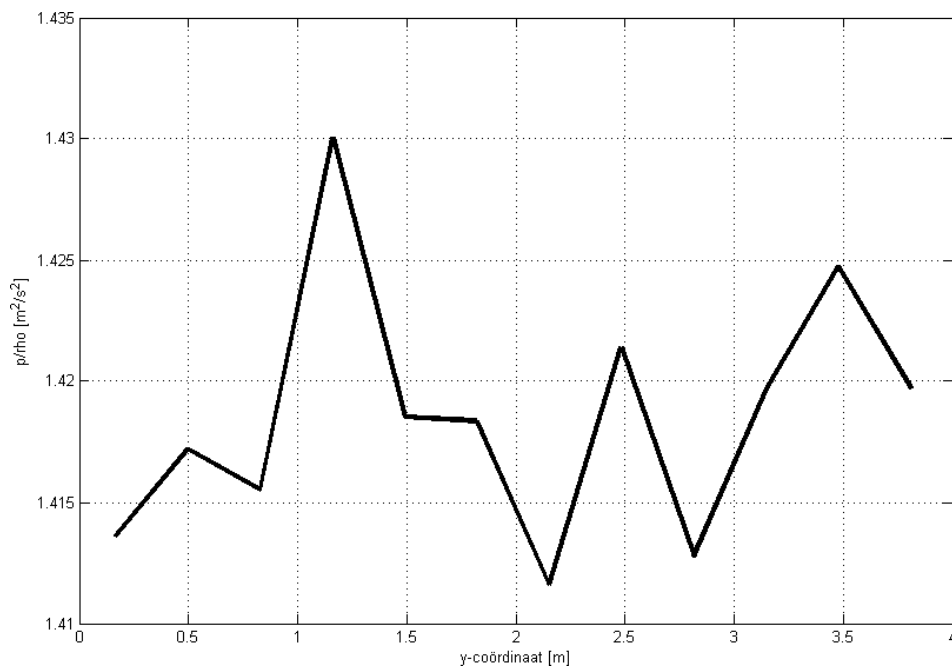
De variaties in afwijking in de breedte van het waterscherm worden mogelijk veroorzaakt door fluctuaties van de stroomsnelheid in de tijd. Hiertoe is in Figuur 4.14 voor een aantal tijdstippen de debietverdeling geplot. Er zijn kleine afwijkingen zichtbaar in de tijd, maar deze verklaren niet de grote debietvariaties in de breedte. Hoogstwaarschijnlijk is er toch een bepaalde instabiliteit in de stroming, maar het is niet duidelijk waar deze door wordt veroorzaakt.

De pieken in debiet lijken overeen te komen met de pieken in het drukverloop langs de verschillende openingen zoals is te zien in Figuur 4.15, maar dit geldt niet voor elke waargenomen piek. De drukken bij de instroomopeningen worden tijdens de berekening bepaald aan de hand van de opgegeven instroomsnelheid, alleen de druk bij de uitstroom is gedefinieerd. Echter, de drukverschillen tussen de verschillende inlaten zijn erg klein en de invloed op de uitstroom zal dus beperkt zijn.

De meest waarschijnlijke mogelijkheid is instabiliteit in de stroming waardoor meer water door de ene sectie gaat dan de andere. Dit resultaat laat echter wel zien dat het aanbevolen is om uiteindelijk de gehele geometrie door te rekenen (en te meten), omdat zelfs in een symmetrische situatie er een asymmetrie optreedt.



Figuur 4.14 Procentuele afwijking van het gemiddelde debiet over de breedte voor enkele tijdstippen. De zwarte cirkels tonen de locaties van de inlaten in de breedte.



Figuur 4.15 Vergelijking van de drukken aan de verschillende inlaatranden.

4.3.3 Conclusie

Uit de berekeningen van één en twee secties van het eerste woelbakontwerp volgt dat afwijkingen in het debiet in de breedte zeer beperkt zijn, ongeveer 1%. Er ontstaan grote neren in de tweede en derde kamers, zoals gewenst. Wat betreft de stroming en verspreiding van het debiet lijkt dit ontwerp goed te voldoen.

De berekening aan twaalf secties laat een wat ander beeld zien. Ondanks de symmetrische opzet van de berekening laat het resultaat flinke variaties in de debietafwijking zien. Het is niet duidelijk waar deze vandaan komt. De afwijkingen zijn echter nog onder $\pm 5\%$. Deze berekening laat echter wel zien dat het waardevol is om een berekening te doen van de gehele woelbak.

Een tweede ontwerp is getest waarbij de benodigde ruimte is verkleind. De resultaten van deze berekeningen laten zien dat de helische stroming na de tweede kamer zo goed als uitgedempt is. Hieruit is geconcludeerd dat het niet nodig is om een derde kamer te hebben. In het volgende ontwerp is dus uitgegaan van twee kamers.

De grote drukgradiënt bij de hoek richting de uitstroom laat zien dat in het uiteindelijke ontwerp deze hoek afgerond moet worden.

4.4 Woelbakontwerp 2

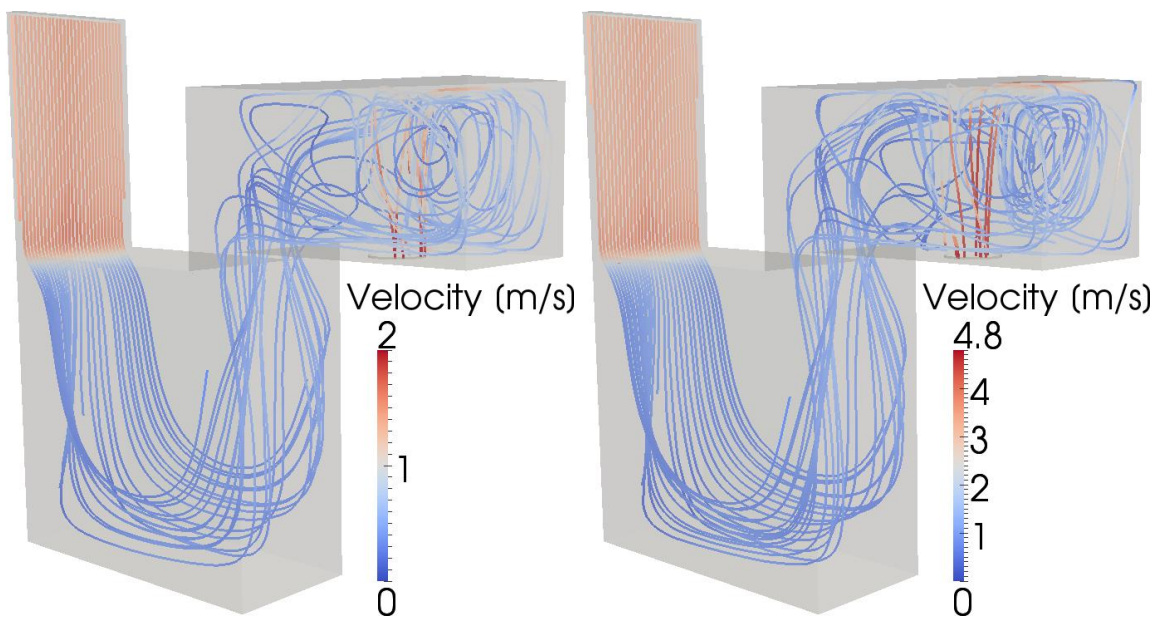
Voor het tweede woelbakontwerp wordt dus uitgegaan van twee kamers voordat het water richting de uitstroom gaat. De afmetingen van de kamers zijn min of meer gelijk gehouden aan de eerste twee kamers van het eerste ontwerp, zodanig dat het ontwerp past in de beschikbare ruimte. Uitgaande van de resultaten van de voorgaande berekeningen zou de helische stroming voldoende gedempt moeten zijn tegen de tijd dat het bij de uitstroomspleet is. Ook zal de sterke drukgradiënt rond de hoek naar de uitstroomspleet hier nog verder aan bijdragen.

Voor deze geometrie zijn driedimensionale berekeningen uitgevoerd voor één en twee secties. De berekening bleek veeleisender wat betreft het rekenrooster. Het was noodzakelijk om enkele wijzigingen in het rekenrooster aan te brengen voordat het mogelijk was om berekeningen met het hoge debiet uit te voeren. Onder andere vanwege deze problemen is geen berekening geproduceerd bij hoog debiet voor de geometrie met twee secties.

4.4.1 1 sectie

In Figuur 4.16 zijn de stroomlijnen bij hoog en laag debiet weergegeven. In de eerste kamer botst de straal tegen het plafond. Wederom is er een helische stroom zichtbaar van de eerste naar de tweede kamer, net als bij het vorige ontwerp. Naar verwachting wordt deze helische stroom gedempt richting de uitstroomspleet. Ook is er een grote neer aanwezig in de tweede kamer.

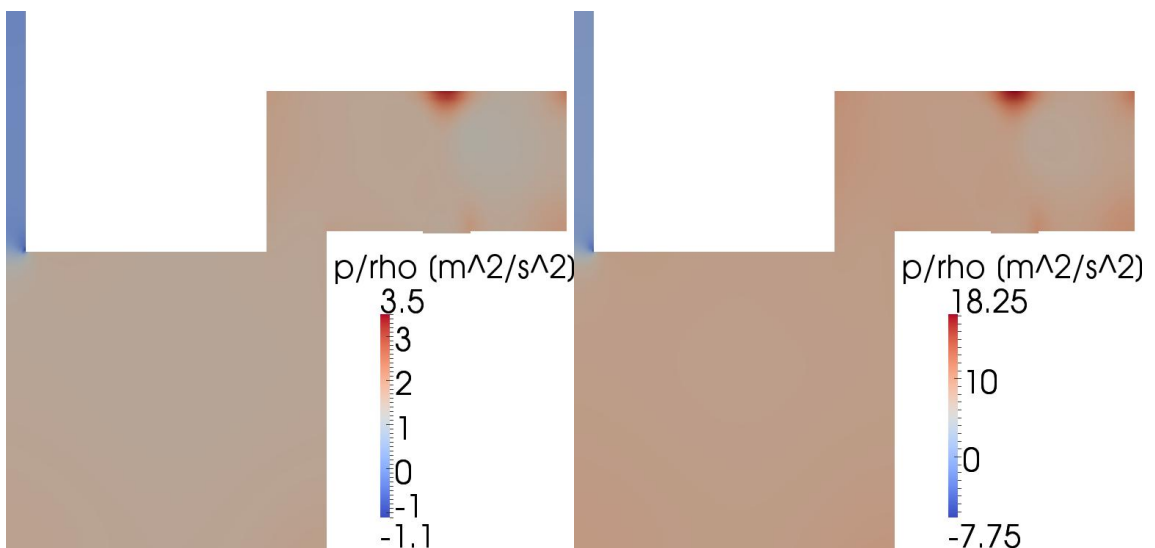
Wat opvalt is dat de snelheid in het midden van de uitstroomspleet hoger is dan aan de randen. Dit is tegenovergesteld aan het vorige ontwerp, waar in het midden (ter hoogte van de instroomopening) een lagere snelheid heerste. Dit wordt ook duidelijk als er naar de afwijking in het debiet wordt gekeken (zie Figuur 4.18).



Figuur 4.16 Stroomlijnen van de stroming in het tweede woelbakontwerp (1 sectie) bij laag debiet (links) en hoog debiet (rechts).

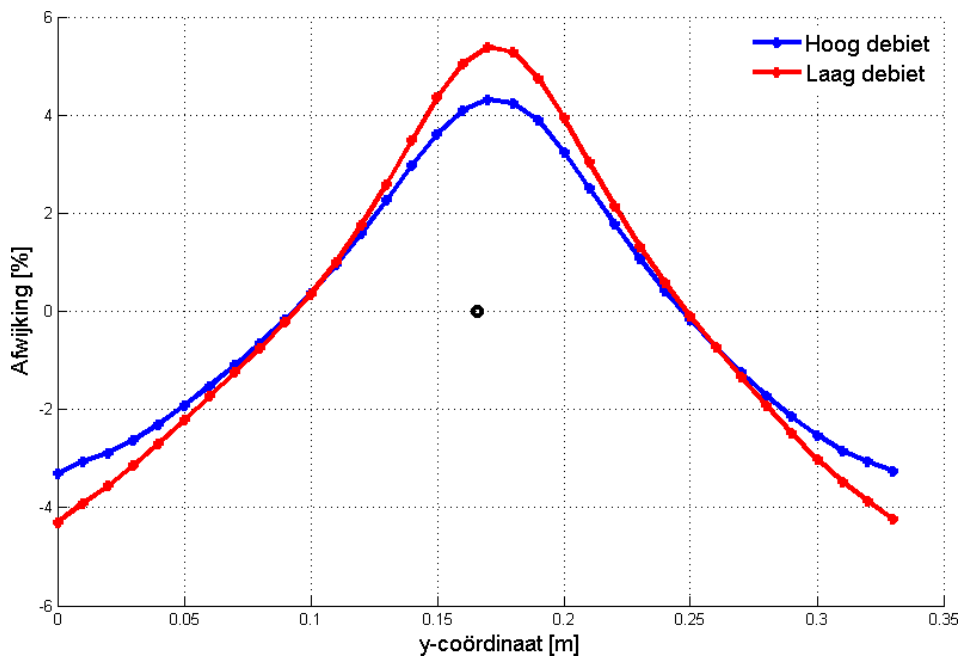
Figuur 4.17 laat de druk in het rekendomein zien. Wederom is te zien een piek in de druk op de plek waar de straal tegen het plafond botst. De benodigde opvoerhoogte is;

Berekende drukval hoog debiet	7.75	kPa
– Opvoerhoogte inclusief hydrostatische druk hoog debiet	1,34	m
• Drukval laag debiet	1.44	kPa
– Opvoerhoogte inclusief hydrostatische druk laag debiet	0,70	m



Figuur 4.17 Dwarsdoorsnede van de drukverdeling in het tweede woelbakontwerp (1 sectie) bij laag debiet (links) en hoog debiet (rechts).

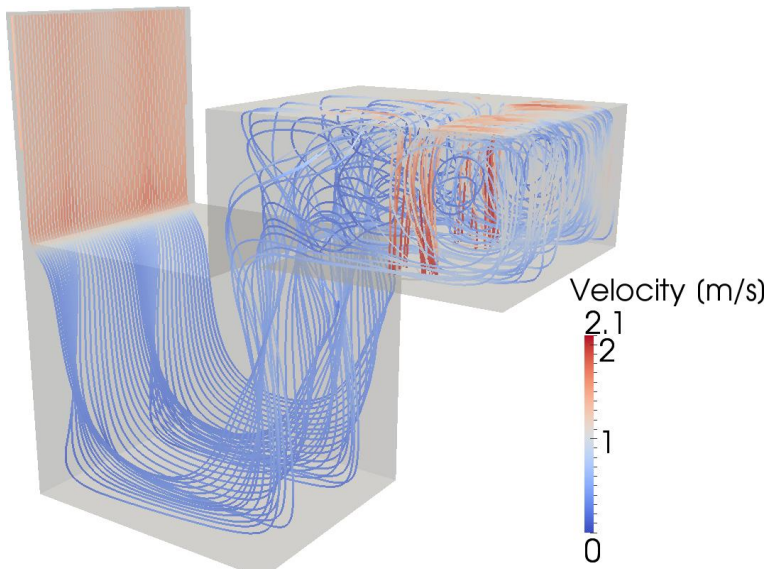
In Figuur 4.16 was al duidelijk dat in het midden de grootste stroomsnelheid heerste. Dit vertaalt zich dan ook naar een hogere debietafwijking in het midden. De afwijking is ook stukken groter dan in het vorige ontwerp met drie kamers. Bij hoog debiet blijft de afwijking onder de 5%, maar bij laag debiet is de maximale afwijking 5,4%.



Figuur 4.18 Procentuele afwijking van het gemiddelde debiet over de breedte van een sectie. De zwarte cirkel toont de locatie van de inlaat in de breedte.

4.4.2 2 secties

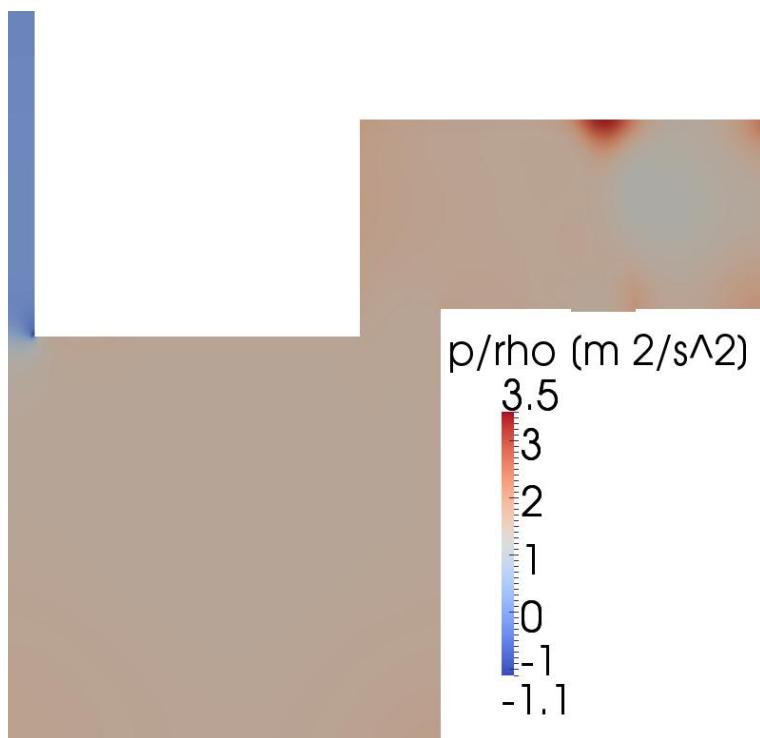
Voor de geometrie met twee secties is slechts een berekening bij laag debiet uitgevoerd. Uitgaande van de voorgaande resultaten zullen de resultaten voor de debietafwijking bij hoog debiet vergelijkbaar zijn met die in Figuur 4.18.



Figuur 4.19 Stroomlijnen van de stroming in het tweede woelbakontwerp (2 secties) bij laag debiet.

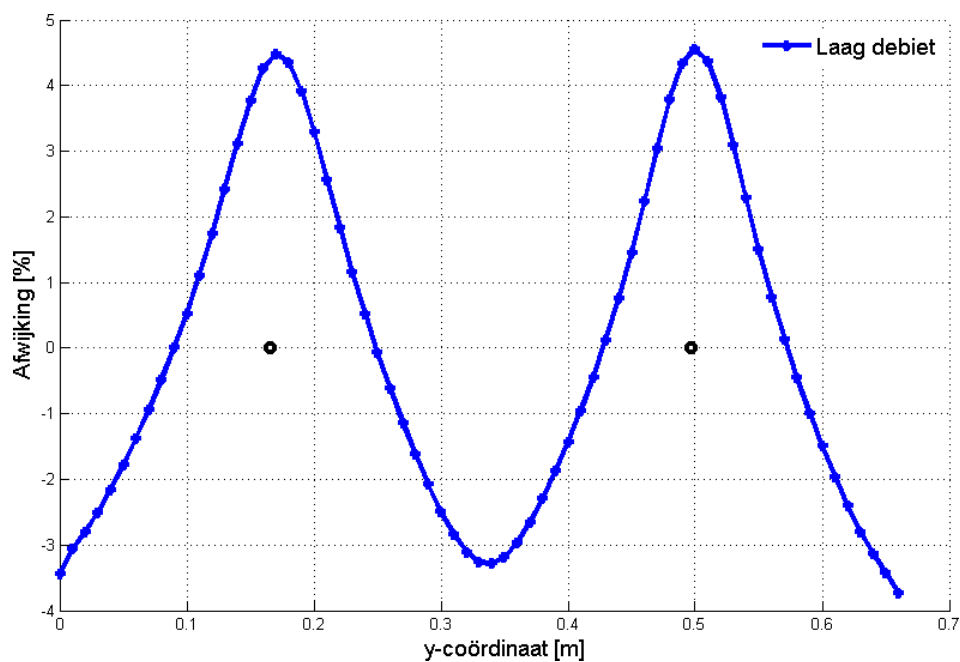
Figuur 4.20 laat de druk in het rekendomein zien. Wederom is de piek te zien in de druk op de plek waar de straal tegen het plafond botst. De benodigde opvoerhoogte is;

- Drukval laag debiet 1,41 kPa
- Opvoerhoogte inclusief hydrostatische druk laag debiet 0,69 m
-
-



Figuur 4.20 Dwarsdoorsnede van de drukverdeling in het tweede woelbakontwerp (2 secties) bij laag debiet.

Wederom is er enige invloed van de symmetrierandvoorwaarde zichtbaar tussen de twee secties in. De afwijking in debiet blijft nu wel onder de 5% in tegenstelling tot de berekening met een enkele sectie. Dit is waarschijnlijk door de invloed van de symmetrierandvoorwaarde. Opvallend om te zien is dat de positieve afwijking groter is dan de negatieve.



Figuur 4.21 Procentuele afwijking van het gemiddelde debiet over de breedte van een twee secties. De zwarte cirkels tonen de locaties van de inlaten in de breedte.

4.4.3 Conclusie

De berekeningen aan het tweede woelbakontwerp laten zien dat de afwijkingen in debiet binnen de in de ontwerpdocumenten [4] gestelde grenswaarde van $\pm 5\%$ blijven, ondanks de verminderde weglengte. Bovendien is de benodigde opvoerhoogte flink gereduceerd. Opvallend aan de resultaten in vergelijking met de resultaten van het eerste ontwerp is dat het hoogste debiet zich nu ter hoogte van de instroomopeningen bevindt en niet tussen de openingen in.

4.5 Conclusie

De numerieke berekeningen hebben laten zien dat beide woelbakontwerpen in staat zijn om het debiet in voldoende mate te verdelen over de breedte. Met behulp van de berekeningen kon in een vroege fase het ontwerp worden doorontwikkeld. Verschillende ontwerpen werden gedefinieerd en de stroming hierin werd numeriek berekend. De berekeningen gaven het vertrouwen dat het ook mogelijk was om een goed functionerende woelbak in een beperkte ruimte in te passen.

Daarnaast hebben de numerieke berekeningen een aantal aandachtspunten naar voren gebracht. Allereerst bleek dat de benodigde opvoerhoogte een groot aandachtspunt zou zijn bij de modelproeven. In de voorgaande berekeningen is alleen de woelbak beschouwd, maar hiervoor bevindt zich nog een drukvat en leidingwerk. De totale toegestane opvoerhoogte van het hele systeem is beperkt door de eisen aan de toe te passen pomp. In het schaalmodelwerk, besproken in Hoofdstuk 5, is hieraan extra aandacht geschonken.

Daarnaast lieten de berekeningen van de initiële ontwerpen zien dat er bij de instroom van de uitstroomspleet een grote drukgradiënt aanwezig is, waarbij ook een flinke onderdruk ontstaat aan de binnenzijde van de bocht. Dit geeft een ongunstig stroombeeld en in het uiteindelijke ontwerp is deze hoek dan ook afgerond.

5 Fysiek schaalmodelwerk

5.1 Uitgangspunt

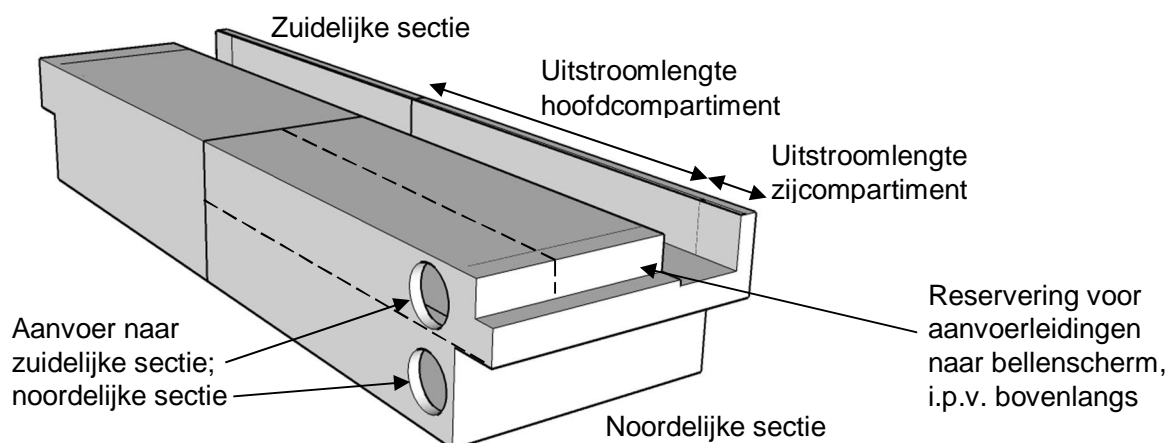
5.1.1 Resultaten numerieke berekeningen

De numerieke berekeningen hebben het gedrag van de stroming in de waterschermbak inzichtelijk gemaakt. Hierbij is onder andere een helische stroming opgemerkt in het woelcompartiment, in de eerste doorgang na de instroom in dit compartiment. Ter plaatse van de volgende doorgang is deze helische stroming gedempt. Er is aangetoond dat ook in de kleinere geometrie van Woelbakontwerp 2 deze helische stroming in voldoende mate gedempt is. Daarbij is de drukval bij Ontwerp 2 kleiner en de uniformering van de uitstroom nog voldoende.

