

# Hydrodynamische impactbelasting van transport vaste afvalstoffen in liggende afvoerleiding

Waterbesparing heeft impact op het functioneren van de gebouwriolering. Vermindering van de stromingssnelheden heeft een negatieve invloed op de waarborging van de zelfreinigende prestaties van de gebouwriolering. Over experimentele en analytische studies over dit onderwerp is al eerder op CIB W062 symposia verslag gedaan [1],[2]en[3]. Op de 43e editie van het internationale platform werd een vervolgonderzoek van de universiteit van São Paulo (Brazilië) gepresenteerd.

L.Y (Liang-Yee)Cheng, adjunct-professor, Universiteit van São Paulo, Brazilië.  
Vertaling en bewerking: ing. E.(Eric)van der Blom, UNETO-VNI, voorzitter TVVL  
Expertgroep Sanitaire Technieken.

Vermindering van de stromingssnelheden als gevolg van waterbesparende toestellen heeft een negatieve invloed op de zelfreinigende prestaties van de gebouwriolering. Er wordt op dit vlak mondiaal veel onderzoek uitgevoerd, onder andere op de universiteit van São Paulo in Brazilië. In dit artikel wordt het vervolgonderzoek gericht op de hydrodynamische impactbelastingen en het gedrag van het vaste afval door de variatie van de initiële locatie, beschreven. Er wordt gebruik gemaakt van modellering en simulatie waarbij een cilindrische vaste stof vervoerd wordt middels een kortstondige waterstroom in een afvoerleiding met een 90° bocht. Dit leidt tot een stap in de richting van het begrijpen van de complexe stromingen in de gebouwriolering.

## ■ DOEL ONDERZOEK

Recente studies over het complexe fluidum-structuur interactie (FSI) probleem van het transport van vaste stoffen [4] hebben

aangetoond dat het hydrodynamische proces kan worden verdeeld in twee fasen. De eerste fase wordt gedomineerd door hoge impulsieve hydrodynamische belastingen van relatief korte duur. De tweede fase wordt overheerst door zwaartekrachteffecten, zoals golven, hydrostatische koppen, gewicht en wrijving. Het doel van het onderzoek naar de factoren die de impulsieve hydrodynamische belastingen beïnvloeden, is gericht op het onderzoek naar de effecten van de reductie van de stromingssnelheid op de transportprestaties van de vaste stof in de rioleringsbuis. Het hydrodynamische gedrag van het vaste afvaltransport wordt aan de hand modellering onderzocht. Hierbij wordt de initiële locatie van de vaste stof in een liggende leiding gevarieerd. Voor dit doel wordt een cilindrische vaste stof getransporteerd door een kortstondige (transiënte) waterstroom in een afvoerbocht van 90°. Omwille van de eenvoud worden de vaste afvalstoffen aangenomen als starre lichamen

met vrije beweging. Ook gezien de relatief lage stromingssnelheid wordt de lucht, die in de leidingen wordt ingelaten, en de drukvariatie als gevolg hiervan verwaarloosd.

## ■ SEMI-IMPLICIETE BEWEGENDE DEELTJES

De numerieke methode die in de onderhavige studie is aangenomen, is gebaseerd op de 'Moving Particle Semi-implicit (MPS) methode'. Het is een volledig Lagrangische meshfree deeltjesgebaseerde aanpak, oorspronkelijk voorgesteld door Koshizuka et al. [5] voor de simulatie van een niet-indrukbaar stroom met vrij oppervlak. Het lost de regulerende vergelijkingen van continuüm op door de differentiële operatoren te vervangen door discrete operatoren, afgeleid van een partikelinteractie-model op basis van een gewichtsfunctie.

