



Dit is de Nederlandstalige samenvatting van het proefschrift *'On the free-surface vortex driven motion of buoyant particles'* waarop Alex Duinmeijer aan de TU Delft promoveerde. Drijfvlagen in de ontvangstbassins van rioolgemalen veroorzaken hoge kosten en ongewenste arbeidsomstandigheden bij verwijdering. Alex onderzocht de effectiviteit van vortexen voor het transport van drijfvuil in rioolgemalen. De resultaten zijn onder andere aanbevelingen voor het ontwerp van ontvangstbassins en voor aanpassing van de in- en uitslagpeilen.



Samenvatting proefschrift Alex Duinmeijer

Drijfslagproblematiek in rioolgemalen
(On the free-surface vortex driven
motion of buoyant particles)

Samenvatting proefschrift Alex Duinmeijer

Drijf laagproblematiek
in rioolgemalen
(On the free-surface
vortex driven motion of
buoyant particles)

Voorwoord

Dit is de Nederlandstalige samenvatting van het proefschrift ‘On the free-surface vortex driven motion of buoyant particles’. Deze Nederlandse samenvatting beschrijft de praktische resultaten van een promotieonderzoek naar transport van drijfvuil in de ontvangsbassins van rioolgemalen door Alex Duinmeijer.

Het doel van het onderzoek was inzicht krijgen in het ontstaan en gebruik van een vortex (draaikolk) voor verticaal transport van drijfvuil in ontvangsbassins van rioolgemalen. Veel rioolgemalen in Nederland hebben in het ontvangsbassin te maken met de vorming van drijfvlagen van stukjes ‘gestold vet’, ook wel FOG genoemd (fat, oil and grease) en ander drijfvuil. Verwijdering van het drijfvuil en de drijfvlagen is gevaarlijk, onhygiënisch en arbeidsintensief werk en kost jaarlijks tientallen miljoenen euro’s.

Op basis van experimenten uitgevoerd in het laboratorium van Deltares, in een testopstelling in Breda en in rioolgemaal ‘Nieuw Terbregge’ in Rotterdam zijn de kenmerken en de transportcapaciteit van vortexen onderzocht en vergeleken met modeluitkomsten.

Het onderzoek toont aan dat een vortex een effectief middel kan zijn voor het transport van drijfvuil naar de zuigmond van de pomp. In het onderzoek zijn de bepalingmethoden voor de onderdompeldiepte van de zuigmond in relatie tot de lengte van de vortex beproefd en aangescherpt. Dit om luchtaanzuiging door de vortex te voorkomen. Tenslotte beveelt Alex Duinmeijer aan om gemaalkelders te verkleinen en de in- en uitslagpeilen waar mogelijk te verlagen om drijfslagvorming te voorkomen.

Deze samenvatting bevat de voor de praktijk meest relevante resultaten van het promotieonderzoek. In het volledige (Engelstalige) proefschrift vindt u meer informatie over de toegepaste (statistische) methoden, modellen en experimentele opstellingen. Het proefschrift met de detailinformatie en de wetenschappelijke onderbouwing van de resultaten kunt u vrij downloaden via www.riool.net/drijfslagonderzoekduinmeijer/.

Wij wensen u veel leesplezier en inspiratie toe.

Hugo Gastkemper, Stichting RIONED
Joost Buntsma, STOWA
April 2021

Inhoud

1	Inleiding	7
1.1	Het rioolgemaal: een korte historie van ontwerpmethodiek	7
1.2	Drijfslagvorming in ontvangsbassins	8
1.3	Ontwerpmethodieken voor transport van drijfvuil	9
1.4	Probleemstelling	10
1.5	Onderzoeksvragen promotieonderzoek	10
1.6	Structuur / Leeswijzer	10
2	Opzet experimenteel onderzoek	11
2.1	Opzet experimenteel onderzoek naar vortexkarakteristieken en de transporteffectiviteit	11
2.2	Opzet experimenteel onderzoek naar bruikbaarheid van CFD	14
3	Uitkomsten Onderzoek	16
3.1	Karakteristieken van de vortex	16
3.2	Transport van drijfvuil met de vortex	18
3.3	Kinetische energiedichtheid als maatregel tegen drijfslagvorming	20
3.4	CFD als ontwerptool voor (riool)gemalen	20
4	Conclusies, aanbevelingen en praktijktoepassingen	24
4.1	Conclusies & Aanbevelingen	24
4.2	Praktijktoepassingen	25
	Literatuur	26
	Publicaties die uit het onderzoek zijn voortgekomen	26
	Colofon	27

1 Inleiding

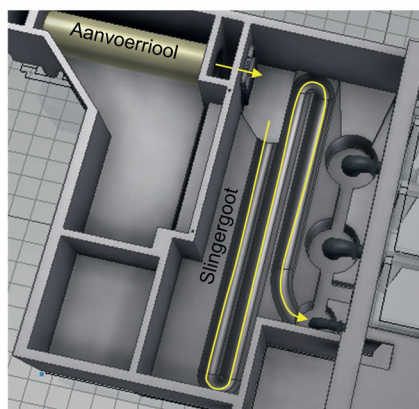
1.1 Het rioolgemaal: een korte historie van ontwerpmethodiek

Het doel van riolering is om de maatschappij te beschermen tegen gezondheidsproblemen en tegen overstroming van stedelijk gebied tijdens hevige regenval. De riolering bestaat voornamelijk uit huisaansluitingen, rioolbuizen en rioolgemalen. De rioolbuizen voeren het rioolwater af op het rioolgemaal die het vervolgens doorpompt naar een rioolwaterzuiveringsinstallatie of ander ontvangtpunt. Het rioolgemaal bestaat uit een ontvangstbassin en één of meerdere droog- of nat opgestelde pompen.

De eerste rioolgemalen dateren uit het einde van de 19^e eeuw. Het Westerlijk Stoomgemaal is het eerste gemaal in Rotterdam en dateert uit 1891. Dit gemaal verpompte zowel singels rioolwater met stoom aangedreven zuigerpompen. Tegenwoordig is dit gemaal een nationaal monument.

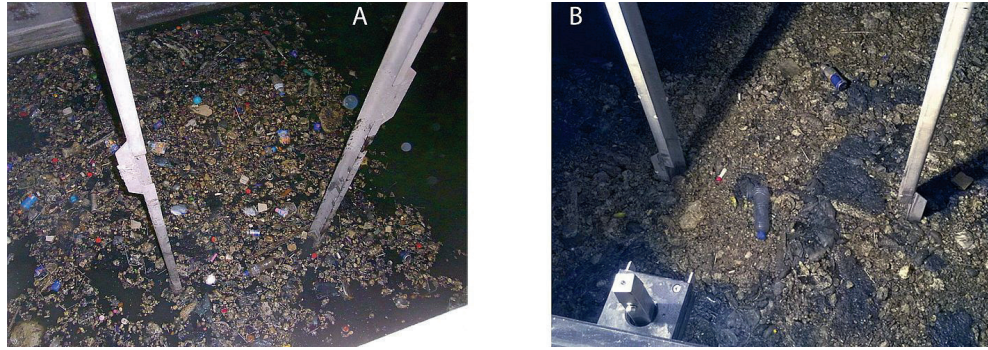
Vanaf de jaren 1910-1920 werden gemalen uitgevoerd met elektromotor aangedreven centrifugaalpompen. Het in- en uitschakelen van de elektromotoren gebeurde met relais (elektromagnetische schakelaars). Om zowel het optreden van hoge motortemperaturen als slijtage van de relais te beperken, werden de pompen maximaal vijf keer per uur ingeschakeld. Om aan deze schakelfrequentie te voldoen waren grote bassins nodig zodat het vullen langer duurde. De grote bassins hadden als nadeel dat de stroomsnelheden te laag waren om sedimentatie van vaste delen te voorkomen. Dit probleem werd opgelost met de installatie van zogenaamde 'slingergoten', zie Figuur 1. De hogere stroomsnelheden in de goot zorgen voor meevoering van (drijf)vuil naar de zuigmond van de pomp. Door het inslagpeil van de pomp lager te maken dan het bodemniveau van de slingergoot ontstaat een 'vrije uitstroming'. Dit zorgt voor hoge stroomsnelheden in de goot.

Vanaf de jaren zeventig van de vorige eeuw werden de (draaistroom) elektromotoren ingeschakeld met frequentieomvormers. Met deze omvormers wordt de draaistroomfrequentie van het 3-fasen stroomnet geregeld zodat de pompen langzaam kunnen opstarten. De maximale schakelfrequentie is hierdoor verhoogd naar circa tien tot twintig keer per uur. Het benodigde bassinoppervlak is nu beduidend kleiner. In de gemeente Rotterdam worden alle motoren met een vermogen boven de 4 kW aangestuurd met frequentieomvormers.



Figuur 1. Slingergoot in rioolgemaal Holwinde (Rotterdam).
Links: 3D-overzicht van het ontvangstbassin.
Rechts: foto van de slingergoot met aan de rechterzijde de zuigmonden. De slingergoot transporteert de vaste delen naar de zuigmond van de pomp. De hoge stroomsnelheden in de goot ontstaan door een vrije uitstroming vanuit de goot naar het verdiepte deel met de zuigmonden.

Figuur 2. Vorming van een drijflaag in het ontvangtbassin van rioolgemaal Amelandseplein (Rotterdam). Links: losse stukjes drijfvuil (kort na reinigen bassin). Rechts: accumulatie van het drijfvuil tot een massieve drijflaag.



Figuur 3. Links: het handmatig verwijderen van een laag drijfvuil. Rechts: detail van de drijflaag met een dikte van bijna 2 m.



1.2 Drijflaagvorming in ontvangtbassins

Veel rioolgemalen in Nederland hebben in het ontvangtbassin te maken met de vorming van drijflagen van stukjes ‘gestold vet’, ook wel ‘FOG’ genoemd (*fat, oil and grease*) en ander drijfvend materiaal. In deze samenvatting gebruiken we de term drijfvuil voor de combinatie van stukjes gestold vet en olie en andere drijfvend materiaal in het rioolwater. De stukjes ‘gestold vet en olie’ hebben een korrelige structuur met een lengte van 0,01 tot 0,2 m. De stukjes worden naar verwachting gevormd in huisaansluitingen en rioolbuizen door een complexe combinatie van processen, zoals de verzeping van vrije vetzuren met calcium (*Nieuwenhuis, 2016*). De bronnen van deze componenten zijn kookoliën en vetten die via de gootsteen worden afgevoerd en zeppen die vanuit douches en (vaat-)wasmachines worden afgevoerd. Bij zeer lage stroomsnelheden in het ontvangtbassin kan het drijfvuil aangroeien tot een gesloten massieve drijflaag, zie Figuur 2. In Rotterdam zijn drijflagen verwijderd met een dikte van bijna 2 m, zie Figuur 3. De aanwezigheid van drijfvuil in het ontvangtbassin leidt tot verschillende problemen:

1. Grotere stukken (samengeklonterd) drijfvuil kunnen pompwaaiers verstopen waardoor de bedrijfszekerheid van de riolering afneemt. Bij een specifieke situatie heeft dit geleid tot een jaarlijkse toename van overstortend rioolwater van 16% (*Korving et al., 2006*).
2. De massieve drijflagen worden periodiek handmatig verwijderd wat leidt tot hoge onderhoudskosten en sociaal-maatschappelijke overlast. Voor de gemeente Rotterdam zijn de kosten geraamd op circa € 400.000,- per jaar. Voor heel Nederland is dit geschat op tientallen miljoenen euro's per jaar.
3. Het verwijderen van de drijflagen is arbeidsintensief, onhygiënisch en gevaarlijk werk. Dit soort arbeid is vanuit ARBO-technisch oogpunt onwenselijk.