Ter evaluatie van de ontwikkelde waterbakgeometrie in termen van uniformiteit van uitstroming en drukval zal deze op schaal worden uitgevoerd en getest. Omdat de berekeningen met het numerieke stromingsmodel niet de gehele bak betreffen, is het gewenst tevens het gedrag van de stroming zichtbaar te kunnen maken in het schaalmodel. Hierop is ingespeeld in de opzet van het schaalmodel.

5.1.2 Voortschrijdend inzicht inpassing in kolk

In overleg met Rijkswaterstaat en Royal HaskoningDHV is geconcludeerd dat het de voorkeur verdient de aansluiting van de aanvoerleidingen op de waterschermbak aan de noordelijke kolkwand te hebben, in lijn met de schetsontwerpen in de aanbestedingsdocumenten. De aanvoer is dan zoals in onderstaand figuur. In Hoofdstuk 3 werd een aanpassing hierop voorgesteld, waarbij de aanvoerleidingen per sectie centraal werden aangesloten. In dat geval werd de instroom meteen verdeeld, het moest immers naar links ofwel naar rechts verder de sectie in. Deze eerste opdeling komt nu te vervallen: het water stroomt nu vanaf één uiteinde beide secties in.



Figuur 5.1 Plaatsing van aanvoerleidingen in de waterschermbak.

De reden voor deze aanpassing was dat de leidingen naar het midden van de secties constructief zeer lastig realiseerbaar waren. Omdat de waterschermbak uit de kolk getild moet kunnen worden dient deze afgekoppeld te kunnen worden van de aanvoer. Bij de eerdere ontwerpen, met leidingen naar het midden van de twee secties, moesten deze

leidingen na ontkoppeling op zichzelf de overspanning van de kolkbreedte realiseren, wat constructief lastig was.

5.1.3 Aanpassing van het ontwerp

De aanvoer van beide secties vindt nu plaats via de noordelijke sectie. Hierop is het ontwerp aangepast. De bovenste aansluiting op de noordelijke sectie wordt binnen deze sectie doorgezet richting de zuidelijke sectie. Dit geeft een verschil in de interne geometrie van de twee secties. Een ander verschil zit in de aanstroomrichting van de secties, welke in de noordelijke sectie vanaf de wand is en in de zuidelijke sectie van de aansluiting tussen de secties. De twee secties zijn, kortom, niet langer symmetrisch.

Het opnemen van de aanvoer bij de interne geometrie kan, gezien de ruimtelijke beperking van de waterschermbak, enkel bij Woelbakontwerp 2: in dit ontwerp is nog voldoende ruimte om de aanvoer van water intern te plaatsen. Daarbij geven de bovengenoemde resultaten vanuit numeriek onderzoek aan dat deze kleinere woelbakgeometrie in voldoende mate presteert.

Het voor het schaalmodelonderzoek gekozen ontwerp maakt daarom gebruik van Woelbakontwerp 2. Een aanpassing hiervan betreft het volume van het primaire verdeelcompartiment, welke zo groot mogelijk is gekozen. Op deze manier blijven de snelheden in dit compartiment zo laag mogelijk. Het compartiment fungeert dan als een vat met gelijke druk, hetgeen een gelijke verdeling door de gaten in de plaat vergemakkelijkt. Gezien de aanstroming vanuit het uiteinde van de sectie en met name in het geval van de noordelijke sectie, waarbij de aanvoer loodrecht op de verdelingsrichting is, is het realiseren van een nette primaire verdeling zeer lastig. De drukvatwerking en het hiertoe gebruiken van het vergrote volume van het primaire verdeelcompartiment zijn daarom een belangrijk uitgangspunt.

5.2 Doel van het schaalmodelwerk

Het uitvoeren van fysieke modelschaalproeven dient om de prestatie van de waterschermbak te toetsen. Hierbij zijn drie aspecten van belang.

- Uniformiteit van afvoer over de lengte van de uitstroomspleet;
- Drukval over de waterschermbak, m.a.w. verliezen als gevolg van de interne geometrie;
- Robuustheid van het ontwerp.

Binnen het onderzoek is voorzien een aanpassing te kunnen doen aan de geometrie waarop tevens de prestatie van een variantontwerp kan worden gemeten. Op basis van de resultaten van de twee varianten kan vervolgens een keuze worden gemaakt richting het eindontwerp.

5.3 Opzet van het schaalmodelwerk

5.3.1 Schaling

Het gedrag van de stroming in de waterschermbak wordt gedreven door traagheid en viscositeit. Het is, met andere woorden, gepast om het schaalmodel Reynolds te schalen.

$$Re \equiv \frac{vL}{\nu}$$

Waarin

- v gemiddelde snelheid [m/s]
- L karakteristieke afmeting [m]
- ν kinematische viscositeit [m²/s]

De kinematische viscositeit is afhankelijk van de temperatuur van het water, zoals zichtbaar in onderstaande tabel.

Tabel 5.1 Viscositeit als functie van temperatuur.

Temperatuur T [°C]	Kinematische viscositeit [m ² /s]
10	1,307·10 ⁻⁶
15	1,139·10 ⁻⁶
20	1,004·10 ⁻⁶

In Tabel 5.2 staan voor verschillende grootheden de schaalfactoren bij schaling volgens Reynolds gegeven.

Tabel 5.2 Schaalfactoren bij Reynoldsschaling. Er is aangenomen dat de stromingsweerstand onafhankelijk zijn van de stroomsnelheid, hiermee is de schaalfactor voor snelheidsdruk gegeven.

Grootheid	Schaalfactor	Voorbeeld (n = 1/2)	
		Werkelijkheid	Schaalmodel
Lengteschaal	n	1 m	0,5 m
Oppervlakte	n ²	1 m ²	0,25 m ²
Tijd	n ²	1 s	0,25 s
Snelheid	n ⁻¹	1 m/s	2 m/s
Debiet	n	1 m ³ /s	0,5 m ³ /s
Snelheidsdruk ($\propto v^2$)	n ⁻²	1 Pa	4 Pa

De schaling van enkele grootheden is opvallend en wellicht anders dan verwacht.

- Het Reynoldsgetal blijft gelijk wanneer snelheid omgekeerd evenredig geschaald wordt met de geometrie. Dit betekent dat een schaalmodel hogere snelheden nodig heeft.
- Snelheidsdrukken schalen met een factor n⁻². Een model op schaal 1:2 ervaart dus drukken vier maal zo hoog als de drukken in werkelijkheid.
- Tijd in het schaalmodel gaat veel sneller. Daarmee wordt bedoeld dat, in het voorbeeld met schaal n = 1/2, in één seconde meting hetzelfde plaatsvindt als in vier secondes in werkelijkheid. Immers, de afstand tussen twee punten is gehalveerd en de snelheid verdubbeld.

In het bijzonder de schaling van de snelheidsdruk is voor de opzet van het schaalmodel van belang. Bovenstaande schaling houdt in dat krachten op de zijwanden van het schaalmodel van dezelfde grootte zijn als krachten in werkelijkheid. Bovendien wordt het model niet omringd door water en moet daarom een hydrostatische druk worden opgeteld aan de snelheidsdrukken. Dit vormt een bijzondere constructieve uitdaging.

5.3.2 Onafhankelijkheid van weerstand

Het gedrag van een stroming door een geometrie is, algemeen gesteld, afhankelijk van de stroomsnelheid. Dit is het meest uitgesproken als wordt gekeken naar laminaire tegenover turbulente stroming. Weerstandscoefficienten van de geometrie (scherpe verwijdingen of bochten) verschillen tussen deze twee situaties. Wanneer de stroming echter voldoende turbulent is zal het stroombeeld niet langer sterk veranderen. Weerstandscoefficienten blijven nu nagenoeg constant.

Wanneer de stroming voldoende turbulent is, hoeft het Reynolds getal daarom niet noodzakelijk gelijk te blijven. Dit lijkt wellicht tegenstrijdig aan de eerdere bevinding dat,

gezien de belangrijkste fysica achterliggend aan de stroming binnen de waterschermbak, het passend is te schalen volgens Reynolds-schaling. Van belang is wel dat het schaalmodel in dezelfde orde van turbulentie zit als de werkelijke waterschermbak.

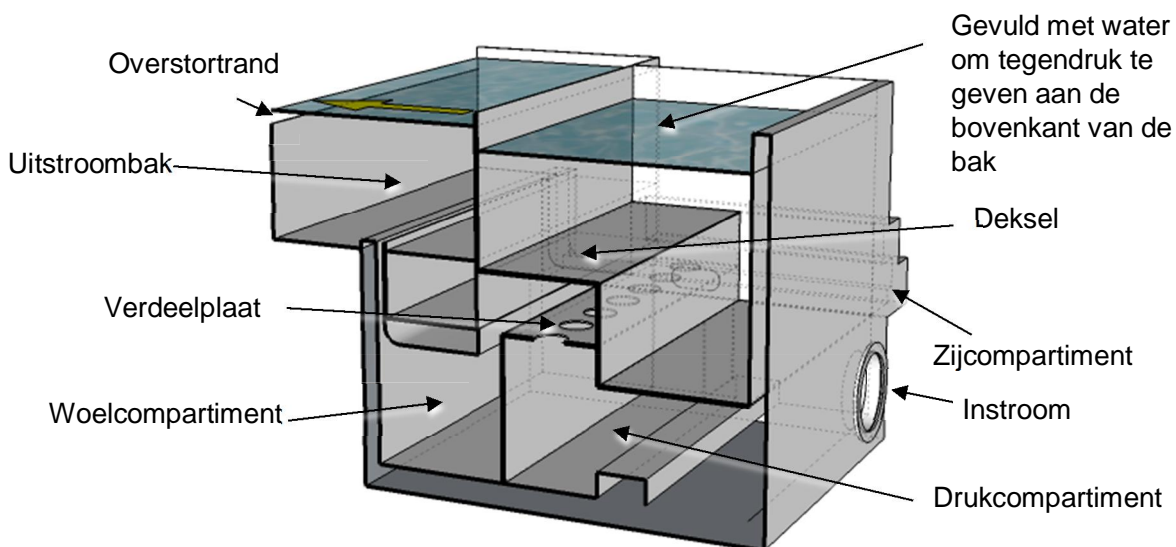
Om de drukken in het schaalmodel te kunnen beperken zal daarom gebruik gemaakt worden van lagere debieten dan volgend uit Reynolds-schaling. De stroming zal voldoende turbulent zijn om overeenstemming te hebben tussen het stromingsgedrag in schaalmodel en in werkelijkheid. Verwacht wordt dat de afwijking in het Reynolds-getal niet doorspeelt in de resultaten van de waterschermbak. Door bij een bereik van debieten te testen zal een eventuele afhankelijkheid kunnen worden herkend en meegenomen in de interpretatie van de resultaten.

5.3.3 Mogelijk maken van aanpassingen

De schaalmodelproeven omvatten ook het testen van een ontwerpvariant. Hiermee wordt de interne geometrie aangepast en het effect daarvan op de prestatie gemeten. Op deze wijze kan eventueel een verbetering van het ontwerp worden gemaakt. Omdat de numerieke berekeningen zeer zwaar zijn en in enkele situaties instabiel werden, is het bepalen van de het effect van ontwerpvarianten enkel bij het schaalmodelwerk komen te liggen.

Het aanpassen van het schaalmodel is echter niet vanzelfsprekend. Het model is in feite een houten bak welke op druk wordt gezet en waarin de doorstroming binnenin vrij moet zijn van obstakels. Een behoorlijke verstijving is nodig en zit hoofdzakelijk aan de buitenkant, waarmee de interne geometrie werkelijk is ingebouwd. Bovendien moeten hoeken en verbindingen tussen plaatwerk en verstijving zo waterdicht mogelijk zijn uitgevoerd. Het aanpassen van de interne geometrie zou dus betekenen dat het model deels uiteengezaagd moet worden, als hier niet van tevoren rekening mee gehouden was.

Er is voor gekozen de verdeelplaat vervangbaar te maken. Hiermee wordt bedoeld de interne horizontale plaat met twaalf gaten, welke het drukcompartiment en het woelcompartiment van elkaar scheidt. Om deze plaat te vervangen moet ook het deksel van de waterschermbak afneembaar zijn, hetgeen de constructie van het schaalmodel sterk compliceerde.



Figuur 5.2 Doorsnede van de meetopstelling, kijkend naar rechts.

5.3.4 Zichtbaar maken van stroming

Er is geprobeerd de stroming in het model zoveel mogelijk *zichtbaar* te maken, niet enkel te meten. Ook dit volgt uit het optreden van numerieke instabiliteiten gedurende het numerieke werk, waardoor het numeriek berekenen van de volledige geometrie niet mogelijk bleek binnen de beschikbare tijd.

Hiertoe is aan het verre uiteinde van de bak (d.w.z. de linkerzijde) een tweetal vensters gemaakt, zie Figuur 5.3. Aan de binnenkant van de bak zijn tegen deze vensters een achttal wollen draadjes bevestigd. Hiermee wordt de richting, kracht en veranderlijkheid van de stroming op deze punten gemakkelijk inzichtelijk gemaakt.

5.3.5 Verschillen tussen schaalmodel en werkelijk ontwerp

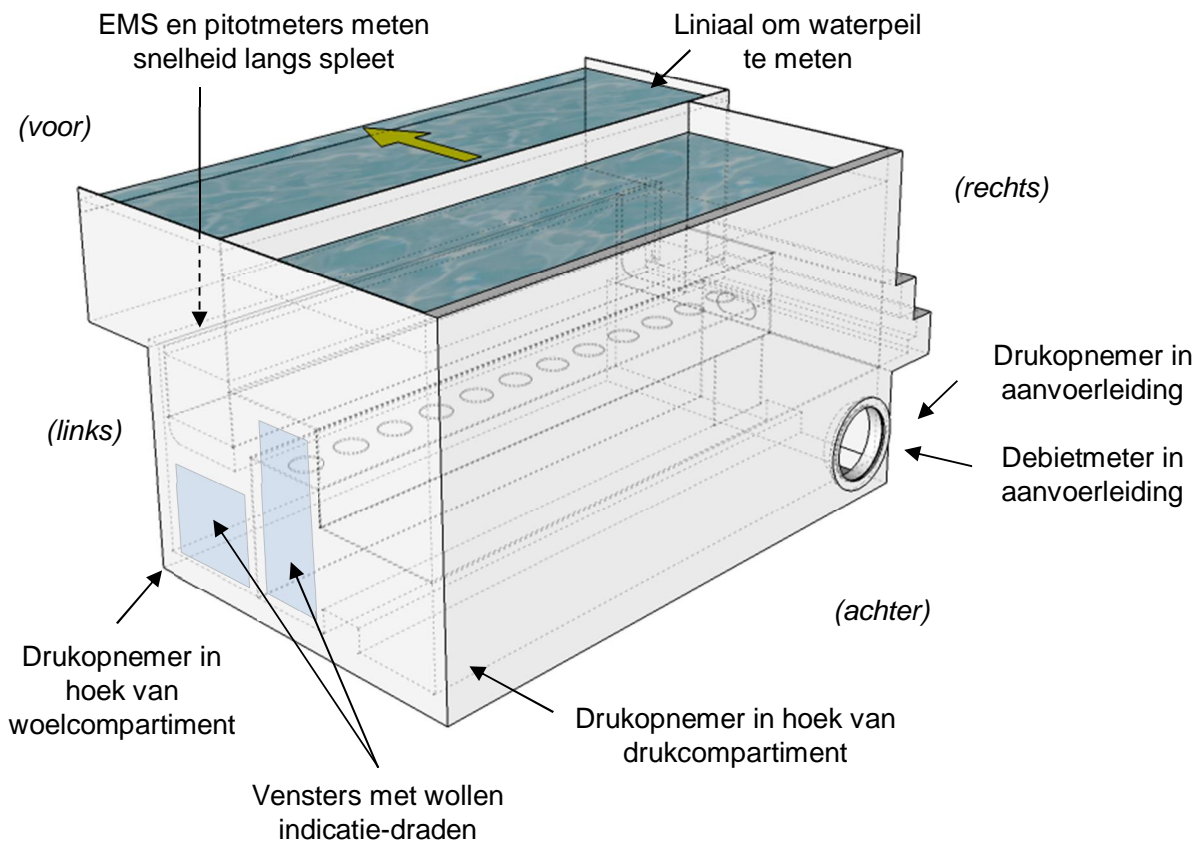
De interne geometrie is zo goed mogelijk overgenomen in het schaalmodel. Een verschil kan gevonden worden in de plaatdikte. Het schaalmodel maakt gebruik van hout, met platen van 18 mm en 25 mm dikte. In werkelijkheid zal staalplaat gebruikt worden, met een geschatte dikte van 10 mm. Natuurlijk heeft de dikte van de buitenbeplating geen invloed op het gedrag van de stroming. Wel is dikte van de beplating aan de binnenzijde van de bak van belang, m.a.w. de scheidingsplaten tussen de verschillende compartimenten. De stroming door de twaalf gaten in deze plaat is mogelijk anders, omdat de vorm van aanstroming en loslating bij afhankelijk zijn van de details van zo'n gat.

5.4 Meetmethode

Om inzicht te geven in het gedrag van de stroming zijn verschillende grootheden gemeten.

- Op drie locaties zijn drukopnemers (dro1 – dro3) geplaatst.
 - dro1: in de aanvoerleiding, juist voor de aansluiting met de waterschermbak;
 - dro2: in de linkeronderhoek van het drukcompartiment;
 - dro3: in de linkeronderhoek van het woelcompartiment.
- Twee EMS-meters zijn gebruikt om de uitstroomsnelheid van de spleet te meten. Een raster van 43 posities was voorzien om de instrumenten te fixeren. Op deze wijze is reeks metingen langs de spleet uitgevoerd.
- Om de tegendruk aan de spleet te bepalen is steeds het waterpeil gemeten in de uitstroombak, met een liniaal op een vaste positie.
- Wollen draadjes aan de binnenzijde van vensters in het model zijn gebruikt als indicatoren voor de veranderlijkheid, richting en snelheid van de stroming.
- Een debietmeter was opgenomen in de aanvoerleiding om een debiet in te kunnen stellen en de variantie hiervan te registreren.

Onderstaand figuur toont de plaatsing van de verschillende instrumenten. Deze is ook gegeven met een foto van de opstelling, Figuur B.1, opgenomen in de Appendix.



Figuur 5.3 Overzicht van de meetopstelling en de meetinstrumenten.

De verschillende meetinstrumenten worden op Deltares onderhouden. Drukopnemers en EMS-instrumenten zijn kort voor de experimenten gekalibreerd en nagekeken.

Een behoorlijke inspanning is gestoken in het ontwikkelen van een tweede methode van stroomsnelheidsmeting. Deze was van belang om de nauwkeurigheid en betrouwbaarheid van de EMS metingen te duiden. Deze tweede meetmethode bestond uit pitotbuizen en daarvan afgeleide instrumenten. Met deze instrumenten is de uitstroomsnelheid boven de spleet gemeten, op dezelfde manier als met de EMS-instrumenten. Tevens is hiermee een meting van snelheden in de waterschermbak uitgevoerd, waarvoor afsluitbare gaten in het deksel boven de verdeelplaat waren voorzien. De resultaten met deze pitotbuizen gaven echter te veel spreiding en bleken in mindere mate reproduceerbaar. Daarop is besloten de metingen voort te zetten met EMS-instrumenten. De bespreking in het voorliggende rapport behandelt enkel deze metingen. Er is voldoende vertrouwen in de resultaten van de EMS-metingen, zoals later zal worden toegelicht.

De uitstroom vanuit de spleet kan, afhankelijk van het debiet, een hoge snelheid hebben. In het geval van het maximale debiet, 200 L/s modelschaal, bedraagt dit 3,6 m/s gemiddeld over de spleet. Het waterpeil hierboven zal daarom niet zo vlak zijn als in bovenstaand figuur is geschetst. Het golvende oppervlak heeft een invloed op de meting, omdat tegendrukken ter hoogte van de spleet hiermee niet-uniform zijn, wat een effect heeft op de snelheden langs de spleetlengte. Er kan worden opgemerkt dat ook in werkelijkheid golven boven het waterscherm zullen optreden, tijdens of na het invaren van schepen of door wind. Omdat het oppervlak in het schaalmodel echter relatief dicht op de spleet zit, is het effect veel uitgesprokener. De verstoring is hiermee dus significant groter dan in werkelijkheid.

De toepassing van tijdsmiddeling van het meetsignaal vermindert de onzekerheid van de meetwaarde als gevolg van ruis. In de metingen is, in het geval van EMS-metingen langs de spleet, gekozen voor een meetduur van tenminste 150 s per positie. De snelle verstoringen zijn hiermee voldoende uitgemiddeld.

5.5 Meetvarianten en -condities

Er zijn verschillende geometrieën getest, waarin het verschil bestaat in de dimensies van de gaten in de verdeelplaat. Deze geometrieën zijn getest op verschillende debieten.

5.5.1 Debieten

De waterschermbak wordt getest op een vijftal debieten: 75, 110, 145, 175 en 200 L/s modelschaal. Op deze wijze wordt een eventuele snelheidsafhankelijkheid van de interne weerstanden van de waterschermbak duidelijk. Deze eventuele afhankelijkheid is in Sectie 5.3.2 besproken, waarin tevens is gegeven dat verwacht wordt dat hiervan geen sprake is wanneer de stroming in modelschaal in dezelfde mate turbulent is als de stroming in werkelijkheid.

Met een aangenomen temperatuur 15°C volgen de volgende Reynoldsgetallen voor boven- en ondergrens van het debiet in zowel werkelijkheid als schaalmodel.

	Werkelijkheid		Schaalmodel		
Debiet per sectie [m ³ /s]	0,700	0,300	0,200	0,175	0,075
Spleetlengte [m]	4,4	4,4	2,2	2,2	2,2
Spleetbreedte [m]	0,05	0,05	0,025	0,025	0,025
Gemiddelde snelheid in de uitstroomspleet [m/s]	3,18	1,36	3,64	3,18	1,36
Re [-]	140·10 ³	59,9·10 ³	79,8·10 ³	69,8·10 ³	29,9·10 ³

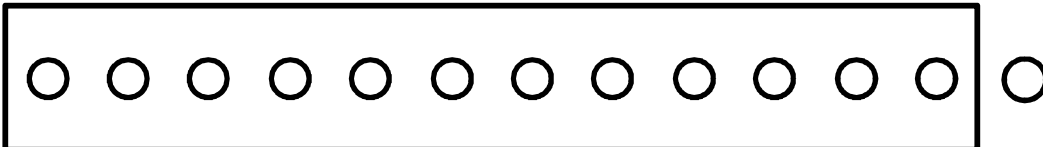
Te zien is dat de snelheden in het schaalmodel bij debieten 75 en 175 L/s overeenkomen met de snelheden in het bereik van normaal gebruik van het waterscherp, 300 – 700 L/s. Hoewel de Reynoldsgetallen in het schaalmodel niet gelijk zijn aan de Reynoldsgetallen in werkelijkheid – dan hadden de schaalmodeldebieten 150 tot 350 L/s moeten bedragen - zijn ze in dezelfde orde grootte en is er een overlap in de bereiken.

5.5.2 Ontwerpen

Gedurende het project zijn uiteindelijk vier verschillende varianten getest. Variant 1 was hierbij het uitgangspunt en is in overeenstemming met de geometrie zoals deze numeriek was berekend. Gezien de resultaten zijn de doorstroomopeningen vergroot in Variant 2. Variant 3 is hierop gebaseerd, waarbij ter indicatie van de robuustheid van de geometrie een enkel gat geblokkeerd is. Aanvullende tests waren uitgevoerd met nogmaals vergrote gaten, Variant 4.

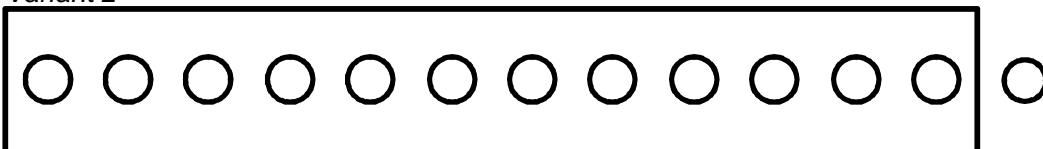
De lengte van de uitstroomspleet van het hoofdcompartiment tegenover die van het zijcompartiment (zie Figuur 5.1) verhouden zich als 90,8%:9,2%. Initieel is ervoor gekozen het doorstroomoppervlak richting het zijoppervlak boven evenredig te dimensioneren.

Variant 1



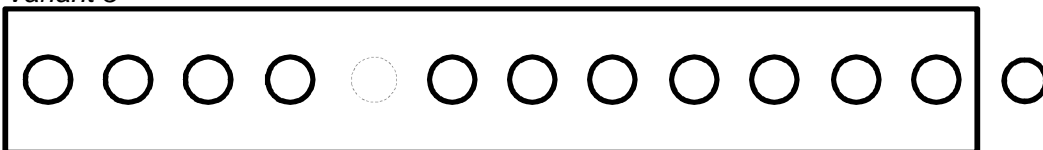
In de verdeelplaat 12 gaten van D60 mm en aan de kopse zijde een gat van D70 mm. Totaal doorstroomoppervlak: 378 cm², 10,2% richting zijcompartiment.