## ■ MESHFREE METHODEN

Op het gebied van numerieke analyse zijn

netwerkvrije methoden die geen verbinding nodig hebben tussen knooppunten van het simulatiedomein, dat wil zeggen een maas, maar zijn eerder gebaseerd op interactie van elk knooppunt met al zijn burens. Hierdoor worden originele uitgebreide eigenschappen, zoals massa- of kinetische energie, niet meer toegewezen aan maaselementen, maar eerder aan de enkele knooppunten. Meshfree-methoden maken het mogelijk om sommige andere moeilijk type problemen op te lossen, ten koste van extra computertijd en programmeringsinspanning.

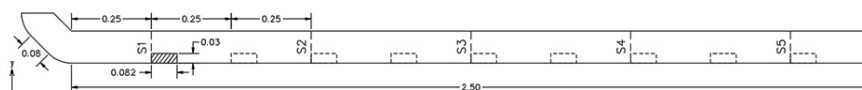
Het oplossingsalgoritme van de MPS-methode is een semi-impliciete, die in twee hoofddelen verdeeld is. Het eerste deel is de expliciete schatting van de snelheid en de positie van het vloeibare deeltje door gebruik te maken van viscositeit en externe krachten voorwaarden van het momentum behoud. Daarna wordt in het tweede deel de druk van de vloeistof- en wanddeeltjes impliciet berekend door gebruik te maken van de Poissonvergelijking voor de druk. De RHS term van de Poisson-vergelijking is evenredig aan de afwijking van de deeltjesdichtheid, die een parameter is die evenredig is aan de dichtheid van de vloeistof in de buurt van het deeltje. Tenslotte wordt de snelheid van de vloeistofdeeltjes bijgewerkt door gebruik te maken van de drukgradiënttermijn van het momentumbehoud en de bijgewerkte posities van de deeltjes worden verkregen. Meer gedetailleerde omschrijving van de MPS-methode, inclusief de numerieke behandeling van de randvoorwaarden, is te vinden in [5], [6] en [7].

### ■ VRIJE SOLIDE MODELLERING

De numerieke modellering van de vaste stoffen beschouwt drie verschillende typen volgens hun bewegingen: vast - vast, vast met gedwongen beweging en een vrije zwevende vaste stof. De snelheid van de vaste en de gedwongen beweging vaste stoffen worden opgelegd als Dirichlet randvoorwaarden. De beweging van de vrije drijvende vaste stof wordt berekend op basis van krachten en momenten verkregen uit de integratie van de druk op het vaste oppervlak, dat wil zeggen de druk van de wanddeeltjes, en interacties tussen vaste stoffen, zoals uitgelegd in de volgende sectie. Aan de andere kant zijn het zwaartepunt, de massa en het traagheidsmoment dat wordt gebruikt voor de bewegingsberekening van elke vrije zwevende vaste stof invoerwaarden.

### ■ BOTSING TUSSEN VASTE STOFFEN

Het vereenvoudigde numerieke model voor



Figuur 1. Configuratie van de horizontale afvoerleiding van een 6 liter watercloset.

de botsing tussen twee starre lichamen is hetzelfde als in het vorige onderzoek [4]. De botsing wordt gedetecteerd wanneer de afstand tussen de wanddeeltjes van de vaste stoffen kleiner is dan 1.225 lo, waarbij lo de beginafstand tussen deeltjes is.

De vaste normale afstotingskracht die voortvloeit uit de botsing wordt berekend door alle componenten van de kracht van elk afzonderlijk deeltje op te sommen. De componenten van de normale afstotingskracht worden berekend op basis van een gedempte harmonische oscillator met lineaire veerkracht en dempende kracht, evenredig met de relatieve snelheid tussen botsende deeltjes [8]. Zowel de veer- als dempconstanten werden verkregen door middel van numerieke tests en zijn gekalibreerd om kritische gedempte beweging te bereiken met minimale oscillatie. Anderzijds wordt de tangentiële wrijvingskracht tussen de vaste stoffen ook berekend als een samenvatting van de bijdragen van de deeltjes, die evenredig zijn aan de relatieve tangentiële snelheid tussen de deeltjes van de verschillende vaste stoffen. De kalibratie van de wrijvingscoëfficiënt werd uitgevoerd door een blok dat op een hellend oppervlak glijdt.