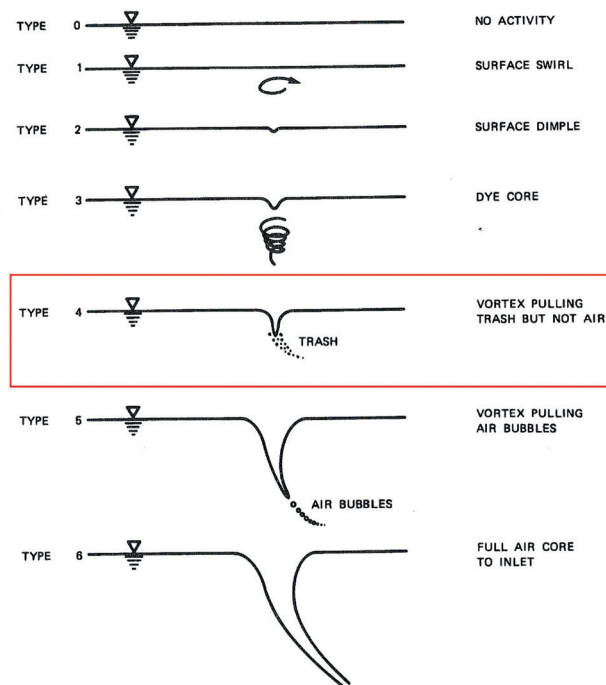
Kortom, de accumulatie van drijfvuil tot massieve drijflagen moet worden beperkt tot een minimum.

1.3 Ontwerpmethodieken voor transport van drijfvuil

Voor het huidige ontwerp van ontvangsbassins wordt ondermeer gebruik gemaakt van de richtlijnen uit de American National Hydraulic Standards Institute (ANSI/HI, 2012). De focus van deze richtlijnen ligt op het verkrijgen van gunstige aanstroomcondities van de zuigmonden van de pompen zoals:

- Lage stroomsnelheden.
- Geen wervelvorming.
- Een uniforme aanstroming van de zuigmonden.
- Voldoende onderdempeldiepte van de zuigmonden om luchtaanzuiging door vortexen (draaikolken) te voorkomen.
- Geen luchtinslag door vallend water.

Deze condities kunnen zelfs gunstig zijn voor de accumulatie van drijfvuil tot massieve drijfvlagen zoals beschreven in paragraaf 3.1. De ANSI/HI (2012) richtlijnen zijn dus minder specifiek gericht op het transport van drijfvuil. De richtlijnen beperken zich tot het ontwerp van sleufvormige en cirkelvormige bassins. Voor de sleufvormige bassins wordt het drijfvuil getransporteerd door extreme verlaging van het bassinpeil zodat een watersprong ontstaat. In de watersprong wordt het drijfvuil in suspensie gebracht en vervolgens getransporteerd naar de zuigmond. In de cirkelvormige bassins wordt het drijfvuil getransporteerd door periodiek het waterpeil extreem te verlagen totdat er een vortex ontstaat van type 4 tot 6, zie Figuur 4. Deze vortex transporteert het drijfvuil naar de zuigmond.



Figuur 4. Classificatie van de sterkte van een vortex (Rindels, 1983).

In Nederland is in een beperkt aantal situaties gebruik gemaakt van rioolgemalen zonder ontvangsbassin, het zogenaamde DAAS-principe (Directe Aansluiting op het AfvalwatertransportSysteem) zie (Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer, 2012). Bij dit principe wordt het rioolwater direct vanuit het aanvoerriool opgepompt zonder gebruik te maken van een ontvangsbassin. Door het ontbreken van een bassin is er ook geen drijfvlagenvorming. De pompcapaciteit wordt geregeld op basis van het rioolwaterdebiet. Hierin ligt ook direct de uitdaging voor het bedrijfszeker toepassen van deze methode als gevolg van de grote variatie in het aanvoerdebiet. Dit debiet kan variëren van bijna nul in de nacht tot maximaal tijdens hevige regenval. Dit vraagt om een betrouwbare aansturing van de pompen.

1.4 Probleemstelling

De methode voor verwijderen van drijfvuil door een extreme verlaging van het waterpeil (beschreven in de ANSI/HI, 2012), heeft een groot risico op pomptrillingen, aanzuiging van lucht en andere ongunstige condities voor de pompen en leidingwerk. Hierdoor wordt deze methode nauwelijks toegepast in Nederland. Ook het gebruik van gemalen zonder ontvangsbassin wordt door het ontbreken van betrouwbare data over het functioneren zelden toegepast. Het gevolg hiervan is dat veel gemalen in Nederland problemen hebben met het transport van drijfvuil, mede door de erfenis van zeer grote ontvangsbassins uit het verleden.

1.5 Onderzoeksvragen promotieonderzoek

Zoals in de probleemstelling beschreven (§1.4) hebben veel gemalen problemen met transport van drijfvuil vanaf het wateroppervlak naar de zuigmond. Als dit niet voldoende gebeurt, is de kans groot dat er massieve drijfslagen ontstaan. Om dit probleem op te lossen zijn er twee methoden bedacht. De eerste methode beoogt het in suspensie brengen of houden van het drijfvuil in het rioolwater door het verhogen van de kinetische energie van het rioolwater. Deze methode is onder andere onderzocht in *Nieuwenhuis, 2016*. De tweede methode gebruikt een vortex (draaikolk) voor een 'verticaal' transport van drijfvuil naar de zuigmond. Dit promotieonderzoek onderzoekt deze tweede methode. Een belangrijk onderdeel in het onderzoek is het betrouwbaar kunnen voorspellen van zowel het optreden van vortexen als de karakteristieken van deze vortexen. Deze kennis is essentieel voor het bepalen van de transporteffectiviteit van de vortex én om luchtaanzuiging te voorkomen. Daarnaast is onderzocht of 'Computational Fluid Dynamics' (CFD of vloeistofmechanica computerberekeningen) betrouwbaar vortexen voorspellen en dus bruikbaar zijn bij het ontwerp van (riool)gemalen.

Samenvattend worden in dit promotieonderzoek de volgende onderzoeksvragen beantwoord:

1. Wat zijn de karakteristieken van een vortex voor onder andere het voorspellen van luchtaanzuiging?
2. Wat is de transporteffectiviteit van een vortex voor het neerwaartse transport van drijfvuil?
3. Wat is de bruikbaarheid van CFD als ontwerptool voor het ontwerp van (riool)gemalen?

1.6 Structuur/leeswijzer

Voor het beantwoorden van de onderzoeksvragen is onder andere gebruik gemaakt van fysisch experimenteel onderzoek. De karakteristieken en transporteffectiviteit van een vortex zijn onderzocht met een experimentele opstelling in het Deltares laboratorium. Deze opstelling en gebruikte meettechnieken zijn beschreven in Hoofdstuk 2. De praktische toepasbaarheid van CFD is ook onderzocht met experimentele opstellingen en ook beschreven in Hoofdstuk 2.

De uitkomsten van de onderzoeksvragen zijn beschreven in Hoofdstuk 3. In dit hoofdstuk is ook een paragraaf opgenomen met uitkomsten van een onderzoek naar het effect van de kinetische energiedichtheid op drijfslagvorming.

De conclusies, aanbevelingen en advies voor praktische toepassing naar aanleiding van dit promotieonderzoek zijn tenslotte beschreven in Hoofdstuk 4.

2 Opzet experimenteel onderzoek

Literatuurstudies toonden aan dat er niet voldoende informatie is voor het beantwoorden van de onderzoeksvragen. Het uitvoeren van experimenteel onderzoek was daarom noodzakelijk. In dit onderzoek zijn de karakteristieken en transporteffectiviteit van de vortex onderzocht met een experimentele opstelling in het laboratorium van onderzoeksinstelling Deltares. In deze opstelling is een vortex gegeneerd en met diverse meettechnieken zijn vervolgens de vortexkarakteristieken bepaald. De transporteffectiviteit is onderzocht met het plaatsen van voorwerpen in de vortex en de beweging te registreren met camera's.

De bruikbaarheid van CFD als ontwerptool voor (riool)gemalen is onderzocht met twee experimentele veldopstellingen. De waarnemingen in deze opstellingen zijn gebruikt voor de validatie van de CFD-resultaten.

Dit hoofdstuk beschrijft de experimentele opstellingen, de toegepaste meettechnieken en de meetprogramma's.

2.1 Opzet experimenteel onderzoek naar vortexkarakteristieken en de transporteffectiviteit

De experimentele opstelling bestaat uit een plexiglas tank (de vortextank) met een diameter van circa 600 mm en een hoogte van circa 1.000 mm. De tank is geplaatst in een plexiglas rechthoekige bak van circa 700 x 700 mm. Deze bak is gevuld met water om de lichtrefractie te minimaliseren tijdens het filmen van de experimenten. Figuur 5 toont een schematisch overzicht en een foto van de opstelling.

De opstelling is een gesloten circuit waarbij een pomp water in de vortextank pompt. Het water stroomt door een gat in de onderzijde van de tank terug naar de pomp. Tussen de tank en pomp bevindt zich een scheidingsbak voor het opvangen van drijvende voorwerpen. Deze voorwerpen worden gebruikt voor het onderzoeken van de transporteffectiviteit zoals later in dit hoofdstuk beschreven. Het pompdebiet wordt geregeld met een afsluiter (flow control valve) in de leiding tussen de pomp en de tank. Met een tweede afsluiter (circulation controle valve) wordt het debiet over de twee instroompunten in de tank verdeeld. De afmetingen van de opstelling zijn qua ordegrrootte gelijk aan de afmetingen van echte pompputten. Dit betekent dat schaaffecten verwaarloosbaar zijn bij het vertalen van de onderzoeksresultaten naar echte gemalen.

Voor het meten van de vortexkarakteristieken zoals de stromingscirculatie Γ , het driedimensionale stroomveld en de diepte van de luchtkern zijn verschillende methoden gebruikt.

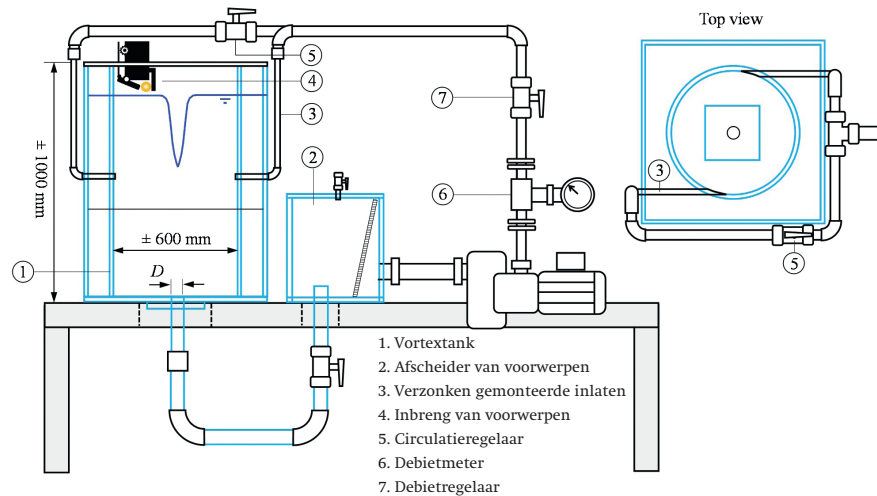
De stromingscirculatie Γ is een belangrijke eigenschap van een vortex en is gedefinieerd als de lijnintegraal van de tangentiële stroomsnelheid V_θ langs een gesloten curve C met radius r (zie voor details over de definitie van Γ het proefschrift 'On the free-surface vortex driven motion of buoyant particles'):

$$\Gamma = \oint_C \mathbf{V} ds = 2\pi r V_\theta = \pi^2 d^2 N t^{-1} \quad (2.1)$$

De circulatie is gemeten met een roterend vierarmig rad dat met vier eivormige plastic drijvers op het wateroppervlak drijft. De as van het rad is gemonteerd in het centrum van de tank. De variabele d in vergelijking (2.1) is de afstand tussen de drijvers en t is de gemeten tijd om N rotaties te maken. Het pompdebiet Q is gemeten met een magnetische flowmeter (Kobold type DMH). De diepte H_D van de luchtkern van de vortex is gemeten met een meetnaald.