Variant 2



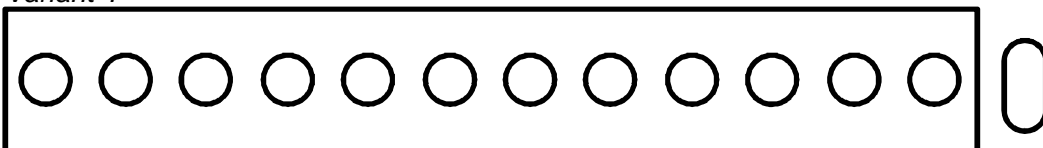
In de verdeelplaat 12 gaten van D80 mm en aan de kopse zijde een gat van D70 mm. Totaal doorstroomoppervlak: 642 cm², 6,0% richting zijcompartiment.

Variant 3



Als Variant 2, nu met een gat in de verdeelplaat afgedicht. Totaal doorstroomoppervlak: 591 cm², 6,5% richting zijcompartiment.

Variant 4



In de verdeelplaat 12 gaten van D100 mm en aan de kopse zijde een gat met oppervlakte 108 cm². Totaal doorstroomoppervlak: 1051 cm², 10,3% richting zijcompartiment.

5.6 Proevenmatrix

De volgende tweeëndertig proeven zijn gebruik in de analyse binnen dit rapport.

De referentie-aanduiding bevat het variantnummer, het geteste debiet en het type meting, waarbij *n* staat voor nulmeting, *s* voor een serie snelheidsmetingen langs de uitstroomspleet, *p* voor een korte meting van drukken en *h* voor een herhalingsmeting.

Tabel 5.3 Uitgevoerde proeven welke zijn gebruikt binnen de huidige analyse.

Referentie	Bestand	Variant	Debiet [Loofdstu/s]	Omschrijving
V1n	20130826 01	(1)	0	Nulmeting
V1Q200s	03	1	200	EMS-serie
V1Q175s	20130827 02	1	175	EMS-serie
V1Q110s	03	1	110	EMS-serie
V1Q145s	04	1	145	EMS-serie (*1)
V1Q075s	05	1	75	EMS-serie
V1Q145sh	06	1	145	Herhaling (*1)
V2n	20130829 01	(2)	0	Nulmeting
V2Q075p	02	2	75	Drukmeting
V2Q110p	03	2	110	Drukmeting
V2Q145p	04	2	145	Drukmeting
V2Q175p	05	2	175	Drukmeting
V2Q200p	06	2	200	Drukmeting
V2Q075s	20130830 02	2	75	EMS-serie
V2Q110s	03	2	110	EMS-serie
V2Q145s	04	2	145	EMS-serie (*2)
V2Q175s	05	2	175	EMS-serie
V2Q200s	06	2	200	EMS-serie
V2Q145sh	07	2	145	Herhaling (*2)
V3Q145s	20130901 01	3	145	EMS-serie
V3Q200s	03&04	3	200	EMS-serie
V3Q075p	20130902 05	3	75	Drukmeting
V3Q110p	06	3	110	Drukmeting
V3Q175p	07	3	175	Drukmeting
V4Q200p	20130912 01	4	200	Drukmeting
V4Q175p	02	4	175	Drukmeting
V4Q145p	03	4	145	Drukmeting
V4Q110p	04	4	110	Drukmeting
V4Q075p	05	4	75	Drukmeting
V4Q145s	06	4	145	EMS-serie
V4Q200s	07	4	200	EMS-serie
V4Q075s	08	4	75	EMS-serie

5.7 Meetresultaten

Onderstaand worden de meetresultaten besproken. Hierbij worden verschillende aspecten nader bekeken.

- Drukval als functie van debiet, voor verschillende varianten
- Uniformiteit van uitstroom
- Robuustheid

5.7.1 Drukval als functie van debiet, voor de verschillende varianten

Onderstaande figuren tonen de drukval, dat wil zeggen het energieverlies binnen de waterschermbak als functie van het debiet. De data zijn gebaseerd op de drie drukopnemers op de verschillende plaatsen: (dro1) in de aanvoerleiding juist voor de aansluiting, (dro2) in het drukcompartiment en (dro3) in het woelcompartiment. De meters in de bak zijn in een hoek geplaatst zodat de gemeten druk niet beïnvloed is door snelheden langs het instrument. Nulmetingen, d.w.z. metingen waarbij de bak gevuld is tot aan de overstortrand maar geen doorstroom kent, zijn uitgevoerd om de statische druk vast te stellen. De gepresenteerde resultaten zijn de gemiddelde gemeten drukken tijdens de verschillende debieten minus deze nulmeting en tonen daarmee de overdruk die nodig is voor het realiseren van een debiet. De getoonde overdruk omvat ook de waterpeilstijging in de uitstroombak boven de overstortrand en is daarmee enkele centimeters te hoog.

In de figuren is het verloop van (over)druk in de bak te herkennen, uitgedrukt in meters waterkolom. Er wordt een onderscheid gemaakt tussen twee interne verliezen (a en b in Figuur 5.4) en het uitstroomverlies. Component a is het verlies tussen het drukcompartiment en het woelcompartiment en omvat hiermee de vernauwing van de verdeelplaat en een scherpe bocht. Component b is het verlies van het woelcompartiment door de spleet tot aan het punt van uitstromen.

Er is verondersteld dat het uitstroomverlies volkomen is, d.w.z. de energiehoogte wordt volkomen gedissipeerd. Bij het debiet van 175 L/s modelschaal bedraagt dit verlies dan 0,52 m. Het uitstroomverlies is niet gemeten maar op basis van de bovengenoemde aanname ingetekend.

In de figuren wordt tevens een fit getoond. Het energieverlies van een stroming is kwadratisch afhankelijk van de stroomsnelheid en wordt algemeen gegeven door de volgende formule.

$$\Delta H = \xi(u_{\text{ref}}) \frac{u_{\text{ref}}^2}{2g}$$

Waarin $\xi(u_{\text{ref}})$ afhankelijk kan zijn van de stroomsnelheid. Wanneer deze verliescoëfficiënt onafhankelijk van de snelheid wordt verondersteld is de relatie tussen verlies en debiet kwadratisch. Zoals besproken is de veronderstelling inderdaad dat ξ onafhankelijk is van de snelheid, omdat de stroming in voldoende mate turbulent is. Hierop is in de figuren een kwadratisch verband op de meetresultaten gefit waarbij als referentiesnelheid u_{ref} gekozen is voor de instroomsnelheid.

$$u_{\text{ref}} = \frac{Q}{\pi R^2}$$

Waarin R de straal van de aanvoerleiding (125 mm modelschaal) is.

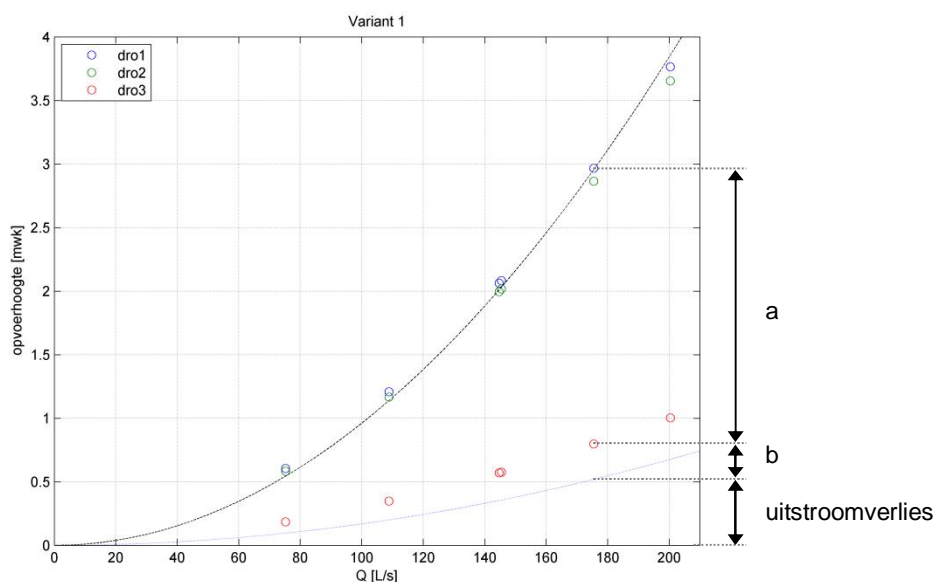
Onderstaande tabel toont de resulterende ξ -waardes per variant. De verliescoëfficiënt van de uitstroom, uitgedrukt in de referentiesnelheid, is $\xi_{\text{uitstroom}} = 0,80$. Te zien is dat Variant 4 het interne energieverlies (a+b) heeft verlaagd tot ca. 30% van het energieverlies bij Variant 1.

Tabel 5.4 Verliescoëfficiënten, gerelateerd aan de instroomsnelheid.

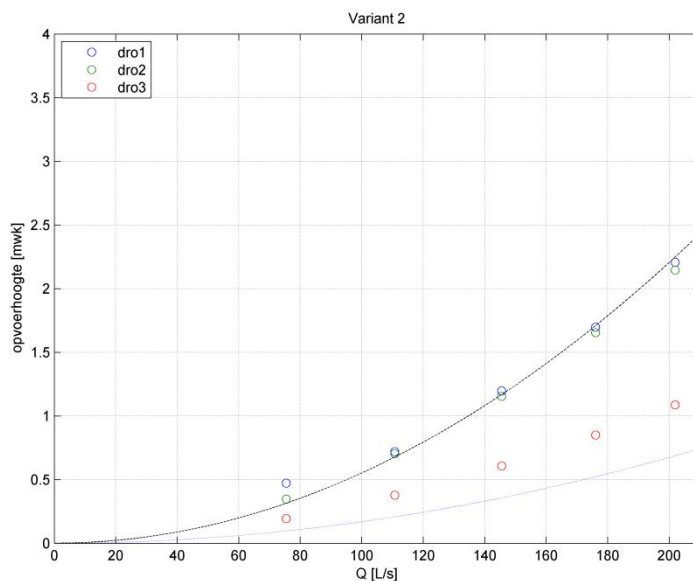
Variant	ξ -waarde inclusief uitstroom	R ² -waarde	ξ -waarde exclusief uitstroom
Variant 1	4,5	0,997	3,7
Variant 2	2,6	0,985	1,8
Variant 4	1,9	0,995	1,1

De fit ligt zeer goed op de meetwaardes, zoals is uitgedrukt in R²-waardes in bovenstaande tabel. Daarmee is aangetoond dat de verliescoëfficiënt niet of nauwelijks afhankelijk is van de snelheid. De wijze van schalen binnen deze modelproeven is daarom passend.

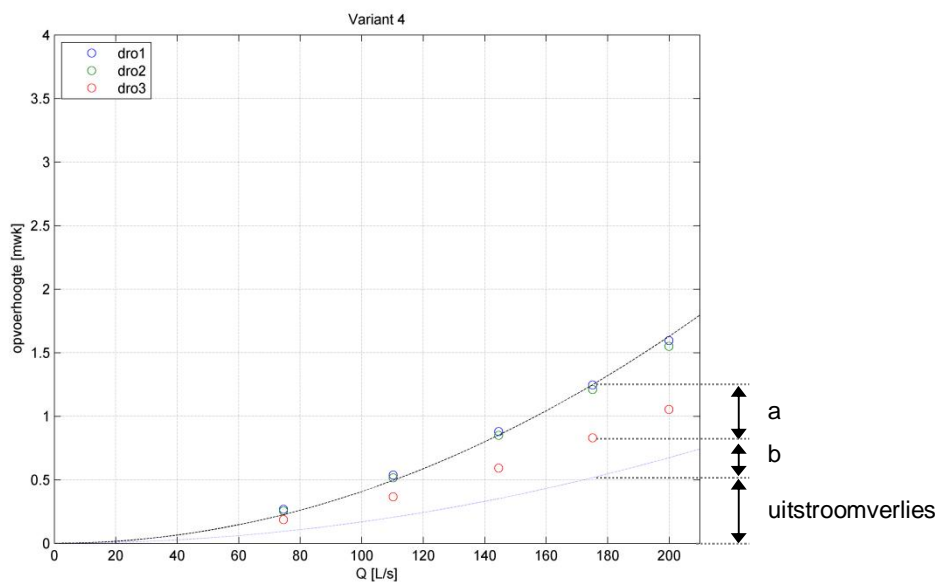
De snelheden in werkelijkheid, bij debieten van 300—700 L/s per sectie prototypeschaal, hebben dezelfde magnitude als bij debieten 75—175 L/s modelschaal. Gevonden verliezen en snelheidsdrukken zijn daarom zonder correcties te verscalen naar werkelijkheid: de magnitudes komen overeen met prototypeschaal.



Figuur 5.4 Verliezen in de waterschermbak bij Variant 1; gebaseerd op V1Q075s, V1Q110s, V1Q145s V1Q145sh, V1Q175s, V1Q200s en V2n. Aangegeven zijn de verschillende componenten bij Q = 175 L/s modelschaal.



Figuur 5.5 Verliezen in de waterschermbak bij Variant 2; gebaseerd op V2Q075p, V2Q110p, V2Q145p V2Q175p, V2Q200p en V2n.



Figuur 5.6 Verliezen in de waterschermbak bij Variant 2; gebaseerd op V3Q075p, V3Q110p, V3Q145p V3Q175p, V3Q200p en V2n.

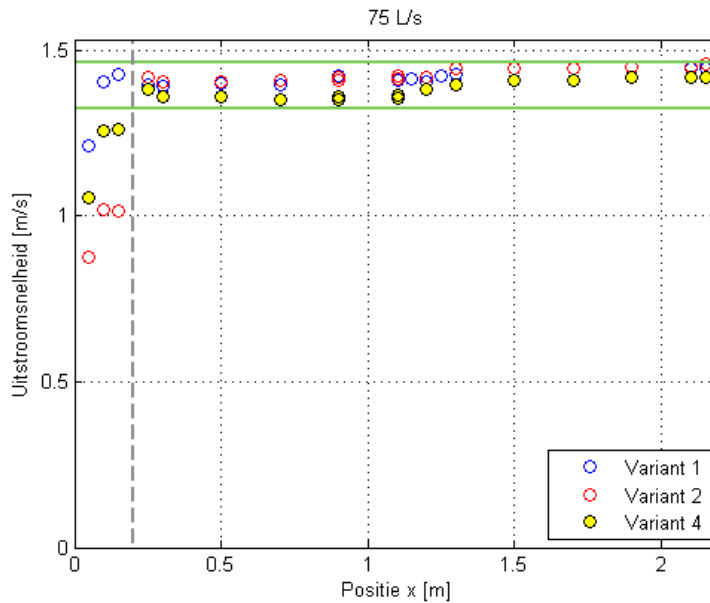
5.7.2 Uniformiteit

Een belangrijke vraag is in hoeverre de interne geometrie er in slaagt het debiet te verspreiden over de spleetlengte, d.w.z. de breedte van de kolk. Deze wordt in de figuren aangeduid met coördinaat x, vanaf de kolkwand gericht.

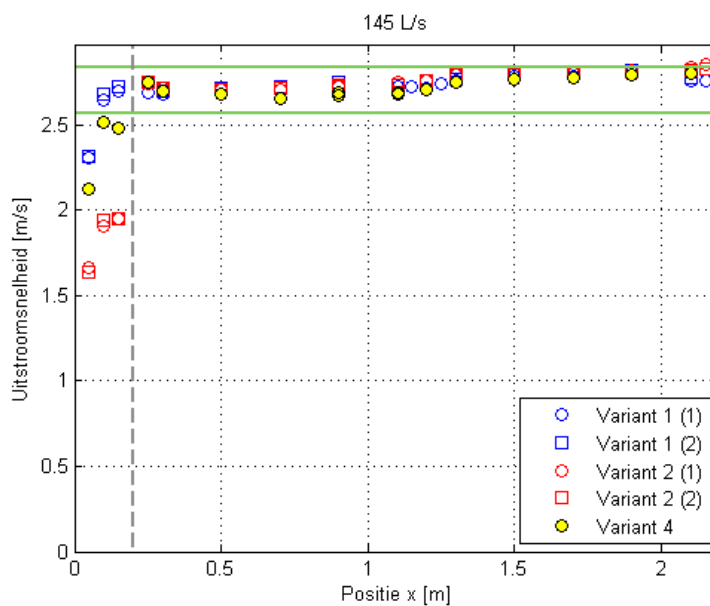
De metingen zijn uitgevoerd met twee EMS-instrumenten. De resultaten van de tweemaal gemeten locaties, op $x = 0,9$ m en op $x = 1,1$ m, zijn op elkaar geschaald. Hierbij zijn de gemiddelden uit de meting met EMS-instrument 2 zo goed mogelijk op de gemiddelden van

EMS-instrument 1 geschaald door een factor α te kiezen, m.a.w. $\alpha \cdot u_{\text{EMS}2} \approx u_{\text{EMS}1}$ voor de genoemde locaties.

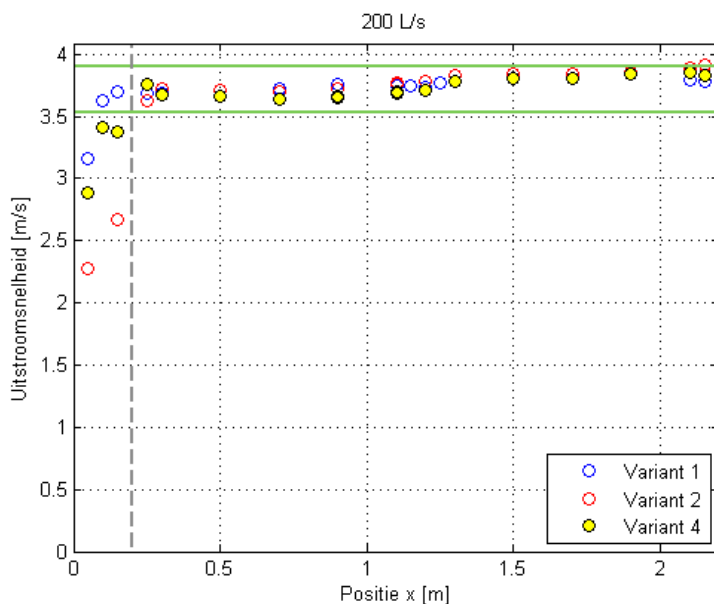
Onderstaande drie figuren tonen de gemiddelde gemeten uitstroomsnelheden van de verschillende varianten, voor drie verschillende debieten.



Figuur 5.7 Gemiddelde uitstroomsnelheden bij 75 L/s modelschaal en verschillende varianten. Gebaseerd op V1Q075 V2Q075 V4Q075. Aangegeven in groene lijnen in een bandbreedte van $\pm 5\%$ (gebaseerd op de mediaanwaarde van de getoonde snelheden). De grijze stippellijn geeft de scheiding aan tussen het zijcompartiment (links in het figuur) en het grote compartiment.



Figuur 5.8 Gemiddelde uitstroomsnelheden bij 145 L/s modelschaal en verschillende varianten. Gebaseerd op V1Q145s V1Q145sh V2Q145s V2Q145sh en V4Q145.



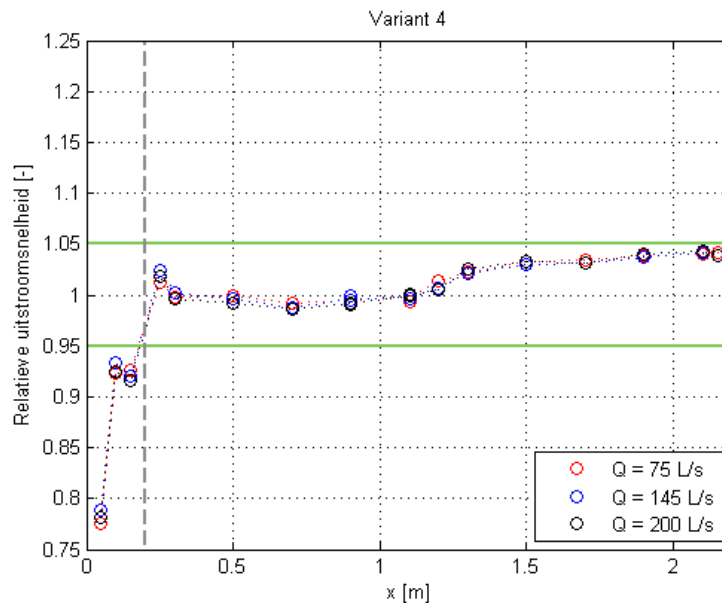
Figuur 5.9 Gemiddelde uitstroomsnelheden bij 200 L/s modelschaal en verschillende varianten. Gebaseerd op V1Q200 V2Q200 V4Q200.

Opvallend zijn de lagere snelheden die worden gevonden bij de uitstroom vanuit het zijcompartiment. Bij Variant 1 (blauwe cirkels) zijn de gevonden snelheden redelijk goed binnen de $\pm 5\%$ range. Een uitzondering hierop is de gemeten snelheid direct aan de wand. Gezien de complexe geometrie, opgelegd door de reserveringen voor de verstijving en de aanvoer van lucht naar het bellenscherm, is deze uitzondering niet verassend.

Variant 2 laat duidelijk lagere snelheden zien vanuit het zijcompartiment. De relatieve doorstroomoppervlakte is in deze variant ca. 6,0% en daarmee significant kleiner dan de relatieve lengte van de spleet vanuit dit gedeelte van 9,6%. De relatief lage uitstroom is dan ook hiermee te verklaren. In Variant 4 is geprobeerd opnieuw een goede overeenstemming te krijgen tussen deze ratio's. De snelheden liggen inderdaad hoger dan de uitstroomsnelheden vanuit het zijcompartiment bij Variant 2, echter alsnog buiten de $\pm 5\%$ bandbreedte.

De verdeling in het hoofdgedeelte, vanuit het woelcompartiment, is zeer goed en valt binnen de $\pm 5\%$ bandbreedte. Opgemerkt kan worden het verloop in snelheden, waarbij de snelheden aan de instroomzijde (kleine x-waardes) lager zijn dan aan de verre zijde (hoge x). Dit verloop is meer uitgesproken bij Variant 4.

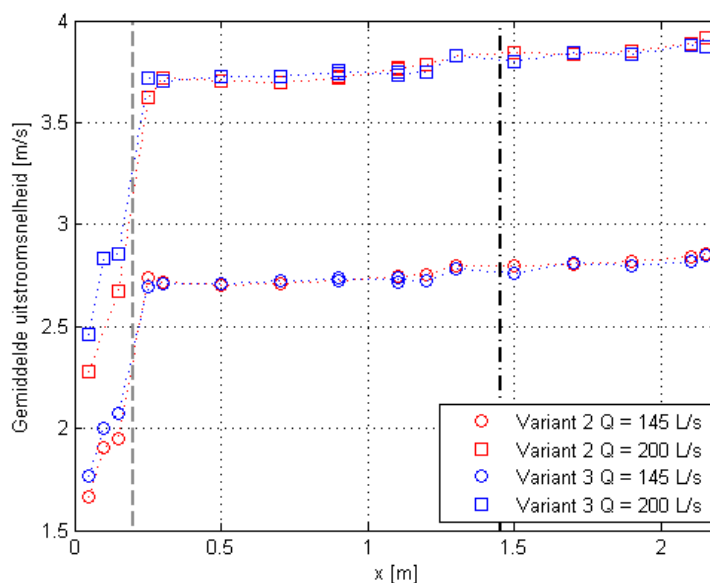
Onderstaand is nogmaals de verdeling van de uitstroomsnelheden weergegeven, waarbij de snelheden zijn genormaliseerd zodat de resultaten van de proeven met verschillende debieten op elkaar zijn komen te liggen. Te zien zijn de resultaten van Variant 4 voor een drietal debieten. De verdeling over de spleetlengte is vrijwel identiek voor de verschillende proeven. Hieruit blijkt opnieuw dat de keuze voor de geteste debieten passend is: de debieten hebben, wanneer zij voldoende turbulent zijn, geen invloed op de verdeling langs de spleet.



Figuur 5.10 Genormaliseerde snelheidsverdeling over de spleetlengte voor Variant 4. Gebaseerd op V4Q145s, V4Q200s en V4Q075s. In groen is aangegeven een $\pm 5\%$ bandbreedte. In gestippeld grijs is aangegeven de scheiding van het hoofdgedeelte en het zijcompartiment.

5.8 Robuustheid van de geometrie: gedrag bij verstopping

Onderstaande figuur toont een vergelijking van de uniformering van de stroming door Variant 2 versus Variant 3. Het verschil in deze varianten is gegeven door de blokkering van een enkele opening in de verdeelplaat. De positie van deze opening is weergegeven met de gestreept-gestippelde zwarte lijn.



Figuur 5.11 Gemiddelde uitstroomsnelheden van verschillende proeven, combinaties van verschillende varianten en debieten. Gebaseerd op V2Q145s, V2Q200s, V3Q145s en V3Q200s. In gestippeld grijs is aangegeven de scheiding van het hoofdgedeelte en het zijcompartiment. In gestreept-gestippeld zwart is aangegeven de locatie van de geblokkeerde opening in de verdeelplaat.