In de huidige studie, na [9], wordt de interactie tussen de vaste en de buiswand gemodelleerd door een veer met een constante van 350000 N/m en een dempconstante van 145 Ns/m te gebruiken. Er werd ook een numerieke wrijvingscoëfficiënt van 0,22 Ns / m geïntroduceerd om de dynamische wrijvingscoëfficiënt van 0,26 te simuleren.

### ■ VALIDATIE VAN DE NUMERIEKE METHODE

Het deeltjesgebaseerde numerieke model voor niet-lineaire hydrodynamica is uitgebreid getest en gevalideerd in de eerdere onderzoeken die zijn vermogen tonen om complexe vloeibare vaste interactie te reproduceren met transiënte oppervlakstromen en vrije zwevende lichamen. De validatie van het ver-

eenvoudigde numerieke model voor de botsing tussen vaste stoffen werd uitgevoerd in [4], waar goede overeenstemming met de experimentele en numerieke resultaten van [10] voor de beweging van een vrije vaste stof in 'dam-break-stroom' wordt getoond. Niettemin, om de voorspelling van de contactkrachten te verbeteren, vooral de wrijving tussen de vaste stoffen die van cruciaal belang zijn bij lange simulaties, worden nieuwe contactmodellen door de auteurs onderzocht.

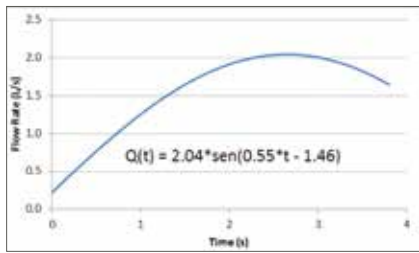
### ■ TESTOPSTELLING

Figuur 1 toont de configuratie van de testopstelling. Het bestaat uit een horizontale leiding, die een aansluitleiding van een 6 liter watercloset vertegenwoordigt, met 2,5 meter lengte, een diameter van 100 mm en een helling van 0,0%. De leiding heeft een 90° bochtstuk stroomopwaarts, met ringvormige instroom en open einde stroomafwaarts [6]. Figuur 1 toont ook de positie van de secties S1 tot S5, waarin de golfhoogte en de fluidumsnelheid kan worden gecontroleerd.

Er zijn in totaal 9 testsituaties uitgevoerd, elk met de vaste stof die oorspronkelijk is geplaatst met zijn stroomopwaartse oppervlak: 0,25 m, 0,50 m, 0,75 m, 1,00 m, 1,25 m, 1,50 m, 1,75 m, 2,00 m en 2,25 m van het stroomopwaartse gedeelte van de horizontale leiding. Tabel 1 geeft de benaming van de testsituaties weer. De initiële positie van de vaste stof voor het testsituatie B025 is in figuur 1 getoond met uitgebroken patroon. De beginposities van de vaste stof in de andere testsituaties worden in streeplijnen weergegeven. Na [4] werd het vaste afval gemodelleerd als een homogene cirkelcilinder. De cilindrische vaste stof heeft een diameter van 0,03 m en een lengte van 0,082 m en is in eerste instantie in de leiding met zijn as evenwijdig aan de as van de leiding. Als eerste voorwaarde voor de simulatie is de leiding droog. De dichtheid van de vloeistof is 1000 kg /m<sup>3</sup>.

Cases	B025	B050	B075	B100	B125	B150	B175	B200	B225
Aanvanke-lijke positie (cm)	25	50	75	100	125	150	175	200	225

Tabel 1. Benaming van de testsituaties en de beginpositie van de respectievelijke vaste stof.



Figuur 2. Spoelprofiel van de waterkast [6].

Figuur 2 toont de afvoer van de stromingssnelheid als een functie van de tijd van de 6 liter watercloset voorzien door Cheng et al. [4]. De hypothetische stroming werd ook gebruikt door [4] en [6].