Het driedimensionale stroomveld in de vortex is gemeten met Stereo Particle Image Velocimetry (SPIV). Deze meettechniek bestaat uit twee camera's (LaVision Imager MX 4M) die elk een horizontaal vlak in de vortextank filmen. De vlakken liggen vlak boven elkaar waarbij de ene camera de bovenkant van het bovenste vlak filmt en de andere camera de onderkant van het onderste vlak filmt. De vlakken worden belicht met een pulserende laser (Litron lasers Nano L 50-100). In het water worden zeer kleine polyamide balletjes toegevoegd (Vestosint). Deze balletjes hebben een diameter van $100 \mu\text{m}$ (0,1 mm) en een dichtheid van 1.060 kg/m^3 zodat ze nagenoeg blijven zweven in het water. De camera's maken vervolgens foto's met een frequentie van 1 Hz. Via speciale software wordt de verplaatsing van de balletjes als functie van de tijd geanalyseerd waaruit de tangentiële (V_θ) en radiale (V_r) stroomsnelheden worden afgeleid.

Figuur 5
 Boven: schematisch overzicht van de opstelling.
 Onder: foto van de experimentele opstelling.



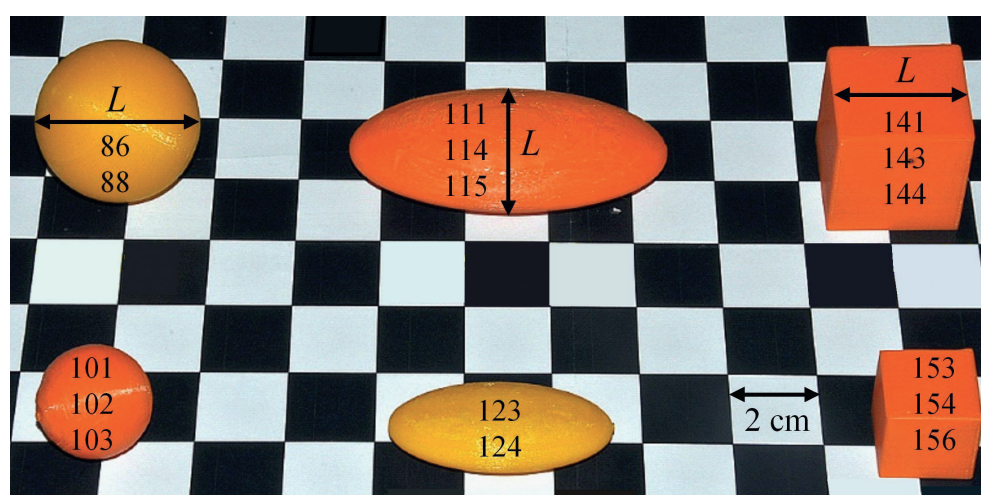
De verticale (axiale) stroomsnelheid V_z wordt bepaald met stereoscopie waarbij gebruikt wordt gemaakt van de foto's van de boven elkaar gelegen vlakken. Een gedetailleerde beschrijving van deze methode vindt u in *Duinmeijer, Oldenzel & Clemens (2019)*. De beweging van de experimentele voorwerpen is gemeten met 2D- en 3D-Particle-Tracking-Velocimetry (2D-PTV en 3D-PTV). Bij deze meettechniek wordt een bewegend voorwerp gefilmd waarna de beelden met speciale software worden bewerkt om de driedimensionale positie als functie van de tijd te bepalen. De 2D-PTV opstelling bestaat uit een enkele high speed camera (*IO Industries Flare 2M280CCX*) die is gemonteerd boven de vortextank. De 3D-PTV opstelling bestaat uit twee groepen van elk drie camera's die op circa 1,7 m van de vortextank zijn geplaatst. Elke groep filmt één zijde van de vortextank. Deze zijden grenzen aan elkaar. Voor de camera's zijn vier iPhones-6 en twee iPhones-5s gebruikt. De reden dat er twee groepen zijn gebruikt is dat de beweging van het voorwerp ook wordt gefilmd als het voorwerp zich achter de luchtkern bevindt. De camera's filmen in de slow motion modus met een snelheid van 120 fps voor de iPhones-5s en 240 fps voor de iPhones-6. Als een voorwerp zich aan het wateroppervlak bevindt of als langs de luchtkern beweegt, treden er reflecties op tussen de grenzen lucht-water en water-plexiglas. Deze reflecties leiden tot fouten in de positiebepaling van het voorwerp. De experimentele voorwerpen zijn daarom geverfd met

lichtgevende verf en de opstelling is geplaatst in een donkere kamer. De vortextank is vervolgens door LED-strips verlicht met uv-licht. Deze strips zijn gemonteerd aan de bovenzijde, de onderzijde en aan de zijkanten van de tank.

De 3D-PTV meettechniek bestaat uit twee stappen:

1. De bepaling van de tweedimensionale positie van het voorwerp in zowel het horizontale als verticale vlak inclusief de vereiste nauwkeurige synchronisatie van de camera's.
2. De conversie van de tweedimensionale posities naar de gewenste driedimensionale posities.

Bij het bepalen van de transporteffectiviteit van de vortex is gebruikt gemaakt van verschillende experimentele voorwerpen. Om de werkelijke waargenomen vormen van drijfvuil zoveel mogelijk te benaderen, is geëxperimenteerd met bolvormige, kubusvormige en ellipsvormige voorwerpen met een karakteristieke lengte L van 0,02 tot 0,04 m, zie Figuur 6. De voorwerpen hebben een relatieve dichtheid van 0,6 tot 1,0 wat overeenkomt met dichtheden van drijfvuil zoals waargenomen in de praktijk (Nieuwenhuis et al., 2016, Keener et al., 2008). De experimentele voorwerpen zijn gemaakt met 3D-printers. Het gebruikte materiaal is polylactic acid (biologisch afbreekbaar plastic) met een dichtheid van 1.240 kg/m^3 .



Figuur 6
3D-geprinte experimentele voorwerpen met karakteristieke lengte L . De voorwerpen zijn bol-, kubus- en ellipsvormig.

Het experimentele programma voor het bepalen van de karakteristieken van een vortex bestaat uit acht series met verschillende hydraulische condities: vier verschillende pompdebieten ($0,69 \text{ m}^3/\text{h}$, $1,16 \text{ m}^3/\text{h}$, $1,50 \text{ m}^3/\text{h}$ en $2,50 \text{ m}^3/\text{h}$) en twee verschillende uitstroomsnelheden ($0,27 \text{ m/s}$ en $0,45 \text{ m/s}$). De experimenten worden uitgevoerd met een vaste waterdiepte van $0,90 \text{ m}$.

Het experimentele programma voor het bepalen van de transporteffectiviteit is opgedeeld in twee programma's: het eerste programma meet de bewegingen van de experimentele voorwerpen in het wateroppervlak. Dit zijn dus de bewegingen in het horizontale vlak en gemeten met de 2D-PTV opstelling. Het tweede programma meet de bewegingen van het voorwerp in zowel het horizontale als verticale vlak. Hiervoor wordt de 3D-PTV opstelling gebruikt. Vanaf het moment dat de vortex stabiel was (de lengte van de luchtkern wijzigt niet meer) werd er per experiment voorzichtig een voorwerp in het wateroppervlak gelegd. Bij de 2D-PTV metingen gebeurde dit handmatig en bij de 3D-PTV experimenten gebeurde dit met een op afstand bedienbaar apparaat. De experimenten zijn meerdere keren herhaald om de reproduceerbaarheid van de experimenten te bepalen.

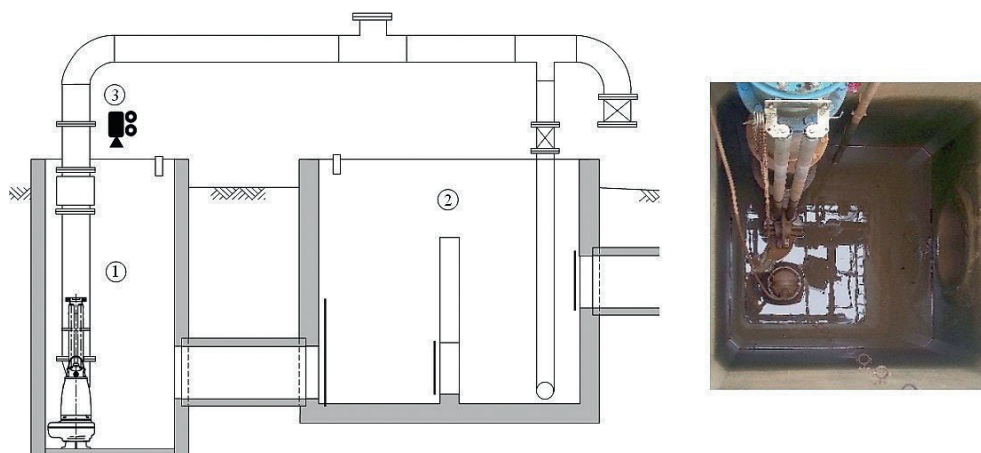
2.2 Opzet experimenteel onderzoek naar bruikbaarheid van CFD

Voor het onderzoek naar de bruikbaarheid van CFD als ontwerptool voor (riool)gemalen is gebruik gemaakt van twee testlocaties: de testopstelling Breda en een echt rioolgemaal in Rotterdam.

Testopstelling Breda

De testopstelling in Breda bestaat uit een ontvangtbassin, een overstortput en een circa 50 m lange Ø600 leiding met daarin een debietmeterput en een lozingsput. Het ontvangtbassin is een rechthoekige betonnen bak van 1,5 x 1,5 m en een hoogte van 3,3 m, zie Figuur 7. Het bassin is met een Ø600 mm aanvoerriool verbonden met de overstortput en een bovenstrooms reservoir. In het bassin zit een dompelpomp type Flygt 3153.181-142 met een capaciteit van 50 tot 400 m³/h. De pomp loost in de overstortput zodat het systeem een gesloten circuit is met een constante waterdiepte. Het pompdebiet wordt geregeld door een combinatie van een frequentie-omvormer en afsluiter. Het debiet wordt gemeten met een Krohne Aquaflex F DN300. De beweging van het wateroppervlak is gemeten met een camera (D-link DCS-2310 L) die is gemonteerd boven het bassin. De waterdiepte is ingesteld op 0,93 m zodat er een straalvormige instroming optreedt vanuit het aanvoerriool. Dit wordt beschouwd als een realistische situatie in veel rioolgemalen. De pompcapaciteit is ingesteld op 275 m³/h zodat er een vortex type 5 tot 6 (Figuur 4) ontstaat. Met de camera zijn snapshots gemaakt van het wateroppervlak en dus de locatie van de vortex. Deze informatie is gebruikt om de CFD-resultaten kwalitatief te valideren.

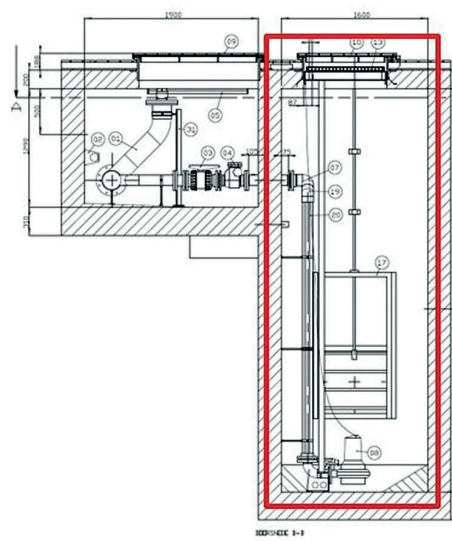
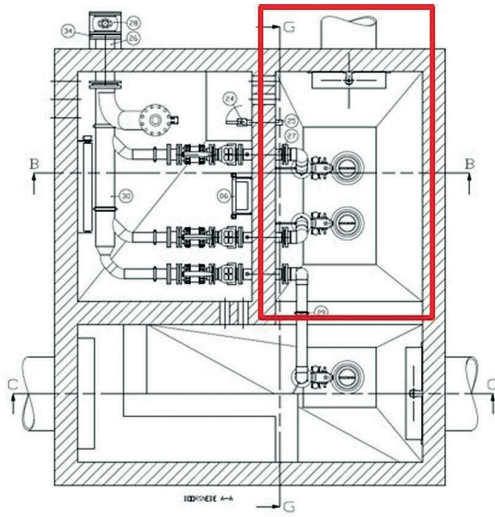
Figuur 7
 Links: schematisch aanzicht van de testopstelling Breda met (1) het ontvangtbassin en pomp (2) de overstortput en (3) de camera. Rechts: bovenaanzicht van het ontvangtbassin met rechts het ø600 mm aanvoerriool.