Er kan opgemerkt worden dat bij het meetpunt nabij het geblokkeerde gat de snelheid iets is verlaagd. Echter zeer beperkt. Hieruit wordt opgemaakt dat de stroming na de verdeelplaat - de bocht en het woelcompartiment – voldoende corrigerend werkt. Een ander verschil wordt gevonden bij de uitstroming vanuit het zijcompartiment, welke enigszins groter is bij Variant 3. Door de verstopping is de relatieve opening naar het zijcompartiment groter. Ook dit effect is beperkt. Geconcludeerd wordt daarom dat van een verstopping van de verdeelplaat dus geen effect merkbaar is aan de uitstroming.

5.9 Nauwkeurigheid van metingen

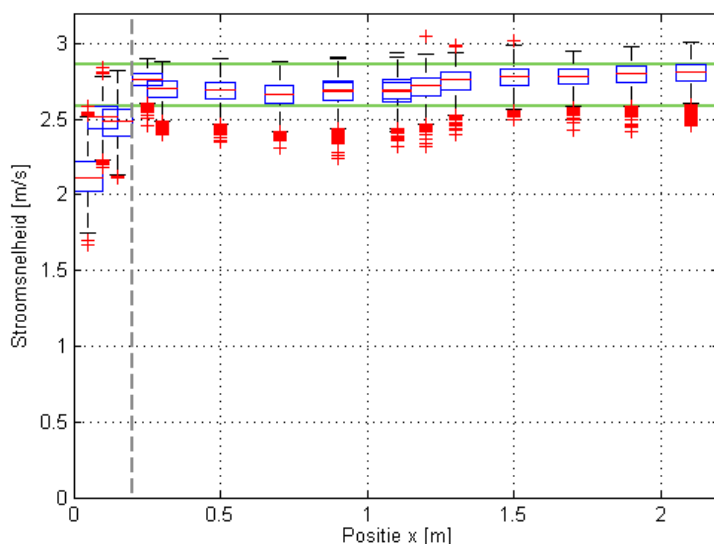
5.9.1 Herhaalbaarheid

Figuur 5.8 toonde de gemiddelde resultaten van snelheidsmetingen met EMS-instrumenten bij $Q = 145$ L/s modelschaal en verschillende varianten. Voor Variant 1 en 2 zijn twee series van metingen opgenomen. Dit toont de herhaalbaarheid van de metingen. Dit figuur toont dat de uitkomsten zeer dicht op elkaar liggen, hetgeen een goede reproduceerbaarheid van de metingen aantoont.

5.9.2 Spreiding in tijd

Onderstaand figuur toont de spreiding van de uitstroomsnelheid in tijd middels boxplots per meetlocatie. De blauwe contour geeft hierbij de 25% en 75% percentiel aan, m.a.w. 50% van de metingen valt binnen deze contour. De zwarte stippellijnen geven de extreme waarden aan, de rode + markeringen de outliers.

De spreiding van de snelheden in de tijd is van een orde $\pm 10\%$ wanneer extreme waarden worden beschouwd. 50% van de tijd blijft spreiding in een bandbreedte van ca. $\pm 2\%$.



Figuur 5.12 Spreiding van snelheden in tijd, per positie, voor Variant 4 en $Q = 145$ L/s modelschaal.

5.10 Conclusies

- Een meetopstelling is opgezet waarbij verschillende varianten getest konden worden. Uiteindelijk zijn vier varianten toegepast, welke verschillen in de doorstroomopeningen vanuit het drukcompartiment naar het woel- en zijcompartiment. De opening is hierbij steeds groter gekozen.
- De metingen zijn zeer goed herhaalbaar. Tevens is aangetoond dat de wijze van schaling van het debiet passend is. Hoewel de gemeten debieten niet compleet overeenkomen met de debieten in prototypeschaal, is te zien dat de prestatie van de waterschermbak in werkelijkheid gelijk kan worden verwacht aan de prestatie van het schaalmodel.
- De afmetingen van de gaten hebben een grote invloed op het verlies binnen de waterschermbak. Variant 4 (gaten van D100 mm modelschaal) beperkt het totale interne verlies tot 30% ten opzichte van Variant 1 (D60mm modelschaal).
- De uitstroomuniformiteit van de waterschermbak is voor alle varianten zeer goed. In het hoofdcompartiment vallen de gemiddelde snelheden langs de uitstroomspleet alle binnen een bandbreedte van $\pm 5\%$. De snelheden vanuit het zijcompartiment zijn lager, afhankelijk van de relatieve doorstroomopening naar dit compartiment.
- De geometrie van de waterschermbak blijkt zeer robuust tegen verstoppingen in de verdeelplaat: verstopping van één gat geeft geen zichtbare verandering van uitstroom. Verwacht wordt dat de stroming in het woelcompartiment en de vernauwing van de uitstroomspleet corrigerend werkt op verstoringen vroeg in de bak.
- Gezien de beperking in drukval en de voldoende uniformering van de stroming heeft Variant 4 de voorkeur en deze zal worden gebruikt als basis voor het eindontwerp.

6 Eindontwerp

Het ontwerp zoals dit is getest in het schaalmodel hield niet enkel rekening met de te verwachten hydraulica, maar ook met de overige (constructieve) eisen. Hoewel de waterschermbak niet constructief was doorgerekend, is een reservering gemaakt in de beschikbare ruimte waarin de constructie vormgegeven kan worden. Tevens is de opzet van de compartimenten zodanig dat ruimte voor mangaten kan worden gevonden.

Het eindontwerp van de waterschermbak is besproken in het Deltares memo *Interne geometrie waterschermbak PKJS* (1207406-003-HYE-0002) dd. 19 september 2013. Deze is integraal opgenomen als dit rapport als Appendix F. Ter overdracht naar de aannemer werd hierbij ook het ontwerp in digitale vorm bijgeleverd, als Google Sketchup bestand. Dit bestand is geen onderdeel van het voorliggende rapport.

7 Recapitulatie en conclusies

Binnen dit onderzoek is het hydraulisch ontwerp van de waterschermbak voor de pilot Krammerjachtensluis (PKJS) ontwikkeld, door de interne geometrie hiervan te definiëren. Op basis van de ontwikkelingen en metingen aan de Stevinsluis in het kader van de Volkeraksluisstudies is een concept ontwikkeld en ingepast aan de randvoorwaarden van het huidige project.

De randvoorwaarden werden gesteld in de aanbestedingsdocumenten en behandelden onder andere de inpassing van de bak in de jachtenkolk, waaruit de externe geometrie van de bak volgt. Tevens werden eisen gesteld aan de constructie van de waterschermbak: deze dient op de verspringing in de kolkwand te rusten en omvat constructief ook het bellenscherm. Voorts waren er eisen rondom onderhoud en robuustheid. Hoewel detaillering van deze aspecten buiten de scope van het onderzoek valt (bijvoorbeeld de plaatsing van mangaten) was het nodig het ontwerp zodanig vorm te geven dat aan deze eisen voldaan kon worden; dit is gedaan door marges te kiezen tussen de gebruikte interne afmetingen en de mogelijk te gebruiken externe afmetingen.

In de genoemde documenten werden ook het bereik van debieten van het waterscherm, afhankelijk van de waterstand, en de beoogde uniformiteitstolerantie gegeven. Ten slotte werden de capaciteit van de voorziene pompen en daarmee het maximale energieverlies binnen de waterschermbak gegeven.

Het toegepaste concept maakt gebruik van een aantal hydraulische processen: (1) een grove verdeling door een plaat met beperkte doorstroomopeningen, (2) de uniformerende werking van afwisselend vernauwen en verbreden van de stroming en (3) de verdelende werking van een neer of zgn. 'wals'.

Het concept en de randvoorwaarden uit de aanbestedingsdocumenten hebben geleid tot twee initiële ontwerpen, welke verschillen in omvang en het aantal 'kamers' waardoor de stroming zich beweegt. Beide ontwerpen maakten gebruik van een zgn. primair verdeelcompartiment, een woelkamer, verschillende nauwe doorgangen en uiteindelijk een nauwe uitstroomspleet. De spleet in de verspringing van de kolkwand wordt via een gescheiden zijcompartiment geleid gezien de beperkte beschikbare ruimte.

De initiële ontwerpen zijn beide doorgerekend met het computational fluid dynamics (CFD) pakket OpenFoam. Hierbij is de berekening van grote domeinen zeer zwaar en gemakkelijk instabiel gebleken. De gebruikte berekeningen omvatten daardoor niet de complete waterschermbak maar simuleerden de woelbaksectie in oplopende complexiteit en met toepassing van de onder- en bovengrens van toe te passen debiet.

De numerieke berekeningen hebben inzicht gegeven in het gedrag van de stroming: de verwachte neren en het vernauwen en verwijden van de stroming en zijn grafisch weergegeven in dit rapport. De uniformiteit van de uitstroom bleek voldoende: binnen $\pm 5\%$ in het geval van de berekening van het volledige woelcompartiment. Kritieke punten in het ontwerp werden geïdentificeerd en aangepast. Een voorbeeld hiervan is de vormgeving van de uitstroomopening, waarvan de bovenstroomse hoek werd afgerond om het resulterende energieverlies en het instabiele instroomkarakter te verminderen.

Het kleinere Woelbakontwerp 2 gaf een hogere variabiliteit in uitstroomsnelheden, echter nog voldoende uniform. De drukval van deze variant was kleiner dan van Woelbakontwerp 1.

Gezien de inpassing in de kolk is er in samenspraak met Rijkswaterstaat en Royal HaskoningDHV voor gekozen de aanvoerleidingen aan de noordelijke kolkwand op de waterschermbak aan te sluiten en de doorzetting van het debiet naar de zuidelijke sectie op te nemen in de bak. Hierop waren de twee secties niet langer symmetrisch. Daarnaast was deze aanpassing enkel mogelijk wanneer Woelbakontwerp 2 werd toegepast. Dit woelbakontwerp presteerde voldoende goed met betrekking op de drukval en uniformering van de stroming.

Schaalmodelwerk is uitgevoerd waarbij een enkele sectie van het ontwerp, gebaseerd op Woelbakontwerp 2 en rekening houdend met reserveringen voor de verstijvingen van de werkelijke waterschermbak, op schaal 1:2 in hout is uitgevoerd. De geteste debieten varieerden van 75 – 200 L/s modelschaal. Hiermee werd niet geheel volgens Reynolds geschaald: daartoe had een bereik van 150 – 350 L/s modelschaal moeten worden toegepast. Deze werkwijze is toegepast om de drukken op het schaalmodel te beperken. Er is in dit onderzoek aangetoond dat de geteste debieten een representatief gedrag geven van de stroming in de waterschermbak, verdere verhoging van het debiet geeft geen significante verandering in het gedrag van de stroming. Uniformering en drukval zijn op deze manier dus passend gemodelleerd.

Binnen het schaalmodelwerk zijn vier varianten van het ontwerp getest. Deze varianten verschillen in de afmetingen van de doorlaatopeningen in de verdeelplaat en richting het zijcompartiment. Variant 1 was overeenkomstig het ontwerp dat numeriek gesimuleerd werd. Variant 2 en daarna Variant 4 gebruikten steeds grotere doorstroomopeningen. De verdeelplaat van Variant 3 was gelijk aan die van Variant 2, waarbij een enkel gat geblokkeerd werd. Hiermee wordt het effect van blokkeringen getoetst en een gevoel gegeven voor de mate van robuustheid van het ontwerp.

De verrichte metingen beslaan drukmetingen en snelheidsmetingen. Deze laatste maken gebruik van EMS-instrumenten, welke de stroomsnelheden in een klein volume juist boven de uitstroomspleet meten. Aanvullende metingen zijn verricht waarbij gebruik werd gemaakt van pitotbuizen en hierop gebaseerde instrumenten. De herhaalbaarheid hiervan bleek echter onvoldoende. Daarom zijn de gepresenteerde resultaten op basis van de EMS-metingen. De herhaalbaarheid en spreiding in tijd van deze metingen is tevens besproken.

Door het toepassen van grotere doorstroomopeningen is het interne energieverlies van de waterschermbak sterk verminderd: Variant 4 resulteert in een drukval van ca. 1,3 mwk bij 175 L/s modelschaal inclusief uitstroomverlies. Hiermee is het interne verlies tot 30% gereduceerd ten opzichte van Variant 1. De snelheden en daarmee de drukval in deze meting komt overeen met de prototypeschaalwaarde wanneer het maximum debiet wordt toegepast.

De uniformering van de verschillende varianten is goed: de variabiliteit van stroomsnelheden van uit het hoofdcompartiment is binnen $\pm 5\%$ bij alle Varianten en daarmee voldoende. Het zijcompartiment kent een lagere uitstroomsnelheid. Gezien de beperkte afmetingen van dit compartiment en de constructieve reserveringen aan deze uiteindes is een grotere afwijking van de gemiddelde uitstroomsnelheid niet verwonderlijk. Met het vergroten van het doorstroomoppervlak naar het zijcompartiment is de afwijking beperkt.

De gevoeligheid voor verstoppingen bleek zeer klein: de blokkering van de verdeelplank in Variant 3 leidde niet tot een significant effect aan de uitstroomsnelheden van de waterschermbak. Hierop wordt verwacht dat de robuustheid van de waterschermbak in dit opzicht voldoende is.

Gezien de beperkte drukval en de voldoende uniformering van de stroming is Variant 4 gekozen als eindontwerp. Dit ontwerp is verder uitgewerkt waarbij aandacht is geschonken aan de randvoorwaarden uit de genoemde documenten. Het ontwerp is vastgelegd in het memo *Interne geometrie waterschermbak PKJS* dd. 19-september 2013, appendix van het voorliggende rapport. Ter overdracht aan de aannemer werd hierbij ook het ontwerp in 3D digitaal meegeleverd.

8 Aanvullende inzichten

De vaststelling van het hydraulisch ontwerp is afgerond met het opleveren hiervan middels het memo *Interne geometrie waterschermbak PKJS* dd. 19-september 2013 en de hierbij gevoegde digitale weergave van het ontwerp. Het ontwerp was hiermee overgedragen naar de aannemer. Omdat deze hiermee verder kon, is volgend op de oplevering voorrang gegeven aan andere werkzaamheden binnen project Pilot Krammerjachtensluis. Het afronden van de voorliggende rapportage, welke de achtergrond en de prestatie van het waterschermontwerp presenteert, is om die reden in tijd verschoven. Tijdens het afronden van deze rapportage zijn enkele nieuwe inzichten opgedaan die de eerdere analyses mogelijk verbeteren. Gezien de fase van het project zijn deze inzichten onderstaand gegeven en is gekozen de voorgaande hoofdstukken en analyses daarin niet te herzien.

8.1 Verdellende aspecten in het hydraulische ontwerp

De uniformering van de stroming door de waterschermbak kan worden toegeschreven aan verschillende fysische aspecten: (1) het grof verdelen door een verdeelplaat met gaten, (2) het verdelen door een nauwe uitstroomspleet, waardoor de bak als een drukvat werkt, (3) het optreden van een neer, de zgn. 'wals' in de lengte van de bak, welke de snelheden middelt en (4) het afwisselend vernauwen en verbreden van de doorstroomopening door verschillende compartimenten vorm te geven.

De proef waarin een gat in de verdeelplaat werd afgedicht gaf aan dat de verdeling door de uitstroomspleet alsnog erg uniform werd. Hieruit wordt geconcludeerd dat de opeenvolgende vernauwingen, de wals en de nauwe uitstroomspleet een sterk corrigerend effect hebben wanneer de grove verdeling wordt verstoord. Tevens werd bij het stapsgewijs vergroten van de doorstroomopeningen steeds nog een voldoende uniformiteit gevonden, hoewel het verloop van de debietverdeling over de kolkbreedte wel werd verslechterd. Hierop kan worden gesuggereerd dat de verdeelplaat van nog grotere openingen kan worden voorzien of geheel kan worden weggelaten. Hiermee zou de drukval kunnen worden beperkt. Daarnaast zou het de constructie van de waterschermbak kunnen vergemakkelijken. Binnen het huidige ontwerpproject was geen ruimte om dit verder uit te werken.

8.2 Interactie van stralen in numeriek werk

Het numerieke werk omvat het woelcompartiment, vanaf de verdeelplaat tot de uitstroomspleet. In geval van Woelbakontwerp 1, waarin het woelcompartiment drie kamers omvat, valt op dat de afwijking in de simulatie van twee vulopeningssecties (Sectie 4.3.2.2) met $\pm 1\%$ zeer gering is. Wanneer twaalf secties worden gesimuleerd (Sectie 4.3.2.3) geeft dit een afwijking van $\pm 2-3\%$.

Voor woelbakontwerp 2, waarin het woelbakcompartiment uit twee kamers bestaat, is enkel de geometrie met twee secties getest (Sectie 4.4.2). De spreiding blijkt hieruit voldoende: binnen $\pm 4\%$. Op basis van het voorgaande kan worden verwacht dat de spreiding van de berekening met twaalf secties ca. $\pm 10\%$ bedraagt. Deze numerieke berekening is echter niet uitgevoerd. Het fysieke schaalmodelwerk laat zien dat de spreiding van de uitstroomsnelheden toch voldoende uniform is. Het is binnen het voorliggende onderzoek niet uitgezocht hoe de resultaten van het numerieke werk overeenkomen met de metingen in schaalmodel.

8.3 Correctie van drukopnemers

Langs een stroomlijn geldt dat

$$p_{\text{tot}} = q + p = \frac{1}{2}\rho v^2 + p = \text{constant}$$

Waarin

q	dynamische druk (snelheidsdruk)
p	statische druk
ρ	dichtheid
v	snelheid
p_{tot}	totale druk

De benodigde opvoerhoogte van de pompen die het debiet gaan leveren voor het waterscherm wordt gegeven door het verschil in totale druk. In dit geval wordt dit gegeven door het waterstandsverschil tussen Zijpe en Volkerak-Zoommeer, de leidingsverliezen, de uittreeverliezen en alle interne weerstanden.

De drukopnemers meten de statische druk, p . Deze is gelijk aan de totale druk op punten waar de snelheid nul is, zogenaamde stagnatiepunten. Om deze reden zijn de drukopnemers in de waterschermbak geplaatst in hoeken van de compartimenten, waar de snelheid zeer klein wordt verwacht.

Ook in de aanvoerleiding is een drukopnemer geplaatst, via een korte dunne buis direct op de leiding. De uitvoering van deze aansluiting betekent dat de korte buis als het ware leeg wordt getrokken ten gevolge van de snelheid in de aanvoerleiding. De gemeten druk is, met andere woorden, niet de totale druk maar de statische druk. De fout die hierin wordt gemaakt is gelijk aan de snelheidshoogte in de aanvoerleiding. In het voorliggende rapport is hiervoor niet gecorrigeerd.

In de figuren waarin de drukval gepresenteerd is, Sectie 5.7.1, valt de gemeten druk p in de aanvoerleiding nagenoeg op de gemeten druk p in het primaire verdeelcompartiment. De totale drukken p_{tot} zijn echter niet gelijk; dit kan enkel het geval zijn wanneer tussen de twee punten geen energieverlies optreedt. Vanuit de aanvoerleiding stroomt het water het verdeelcompartiment in, waarbij het tegen een breekbalk aanstroomt en een scherpe richtingsverandering moet maken. Naar verwachting gaat hiermee de snelheidsenergie nagenoeg compleet verloren.

Uit het bovenstaande is geconcludeerd dat de drukmeting in de aanvoerleiding gecorrigeerd dient te worden. Deze meting geeft niet de totale druk, maar de dynamische druk; het verschil hiertussen wordt gegeven door de dynamische druk. Deze wordt gegeven door onderstaande formule.

$$q = \frac{1}{2g} \left(\frac{Q}{\frac{1}{4}\pi D_{\text{buis}}^2} \right)^2$$

Waarin

q	dynamische druk (snelheidsdruk) [mwk]
g	gravitatieconstante (9,81 m/s ²) [m/s ²]
Q	debiet (75 – 200 L/s modelschaal) [m ³ /s]
D_{buis}	diameter van de aanvoerleiding (250 mm modelschaal) [m]

Bij het toepassen van het maximum debiet in werkelijkheid komen de waardes van snelheden en daarmee de waardes van drukvallen overeen met de resultaten van de schaalmodelmeting bij 175 L/s modelschaal. In dat geval is de drukval, gegeven met bovenstaande formule, ca. 0,65 m. Hiermee wordt de totale drukval over de waterschermbak ca. 1,35 m (componenten a en b uit Figuur 5.6 zijn samen 0,7 m). Dit is hoger dan de waarde van 0,5 m die was voorzien voor het waterscherm (zie Tabel 2.2). Indien we alle verliezen tezamen beschouwen komen we tot de conclusie dat de capaciteit van de voorziene pompen mogelijk onvoldoende is om bij de maximale waterstand van 2,5 mNAP het gewenste debiet van 1,4 m³/s te realiseren.

Op basis van de genoemde verliescoëfficiënten kan worden geschat welk debiet dan nog wel mogelijk is. Hieruit blijkt – de berekeningen zijn niet opgenomen in dit rapport – dat, met een pomp met een opvoerhoogte van 5,5 mwk, tot aan een waterstand van 2,2 mNAP het volgens het ontwerp gewenste debiet kan worden gerealiseerd. Daarboven is het realiseerbare debiet lager dan de ontwerpwaarde, aflopend tot 1,2 m³/s bij de uiterste waterstand van 2,5 mNAP, wat 90% van de ontwerpwaarde is.

9 Referenties

- [1] Pilot Krammerjachtensluis, functionele en hydraulische aspecten –
Projectvoorbereiding
Deltares, 24 mei 2013
Rapport 1207406-000-HYE-0005
- [2] Ontwerpstudie en Praktijkproef Zoutlekbeperving Volkeraksluizen – Beschrijving en
resultaten praktijkproef Stevinsluis en evaluatie maatregelen Stevinsluis
Deltares, 2011
Rapport 1201226-005-ZKS-0007
- [3] Ontwerpstudie en praktijkproef Zoutbeperving Volkeraksluizen – Deeltaak 1:
Numerieke simulatie van uitwisselingsstromingen en van uitwisselingsbeperkende
maatregelen. Deltares, 2010
1201226-001
- [4] Definitief Ontwerp Ombouw zoutzoutscheiding Krammerjachtensluis 2, versie
definitief
Royal HaskoningDHV, 22-03-2013
Kenmerk LW-AF20122590
- [5] Vraagspecificatie Eisen, Beschrijving van het Werk Pilot implementatie innovatie
zout-zoetscheiding Krammerjachtensluis
Rijkswaterstaat, 22-03-2013
Zaaknummer 31070128

A Eisen waterschermbak

Relevante eisen uit [5]

4.9 Waterschermb (WAS)

Functionele eis: Water keren → Zoutwater keren (ZK)

WAS-ZK-1	Geldigheidsperiode(s):		G
Waterschermb	Bovenliggende eis(en)	Onderliggende eis(en)	
Het waterschermb dient gerealiseerd te zijn conform P&ID P0101 met bijbehorende instrumentenlijst (bron [D03], bijlage 1). Afwijken van deze configuratie is alleen mogelijk als aantoonbaar wordt gemaakt dat het principe van hevelen toepasbaar is en tot aanpassing van de P&ID en de bijbehorende instrumenten leidt. Bij het principe van hevelen wordt gebruik gemaakt van vrij verval (bij laag water aan OS-zijde). Zie hiervoor ook bron [D03].	JS2-ZK-1	WAS-ZK-2 WASb-ZK-1 WASp-ZK-1 WASl-ZK-1 WASl-ZK-2	
Verificatiemethode			
Toelichting			
Het waterschermsysteem bestaat uit twee pompen met leidingwerk dat via een wandschuifopening aansluit op de waterschermbak met uitstroommond, verdeeld over twee secties. De leidingen zijn voorzien van (regelbare) afsluiters, debietmeters en koppelflenzen t.b.v. onderhoud.			
WAS-ZK-2	Geldigheidsperiode(s):		G
Regeling waterdebietschermb	Bovenliggende eis(en)	Onderliggende eis(en)	
Het debiet van het waterschermb dient regelbaar te zijn om het debiet te kunnen variëren o.b.v. de waterstand aan de Oosterschelde-zijde.	WAS-ZK-1	WAS-RV-1	
Verificatiemethode			

Functionele eis: Doorlaten schepen → Inlaten schepen (IS)

WAS-IS-1	Geldigheidsperiode(s):		G
Ruimtebeslag waterschermb	Bovenliggende eis(en)	Onderliggende eis(en)	
Alle onderdelen van het waterschermsysteem, zoals beschreven in P&ID P0101 met bijbehorende instrumentenlijst (bron [D03], bijlage 1) dienen de vaarwegbreedte en -diepte niet te beperken.	JS2-IS-1		
Verificatiemethode			

Functionele eis: Doorlaten schepen → Uitlaten schepen (US)

WAS-US-1	Geldigheidsperiode(s):		G
Ruimtebeslag waterschermb	Bovenliggende eis(en)	Onderliggende eis(en)	
Alle onderdelen van het waterschermsysteem, zoals beschreven in P&ID P0101 met bijbehorende instrumentenlijst (bron [D03], bijlage 1) dienen de vaarwegbreedte en -diepte niet te beperken.	JS2-US-1		
Verificatiemethode			

Omgevingshinder (OG)