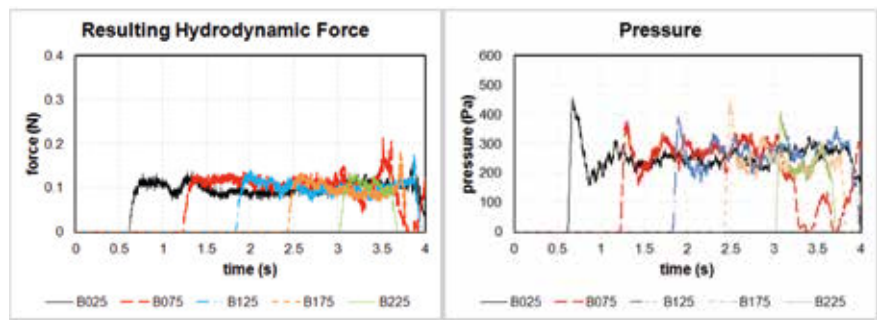
Voor alle gesimuleerde testsituaties is de initiële afstand tussen deeltjes ( $l_0$ ) 0,002 m, wat leidt tot modellen met ongeveer 850 K deeltjes. De aangenomen tijdstap was  $5 \times 10^{-5}$  s, wat leidt tot de verwerkingstijd van ongeveer 3,5 dagen voor 5 seconden simulatie.

## RESULTATEN EN DISCUSSIE

Figuur 3 en 4 geven een reeks afbeeldingen verkregen uit de berekenings simulaties van respectievelijk de testsituaties B025 en B075. In de figuren worden sectieaanzichten van de horizontale leiding getoond, en de kleurschaal vertegenwoordigt snelheidsgrrootte.



Figuur 3. Volgorde van beelden verkregen uit de simulaties van de case B025.



Figuur 5. Berekende tijdshistorie van (a) druk in de buurt van het laagste punt van het stroomopwaartse vlak van de vaste stof en (b) tijdshistorie van de resulterende hydrodynamische druk.

In figuur 3 bereikt de waterstroom vanaf de bocht de vaste stof op 25 cm van de stroomopwaartse sectie van de horizontale leiding bij ongeveer  $t = 0,7$  s. Een opwaartse splash wordt gegenereerd, gevolgd door de vorming van een golf, die duidelijk is getoond bij  $t = 1,0$  s. Aangezien de 6 liter afvoer verder gaat tot  $t = 3,8$  s, wordt de vaste stof door de waterstroom vooruit geduwd. Ook kan een hydraulische sprong worden waargenomen nabij 20 cm stroomafwaarts aan het begin van de horizontale leiding. Tenslotte is het interessant om erop te wijzen dat bij  $t = 4,0$  s de vaste stof drijven en uit elkaar vallen.

Als voorbeeld van wat er gebeurt in geval een vaste stof verder stroomafwaarts ligt, geeft figuur 4 het verloop van B075 weer. In dit