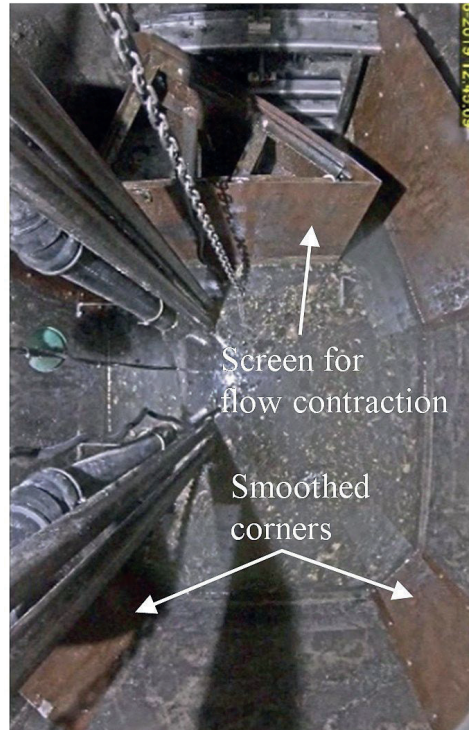
Rioolgemaal Nieuw Terbregge

Rioolgemaal G0156 Nieuw Terbregge bevindt zich in Rotterdam. Het ontvangtbassin heeft een oppervlakte van 1,60 x 2,50 m en een hoogte van 4,40 m, zie Figuur 8. Het gemaal heeft twee dompelpompen die elkaars reserve zijn met een vaste capaciteit van 35 m³/h. Een Axis M1125-E netwerkcamera is bevestigd aan de bovenzijde van het gemaal voor het filmen van het wateroppervlak, de locatie van de vortex en het dynamische gedrag van drijfvuil. De linker afbeelding in Figuur 9 toont een screenshot van het originele ontvangtbassin.

Om een vortex te genereren, moet het water voldoende circuleren en moet er een versnellen- de axiale stroming naar de zuigmond zijn. Met de originele geometrie van het ontvangtbassin ontstaat er onvoldoende circulatie voor het laten ontstaan van een vortex type 4 tot 6. Met een CFD-model van het ontvangtbassin zijn daarom aanpassingen bepaald die volgens het CFD-model leiden tot een sterke circulatie en het ontstaan van een vortex. Het CFD-model en de benodigde aanpassingen zijn beschreven in Hoofdstuk 3, paragraaf 3.4. De rechter afbeelding in Figuur 9 toont het aangepaste bassin.



Figuur 8
Bouwtekeningen van
rioolgemaal G0156 Nieuw
Terbregge. De rode lijnen
tonen het ontvangtbassin
zoals gemodelleerd in CFD.
Links: bovenaanzicht.
Rechts: zij aanzicht.



Figuur 9
Screenshots van de camera in
gemaal G0156 Nieuw
Terbregge.
Links: originele
ontvangtbassin.
Rechts: aangepast bassin.
Voor het aanvoerriool is een
scherm geplaatst om de
stroming naar de wand te
geleiden (screen for flow
contraction). De schuine
hoeken (smoothed corners)
zorgen voor een geleiding van
de stroming zodat er voldoende
circulatie ontstaat.

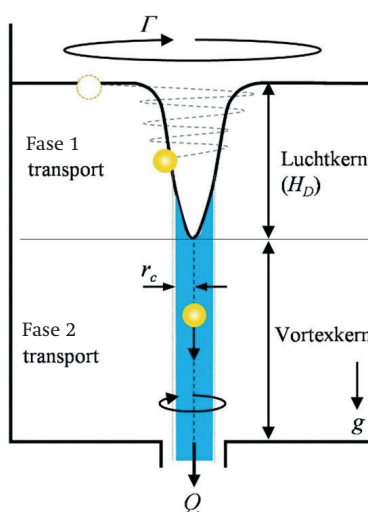
3 Uitkomsten onderzoek

Dit hoofdstuk beantwoordt de onderzoeksvragen uit paragraaf 1.5. Het hoofdstuk start met een beschrijving van de karakteristieken van de vortex die volgen uit de experimenten met de vortextank. Vervolgens worden de uitkomsten beschreven van het onderzoek naar de transporteffectiviteit van de vortex en de praktische toepassing daarvan. In dit hoofdstuk is ook een paragraaf opgenomen over het effect van de kinetische energiedichtheid op drijf-laagvorming. Het hoofdstuk wordt afgesloten met de uitkomsten van het onderzoek naar de bruikbaarheid van CFD als een ontwerptool voor (riool)gemalen.

3.1 Karakteristieken van de vortex

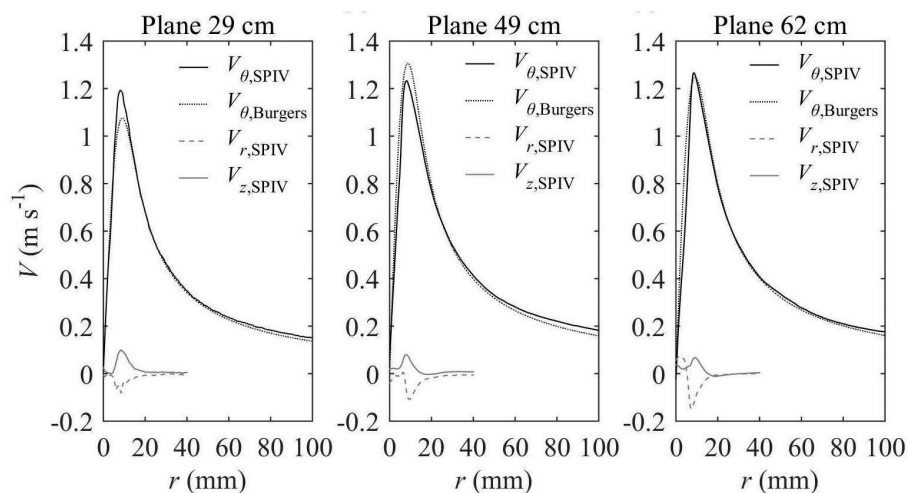
Kennis van de karakteristieken van een vortex is van belang bij het bepalen van de vortex-transporteffectiviteit maar ook bij het ontwerp van het ontvangtbassin. Vooral het driedimensionale stroomveld in de vortex, de lengte H_D van de luchtkern, de stromingscirculatie Γ en de vortexkernradius (kernradius r_c) zijn belangrijke karakteristieken. Figuur 10 toont een overzicht van deze karakteristieken.

Figuur 10
Karakteristieken van een vortex waaronder de luchtkern met lengte H_D , de vortexkern, de vortexkernradius r_c en de stromingscirculatie Γ .



Het driedimensionale stroomveld is geanalyseerd op basis van de Stereo PIV-metingen. Uit deze analyse volgt dat de horizontale omtreksnelheid V_θ (de tangentiële snelheid) nagenoeg onafhankelijk is van de diepte z in de vortex en dus $\partial V_\theta / \partial z \sim 0$, zie Figuur 11. De omtreksnelheid is wel afhankelijk van de radiale afstand met een maximum op $r = r_c$ met r gemeten vanaf het centrum van de vortexkern. De verticale stroomsnelheid V_z (de axiale snelheid) is geconcentreerd in een gebied rondom de vortexkern met een straal van $\sim 2r_c$. Op basis van de Navier-Stokes vergelijkingen (de driedimensionale bewegingsvergelijkingen van een stroomdeeltje) heeft Burgers (1948) een model opgesteld dat de omtreksnelheid V_θ van de vortex voorspelt, zie Duinmeijer et al., (2019). Het Burgers vortexmodel maakt gebruik van Γ en r_c . Het model is gevalideerd met de data uit de Stereo PIV-metingen. Uit de validatie volgt dat het Burgers vortexmodel een relatieve nauwkeurigheid heeft van circa 10%.

Figuur 11
De met stereo particle image velocimetry (SPIV) gemeten snelheidsprofielen van V_θ , V_z en V_r op drie dieptes in de vortextank. (a) Gemeten profielen op een hoogte van 0,29 m. (b) Gemeten profielen op een hoogte van 0,49 m. (c) Gemeten profielen op een hoogte van 0,63 m. De grafieken tonen ook de voorspelde omtreksnelheid met het Burgers vortexmodel ($V_{\theta,Burgers}$).



Een andere belangrijke karakteristiek van de vortex is het debiet dat door de vortex stroomt ofwel het radiaal instromende debiet over de waterdiepte. Dit debiet is berekend door de gemeten verticale stroomsnelheden in de vortexkern te integreren over het horizontale vlak. Hieruit blijkt dat de vortex maar een klein deel van het totale debiet naar de opening transporteert. Deze waarneming komt overeen met waarnemingen uit andere onderzoeken zoals van *Andersen et al. (2006)*. Op basis van de aanname dat het debiet in de vortex lineair toeneemt over de diepte, transporteert de vortex maar circa 10 tot 25% van het totale debiet Q . De rest van het debiet stroomt via de bodem van het ontvangtbassin de zuigmond in. Daarnaast is er geen relatie waargenomen tussen het debiet dat door de vortex wordt getransporteerd en de diameter van de zuigmond.

Bij het toepassen van een vortex voor het transport van drijfvuil moet worden voorkomen dat de luchtkern zich strekt tot in de zuigmond. In deze situatie zuigt de pomp lucht aan. In de praktijk is dit bijvoorbeeld waarneembaar bij het leeglopen van een bad. Het slurpende geluid aan het einde van het leeglopen is een indicatie dat er lucht wordt meegenomen ofwel: de luchtkern strekt zich uit tot in de afvoeropening. Bij pompen leidt luchtaanzuiging tot trillen van de pomp, capaciteitsverlies en lucht in de persleiding met mogelijk negatieve gevolgen zoals capaciteitsverlies. Het is dus van belang om de karakteristieken van een vortex, en dus de waarde H_D , met een bepaalde mate van betrouwbaarheid te voorspellen.

In afgelopen decennia is veel onderzoek gedaan naar de karakteristieken van een vortex. Veel onderzoek is gericht op het voorspellen van de benodigde onderdompeldiepte S (de afstand vanaf de zuigmondopening tot aan de waterspiegel) om te zorgen dat de luchtkern zich niet tot aan de zuigmond strekt (*Anwar & Amphlett, 1980, Odgaard 1986, Gulliver & Rindels, 1986*). De uitkomsten van dit soort onderzoeken zijn vaak vertaald in een set dimensieloze parameters op basis van de aanwezige variabelen zoals het pompdebiet Q , de zuigmond diameter D en de waterdiepte H . De parameters zijn vervolgens gevalideerd met meetdata van specifieke experimentele opstellingen. De richtlijnen in de ANSI/HI (2012) adviseren de volgende vergelijking voor de onderdompeldiepte S :

$$S = D_b \left(1 + 2,9 \frac{Q}{D_b^{2,5} \sqrt{g}} \right) = D_b \left(1 + 2,3 \frac{U_o}{\sqrt{g D_b}} \right) \quad (3.1)$$