WAS-OG-1	Geldigheidsperiode(s):		G
Voorkomen geluidshinder waterscherm	Bovenliggende eis(en)	Onderliggende eis(en)	
De waterschermsysteem (inclusief de pompen) dient te functioneren zonder de geldende normen met betrekking tot geluidsoverlast te overschrijden.	JS2-OG-1		
Verificatiemethode			

Ontwerprandvoorwaarden (RV)

WAS-RV-1	Geldigheidsperiode(s):		G
Ontwerpwaterstand waterscherm	Bovenliggende eis(en)	Onderliggende eis(en)	
Het waterscherm dient de vereiste effectiviteit te behalen bij waterstanden waarop er geschut kan worden aan de OS-zijde, dus binnen de range van waterstanden: - OS-zijde: NAP -1,70 m tot NAP +2,50 m	WAS-ZK-2		
Verificatiemethode			

4.9.1 Waterschermbak (WASb)

Functionele eis: Water keren → Zoutwater keren (ZK)

WASb-ZK-1	Geldigheidsperiode(s):		G
Waterscherm	Bovenliggende eis(en)	Onderliggende eis(en)	
De uitlaatbak van het waterscherm dient geplaatst te zijn aan de binnenkant van de drempel aan de OS-zijde van de sluiskolk.	WAS-ZK-1	WASb-VO-1 WASb-VO-2 WASb-VO-3 WASb-VO-4 WASb-VO-5 WASb-VO-6 WASb-IR-1 WASb-RV-1 WASb-RV-2	
Verificatiemethode			
Deze eis wordt geverifieerd doordat aan alle onderliggende eisen is voldaan			

Aspecteis: Vormgeving (VO)

WASb-VO-1	Geldigheidsperiode(s):		G
Bovenkant waterschermbak	Bovenliggende eis(en)	Onderliggende eis(en)	
De bovenkant van de waterschermbak dient gelijk te zijn aan NAP -3.80m zoals in tekening DET-830 (bron [D03], bijlage 2) is gespecificeerd.	WASb-ZK-1		
Verificatiemethode			

WASb-VO-2	Geldigheidsperiode(s):			G
Onderkant waterschermbak	Bovenliggende eis(en)	Onderliggende eis(en)		
De onderkant van de waterschermbak dient gelijk te zijn aan de bovenkant van de instroomopening van het rioolsysteem zijn aangelegd op de hoogte van NAP -5.20m zoals ook in tekening DET-830 (bron [D03], bijlage 2) is gespecificeerd.	WASb-ZK-1			
Verificatiemethode				

WASb-VO-3	Geldigheidsperiode(s):			G
Afmetingen van de waterschermbak in breedterichting kolk	Bovenliggende eis(en)	Onderliggende eis(en)		
De waterschermbak dient even breed te zijn als de sluis kolk en aan de zijken aan te sluiten op de bestaande wandconstructie.	WASb-ZK-1			
Verificatiemethode				

WASb-VO-4	Geldigheidsperiode(s):			G
Afmetingen van de waterschermbak in lengterichting kolk	Bovenliggende eis(en)	Onderliggende eis(en)		
De waterschermbak dient in de lengterichting van de sluis kolk een afmeting te hebben van 2142 mm te hebben conform tekening DET-830 (bron [D03], bijlage 2), maar de Opdrachtnemer dient uit te gaan van een mogelijke wijziging van deze afmeting met maximaal 20%.	WASb-ZK-1			
Verificatiemethode				

WASb-VO-5	Geldigheidsperiode(s):			G
Vormgeving uitstroomband waterschermbak	Bovenliggende eis(en)	Onderliggende eis(en)		
De vormgeving van de uitstroomband dient conform tekening DET-830 (bron [D03], bijlage 2) te zijn aangelegd waarbij het uiteinde niet hoger dient te komen dan de bovenkant van de drempel, namelijk NAP -3.70meter.	WASb-ZK-1			
Verificatiemethode				

WASb-VO-6	Geldigheidsperiode(s):			G
Inwendige vormgeving waterschermbak	Bovenliggende eis(en)	Onderliggende eis(en)		
De inwendige vormgeving van de waterschermbak dient te zijn uitgevoerd conform het detailontwerp van Deltares (bron [D08]).	WASb-ZK-1			
Verificatiemethode				

Aspecteis: Onderhoud (OH)

WASb-OH-1	Geldigheidsperiode(s):			G
Mangat in waterschermbak	Bovenliggende eis(en)	Onderliggende eis(en)		
De waterschermbak dient te zijn voorzien van een afsluitbaar mangat met een minimale doorsnede van 700 mm ten behoeve van onderhoud.	JS2-OH-2			
Verificatiemethode				

WASb-OH-2	Geldigheidsperiode(s):			G
Onderhoud waterschermbak	Bovenliggende eis(en)	Onderliggende eis(en)		
De waterschermbak dient van zijn positie in de kolk en uit het water te kunnen worden gehesen voor onderhoud.	JS2-OH-2	WASb-OH-3		
Verificatiemethode				

WASb-OH-3	Geldigheidsperiode(s):			G
Ontwatering waterschermbak	Bovenliggende eis(en)	Onderliggende eis(en)		
De waterschermbak dient voor onderhoud ontwaterd te kunnen worden voorafgaand aan het uithijzen van de bak.	WASb-OH-2			
Verificatiemethode				

Aspecteis: Duurzaamheid (D)

WASb-D-1	Geldigheidsperiode(s):			G
Ontwerplevensduur waterschermbak	Bovenliggende eis(en)	Onderliggende eis(en)		
De waterschermbak dient met een ontwerplevensduur te zijn gerealiseerd van ≥ 5 jaar.	JS2-D-2			
Verificatiemethode				

Interne raakvlakeis (IR)

WASb-IR-4	Geldigheidsperiode(s):			G
Uitsparing in waterschermbak voor luchtleidingen bellenscherm	Bovenliggende eis(en)	Onderliggende eis(en)		
De locatie en afmeting van de sparing in de waterschermbak voor de luchtleidingen dient conform tekening DET-830 (bron [D03], bijlage 2) te zijn uitgevoerd.	WASb-ZK-1			
Verificatiemethode				

Ontwerprandvoorwaarden (RV)

WASb-RV-1	Geldigheidsperiode(s):			G
Ontluchting waterschermbak	Bovenliggende eis(en)	Onderliggende eis(en)		
De waterschermbak dient ontlucht te kunnen worden tijdens het in bedrijf zijn van het waterschermsysteem.	WASb-ZK-1			
Verificatiemethode				

WASb-RV-2	Geldigheidsperiode(s):			G
Belasting waterschermbak	Bovenliggende eis(en)	Onderliggende eis(en)		
De waterschermbak dient op basis van de maatgevende belastingen te zijn ontworpen, rekening houdend met: <ul style="list-style-type: none"> - droogzetten van de kolk; - uithijzen van de bak voor onderhoud; - slib in de waterschermbak; - corrosie; - slepende ankers; - andere van toepassing zijnde factoren. 	WASb-ZK-1			
Verificatiemethode				

4.9.2 Pomsysteem inclusief bordes (WASp)

Functionele eis: Water keren → Zoutwater keren (ZK)

WASp-ZK-1	Geldigheidsperiode(s):			G
Aanleg pompsysteem	Bovenliggende eis(en)	Onderliggende eis(en)		
Voor het waterschermsysteem dienen er pompen te zijn aangelegd aan de buitenzijde van kolkwand 2.	WAS-ZK-1	WASp-RV-1		
Verificatiemethode				

Aspecteis: Onderhoud (OH)

WASp-OH-1	Geldigheidsperiode(s):			G
Bescherming vuil	Bovenliggende eis(en)	Onderliggende eis(en)		
De pompen dienen te zijn voorzien van een vuilrooster.	JS2-OH-2			
Verificatiemethode				

WASp-OH-2	Geldigheidsperiode(s):			G
Bordes	Bovenliggende eis(en)	Onderliggende eis(en)		
De pompen en handmatig bediende afsluiters bij de pompen dienen bereikbaar te zijn via een aan te leggen bordes, met toegang vanaf de kolkwand.	JS2-OH-2			
Verificatiemethode				

WASp-OH-3	Geldigheidsperiode(s):			G
Vuilrooster pompen	Bovenliggende eis(en)	Onderliggende eis(en)		
De vuilroosters voor de pompen dienen handmatig reinigbaar te zijn vanaf een aan te leggen bordes met toegang vanaf de kolkwand.	JS2-OH-2			
Verificatiemethode				

Ontwerprandvoorwaarden (RV)

WASp-RV-1	Geldigheidsperiode(s):			G
Benodigd waterdebiet waterscherm	Bovenliggende eis(en)	Onderliggende eis(en)		
Het totale waterdebiet door het waterscherm (de 2 secties samen) dient minimaal 0,6 m ³ /s en maximaal 1,4 m ³ /s te bedragen bij een opvoerhoogte van 0-5,5 m.	WASp-ZK-1			
Verificatiemethode				

4.9.3 Leidingen (WASI)

Functionele eis: Water keren → Zoutwater keren (ZK)

WASI-ZK-1	Geldigheidsperiode(s):			G
Aanleg leidingen waterscherm	Bovenliggende eis(en)	Onderliggende eis(en)		
Voor het waterschermsysteem dienen er waterleidingen te zijn aangelegd tussen het pompsysteem en de waterschermak.	WAS-ZK-1	WASI-IR-1		
Verificatiemethode				

WASI-ZK-2	Geldigheidsperiode(s):			G
Aanleg leidingen waterscherm	Bovenliggende eis(en)	Onderliggende eis(en)		
De waterleidingen dienen o.a. te zijn voorzien van bedieningskleppen en debietmeters. Zie hiervoor tekening P&ID Waterscherm P0101 en de bijbehorende instrumentenlijst (bron [D03], bijlage 1).	WAS-ZK-1	WASI-RV-1		
Verificatiemethode				

Functionele eis: Water keren → Primair keren (PK)

WASI-PK-1	Geldigheidsperiode(s):			G
Kruising leidingen waterscherm	Bovenliggende eis(en)	Onderliggende eis(en)		
De waterschermleidingen dienen de kolkwand te kruisen via een wandschuifopening, waarbij de hoogwaterveiligheid geborgd dient te zijn conform de vigerende wettelijke eisen.	JS2-PK-1			
Verificatiemethode				

Interne raakvlakeisen (VO)

WASI-IR-1	Geldigheidsperiode(s):			G
Locatie waterscherMLEIDINGEN in kolk	Bovenliggende eis(en)	Onderliggende eis(en)		
De waterleidingen dienen aan te sluiten op de waterschermbak aan de zijde van kolkwand 2 (KW2), op de locatie zoals in tekening DET-810 (bron [D03], bijlage 2) vermeld.	WASI-ZK-1			
Verificatiemethode				

Aspecteis: Onderhoud (OH)

WASI-OH-1	Geldigheidsperiode(s):			G
Plaatsing bediende kleppen waterscherM	Bovenliggende eis(en)	Onderliggende eis(en)		
De bedieningskleppen van het waterscherM dienen buiten de sluiskolk boven de waterlijn van het VZM (NAP+0,15 m) te worden geplaatst.	JS2-OH-2			
Verificatiemethode				

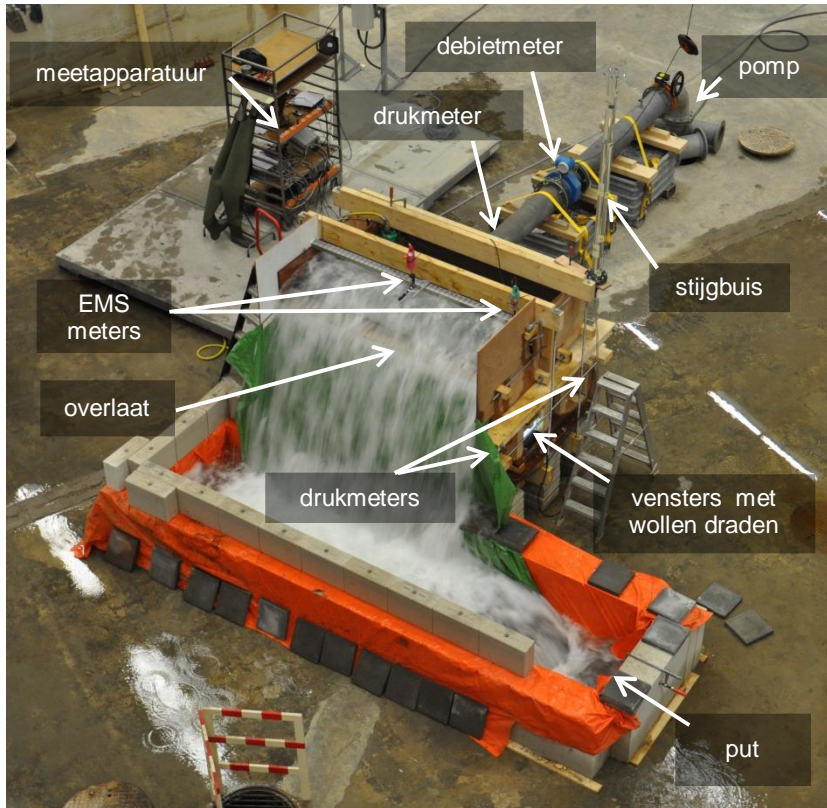
WASI-OH-2	Geldigheidsperiode(s):			G
Onderhoud debietmeters	Bovenliggende eis(en)	Onderliggende eis(en)		
De debietmeters dienen zelfstandig demontabel te zijn van de leiding voor onderhoud.	JS2-OH-2			
Verificatiemethode				

WASI-OH-3	Geldigheidsperiode(s):			G
Onderhoud waterscherMLEIDINGEN	Bovenliggende eis(en)	Onderliggende eis(en)		
De waterleidingen dienen zo te zijn gerealiseerd dat het van zijn positie en uit het water kan worden gehesen voor onderhoud.	JS2-OH-2			
Verificatiemethode				

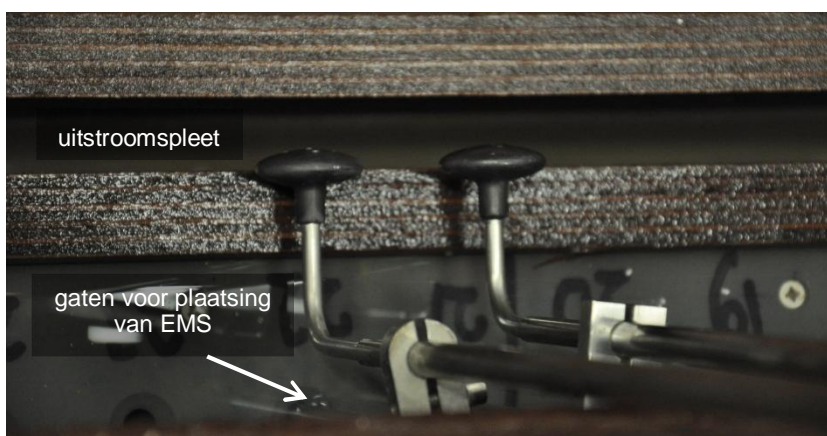
Ontwerprandvoorwaarden (RV)

WASI-RV-1	Geldigheidsperiode(s):			G
Positie debietmeters	Bovenliggende eis(en)	Onderliggende eis(en)		
Om de meetnauwkeurigheid van de debietmeters te waarborgen dienen deze in een horizontaal leidingdeel te zijn geplaatst, met een horizontale lengte van 5x de leidingdiameter vòòr en 3x de leidingdiameter achter de debietmeter.	WASI-ZK-2			
Verificatiemethode				

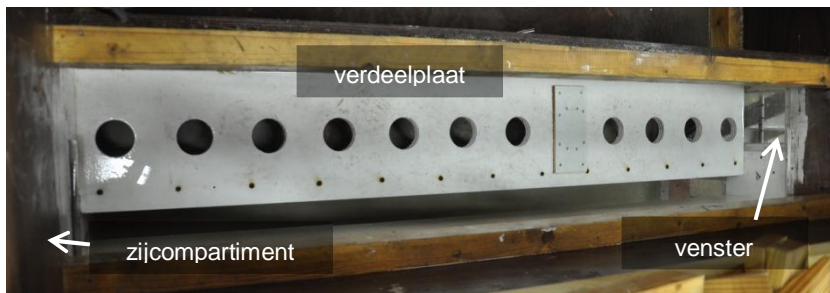
B Foto's fysiek schaalmodelwerk



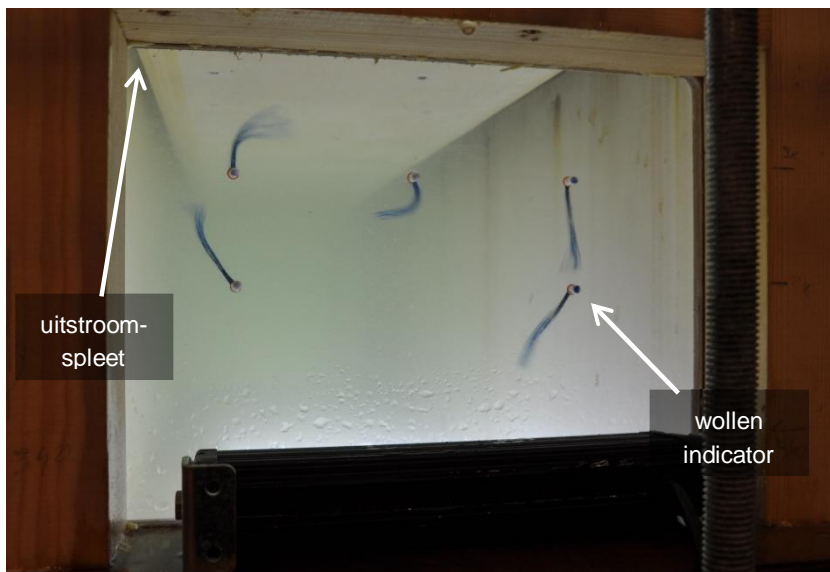
Figuur B.1 Overzicht van de meetopstelling. De drukmeters zijn niet te zien op deze foto, indicatief is hun plaatsing aangegeven..



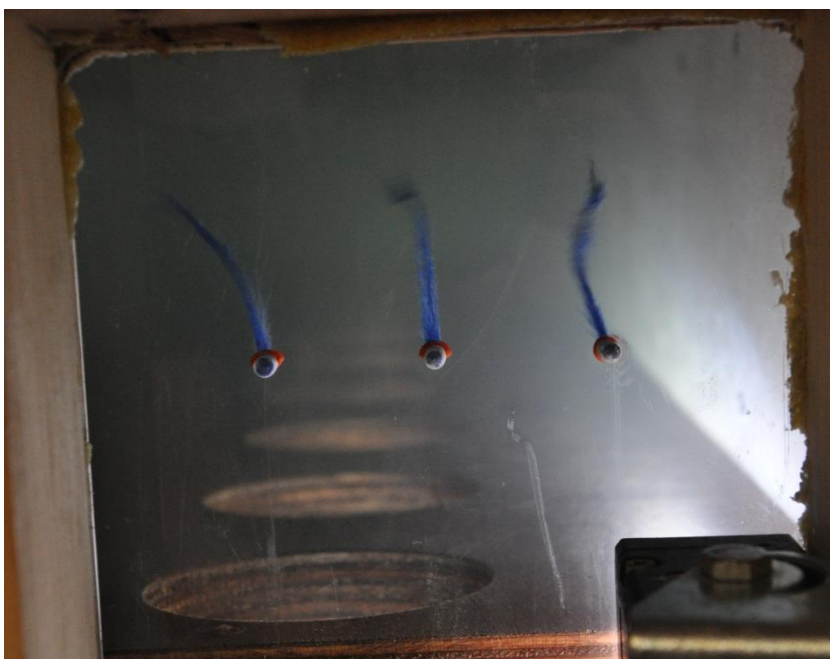
Figuur B.2 Detail plaatsing EMS meter langs de uitstroomspleet.



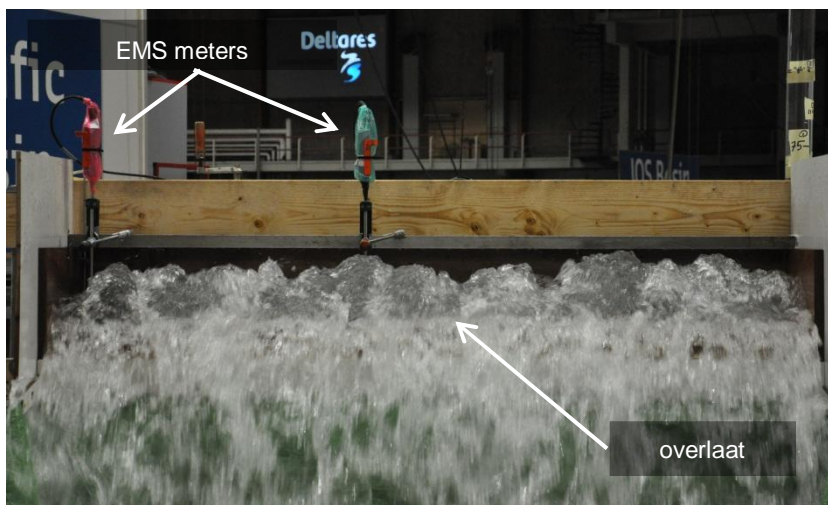
Figuur B.3 De verdeelplaat geplaatst in het model. Hier is te zien Variant 3, waarbij een van de gaten afgedicht is.



Figuur B.4 Wollen stromingsindicatoren in het woelcompartiment. Linksboven de uitstroomspleet. (Variant 4, 145 L/s)



Figuur B.5 Wollen indicatoren boven de verdeelplaat. (Variant 4, 145 L/s)



Figuur B.6 Het wateroppervlak boven de uitstroomspleet (Variant 4, 145 L/s) en de plaatsing van de twee EMS-meters.

C Numerieke achtergrond

In dit hoofdstuk wordt de algemene opzet van de berekeningen besproken en in de volgende hoofdstukken worden de numerieke resultaten van de berekeningen. Dit hoofdstuk vat de numerieke aspecten van de berekeningen samen, zodat in de volgende hoofdstukken de focus op de resultaten en de interpretatie daarvan ligt

Dit hoofdstuk is bedoeld om de numerieke aspecten uit dit onderzoek samen te vatten en is voor de niet met numerieke methodes bekende lezer moeilijk te volgen. Dit hoofdstuk kan overgeslagen worden in het geval de lezer vooral geïnteresseerd is in de conclusies van het onderzoek.

C.1 Finite-volume methode

OpenFoam gebruikt de zogenaamde finite-volume methode voor het discretiseren van de vergelijkingen. De Navier-Stokes vergelijkingen zullen hier als voorbeeld worden gebruikt. Het rekendomein wordt opgedeeld in een groot aantal (controle)volumes, ook wel aangeduid als cellen. Een schematische weergave van een dergelijke cel inclusief gebruikelijke terminologie voor een eendimensionale situatie is weergegeven in Figuur 9.1. De vergelijkingen worden herschreven in conservatieve vorm door ze te integreren over elke cel. Gebruikmakend van de Navier-Stokes vergelijkingen

$$\rho \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \rho (\bar{v} \cdot \nabla) \bar{v} = \nabla \cdot \mu (\nabla \bar{v}) - \nabla p$$

reduceren deze na integratie en gebruikmaking van het Gauss theorema tot

$$\rho \int_V \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} dV + \rho \oint_S \bar{v} (\bar{v} \cdot \hat{n}) dS = \oint_S \mu \nabla \bar{v} \cdot \hat{n} dS - \int_V \nabla p dV$$

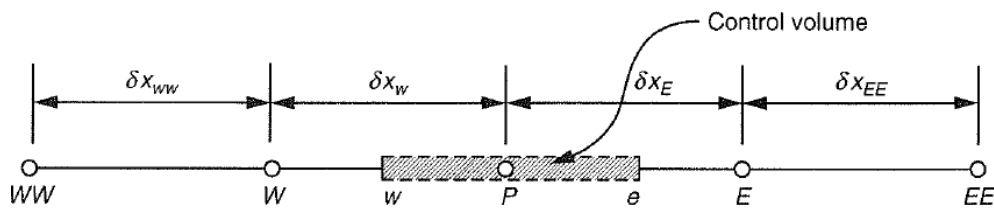
Elke cel heeft slechts een beperkt aantal vlakken. In het geval van een hexagoon zijn dat er bijvoorbeeld zes en in het geval van een polyhedron kunnen dat er meer zijn. Vanwege dit beperkt aantal vlakken (w en e in Figuur 9.1) kan de oppervlakte-integraal (\oint_S) gereduceerd

worden tot een sommatie van de fluxen door deze vlakken. Daarnaast heeft elke cel een waarde die constant is in de gehele cel, de celwaarde (P, W en E in Figuur 9.1). Aangezien de waarde in de volume-integraal (\int_V) constant is, reduceert de volume-integraal tot het

celvolume. De vergelijkingen reduceren dan tot de volgende sommatie

$$\rho V \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \sum_f^{N_{\text{faces}}} \rho \bar{v}_f (\bar{v}_f \cdot \hat{n}) A_f = \sum_f^{N_{\text{faces}}} \mu_f (\nabla \bar{v}_f \cdot \hat{n}) - \nabla p V,$$

Waarin V het volume van de cel is, A_f het oppervlak van een vlak en het subscript $_f$ duidt aan dat het om een waarde op een celvlak gaat en niet om de celwaarde. Discretisatieschema's worden gebruikt om de waardes op de celvlakken te bereken. Voor meer informatie wordt de geïnteresseerde lezer verwezen naar (Ferziger and Perić 2002).



Figuur 9.1 Schematische weergave van een controlevolume P met vlakken w en e , die de controlevolumes W en E begrenzen en de volgende burens WW en EE (Tu, Yeoh et al. 2007).

C.2 Discretisatieschema's

Discretisatieschema's interpoleren tussen de celwaarden van de omringende cellen van een celvlak om de waarden van de variabelen op het vlak te bepalen. Hierbij kunnen verschillende methodes toegepast worden. OpenFoam biedt de mogelijkheid om apart het discretisatieschema in te stellen voor elke term in de vergelijkingen.

De advectieterm (de tweede term in de Navier-Stokes vergelijkingen) in het bijzonder is gevoelig voor welk discretisatieschema wordt toegepast. Het central-differencing schema is nauwkeurig, maar kan leiden tot instabiliteiten. Het upwind schema is zeer robuust, maar minder nauwkeurig, met name wanneer het rekenrooster uit polyhedra bestaat.

C.2.1 Central-differencing

In het lineaire schema wordt de celwaarde bepaald door gebruik te maken van lineaire interpolatie. In een uniform, één-dimensionele situatie geeft dit,

$$\Phi_e = \frac{1}{2}(\Phi_E + \Phi_P)$$

$$\Phi_w = \frac{1}{2}(\Phi_P - \Phi_W)$$

Waarin Φ de variabele is. in het geval van door advectie gedomineerde systemen kan central-differencing onrealistische waarden geven (Hanjalić 2007).

C.2.2 Upwind

Het upwind schema lost het probleem van de lineaire interpolatie op door de celwaarde van het bovenstroomse cel the projecteren op het celvlak. Dit resulteert in

$$\Phi_e = \begin{cases} \Phi_P & v_w > 0 \\ \Phi_E & v_w < 0 \end{cases}$$

Het upwind schema is eerste orde nauwkeurig en heeft een grote numerieke diffusie tot gevolg als het rekenrooster niet fijn genoeg is en de aanwezige gradienten groot zijn.

C.2.3 Linear upwind

Het linear upwind schema is een tweede orde nauwkeurig schema, waarbij de numerieke diffusie sterk verminderd is ten opzicht van het eerste orde upwind schema. In deze methode wordt de met de upwind methode verkregen waarde gecorrigeerd met de bovenstroomse gradiënt van de variabele. Dit geeft

$$\Phi_e = \begin{cases} \Phi_P + (\nabla\Phi)_w \cdot \vec{r} & v_w > 0 \\ \Phi_E + (\nabla\Phi)_{ee} \cdot \vec{r} & v_w < 0 \end{cases}$$

waarin \vec{r} the vector van het bovenstroomse celcentrum naar het celvlak is.

C.2.4 Gradiënt discretisatie

Voor het discretiseren van de gradiënten wordt gebruik gemaakt van de Gauss methode waarbij de gradiënt kan worden benaderd als een sommatie van de waardes op de celvlakken;

$$\int_V \nabla \phi dV = \int_S \phi \hat{n} dS$$

$$\int_V \nabla \phi dV = \nabla \phi_p V = \int_S \phi \hat{n} dS$$

$$\nabla \phi_p = \frac{1}{V} \sum_{faces} \phi_f \hat{n} A_f$$

waarin ϕ_f de waardes op de celvlakken zijn die nog moeten worden bepaald. Standaard wordt de cell based methode gebruikt waarbij waarde op het celvlak wordt bepaald met de waardes van de naburige cel centra. Het is in OpenFoam mogelijk om een face based methode te gebruiken, maar dat is in dit onderzoek niet gedaan.

C.2.5 Tijdsdiscretisatie

Voor de tijdsdiscretisatie wordt een eerste orde implicit Euler methode gebruikt. Deze methode gebruikt in alle termen de waarde van de huidige tijdstap, behalve in de tijdsterm. Hoewel minder nauwkeurig dan de tweede orde backward Euler of Crank-Nicolson methodes, is deze wel stabiel.

C.2.6 Koppeling van druk en momentum

Voor het koppelen van druk en momentum maakt *simplefoam* gebruik van het SIMPLE algoritme. *pimplefoam* maakt gebruik van het zogenaamde PIMPLE algoritme. Dit is een hybride van SIMPLE en PISO waarbij gebruik gemaakt kan worden van meerdere (SIMPLE) iteraties per tijdstap. Indien dergelijke SIMPLE iteraties niet worden uitgevoerd is het PIMPLE algoritme gelijk aan het PISO algoritme. Voor meer informatie over de SIMPLE en PISO algoritmes wordt de lezer verwezen naar (Ferziger and Perić 2002).

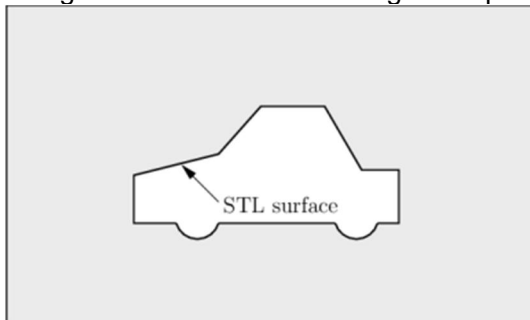
D snappyHexMesh

snappyHexMesh (snappy) is een roostergenerator die gebruikmakend van getrianguleerde oppervlaktes in Stereolithography (STL) formaat automatisch een driedimensionaal rooster genereert opgebouwd uit hexaëders en split-hexaëders. Via een iteratief proces vormt het rooster zich naar het opgegeven oppervlak vanuit een achtergrondrooster. Ook is er de mogelijkheid om laagjes cellen op een oppervlak toe te voegen om de grenslaag beter te beschrijven.

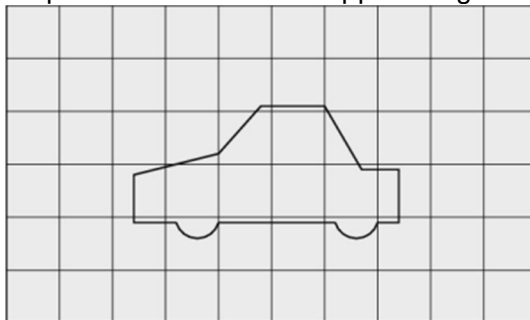
De volgende bestanden zijn noodzakelijk om snappy te gebruiken

- Een STL bestand (in ASCII of binary)
- Een achtergrondrooster. Deze kan heel eenvoudig met *blockMesh*, de standaard OpenFoam roostergenerator die vooral geschikt is voor eenvoudige roosters, gegenereerd worden. De celdichtheid in dit achtergrondrooster bepaalt de basis celdichtheid in het uiteindelijke rooster. Voor een goede werking van snappy is het belangrijk dat de cellen een aspectverhouding van ongeveer 1:1 hebben.
- *snappyHexMeshDict*, een tekstbestand met daarin alle instelling voor snappy.

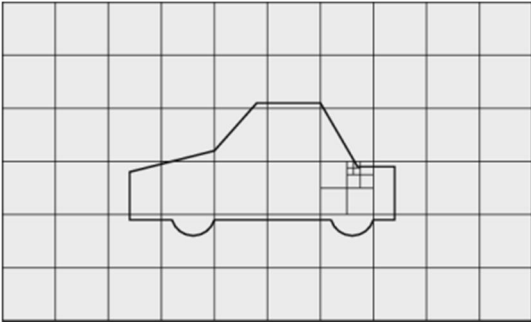
Het proces van snappy zal verduidelijkt worden aan de hand van enkele figuren die zijn overgenomen uit de handleiding van OpenFoam.



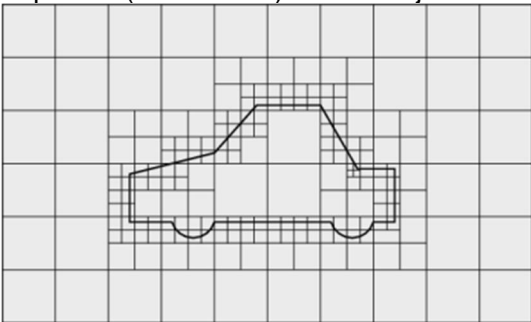
Stap 1: Er wordt een STL oppervlak gemaakt



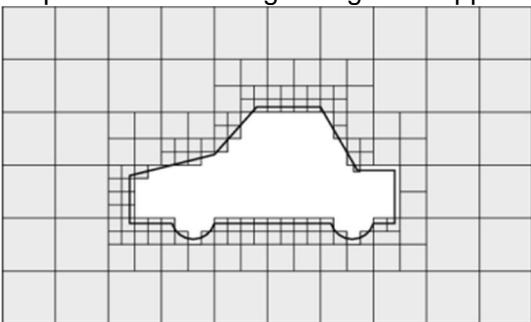
Stap 2: Het maken van een achtergrondrooster (bijvoorbeeld met blockMesh)



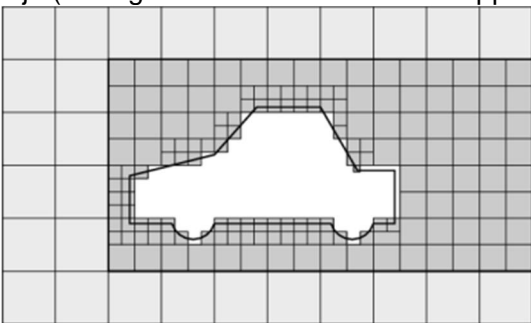
Stap3: Rond bepaalde (in te stellen, meestal scherpe) hoeken wordt het rooster met een bepaalde (in te stellen) mate verfijnd.



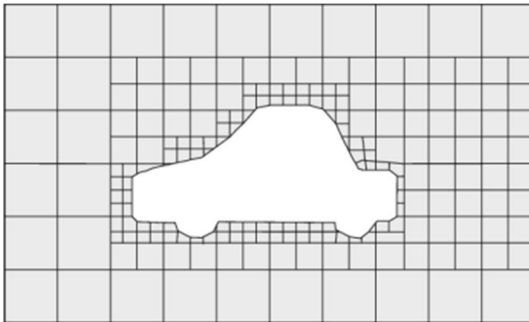
Stap4: Dan wordt langs het gehele oppervlak het rooster verfijnd in een op te geven mate.



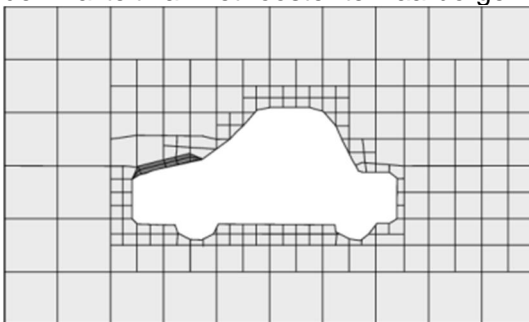
Stap5: Als het rooster overal langs het oppervlak verfijnd is, worden de cellen die niet nodig zijn (in dit geval de cellen binnen het oppervlak) verwijderd.



Stap6: Het is mogelijk om regio's op te geven die in een bepaalde mate verfijnd moeten worden. Dat wordt nu gedaan.



Stap7: Nu worden de hoekpunten van de cellen rond het oppervlak zo verplaatst dat deze op het oppervlak komen te liggen. Dit is een iteratief proces, waarbij continu wordt gepoogd om de kwaliteit van het rooster te waarborgen.



Stap8: Een nadeel van de vorige stap is dat de cellen rond het oppervlak een vreemde vorm kunnen krijgen die invloed heeft op de oplossing. Het is dan mogelijk om een laag cellen op het oppervlak te plaatsen. Dit kan ook worden gebruikt om de grenslaag beter uit te rekenen.

E Opzet van het rekenrooster voor de waterscherm berekeningen

E.1 Geometrie

De geometrie wordt in Gmsh opgebouwd door punten te definiëren en hiertussen lijnen te trekken. Daarnaast kunnen er geometrische vormen zoals cirkels voor de inlaat worden gedefinieerd. Tussen de lijnen kunnen weer oppervlaktes worden gedefinieerd.

Meerdere vlakken kunnen aan elkaar gekoppeld worden door middel van zogeheten Physical Groups zodat deze als een apart STL-bestand kunnen worden opgeslagen. Op die manier kan voor een aantal vlakken tegelijkertijd een randvoorwaarde worden gedefinieerd in de uiteindelijke berekening.

Om de geometrie weg te schrijven als STL-bestand wordt er door Gmsh een rooster bestaande uit driehoeken op de vlakken gemaakt (zie ook Figuur 4.1). Per Physical Group wordt er een STL-bestand weggeschreven. Al deze bestanden bij elkaar definiëren de geometrie bij het maken van het rekenrooster.

E.2 Rekenrooster

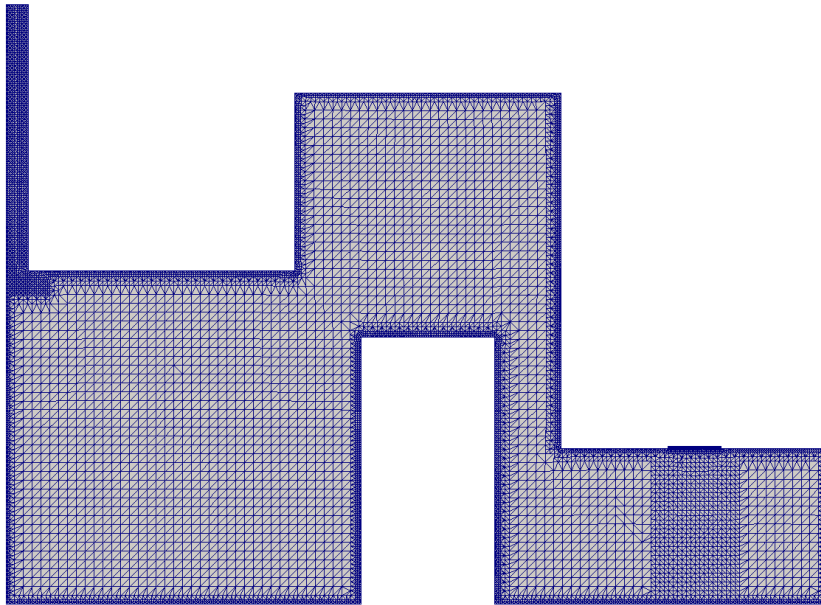
De meshprocedure van snappyHexMesh is een iteratief proces waarbij er van een volledig hexagonaal achtergrondrooster naar een gemengd rooster met hexagons en polyhedrons wordt gegaan dat zich volledig naar de opgegeven geometrie vormt. De procedure die snappyHexMesh volgt is schematisch gegeven in Appendix D.

SnappyHexMesh bevat een groot aantal variaties aan instellingen die de kwaliteit van het gegenereerde rekenrooster beïnvloeden. Dit maakt snappyHexMesh flexibel, maar tegelijkertijd ook erg tijdrovend om mee te werken, omdat er veel pogingen moeten worden ondernomen om een goed rooster te krijgen. Ook zorgen de eisen die aan het rekenrooster worden gesteld, zowel door snappyHexMesh als OpenFoam, er voor dat dit rooster erg groot kan worden.

Het is mogelijk om regio's in het gebied te definiëren waar het rooster meer verfijnd moet worden, omdat de doorstroomopening vernauwt of in dat gebied een complexere stroming wordt verwacht. Dit geldt in deze studie voor de aanstroming naar de uitstroomspleet en de uitstroomspleet zelf en rond de gaten waar het water van het drukvat naar de woelkamers stroomt. Een voorbeeld van een rekenrooster wordt gegeven in **Error! Reference source not found.**

Ook langs de randen en de hoeken wordt een verfijning uitgevoerd, om het rooster goed te laten aansluiten op de geometrie en de grenslaagstroming met voldoende nauwkeurigheid op te lossen. Hierbij wordt ook een zwakte van snappyHexMesh zichtbaar: snappyHexMesh heeft met name moeite om een goed rooster te berekenen rond scherpe hoeken. Dit levert makkelijk ongunstig gevormde cellen op rond de hoeken en ook zijn er een hoge mate van verfijning en een hoog aantal iteraties tijdens de meshprocedure noodzakelijk om het rooster rond de hoeken goed te laten aansluiten op de geometrie. Dit vergroot het aantal cellen significant en hiermee ook de rekentijd. Het optimaliseren van het rooster is erg tijdrovend. Vanwege de voortgang van het project is ervoor gekozen om hier niet te veel tijd aan te besteden en indien nodig met een fijner dan noodzakelijk rekenrooster te werken, waarbij een

hogere rekentijd werd geaccepteerd. Hieronder volgt een overzicht van de gemaakte rekenroosters met het aantal cellen.



Figuur 9.2 Doorsnede van het rekenrooster van de driedimensionale berekeningen van een enkele sectie voor het eerste ontwerp van de woelbak (rooster 4 in Tabel 4.1). Zichtbaar zijn de verfijningen rond de inlaat en rond de uitstroomspleet.

Tabel 4.1 Overzicht van gemaakte rekenroosters en het aantal cellen in deze roosters.

#	Mesh	Aantal cellen
1	1 ^e ontwerp woelbak, 2D	49.500
2	1 ^e ontwerp woelbak, 3D, 1 sectie	567.692
3	1 ^e ontwerp woelbak, 3D, 2 secties	1.135.363
4	1 ^e ontwerp woelbak, 3D, 1 sectie, verfijnd aan rand	786.762
6	1 ^e ontwerp woelbak, 3D, 12 secties	3.858.141
7	2 ^e ontwerp woelbak, 3D, 1 sectie	536.860
8	2 ^e ontwerp woelbak, 3D, 2 secties	1.073.720
9	2 ^e ontwerp woelbak, 3D, 1 sectie, grof	284.995
10	2 ^e ontwerp woelbak, 3D, 1 sectie, fijner aan randen tbv $k-\epsilon$	790.859
11	3 ^e ontwerp woelbak, 3D, met drukvat	3.562.102

E.3 Numerieke overwegingen

De driedimensionale berekeningen maken gebruik van de solver pimpleFoam. Deze solver lost een tijdsafhankelijke stroming op. Er is gekozen voor pimpleFoam, omdat met een tijdsafhankelijke solver (simpleFoam) geen convergerende oplossing kon worden bereikt. Waarschijnlijk komt dit doordat de stroming intrinsiek instabiel is.

Een groot probleem bij de berekeningen was de instabiliteit van de berekeningen. Met name bij het hoge debiet was er een zeer fijn rekenrooster benodigd om te zorgen dat het Courant-getal niet divergeerde. Vanwege de stabiliteit is daarom gekozen om de divergentieterm te discretiseren met behulp van het upwind-schema. Dit schema is zeer stabiel maar kent een hogere mate van numerieke diffusie. Dit zal een conservatieve waarde voor de drukval opleveren vanwege de grotere diffusie, maar eventuele details in de stroming worden minder

goed weergegeven. Er wordt vanuit gegaan dat dit schema zal zorgen voor een redelijke benadering. Gezien de beperkte tijd voor het numerieke werk is ervoor gekozen om te kiezen voor stabiliteit boven een gedetailleerde oplossing.

F Eindontwerp

Memo *Interne geometrie waterschembak PKJS* (1207406-003-HYE-0002-m) dd. 19 september 2013

Memo

Aan

Kees-Jan Meeuse;Rijkswaterstaat Zee en Delta locatie Middelburg

Datum

19 september 2013

Kenmerk

1207406-003-HYE-0002

Aantal pagina's

20

Van

Pepijn van der Ven

Doorkiesnummer

+088 335 839 5

E-mail

pepijn.vanderven@deltares.nl

Onderwerp

Interne geometrie waterschembak PKJS

Geachte Kees-Jan Meeuse,

In het voorliggende document wordt de interne geometrie van de waterschembak voor de pilot Krammerjachtensluis (PKJS) beschreven.

Het ontwerp volgt uit de ontwerpstudie 1207406.003, waarbij gebruik is gemaakt van numerieke stroommodellering en fysiek schaalmodelwerk. De resultaten van deze studie zijn niet opgenomen in dit memo maar zullen worden uiteengezet in een rapportage [1] welke in voorbereiding is.

Dit document is als volgt ingedeeld.

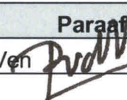
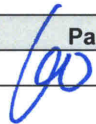

1	Inleiding.....	2
2	Externe geometrie.....	3
3	Reservering verstijving.....	6
4	Beplating van de buitenkant	9
5	Interne geometrie linker sectie.....	10
6	Interne geometrie rechter sectie.....	14
7	Geleidekruizen	17
8	Aansluiting leidingen.....	18
9	Overdrukken per compartiment	19
10	Referenties.....	20

Met vriendelijke groet,

Pepijn van der Ven

Status

Definitief

	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	19-09-2013	P.P.D. van der Ven		O.M. Weiler		K.J. Bos	

1 Inleiding

Het uitwendige van de waterschermbak is gegeven in de documenten *Vraagspecificatie Eisen* [2] en *Definitief Ontwerp Ombouw zoetzoutscheiding Krammerjachtensluis 2* [3] en de in deze documenten opgenomen figuren. Deltares is gevraagd om, op basis van numeriek en schaalmodelonderzoek, het hydraulische gedrag van de waterschermbak vast te stellen en hiermee de interne geometrie vast te leggen.

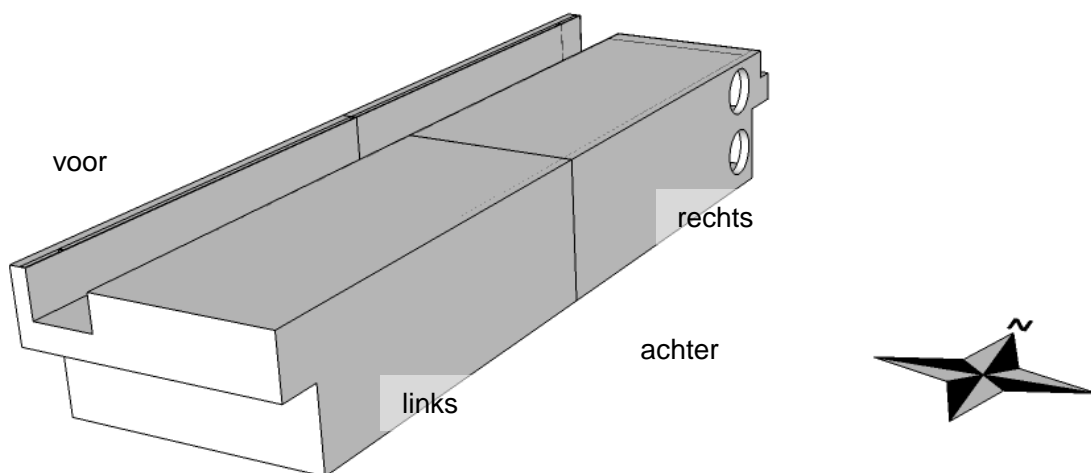
De ruimte welke beschikbaar is voor de stroming is gegeven door het uitwendige minus de ruimte benodigd voor de constructie. Om tot een passende interne geometrie te komen is daarom op verschillende manieren een constructieruimte gereserveerd.

Het hydraulische ontwerp van de waterschermbak wordt in het voorliggende memo aan de hand van verschillende figuren geïllustreerd. Hiertoe zijn beide secties in 3D getekend in het (gratis verkrijgbare) programma Sketchup. Dit sketchup-bestand is met dit memo verstuurd en dient als vergemakkelijking bij de interpretatie van het in dit memo gepresenteerde ontwerp.

2 Externe geometrie

2.1 Opdeling in twee segmenten

Het waterscherm bestaat uit twee segmenten, welke beide de halve kolkbreedte overspannen. De secties zijn niet symmetrisch. Dit verschil komt voort uit de aanvoer van water, welke via twee leidingen aan de noordelijke kolkwand plaatsvindt. De aanvoer van de linker (zuidelijke) sectie gaat door de rechter sectie heen; hierop wordt verder ingegaan in Hoofdstuk 5.