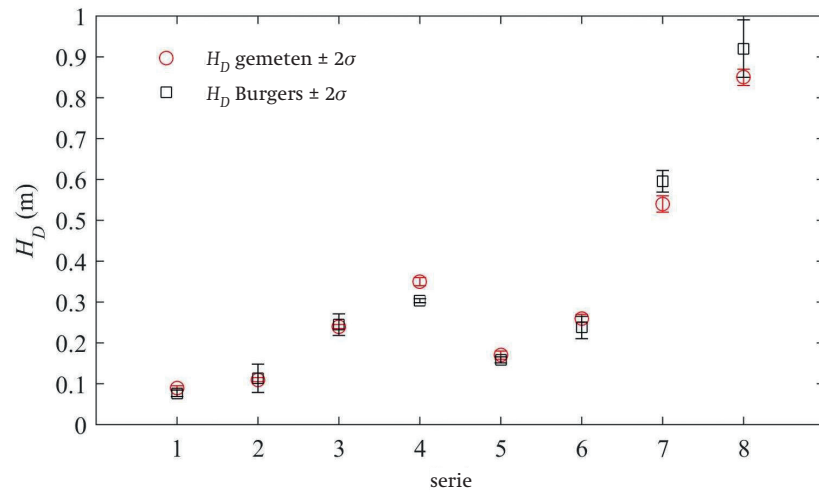
Met D_b de buitendiameter van de zuigmond en U_o de gemiddelde stroomsnelheid in de zuigmond. Deze vergelijking maakt echter geen gebruik van maatgevende hydraulische variabelen zoals de bulkcirculatie Γ_∞ van de stroming (circulatie op orde grootte $10r_c$ vanaf de kern). Er kunnen dus vraagtekens worden geplaatst bij de praktische toepasbaarheid van de vergelijking. In de praktijk blijkt dat vergelijking (3.1) enigszins conservatief is omdat bij meerdere gemalen in Rotterdam de onderdompeldiepte om diverse redenen met soms wel 50% is gereduceerd zonder het (zichtbaar) optreden van vortexen. Het is dus duidelijk dat de uitkomst van vergelijking (3.1) met enige terughoudendheid moet worden toegepast. Met name bij het ontwerp van nieuwe (riool)gemalen kan dit leiden tot overdreven diepe en dus duurdere ontwerpen. Daarnaast geeft een te conservatieve onderdompeldiepte ook lagere stroomsnelheden wat weer gunstig is voor drijfslagvorming. Op basis van het Burgers vortexmodel geldt de volgende vergelijking voor de lengte H_D van de luchtkern:

$$H_D = \frac{\ln 2}{4\pi^2 g} \left(\frac{\Gamma_\infty}{r_c} \right)^2 \quad (3.2)$$

Vergelijking (3.2) is gevalideerd door de berekende waarden te vergelijken met de gemeten lengte van de luchtkernen, zie Figuur 12. De gemeten en berekende waarden komen redelijk goed overeen. De onzekerheid van vergelijking (3.2) is circa 20%. Voor de doeleinden van dit onderzoek is deze onzekerheid acceptabel.

In de toegepaste modellen voor het voorspellen van H_D is geen rekening gehouden met de oppervlaktespanning σ van het (schone) water ($\sigma = 0,0172$ N/m bij 25 °C). Uit diverse onderzoeken blijkt dat de oppervlaktespanning wel invloed heeft op de lengte. Anwar (1978) bijvoorbeeld geeft aan dat de oppervlaktespanning effect heeft bij een Weber getal $We = \rho U_o H / \sigma > 10^4$. De relatieve bijdrage is echter onbekend. *Odgaard (1986)* geeft aan dat de oppervlaktespanning leidt tot een drukafname in de punt van de luchtkern van ongeveer $-2\sigma/r_c$. Op basis hiervan met $r_c > 10^{-2}$ lijkt de bijdrage van de oppervlaktespanning in de voorspelling van H_D verwaarloosbaar in het ontwerp van gemalen.

Figuur 12
 Vergelijking tussen de gemeten lengte van de luchtkern (H_D) en de lengte berekend met het Burgers vortexmodel inclusief een 95% betrouwbaarheidsinterval.

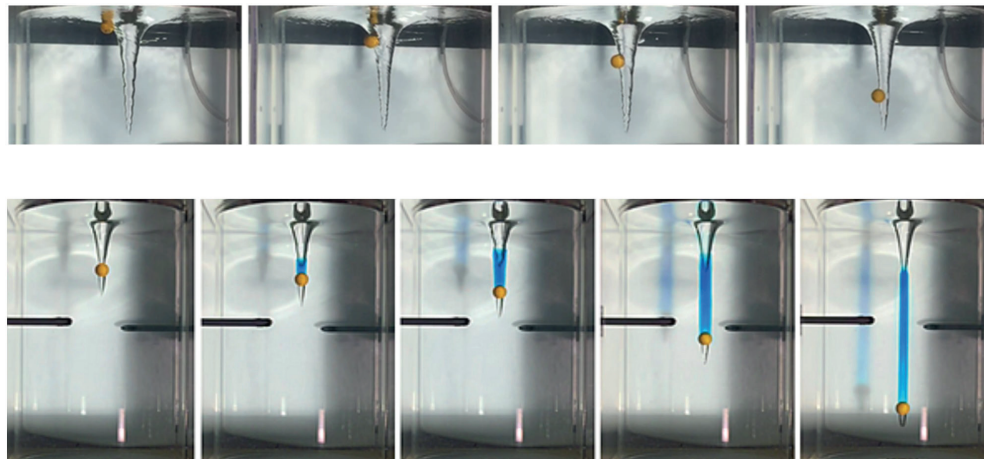


3.2 Transport van drijfvuil met de vortex

Met behulp van de 2D- en 3D-PTV meettechnieken zijn de bewegingen van de bolvormige, kubusvormige en ellipsvormige voorwerpen in de vortexstroming gemeten. Deze voorwerpen representeren bij benadering de vormen van het in de praktijk waargenomen drijfvuil. Uit de circa 700 metingen blijkt dat het transport van drijfvuil kan worden onderverdeeld in twee karakteristieke fases: het fase 1 transport betreft de spiraalvormige beweging van een voorwerp langs de luchtkern van de vortex totdat het voorwerp het einde van de luchtkern bereikt en zich ‘nestelt’ in het centrum van de vortexkern. Tijdens dit neerwaartse transport kan het voorwerp uit de luchtkern worden ‘geslingerd’. Het fase 2 transport betreft de verticale beweging van het voorwerp door de vortexkern waarbij het voorwerp zich in het centrum van de kern bevindt.

In Figuur 10 zijn de transportfases illustratief weergegeven. Figuur 13 toont de waargenomen transportfases tijdens het experimenteren met een bolvormig voorwerp.

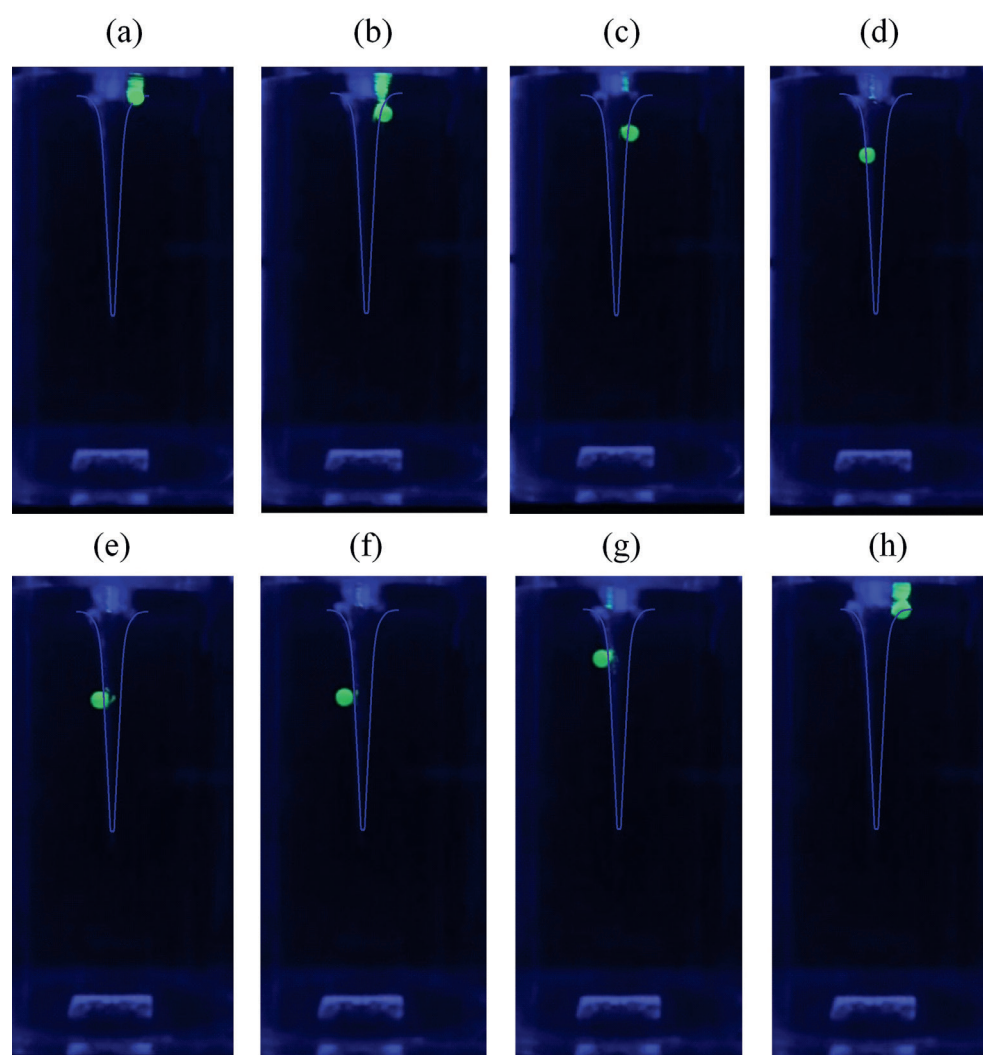
Figuur 13
 De waargenomen transportfases in het vortextransport van een $\varnothing 38$ mm bolvormig voorwerp. (a) Het transport in fase 1 (spiraalvormige beweging om de luchtkern). (b) Het transport in fase 2 (verticale beweging van het voorwerp door de vortexkern)



Of voorwerpen bij het fase 1 transport uit de vortex worden geslingerd, is grotendeels afhankelijk van de vorm van het voorwerp. Uit de experimenten blijkt dat bolvormige voorwerpen ook om hun eigen as gaan draaien. Tijdens deze rotatie ontstaat er een naar buiten toe gerichte liftkracht die het voorwerp van de luchtkern afduwt. Hierdoor keert het voorwerp weer (deels) terug naar het wateroppervlak waarna het proces zich herhaalt, zie ook Figuur 14. De liftkracht die dit veroorzaakt is hetzelfde als de kracht die bij tennis de top-of back spin veroorzaakt of de effectbal bij voetbal. Dit verschijnsel staat ook wel bekend als het ‘Magnus effect’. Dit effect is veel minder aanwezig bij de kubus- en ellipsvormige voorwerpen. Verder lijkt de beweging van een voorwerp te worden bepaald door de initiële snelheid en rotatie van het voorwerp voordat het voorwerp in de vortexstroming wordt geplaatst. Of anders gezegd: tijdens de experimenten vertoonde het systeem een chaotisch gedrag. Dit is overigens bekend gedrag bij niet lineaire systemen waaronder vortextransport valt. Bijvoorbeeld de beweging van een voorwerp in twee experimenten met identieke hydraulische condities maar met kleine verschillen in initiële condities: in het eerste experiment beweegt het voorwerp zich naar het centrum toe en in het tweede experiment van het centrum af. Om dit gedrag te kwantificeren is een model ontwikkeld dat

de tweedimensionale beweging van een voorwerp in de vortexstroming voorspelt. De conclusie is dat de beweging van een voorwerp in een vortex een korte voorspellingshorizon heeft. Met de kanttekening dat dit gelimiteerde voorspelbare gedrag voornamelijk geldt voor bolvormige voorwerpen. Kubusvormige en ellipsvormige voorwerpen vertonen een minder chaotisch gedrag en worden vaker door de vortex getransporteerd. Op basis van de onderzoeksresultaten is er een transportparameter ontwikkeld die indicatief aantoont of een voorwerp succesvol langs de luchtkern omlaag wordt getransporteerd zonder dat deze uit de kern wordt 'geslingerd'. Voor meer informatie over deze parameter wordt verwezen naar het proefschrift.