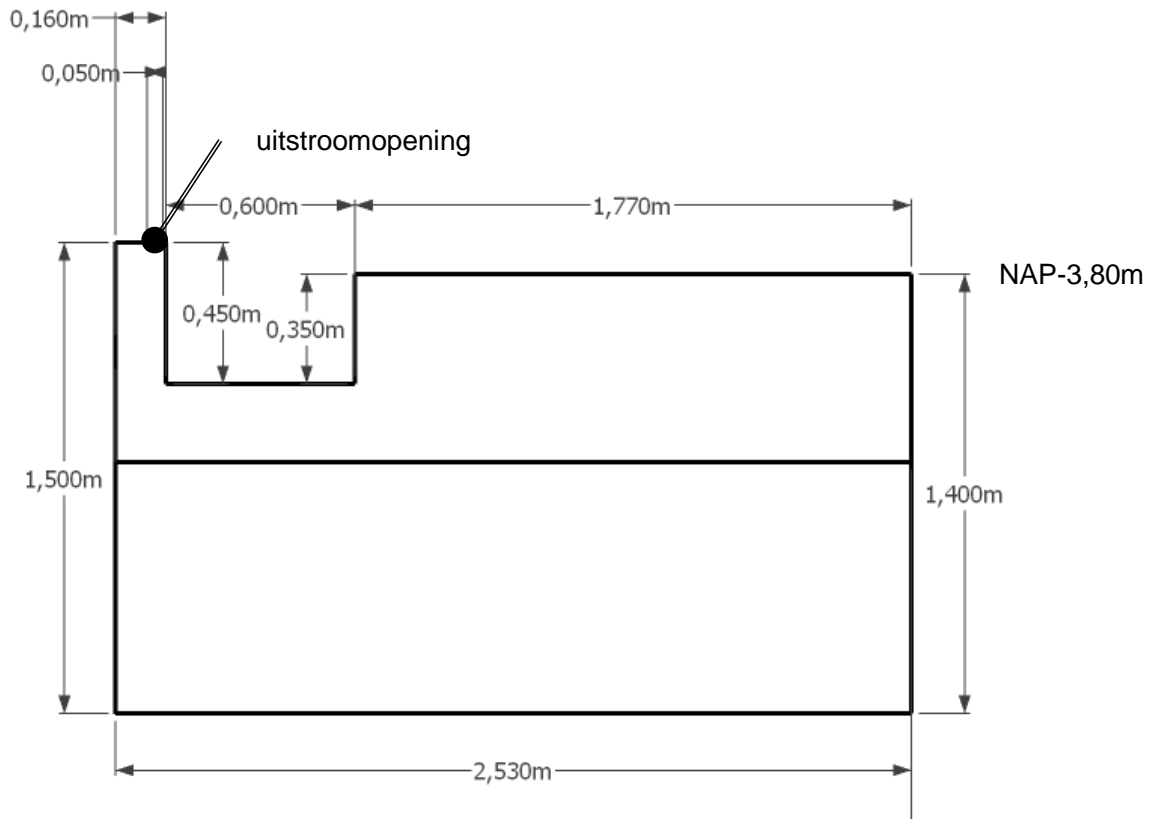
Figuur 2.1 Overzicht van waterschermsecties, achteraanzicht. De in dit memo gebruikte aanduidingen van richting en locatie zijn ook weergegeven, waarbij 'rechts' overeenkomt met het werkelijke noorden, en 'voor' met het werkelijke westen.

De globale afmetingen van een enkele sectie zoals hier gepresenteerd zijn (lxbxd) 4,40m×2,53m×1,50m. Deze buitenmaten zijn niet bindend: de maximale breedteafmeting, volgend uit [2], bedraagt 2,57m.

Merk op, om verwarring in woordgebruik te voorkomen, dat *lengterichting* van de bak overeenkomt met de *kolkbreedte*.

2.2 Dwarsdoorsnede en uitsparing voor het bellenscherm

Onderstaand zijn de externe afmetingen van de waterschermbak weergegeven. Het bellenscherm wordt achter de uitstroomspleet t.b.v. het waterscherm geïnstalleerd, waarvoor een uitsparing van 600mm×450mm is gemaakt. Deze afmetingen zijn ruimer dan de reservering zoals getekend in [3], DET-830.



Figuur 2.2 Externe afmetingen van de waterschermbak, doorsnede vanaf links (d.w.z. het zuiden) gezien.

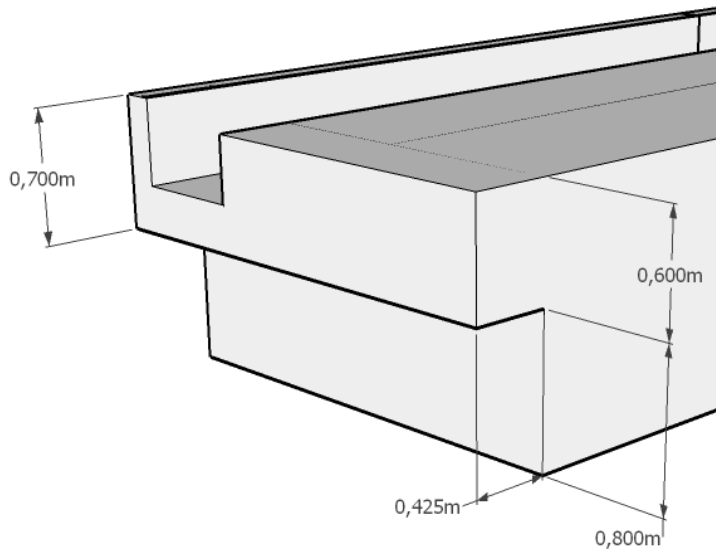
Bovenstaand figuur toont ook de breedte van de uitstroomspleet, 50mm, waarnaast een reservering voor de verstijving van 100mm (links in de figuur, zie Hoofdstuk 3) en 10mm dekplaatdikte (rechts in de figuur, zie Hoofdstuk 4).

De uitstroomopening is op hoogte NAP-3,70m; gelijk aan de hoogte van de drempel. De bovenkant van de rest van de bak is beperkt tot NAP-3,80. De reden hierachter is dat in [3] de aanvoerleidingen voor het bellenscherm bovenlangs zijn gepland. Het heeft echter voordelen om deze aanvoer langs de wand te plaatsen; er zijn in dat geval minder bochten nodig en de verschillende aanvoerleidingen zijn onderling beter uitwisselbaar. Om de aanvoer op deze manier vorm te geven is in het huidige ontwerp een uitsparing opgenomen, zie Sectie 2.4. De 100mm aan de bovenkant van de bak zou vervolgens wellicht constructief gebruikt kunnen worden.

2.3 Nokken

De kolkwanden kennen een verspringing, waarop de waterschermscties zullen worden geïnstalleerd. Dit betekent dat er aan de wandzijdes van de waterschermbak een uitsparing is, zoals weergegeven in onderstaande figuren. De gedeeltes boven deze verspringingen worden in het huidige memo de nokken genoemd. De interne vormgeving van deze uiteindes worden nader besproken in Secties 5.2 en 6.3.

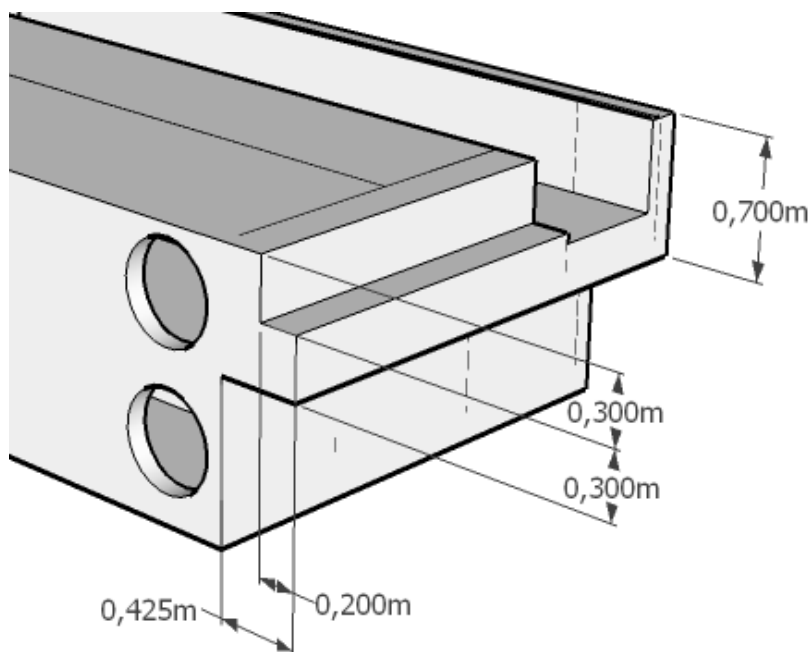
Onderstaand figuur toont de externe afmetingen van deze uitsparing aan het linker (zuidelijke) uiteinde. Deze zijn gebaseerd op de tekeningen in [3].



Figuur 2.3 Externe afmetingen van de nok aan de linker sectie.

2.4 Nok en uitsparing aanvoer bellenscherm

De nok aan het rechter (noordelijke) uiteinde kent een tweede uitsparing, welke een aanpassing is op de externe geometrie zoals gegeven in [2]. Deze uitsparing, langs de kolkwand aan de bovenzijde van de bak, geeft een ruimte waarin de aanvoer van lucht voor het bellenscherm geplaatst kan worden. Zoals eerder genoemd kan de ruimte boven de bak (tussen NAP-3,80m en -3,70m) dan wellicht constructief gebruikt worden.



Figuur 2.4 Externe afmetingen nok aan rechtersectie met uitsparing voor de aanvoer van lucht voor het bellenscherm.

3 Reservering verstijving

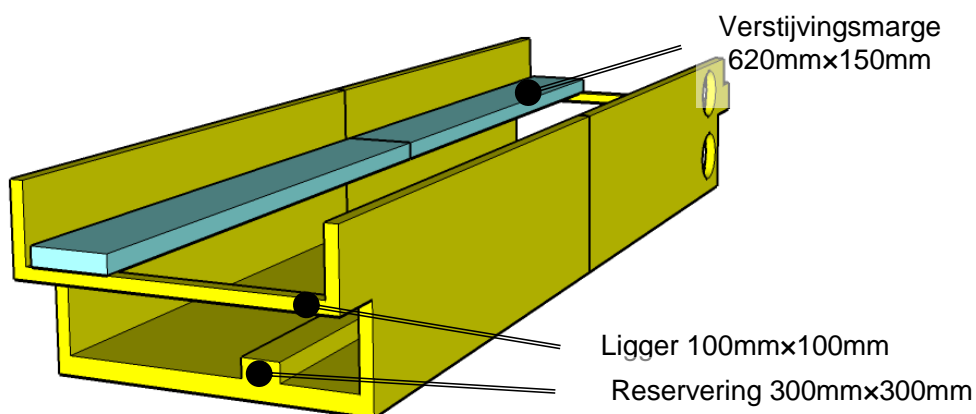
Het doel van het onderzoek [1] is het vaststellen van de interne geometrie. Omdat er een wisselwerking is tussen de externe afmetingen van de bakken, de constructie hiervan, en de – resterende – ruimte voor de interne geometrie en stroming, is rekening gehouden met de constructie door hiervoor ruimte te reserveren. Er zijn geen berekeningen gemaakt of deze ruimte voldoende is om een benodigde stijfheid te bereiken. Het doel van de reservering is enkel geweest de aannemer constructiemogelijkheid te geven tussen de opgelegde externe afmetingen en de gewenste interne geometrie.

Merk op dat naast onderstaande componenten ook stijfheid wordt ontleend aan het plaatmateriaal dat intern wordt gebruikt (zie Hoofdstukken 5 en 6).

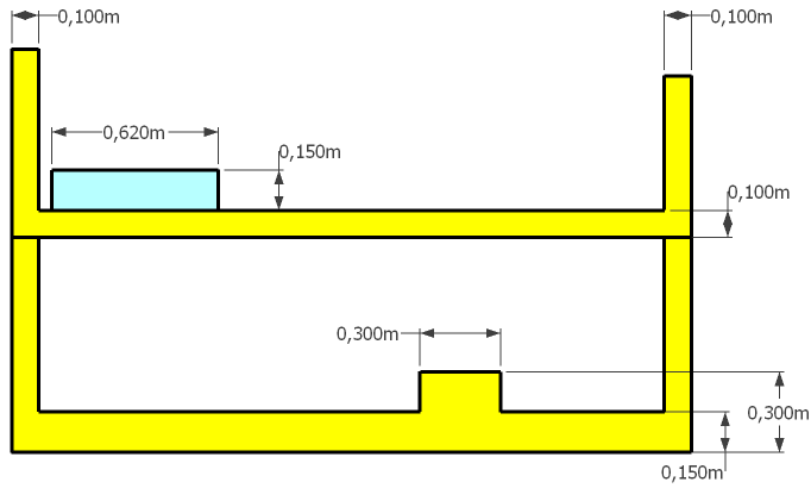
De primaire constructieruimte is gegeven met het onder- voor- en achtervlak van de waterschermbak. Deze vormen een U-vormig profiel (in onderstaand figuur geelgekleurd), waarbij aan de voor- en achterzijde 10cm dikte is gereserveerd en aan de onderzijde 15cm. Een extra verdikking in de bodem, over de gehele lengte van de waterschermbak, geeft de mogelijkheid voor een ligger van (bxd) 300mmx300mm.

Het voor- en achtervlak worden onderling verbonden door een ligger in de breedterichting van de bak, van 100mmx100mm, welke juist op de verspringing van de kolkwand ligt. Deze valt in onderstaand figuur binnen het geelgekleurde volume.

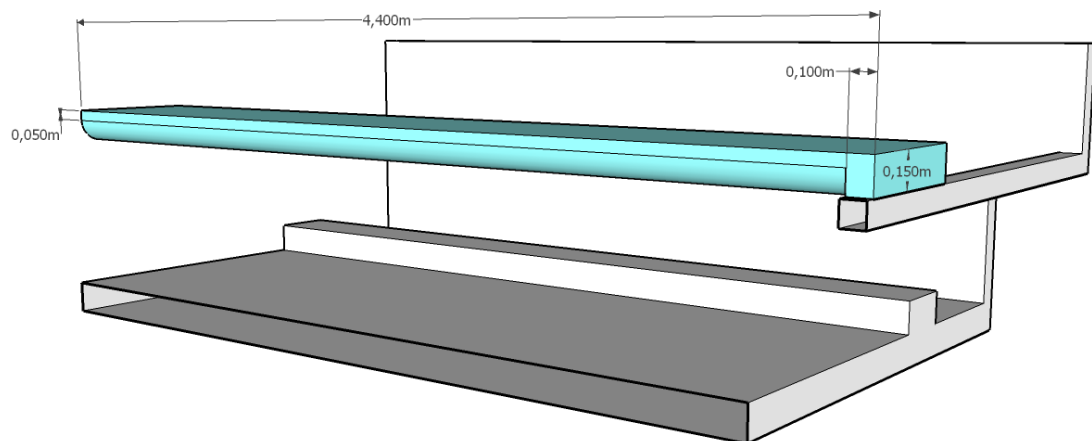
Daarnaast is er een marge tussen de uitsparing voor het bellenscherm en de interne geometrie. Deze is weergegeven in de vorm van een ligger over de kolkbreedte (onderstaand blauwgekleurd). Deze ligger heeft een afgeronde hoek welke essentieel is voor het gedrag van de stroming door de spleet. Deze afronding wordt gegeven in Figuur 3.4 en Figuur 3.5.



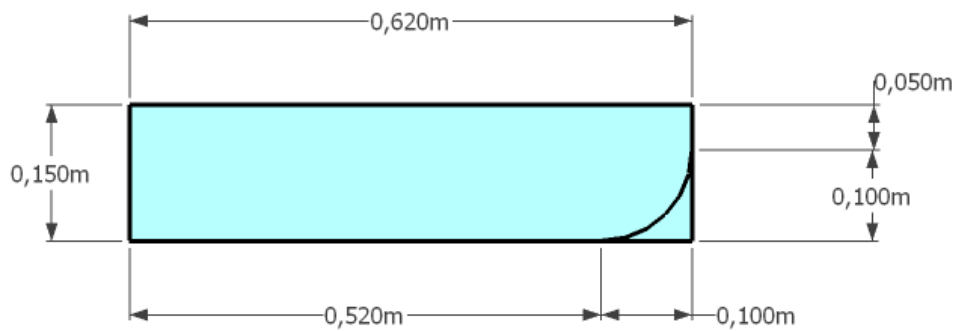
Figuur 3.1 Overzicht reserveringen voor verstijving.



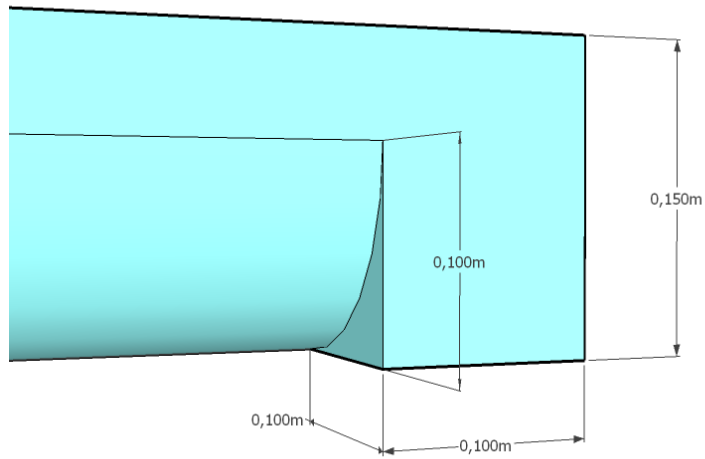
Figuur 3.2 Afmetingen reserveringen voor verstijving (linkeraanzicht)



Figuur 3.3 Afronding in ligger, schuin van voren (d.w.z. vanuit het westen) gezien.



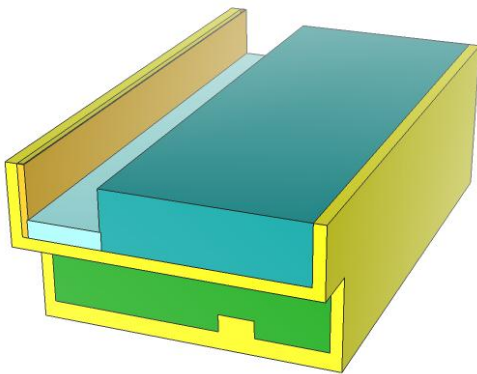
Figuur 3.4 Maatvoering ligger, rechteraanzicht.



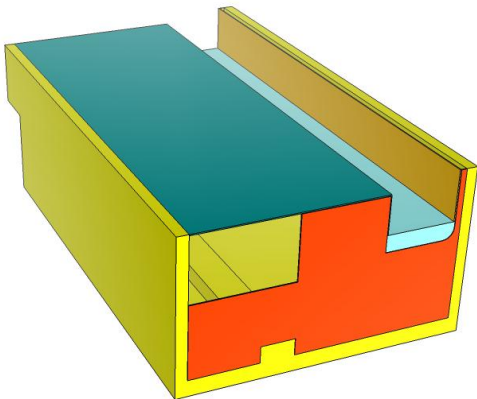
Figuur 3.5 *Maatvoering van het uiteinde van de ligger, schuin van voren gezien.*

4 Beplating van de buitenkant

De zijdes van de bak waar geen specifieke reservering voor de verstijving is opgenomen, worden gevormd door plaatwerk waarvoor een dikte van 10mm is aangenomen. Onderstaand is deze beplating getoond voor de linkersectie. In dit geval bestaat deze beplating uit vier onderdelen: een plaat aan bovenzijde (blauwgekleurd), een plaat tussen het ondervlak en de dwarsbalk van 100mm×100mm (groen), en plaat welke de uitstroomspleet vormt (oranje) en een scheidingsplaat tussen de twee secties (rood). Deze laatste plaat wordt gedeeld door beide secties en steekt dus 5mm uit de sectie.



Figuur 4.1 Beplating aan de buitenkant van de linker sectie, gezien van linksboven.



Figuur 4.2 Beplating aan de buitenkant van de linker sectie, gezien van rechtsboven.

De beplating van de rechter sectie is vergelijkbaar, waarbij de beplating de externe vormgeving, zoals gegeven in Hoofdstuk 2, volgt.

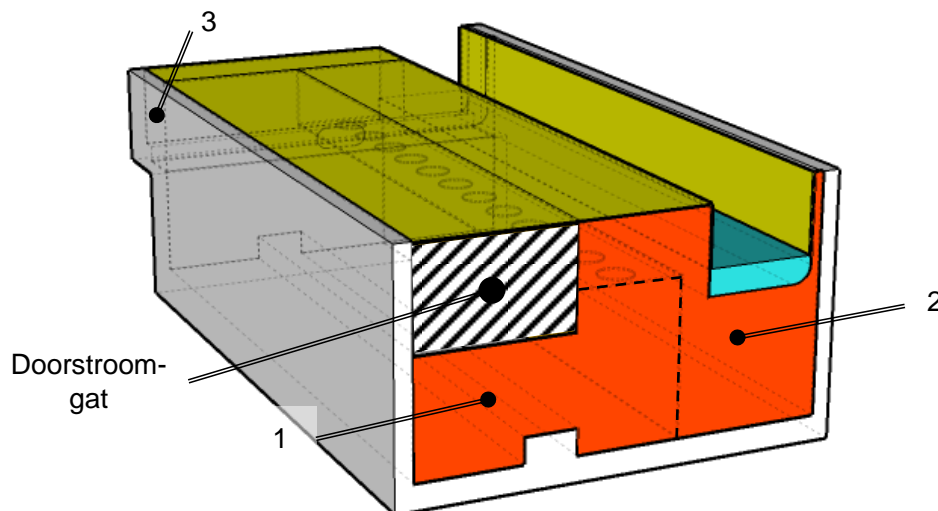
Gegeven de externe maten, de reservering voor verstijving en de dikte van de beplating rondom volgen de afmetingen van het interne volume. De indeling hiervan in compartimenten zal worden gegeven in de volgende hoofdstukken.

5 Interne geometrie linker sectie

Met linker sectie wordt bedoeld de zuidelijke sectie, d.w.z. aan de verre zijde van de aanvoerleidingen. De aanvoer van water naar deze sectie vindt plaats via een koker in de rechtersectie en door een rechthoekig gat in de afscheiding tussen beide secties (in onderstaand figuur is deze afscheidingsplaat roodgekleurd, het gat gearceerd).

De sectie bestaat uit drie compartimenten, genummerd gegeven in onderstaand figuur.

- 1 Het drukvat
- 2 Het grote woelcompartiment
- 3 Het nokcompartiment

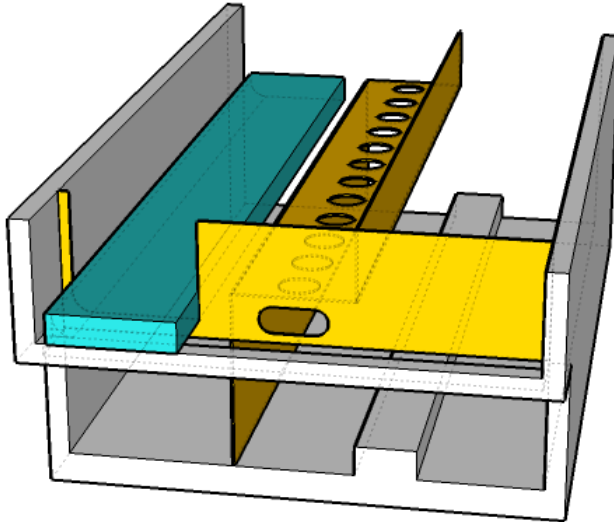


Figuur 5.1 Linker sectie, van rechtsboven gezien; zichtbaar is de opening naar de rechtersectie, waardoor de aanvoer van water plaatsvindt.

Figuur 5.2 toont de interne vlakken welke de verschillende compartimenten scheiden:

- de verticale lange platen en de horizontale plaat met 12 gaten tussen het drukvat en de grote woelbak
- de verticale afscheiding met het langgerekte gat tussen het drukvat en het nokcompartiment.

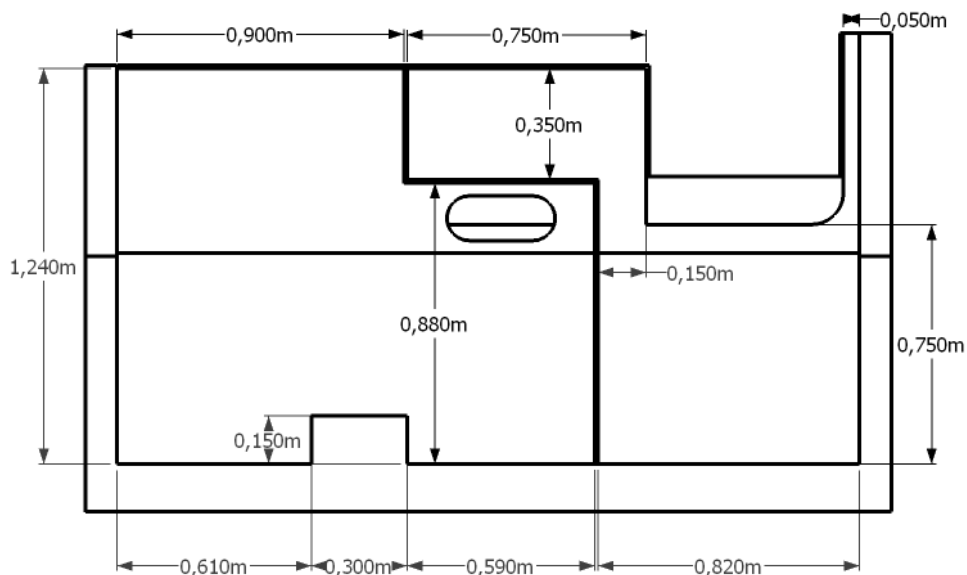
Deze onderdelen worden in de opvolgende secties nader toegelicht.