Het onderzoek naar het fase 2 transport (de neerwaartse beweging door de vortexkern) toont aan dat deze beweging ontstaat door een onbalans tussen de opwaartse kracht en de neerwaartse sleepkracht op het voorwerp door de verticale stroming in de vortexkern (de sleepkracht of drag force F_D). In eerste instantie is geprobeerd om het waargenomen transport te verklaren aan de hand van het berekenen van de sleepkracht met de algemeen toegepaste sleepkrachtvergelijking: $F_D = \frac{1}{2} C_D \rho A U_z$. Hierbij bevindt het voorwerp met oppervlak A zich in een uniform stroomveld (overal gelijke stroomsnelheid) en wordt de vorm van het voorwerp en de stroomkarakteristiek (Reynoldsgetal) verdisconteerd in een sleepkrachtcoëfficiënt C_D . Om deze formule toe te passen is de verticale stroomsnelheid U_z in de vortexkern beschouwd als uniform door te rekenen met de gemiddelde snelheid over het aangestroomde oppervlak A . Een zeer belangrijke conclusie van dit onderzoek is dat deze vergelijking niet geldig is om het waargenomen gedrag te verklaren: de berekende sleepkracht moet tientallen malen groter zijn.



Figuur 14
3D-PTV opnames van het fase 1 transport van een bolvormig experimenteel voorwerp (Ø38 mm). In dit voorbeeld start het voorwerp met een neerwaartse spiraalvormige beweging om de luchtkern heen (figuren a t/m d). Op een bepaalde diepte verandert de beweging in een opwaartse beweging die eindigt aan het wateroppervlak (figuren e t/m h).

Uit nader onderzoek volgt dat de neerwaartse sleepkracht wordt bepaald door de aanwezigheid van een zogenaamde Taylor-kolom onder het voorwerp. Proudman (1916) en Taylor (1917) ontdekten dat een stijgend bolvormig object in een roterende vloeistof wordt vergezeld door een stijgende kolom van vloeistof die het voorwerp omringt. Deze kolom is verantwoordelijk voor de sleepkracht F_D op het voorwerp. Op basis van deze Taylor-kolom en

gevalideerd met waarnemingen is in dit promotieonderzoek een transportconditie ontwikkeld die indicatief aantoont of een voorwerp door de vortexkern heen omlaag wordt getransporteerd of dat het voorwerp 'stil' blijft hangen in de vortexkern. Zie voor meer informatie over deze conditie het volledige proefschrift.

Samenvattend wordt geconcludeerd dat de vortex een effectief middel kan zijn voor het neerwaarts transport van drijfvuil. De effectiviteit is echter sterk afhankelijk van de vorm van het vuil, hoe het vuil wordt aangevoerd naar de vortex (de initiële condities) en de karakteristieken van de vortex. Uit het onderzoek volgt bijvoorbeeld dat bolvormige voorwerpen een grote kans hebben om tijdens het neerwaarts transport als gevolg van een liftkracht uit de vortex te worden 'geslingerd'. Kubusvormige of ellipsvormige voorwerpen zijn hier veel minder gevoelig voor.

Voor het neerwaartse transport door de vortexkern is succesvol transport naast de dichtheid van het voorwerp ook sterk afhankelijk van de verhouding tussen de lengte van het voorwerp en de kernradius r_c van de vortex. De vorm van het voorwerp is in deze transportfase in veel mindere mate bepalend voor een succesvol transport.

3.3 Kinetische energiedichtheid als maatregel tegen drijfvaagvorming

Zoals aangegeven in de Inleiding is er een indicatie dat hogere (in)stroomsnelheden en een kleiner bassin de vorming van drijfvlagen tegenwerkt. Deze variabelen worden uitgedrukt in de kinetische energiedichtheid (KED) van het ontvangsbassin. In 2016 is aan de TU Delft een afstudeeronderzoek uitgevoerd naar onder andere de relatie tussen de aanwezigheid van drijfvuil in rioolgemalen en de KED van deze gemalen (Nieuwenhuis, 2016). Deze paragraaf gaat in op het begrip KED en het verwachte effect hiervan op drijfvuil. Het effect van de KED is gebaseerd op de verwachting dat instromend drijfvuil met een hogere kinetische energie meer in suspensie wordt gebracht en dan ook langer in suspensie blijft. Drijfvuil dat reeds drijft kan immers lastig in suspensie worden gebracht (hoe krijg je een ping-pongbal vanuit drijvende toestand onder water zonder gebruik te maken van mechanische hulpmiddelen?). Drijfvuil in suspensie wordt meegenomen met de versnellende stroming naar de zuigmond van de pomp. De dichtheid in de KED heeft te maken met impulsoverdracht: het effect van vallend water op de turbulentiegraad van het bassinwater is groter naarmate het bassin kleiner is.

In het onderzoek van Nieuwenhuis (2016) is van een groot aantal rioolgemalen in vijf Nederlandse gemeenten de relatie onderzocht tussen de aanwezigheid van drijfvuil en de KED van het gemaal. De KED is berekend met de kinetische energie van het instromende afvalwater vanuit het aanvoerriool: $E_k = \frac{1}{2} m V^2$ met m de massa van het instromende water en V de gemiddelde stroomsnelheid in de uitstroomopening van het riool. De kinetische energie is eventueel verhoogd met de potentiële energie als het bassinpeil lager is dan het niveau van de onderkant van het aanvoerriool (vallend water). Het watervolume in het ontvangsbassin is het gemiddelde volume water tussen het DWA in- en uitschakelpeil. Gedetailleerde informatie vindt u in het afstudeeronderzoek van Nieuwenhuis (2016). Het onderzoek geeft een duidelijke indicatie dat gemalen met een hogere KED minder problemen ondervinden met de aanwezigheid van drijfvuil en drijfvlagen.

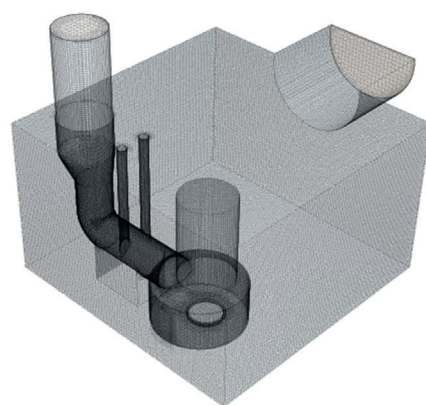
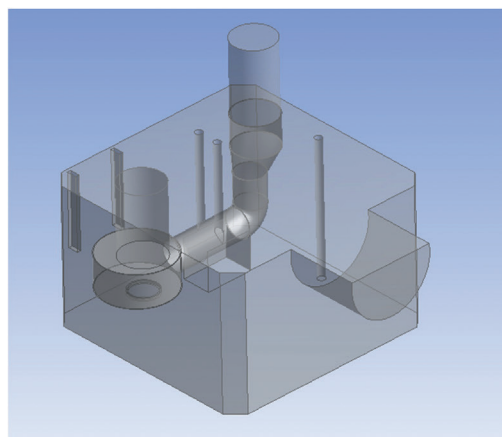
3.4 CFD als ontwerptool voor (riool)gemalen

In deze paragraaf worden de uitkomsten beschreven van het onderzoek naar de bruikbaarheid van CFD als ontwerptool voor (riool)gemalen. Voor dit onderzoek zijn de waarnemingen in twee testopstellingen gebruikt voor de validatie van de CFD -resultaten.

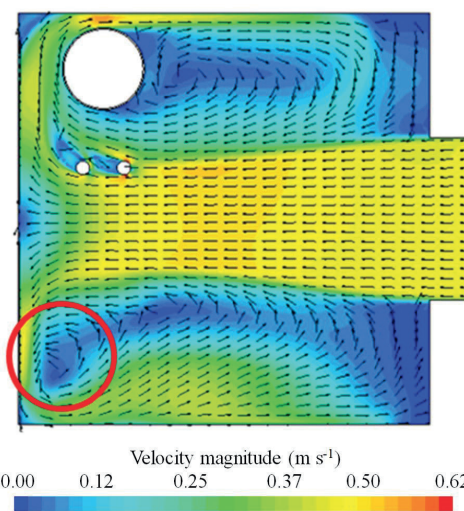
Testopstelling Breda

Het CFD-model van het ontvangsbassin is opgebouwd uit een zesvlak grid met 1,2 miljoen cellen, zie Figuur 15. Het CFD-model is een één-fase benadering waarbij wordt gerekend met een vast wateroppervlak ($\partial h / \partial z = 0$). De berekening is uitgevoerd met een Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) turbulentiemodel. Zowel een $k-\epsilon$ als een $k-\Omega$ model zijn gebruikt met dezelfde resultaten. De opgelegde randvoorwaarden zijn een constante druk in het aanvoerriool en een constant debiet van $275 \text{ m}^3/\text{h}$ in de persleiding. De vaste waterdiepte h is 0,93 m. De bovenste grens van het model is een vast wateroppervlak waarbij een non-zero slipconditie geldt (tangentiële vloeistofsnelheid $> 0 \text{ m/s}$). Figuur 16 toont de vergelijking tussen de experimentele resultaten en de resultaten van het CFD-model.

In het bassin was een duidelijke vortex aanwezig die gedurende langere tijd aanwezig was. De vortex maakte geregeld een slurpend geluid wat indicatief is voor de aanzuiging van lucht. De vortex is daarom geclassificeerd als een type 5 of 6, zie ook Figuur 4. De CFD-resultaten tonen een duidelijke circulatie van de stroming waarbij het centrum van de circulatie wordt beschouwd als een locatie van een vortexkern. De locatie van de vortex is ook duidelijk waarneembaar in de berekende 3D-stroomlijnen, zie Figuur 17. Op basis van bovenstaande (kwalitatieve) vergelijking wordt voor deze testlocatie geconcludeerd dat het één-fase CFD-model in staat is om het optreden van een vortex te voorspellen. Het één-fase model is echter niet in staat om de juiste locatie en sterkte (lengte van de luchtkern) te voorspellen. Het is daarnaast duidelijk dat het één-fase CFD-model niet geschikt is voor het voorspellen van het 'chaotische' wateroppervlak zoals waargenomen in het fysieke experiment. Dit is uiteraard het gevolg van de één-fase benadering die geen rekening houdt met de interactie tussen de verschillende fases (water-lucht).



Figuur 15
Links: CFD-model van het ontvangtbassin in de testopstelling Breda. Rechts: het modelgrid van het bassin met daarin het aanvoerriool, de pomp en een deel van de persleiding.

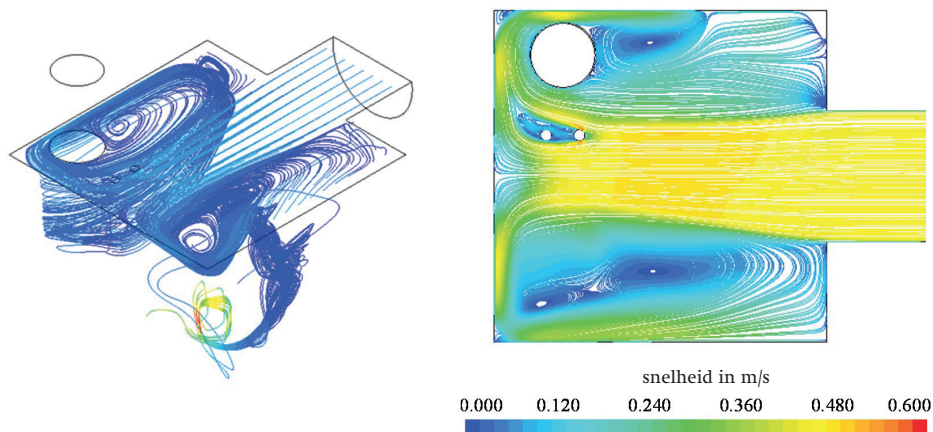


Figuur 16
Links: Optreden van een vortex in het bassin van de testopstelling Breda bij een capaciteit van 275 m³/h en een waterdiepte van 0,93 m. De vortex is geclassificeerd als een type 5 of 6. Rechts: de met CFD berekende stroomsnelheden (richting en grootte) aan het wateroppervlak. De rode cirkel toont het centrum van de stromingscirculatie en wordt beschouwd als de locatie van een vortex.

Testopstelling rioolgemaal G0156 Nieuw Terbregge

Het CFD-model van het ontvangtbassin is opgebouwd uit een meervlakkig grid met circa 350.000 cellen. Deze testcase maakt ook gebruik van een één-fase benadering met een vast wateroppervlak ($\partial h/\partial z = 0$). De berekening is uitgevoerd met een Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) turbulentiemodel met een $k-\epsilon$ model. Het model gebruikt net zoals in werkelijkheid één pomp. De vaste waterdiepte is 1,2 m. De opgelegde randvoorwaarden zijn een constant pompdebiet van 33 m³/h en een volledig ontwikkeld snelheidsprofiel in het aanvoerriool. De bovenste grens van het model is een vast wateroppervlak waarbij een non-zero slipconditie geldt (tangentiële vloeistofsnelheid > 0 m/s).

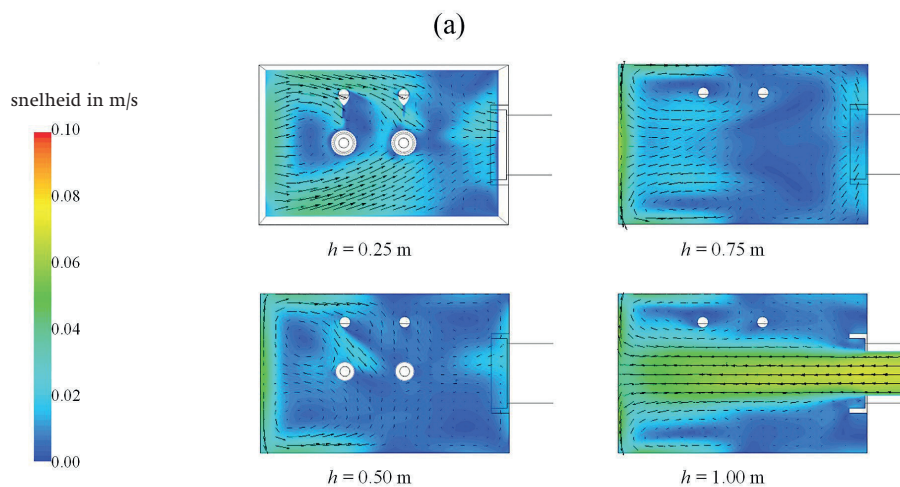
Figuur 17
 Links: de met CFD berekende driedimensionale stroomlijnen in het bassin. De stroomlijnen starten vanaf het wateroppervlak.
 Rechts: de berekende horizontale stroomsnelheid aan het wateroppervlak. De donkerblauwe zones representeren het centrum van de stromingscirculatie en worden beschouwd als de locatie van een vortex.

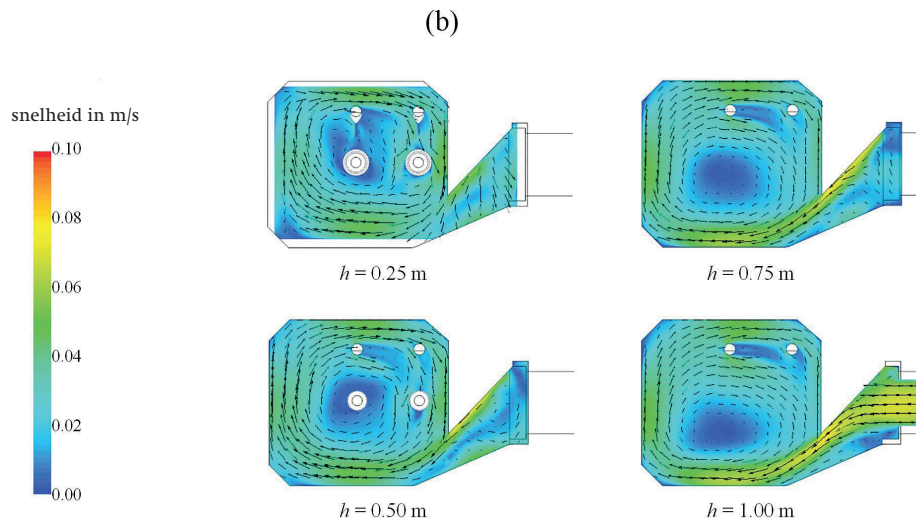


Het CFD-model is aanvankelijk opgesteld om de benodigde aanpassingen aan het originele ontvangtbassin te bepalen voor het genereren van een vortex type 4 tot 6 (zie Hoofdstuk 3). De bedoeling was om met deze vortex veldonderzoek te doen naar de vortex transporteffectiviteit in een echt rioolgemaal. Voor het originele ontvangtbassin toont Figuur 18(a) de stromingen zoals berekend met het CFD-model. Het is duidelijk dat er geen sterke stromingscirculatie optreedt wat als essentieel wordt beschouwd voor het ontstaan van een vortex. Proberenderwijs zijn vervolgens de aanpassingen bepaald die volgens het CFD-model leiden tot een sterke stromingscirculatie en dus een vortex, zie Figuur 18(b). Vergeleken met de resultaten van het originele bassin is de stromingscirculatie in het aangepaste bassin veel sterker aanwezig. Het centrum van de circulatie op $h = 0.75$ en $h = 1$ m is gedefinieerd als een vortexkern om het optreden van een vortex duidelijk te visualiseren. De naar verwachting sterkste vortex is gevisualiseerd in Figuur 19.

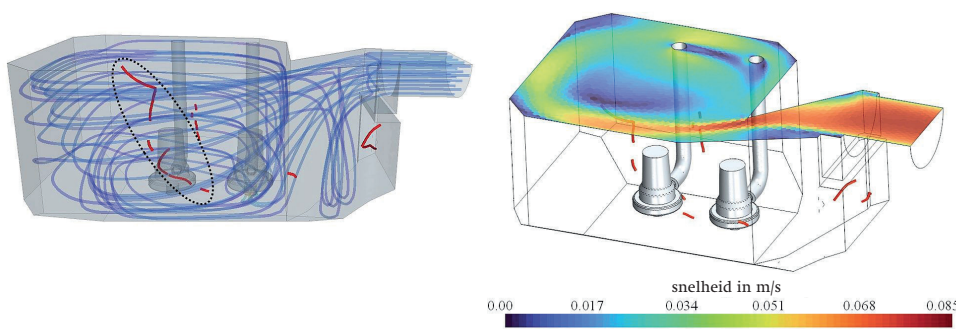
Het ontvangtbassin van het gemaal is vervolgens aangepast volgens de resultaten uit het CFD-model, zie Figuur 9. Er zijn vervolgens meerdere experimenten uitgevoerd voor het genereren van een vortex. Hierbij is water ‘gespaard’ in het aanvoerende riool om gedurende langere tijd stationaire condities in het bassin te houden. Echter, het lukte niet om een (zichtbare) vortex te genereren. Om dit te verklaren is het snelheidsveld in het bassin gemeten en vergeleken met de CFD-resultaten, zie Figuur 20. Omdat de velden goed met elkaar overeenkomen, wordt deze parameter niet beschouwd als reden voor het niet ontstaan van een vortex. Door tijdsgebrek was verder onderzoek naar de oorzaak niet mogelijk maar uiteraard wel gewenst.

Figuur 18
 CFD-resultaten van de horizontale stroming (grootte en richting) op vier verschillende dieptes h in het ontvangtbassin. (a) Resultaten in het originele bassin.

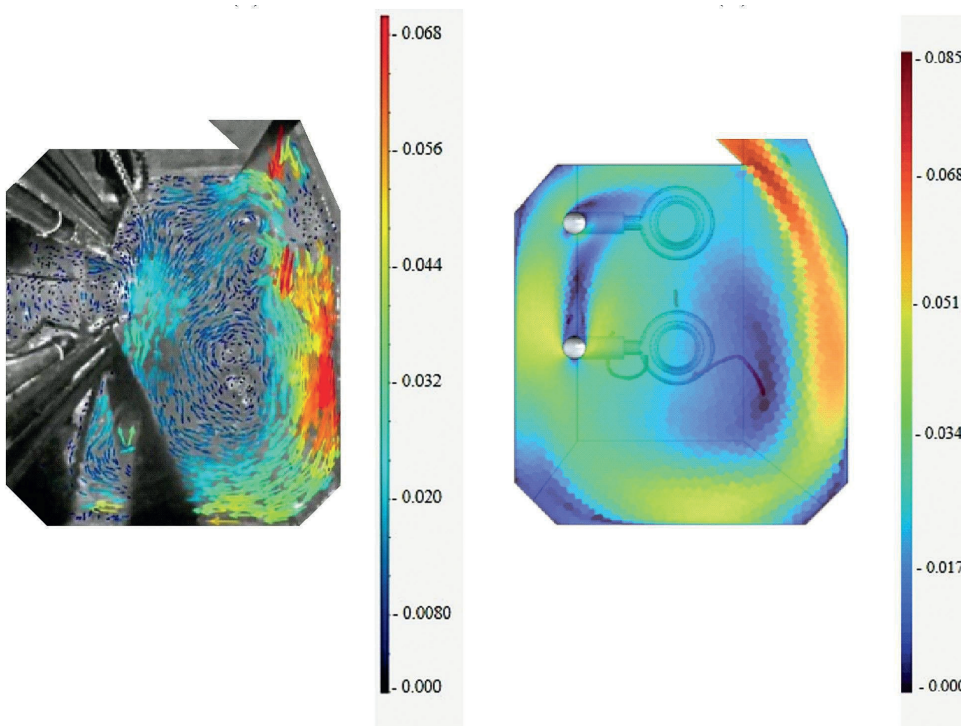




Figuur 18
CFD-resultaten van de horizontale stroming (grootte en richting) op vier verschillende dieptes h in het ontvangstbassin. (b) Resultaten in het aangepaste bassin.



Figuur 19
Links: de met CFD berekende 3D-stroomlijnen in het aangepaste bassin en het optreden van de sterkste vortekern (rode lijn) en gemarkeerd met een zwart gestippelde ellips. De kern start vanaf het wateroppervlak en eindigt in de zuigmond.
Rechts: de CFD-resultaten van de horizontale stroomsnelheid aan het wateroppervlak.



Figuur 20
Gemeten en met CFD berekende stroomsnelheden aan het wateroppervlak. Links: de gemeten snelheid m.b.v. 2D-PTV. Rechts: de CFD berekende stroomsnelheid. De stroomsnelheden zijn ordegrootte gelijk in grootte en richting.

4 Conclusies, aanbevelingen en praktijktoepassingen

4.1 Conclusies & aanbevelingen

De effectiviteit van een vortex voor transport van drijfvuil

De vortex kan een effectief middel zijn voor het neerwaartse transport van drijfvuil. De effectiviteit is echter sterk afhankelijk van de vorm van het vuil, hoe het vuil wordt aangevoerd naar de vortex (de initiële condities) en de karakteristieken van de vortex. Bolvormige voorwerpen kunnen tijdens het neerwaartse transport langs de luchtkern als gevolg van liftkrachten uit de vortex worden 'geslingerd'. Kubus of ellipsvormige voorwerpen zijn hier minder gevoelig voor. Bij het neerwaartse transport door de vortexkern is succesvol transport, naast de dichtheid van het voorwerp, sterk afhankelijk van de verhouding tussen de lengte van het voorwerp en de kernradius r_c van de vortexkern. De vorm van het voorwerp is bij transport door de vortexkern veel minder mate bepalend voor succesvol transport. Kortom: bij toepassing van de vortex voor het neerwaarts transport van drijfvuil is analyse vooraf essentieel om de effectiviteit in te schatten. De resultaten van het promotieonderzoek zijn hierbij van grote waarde.