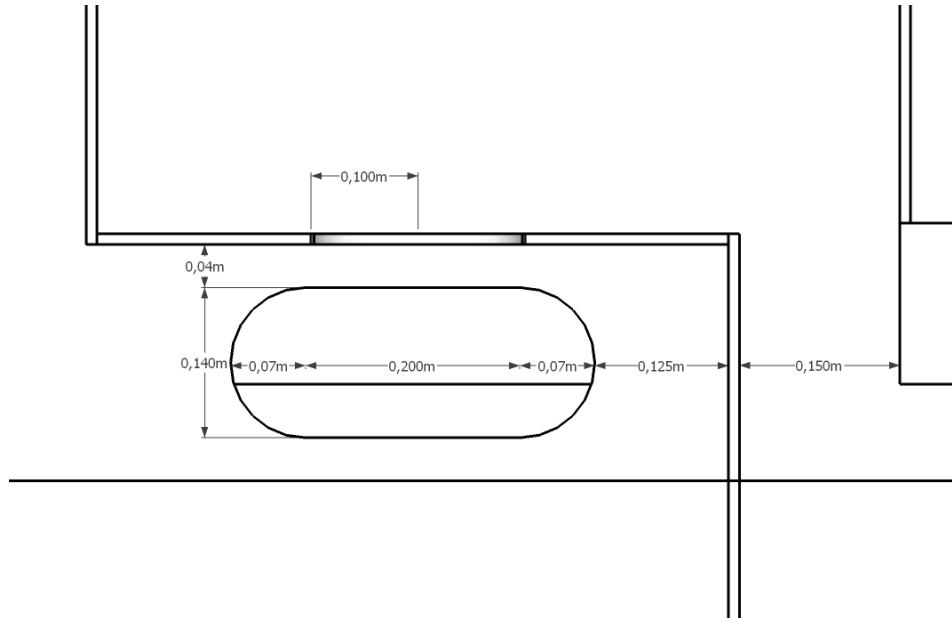
Figuur 5.2 Opengewerkte weergave van de linkersectie, van linksboven gezien.

5.1 Afmetingen drukvat en grote woelcompartiment

Onderstaande doorsnede toont de binnenafmetingen van het drukvat-compartiment en het grote woelcompartiment (compartimenten 1 en 2 in Figuur 5.1). Hierin zijn ook de afmetingen en de positie van de wanden aan de binnenzijde zichtbaar. De doorsnede toont daarnaast ook het gat naar het nokcompartiment, waarvan de afmetingen zijn gegeven in Figuur 5.4.

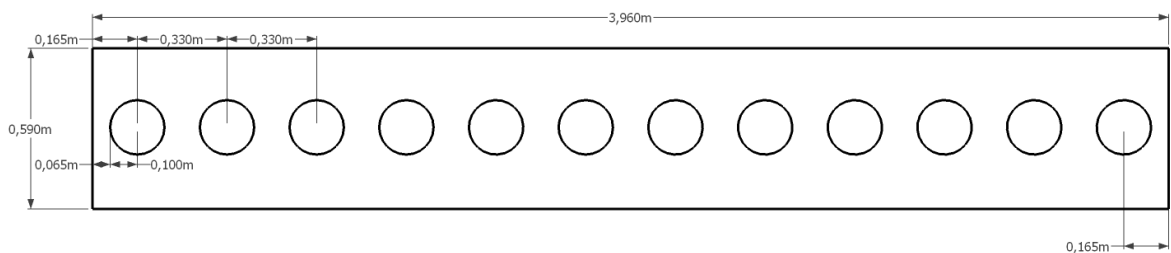


Figuur 5.3 Maatvoering interne geometrie linkersectie; doorsnede van rechts gezien. De gegeven maten zijn binnenmaten, de voorlopig aangenomen plaatdikte is 10mm.

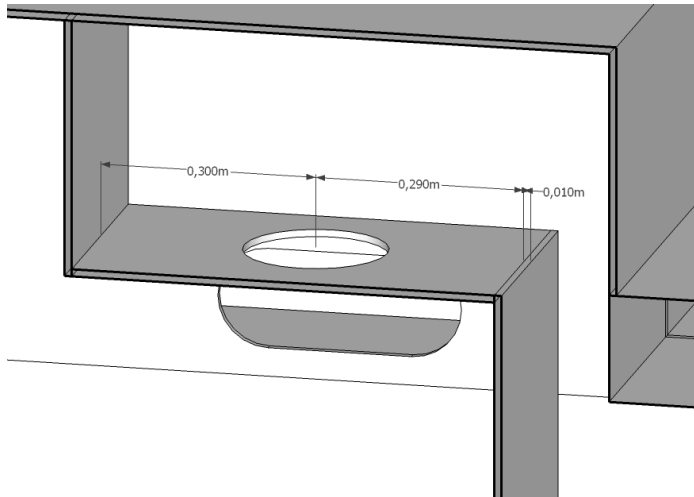


Figuur 5.4 Detail van opening tussen drukvat en het nokcompartiment.

De plaat met 12 gaten, welke de doorstroom tussen het drukvat en het grote woelcompartiment vormt, heeft een lengte van 3960mm en een breedte van 590mm. Met gelijke tussenafstanden vormen twaalf gaten met diameter 200mm het doorstroomoppervlak naar het grote woelcompartiment. Deze gaten zijn weergegeven in onderstaand figuur. Figuur 5.6 toont de positie van de gaten t.o.v. de breedte van de plaat.



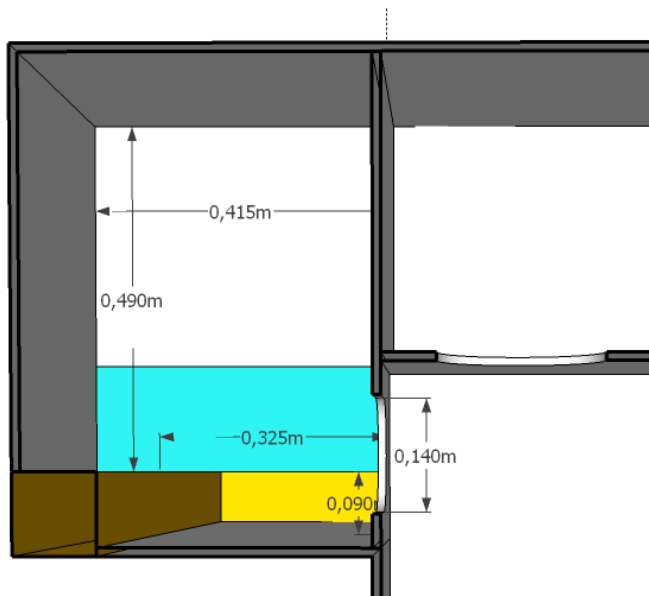
Figuur 5.5 Plaat met 12 gaten, tussen het drukvat en het grote woelcompartiment.



Figuur 5.6 Positie van gaten t.o.v. breedte van de plaat, opengewerkt figuur, vanaf rechts gezien.

5.2 De nok van de rechter sectie

Zoals besproken in Sectie 2.3 zijn aan weerszijden van de waterschermbak uitsparingen vormgegeven overeenkomstig met de verspringing in de kolkwand. De nokken hebben hiermee een beperkte dwarsdoorsnede, waarvan de afmetingen in onderstaand figuur zijn gegeven.



Figuur 5.7 Afmetingen van de nok aan de linker sectie; langsdoorsnede waarbij vanaf achter- (d.w.z. oostelijke) kant wordt gekeken. De verstijvingsreservering over de kolkbreedte – met hierin de afgeronde hoek aan de voorzijde – is blauwgekleurd. De beplating aan de voorzijde is geelgekleurd.

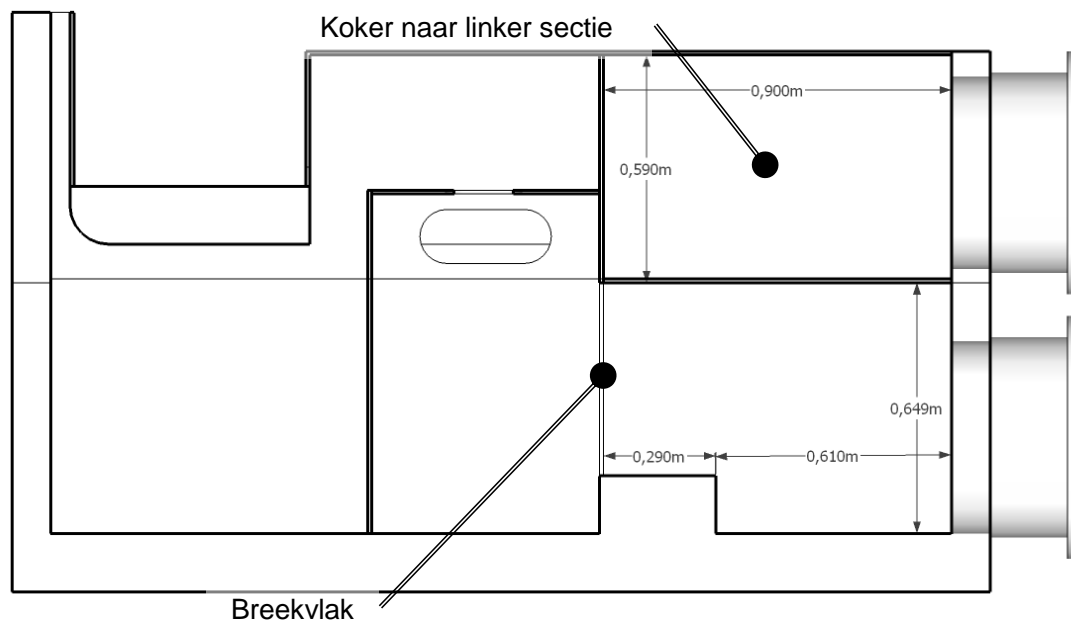
6 Interne geometrie rechter sectie

De interne geometrie van de secties is in grote delen gelijk. Het primaire verschil tussen beide secties is een gevolg van het feit dat de aanvoer van water via de rechter sectie verloopt. Deze sectie heeft dus een koker over de volledige lengte, welke in verbinding staat met de linker sectie; hiermee is het drukvat verkleind.

De aanvoer van water voor de rechter sectie vindt direct plaats door de aangesloten leiding. Dit betekent dat een straal water de bak in is gericht. Deze straal wordt verdeeld door een breekvlak in het verlengde van de aanvoerleiding. Dit breekvlak wordt nader toegelicht in Sectie 6.2.

6.1 Drukvat en grote woelbak

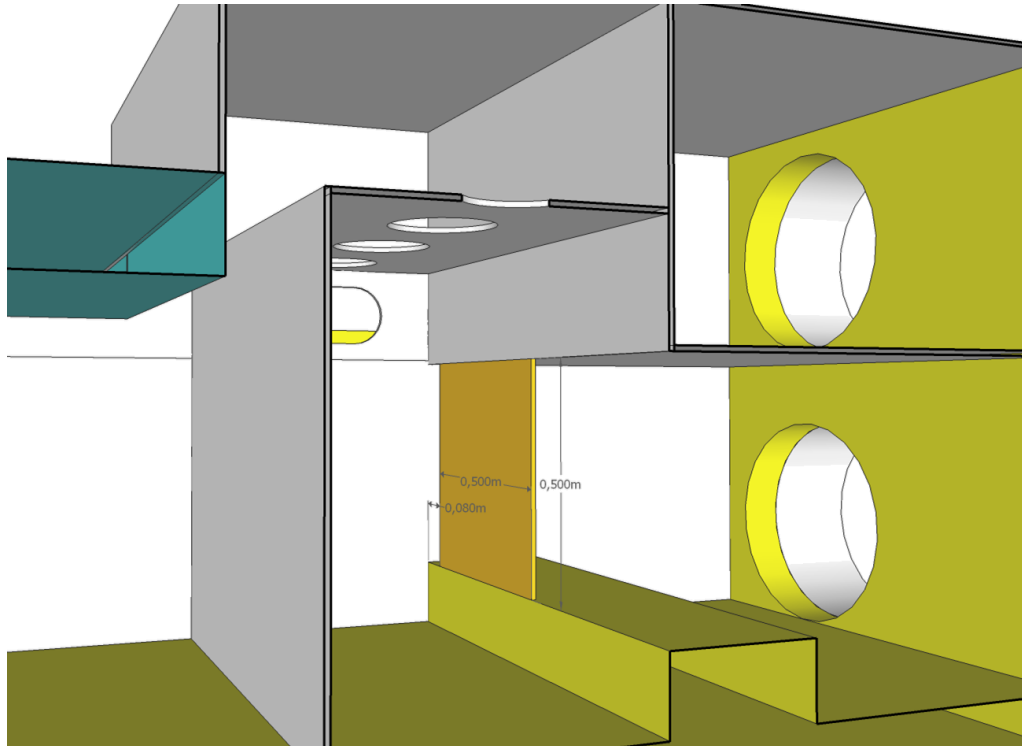
Onderstaand figuur toont een dwarsdoorsnede van de rechter sectie en de afmetingen van de doorstroomkoker richting de linkersectie: (bxd) 900mmx590mm. De overige afmetingen volgen uit Figuur 5.3. Tevens is te zien de positie van het breekvlak, waarop in de opvolgende sectie verder wordt ingegaan.



Figuur 6.1 *Maatvoering interne geometrie rechter sectie; doorsnede van links gezien.*

6.2 Het breekvlak

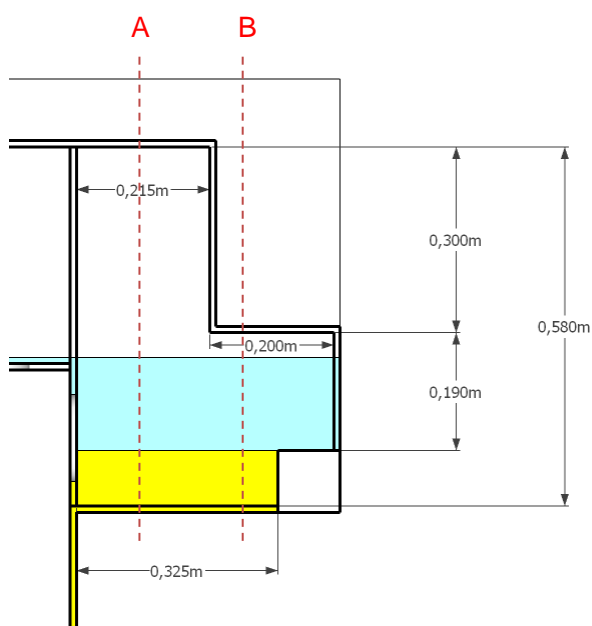
De straal vanuit de aanvoerpijp wordt gebroken door een verticale plaat tussen de verdikking in de bodem en de koker waardoor het debiet naar de linkersectie loopt (zie Figuur 6.1). De afmetingen van dit vlak zijn (hxbxd) 500mmx500mmx10mm. Het vlak wordt zo geplaatst dat een opening van 80mm vrij blijft tot de zijwand, zie Figuur 6.2.



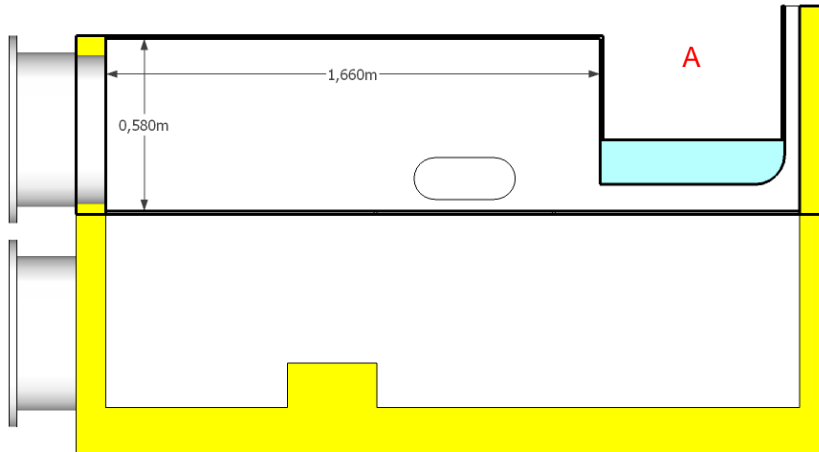
Figuur 6.2 Positie en afmetingen van het breeklak.

6.3 De nok aan de rechter sectie

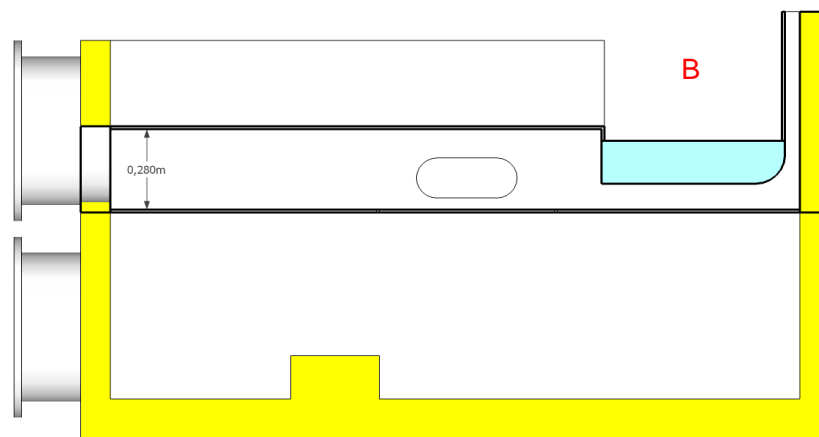
De nok aan deze sectie is gelijk van afmeting aan de nok aan de linker sectie, uitgezonderd van de uitsparing voor de aanvoerleidingen voor het bellenscherm, zoals geïntroduceerd in sectie 2.4. Dit geeft onderstaande afmetingen.



Figuur 6.3 Nok aan rechtersectie, doorsnede van achter gezien; aangegeven zijn onderstaand gegeven doorsnedes.



Figuur 6.4 Doorsnede van rechts gezien, t.p.v. A in Figuur 6.3.

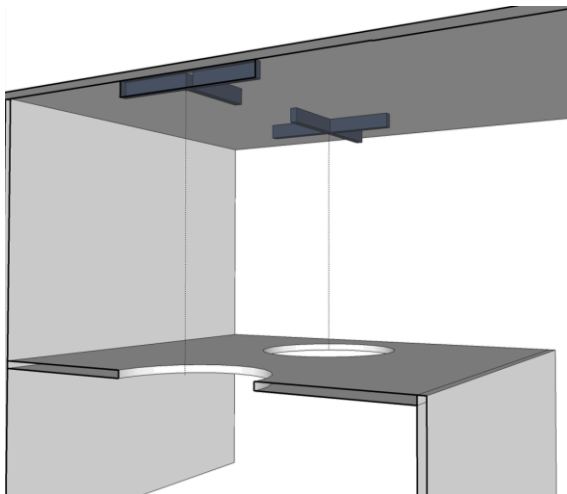


Figuur 6.5 Doorsnede van rechts gezien, t.p.v. B in Figuur 6.3.

7 Geleidekruizen

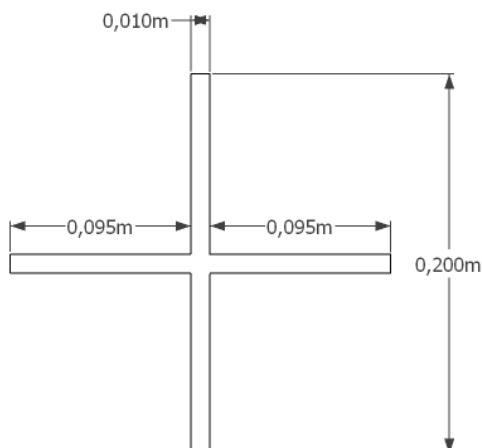
Wanneer stralen gericht worden op een vlak –zoals in het huidige ontwerp de omhooggerichte stralen door de twaalf gaten tussen het drukcompartiment en het grote woelcompartiment zijn– zijn deze instabiel. Dit kan trillingen tot gevolg hebben. Dit effect kan worden gereduceerd door de straal te fixeren en zogenoemd een voorkeur op te leggen. In het huidige ontwerp wordt dit gedaan door kruizen recht boven de doorstroomgaten tegen de bovenplaat van de waterschermbak te plaatsen, zoals aangegeven in onderstaand figuur.

Deze kruizen zijn in de figuren van de voorgaande hoofdstukken weggelaten om deze figuren inzichtelijk te houden. Beide secties hebben boven alle twaalf gaten van de plank tussen het grote woelcompartiment en het drukcompartiment een dergelijk kruis. Het bij dit memo geleverde sketchup-bestand toont deze kruizen wel.



Figuur 7.1 Positie van geleidkruizen, doorsnede.

De afmetingen van deze kruizen worden onderstaand gegeven. De dikte van het kruis (d.w.z. de afmeting in hoogterichting van de waterschermbak) bedraagt 20mm. In de vormgeving en constructieve uitwerking van deze kruizen bestaat een grote mate van vrijheid.

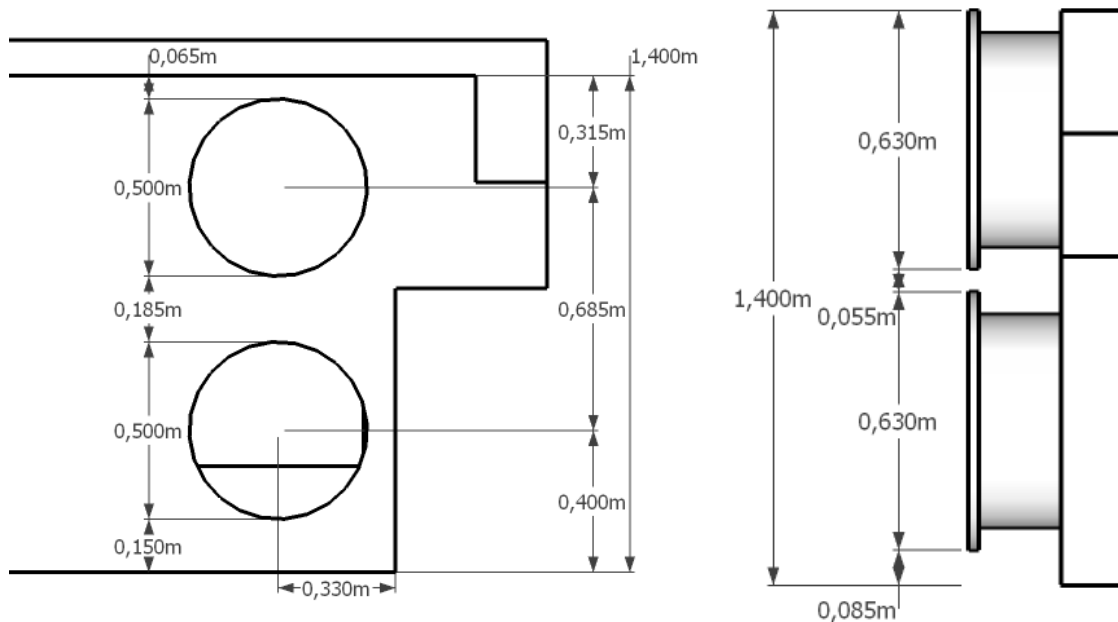


Figuur 7.2 Afmetingen van geleidkruizen.

8 Aansluiting leidingen

De exacte positie van de aansluiting op de leidingen is niet exact gegeven in [2] en [3]. De verticale positie van de aansluitingen, zoals onderstaand gegeven, volgt uit de afmetingen van de flenzen op de leidingen van 630mm doorsnede ([3]) en de indeling in de verschillende compartimenten.

De bovenrand van de flens van de bovenste leiding komt zo overeen met NAP-3,80 en is daarmee in lijn met het bovenvlak van de waterschermbak. De binnenmaat van de onderste buis loopt juist over in het inwendige vloervak (NAP-5,05m) van het drukvat-compartiment van de rechtersectie. De afstand tussen de twee flenzen hier in het huidige ontwerp zo groot mogelijk gehouden met inachtneming van bovenstaande randvoorwaarden.



Figuur 8.1 Aansluiting van leidingen met flens op sectie; achteraanzicht (links) en zijaanzicht (rechts).

9 Overdrukken per compartiment

Wanneer het waterscherm actief is en een debiet moet stromen door de bak, wordt de bak op overdruk gezet door de pompen en/of met behulp van het vrije verval tussen Zoommeer en Zijpe. De overdruk die de binnenzijde van de bak heeft is een functie van het gewenste debiet en verschilt per compartiment. De drukken en de metingen waarop deze zijn vastgesteld worden uitgebreid besproken in [1]. Onderstaand volgt een summier overzicht van de verschillende overdrukken per compartiment voor het grootste, maatgevende debiet van 700 L/s per sectie. Hierbij zijn de overdrukken in het drukvat en het grote woelcompartiment gebaseerd op metingen en is de overdruk in het nokcompartiment (*) hierop geschat. (De absolute druk per compartiment bestaat naast deze overdruk uit de statische druk, welke op zowel binnen- als buitenzijde van de waterschermbak werkt)

Tabel 9.1 Overdruk per compartiment bij 700 L/s/sectie

Compartiment	Overdruk [kPa]	Overdruk [mwk]
Drukvat	12,2	1,25
Groot woelcompartiment	8,1	0,85
Nokcompartiment *	9	0,95

Daarnaast voert de inkomende straal een kracht uit op het breekvlak met bij het maatgevende debiet een magnitude van ca. 2650 N (270 kgf).

10 Referenties

- [1] *Onderzoek interne geometrie waterschermbak*
Deltares, in voorbereiding
Documentnr. 1207406-003-HYE-0001-r
- [2] *Vraagspecificatie Eisen, Beschrijving van het Werk Pilot implementatie innovatie zout-zoetscheiding Krammerjachtensluis*
Rijkswaterstaat, 28-03-2013
Zaaknummer 31070128
- [3] *Definitief Ontwerp Ombouw zoetzoutscheiding Krammerjachtensluis 2*
Royal HaskoningDHV, 22-03-2013
Versie 11