Bepalen benodigde onderdompeldiepte ter voorkoming van luchtaanzuiging

Het Burgers vortexmodel voor het bepalen van de lengte H_D van luchtkern ofwel de minimaal benodigde onderdompeldiepte S , lijkt voldoende nauwkeurigheid te bieden voor gebruik in de praktijk. In dit promotieonderzoek waren de maximale afwijkingen tussen de voorspelde lengte en de gemeten lengte circa 20%. De berekende lengte is veel nauwkeuriger dan het gebruik van de methode voor de benodigde onderdompeldiepte uit bijvoorbeeld de ANSI/HI (2012) of het Capwat handboek. Nadeel bij het gebruik van het Burgers vortexmodel is de vaak onbekende waarde van de stromingscirculatie Γ_∞ en de kernradius r_c . De eerste waarde kan relatief eenvoudig worden benaderd met een één-fase CFD-model van het ontvangstbassin, zie ook paragraaf 4.2. De grootte van r_c is vooraf veel lastiger te bepalen. Hiervoor is meer experimenteel onderzoek noodzakelijk.

Het gebruik van computational fluid dynamics (CFD) als ontwerptool voor (riool)gemalen

Het gebruik van CFD als ontwerptool kan nuttig zijn bij het bassinontwerp van een (riool) gemaal. Vooral het voorspellen van het optreden van vortexen type 4 tot 6 is waardevol voor het bepalen van de diepte van het gemaal (niveau zuigmond) zodat luchtaanzuiging wordt voorkomen. Een één-fase CFD-model is een relatief snelle en goedkope manier om inzicht te krijgen in de hydraulische condities. Het is uiteraard wel belangrijk om te weten hoe betrouwbaar deze CFD-resultaten zijn. De betrouwbaarheid is bepaald door een kwalitatieve vergelijking van de CFD-resultaten met fysieke experimentele resultaten. Dit geldt voor rechthoekige bassins met een straalvormige instroming. Uit de vergelijking volgt dat een één-fase CFD-model een eerste indicatie geeft voor het optreden van een vortex. Voor een nauwkeurige voorspelling van de locatie en sterkte van de vortex is deze methode ongeschikt. Daarnaast is een één-fase model ongeschikt om te bepalen of er luchtaanzuiging optreedt omdat er wordt gerekend met een vaste waterstand en dus geen simulaties van depressies in het wateroppervlak. Een twee-fase model is hiervoor beter geschikt maar kost veel meer rekentijd. Echter, de betrouwbaarheid van een twee-fase model is naar verwachting ook nog steeds een punt van aandacht.

4.2 Praktijktoeepassingen

Geadviseerde methoden voor drijfvuiltransport

In andere landen zoals de Verenigde Staten wordt de vortex type 4 tot 6 reeds toegepast voor het verticaal transport van drijfvuil zoals bij het bijna leegpompen van cirkelvormige ontvangtbassins, zie paragraaf 1.3. De grotere bassins in Nederland zijn vaak rechthoekig uitgevoerd waardoor het zeer lastig is om een dergelijke sterke vortex te genereren. Dan zijn aanpassingen aan het bassin nodig, zoals de installatie van een cirkelvormig compartiment met omgekeerde zuigmond. De effectiviteit van een dergelijk compartiment moet echter eerst met fysisch experimenteel onderzoek worden onderzocht.

Bij problemen met drijfslagvorming in bestaande gemalen wordt geadviseerd om eerst te experimenteren met de procesparameters. Vooral het verlagen van de in- en uitslagpeilen is een relatief makkelijke aanpassing. Hierdoor wordt de kinetische energiedichtheid (KED) van het ontvangtbassin verhoogd dat drijfslagvorming tegenwerkt. In combinatie met verlagen van de peilen kan ook het bassin worden verkleind waardoor de KED nog meer toeneemt. Bij verlaging van het inschakelpeil moet men wel rekening houden met een verhoogde kans op inslag van luchtbellen door ‘vallend’ water vanuit het aanvoerriool. Afhankelijk van de afstand tussen luchtinslag en de zuigmond kunnen deze bellen opgezogen worden door de zuigmond.

Bovengenoemde maatregelen staan enigszins haaks op de richtlijnen van de ANSI/HI (2012). De ANSI/HI-richtlijnen gelden echter voor een grote verscheidenheid aan pompen. Afvalwaterpompen zijn meestal robuust uitgevoerd (bijvoorbeeld de verhouding tussen waaier- en asdiameter is relatief klein) waardoor deze minder gevoelig zijn voor ongunstige aanstroomcondities.

Eén-fase CFD-model als ontwerptool

Zoals in de conclusie (§4.1) aangegeven is het relatief goedkope en simpele één-fase CFD-model niet geschikt om te bepalen of er luchtaanzuiging optreedt. Een alternatief is om met dit model de stromingscirculatie Γ te berekenen. Op basis van een reële schatting van de kernradius r_c kan dan met het Burgers vortexmodel (vergelijking 3.2) een schatting van de lengte van de luchtkern worden gemaakt. Echter, als dit leidt tot een kritische situatie met betrekking tot luchtaanzuiging, dan heeft het gebruik van een fysisch schaalmodel de absolute voorkeur.

Literatuur

- Andersen, A., Bohr, T., Stenum, B., Juul Rasmussen, J. & Lautrup, B. (2006). *The bathtub vortex in a rotating container*. *Journal of Fluid Mechanics*, 556, 121-146.
- Anwar, H.O., Weller, J.A. & Amphlett, M.B. (1978). *Similarity Of Free-Vortex At Horizontal Intake*. *Journal of Hydraulic Research*, 16(2), 95-105.
- Anwar, H.O. & Amphlett, M.B. (1980). *Vortices at vertically inverted Intake*. *Journal of Hydraulic Research*, 18(2), 123-134.
- American National Hydraulic Standards Institute (2012). *American National Standard for rotodynamic pumps for pump intake design*. ANSI 9.8-2012. ISBN 978-880952-70-2.
- Burgers, J.M. (1948). *A Mathematical Model Illustrating the Theory of Turbulence*. *Advances in Applied Mechanics*, 1, 171-199.
- Keener, K.M., Ducoste, J.J. & Holt, L.M. (2008). *Properties Influencing Fat, Oil, and Grease Deposit Formation*. *Water Environment Research* 80 (12): 2241-46.
- Korving, J.L., Clemens F.H.L.R., & Van Noortwijk J.M. (2006). *Statistical Modelling of the Serviceability of Sewage Pumps*. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132, 1076-1085.
- Nieuwenhuis, E. (2016) *A study on the relationship between fat, oil and grease (FOG) deposits in sewer systems and FOG disposal patterns*. Master Thesis TU Delft.
- Odgaard, A. J. (1986). *Free-surface air core vortex*. *Journal of Hydraulic Engineering*, 112(7), 610-620.
- Rindels, A.J. & Gulliver, J.S. (1983). *An experimental study of critical submergence to avoid free-surface vortices at vertical intakes (Report No. 224)*. Minneapolis (MN): University of Minnesota (US).
- Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (2012). *Hydraulisch Ontwerp en beheer afvalwatertransportsystemen*. Stowa 2012-48. ISBN 978.90.5773.586.8.

Publicaties die uit het onderzoek zijn voortgekomen

Peer-reviewed wetenschappelijke artikelen

- Nieuwenhuis, E., Post J., Duinmeijer A., Langeveld, J. & Clemens, F. (2018). *Statistical modelling of Fat, Oil and Grease (FOG) deposits in wastewater pump sumps*. *Water Research*, 135, 155-167.
- Duinmeijer, S.P.A., Moreno-Rodenas, M.A., Lepot, M., Nieuwehuizen Van, C., Meyer, I. & Clemens, F.H.L.R. (2019a). *A Simple measuring set-up for the experimental determination of the dynamics of a large particle in the 3D velocity field around a free-surface vortex*. *Journal of Flow Measurement and Instrumentation*, doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2018.10.007.
- Duinmeijer, S.P.A., Oldenziel, G. & Clemens, F.H.L.R. (2019). *Experimental study on the 3D-flow field of a free-surface vortex using stereo PIV*. *Journal of Hydraulic Research*, DOI: 10.1080/00221686.2018.1555558.
- Duinmeijer, S.P.A. & Clemens, F.H.L.R. (2021). *An experimental study on the motion of buoyant particles in the free-surface vortex flow*. *Journal of Hydraulic Research*, doi.org/10.1080/00221686.2020.1845827.
- Duinmeijer, S.P.A., Oldenziel, G. & Clemens, F.H.L.R. (2021) *Closure to "Experimental study on the 3D-flow field of a free-surface vortex using stereo PIV"*. *Journal of Hydraulic Research*, doi.org/10.1080/00221686.2020.1862929.

Conferentie artikelen

- Duinmeijer S.P.A. and Verhaart, F. (2015, June/July) *On the (in)applicability of ANSI guidelines at wastewater sump design*. Presented at the 36th IAHR World Congress, Den Haag, The Netherlands.
- Duinmeijer, S.P.A., Clemens, F.H.L.R., Pothof, I. and Verhaart, F. (2015, June/July). *On the set-up of experiments on surface pollution influenced vortices*. Presented at the 36th IAHR World Congress, Den Haag, The Netherlands.
- Duinmeijer, S.P.A., Clemens, F.H.L.R. and Verhaart, F. (2015, September). *On the research to free-surface vortices in wastewater pump sumps*. Presented at the 10th Int. Urban Drainage Modelling Conference, Québec, Canada.
- Duinmeijer, S.P.A. and Clemens, F.H.L.R. (2016, September). *Experimental research on free-surface vortices as transport mechanism in wastewater sumps*. Presented at the 8th Int. Conference on Sewer Processes and Networks, Rotterdam, The Netherlands.
- Duinmeijer, S.P.A. and Clemens, F.H.L.R. (2017, September). *3D-PTV on large particles in the free-surface vortex*. Presented at the 14th International Conference on Urban Drainage, Prague, Czech Republic.

Nationale publicaties

- Duinmeijer, S.P.A. (2015) *Rioolgemaal kan slimmer en kleiner*, Cobouw
- Duinmeijer, S.P.A. (2015) *Onderzoek pompkelders van rioolgemaal*. Vakblad Riolerings
- Duinmeijer, S.P.A. (2018) *Verwijderen drijfvuil in rioolgemaal*. Magazine Civiele Techniek
- Duinmeijer, S.P.A. (2019) *Drijfvuil in rioolbassins*. Vakblad H2O
- Duinmeijer, S.P.A. (2019) *Drie initiatieven voor beter behandelbaar afvalwater*. Vakblad Pomp.nl

Colofon

STOWA en Stichting RIONED in het kort

Stichting RIONED is de koepelorganisatie voor de riolering en het stedelijk waterbeheer in Nederland. In RIONED participeren alle partijen die bij de rioleringszorg betrokken zijn: overheden (gemeenten, waterschappen, rijk en provincies), bedrijven (leveranciers, adviesbureaus, inspectiebedrijven en aannemers) en onderwijsinstellingen. De belangrijkste taak van Stichting RIONED is het beschikbaar stellen van kennis aan de vakwereld. Dit doet RIONED door onderzoek, het bundelen van bestaande kennis en het op vele manieren informeren en bij elkaar brengen van professionals.

STOWA is het kenniscentrum van de regionale waterbeheerders (veelal de waterschappen) in Nederland. STOWA ontwikkelt, vergaart, verspreidt en implementeert toegepaste kennis die de waterbeheerders nodig hebben om de opgaven waar zij in hun werk voor staan, goed uit te voeren. Deze kennis kan liggen op toegepast technisch, natuurwetenschappelijk, bestuurlijk-juridisch of sociaalwetenschappelijk gebied.

© 2021 Stichting RIONED en STOWA

Teksten en figuren uit dit rapport mogen alleen worden overgenomen met bronvermelding.

Disclaimer

Deze uitgave is met de grootst mogelijke zorg samengesteld. Niettemin aanvaarden de auteurs en de uitgever geen enkele aansprakelijkheid voor mogelijke onjuistheden of eventuele gevolgen door toepassing van de inhoud van deze publicatie.

promotoren

François Clemens (hoogleraar riolering TU Delft)
Gosse Oldenziel (research engineer Deltares)

auteur

Alex Duinmeijer (promovendus TU Delft, gemeente Rotterdam)

omslagfoto

Alex Duinmeijer (promovendus TU Delft, gemeente Rotterdam)

vormgeving

Marieke Eijt, gaw ontwerp+communicatie b.v., Wageningen

druk

Drukkerij Modern, Bennekom

rapportnummer

2021-17

isbn/ean

978-90-73645-76-9