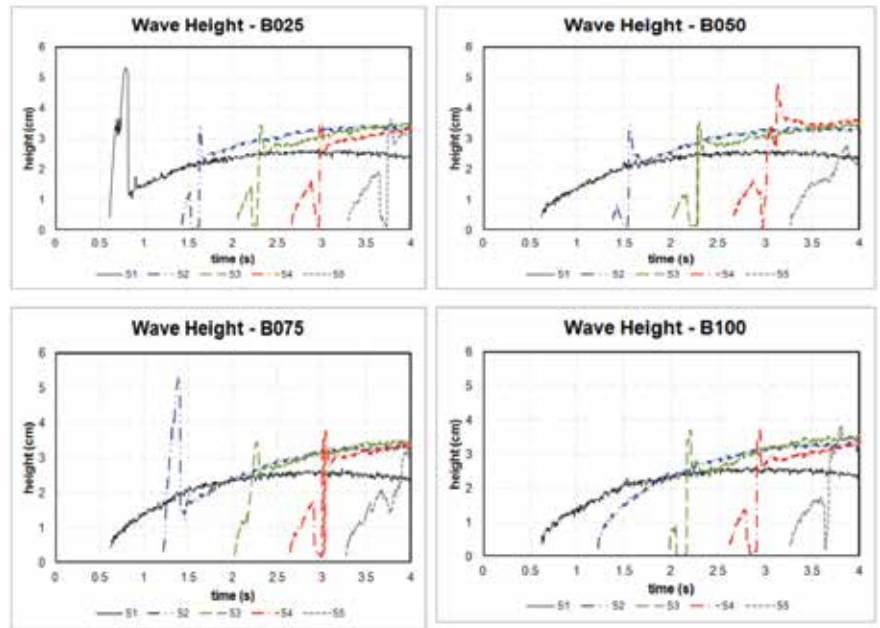
geval bereikt de waterstroom de vaste stof bij ongeveer  $t = 1,3$  s. Daarna, gezien de tijdsverloop, zijn de golf- en stromingspatronen van B075 in daaropvolgende momenten vrij goed vergelijkbaar met die van B025. Het is evenwel duidelijk dat het waterniveau bij de voorzijde van de vaste stof kort na de impact hoger is dan B025 en de waterstroom voortdurend over de vaste stof heen gaat. Bij  $t = 3,1$  s gaat de vaste stof drijven en neerslaan en wordt de beweging van de vaste stof relatief instabiel.

Figuur 5 geeft berekende hydrodynamische druk en kracht op de vaste stof weer. Om de visualisatie eenvoudig te maken, worden alleen de resultaten van 5 testen weergegeven. Figuur 5 (a) laat de berekende druk bij het laagste punt van het longitudinale symmetrische vlak van de vaste stof zien. Aangezien onjuiste drukverschillen berekend werden, werden de resultaten gefilterd met behulp van bewegend gemiddelde. Zoals te zien in figuur 5 (a) zijn de drukpatronen van de testen vrijwel vergelijkbaar, zeker dicht bij het moment wanneer de waterstroom de vaste stoffen raakt, gevolgd door een drukpiek met een relatief stabiele waarde ondanks een iets lagere piekwaarde voor B075, B125 en B225. Bij de test B075, vlakbij  $t = 3,3$  s, daalt de druk door het drijven en neerslaan, zoals al in figuur 4 te zien, en daaruit voortvloeiende snelle schommelingen op de drukmeter. De drukval als gevolg van het drijven en neerslaan van de vaste stof wordt ook in de andere testen waargenomen, maar op verschillende momenten.

De tijdreeksen van de berekende hydrodynamische kracht, gegeven in figuur 5 (b), tonen aan dat de verandering van de initiële positie van de vaste stof in het algemeen niet de hydrodynamische krachten aanzienlijk beïnvloedt, zeker niet in de initiële fase van de vaste beweging. In dit onderzoek, waarbij een relatief korte horizontale leiding wordt bekeken en de simulatie stopt met een open einde, kunnen de globale effecten, waaronder de verandering van de stromingsregimes, niet worden geëvalueerd.

De tijdshistorie van de vaste stof van de positie, snelheid en versnelling van de vaste stoffen, berekend voor de testsituaties B025, B075, B125 en B175 zijn getoond in figuur 6 (respectievelijk a), b), c) en d)). Het vergelijken van de tijdshistorie toont aan dat de snelheid bij B025 iets hoger is dan bij andere testen. Dit komt door een iets lager vloeibaar energieverlies als gevolg van een kleinere afstand van de instroomgrens naar de beginpositie van de vaste stof en een iets grotere momentoverdracht naar de vaste stof. De grafieken tonen echter aan dat de patronen van de positie, snelheid en versnelling, vergelijkbaar zijn voor de verschillende beginposities van de vaste stoffen. De initiële versnellingen door de hydrodynamische impact zijn zeer vergelijkbaar voor de vier testen, met maar een lichte variatie in piekgrootte. De curven van de snelheid van vaste stoffen tonen vergelijkbare opwaartse patronen. Daarna blijft de snelheid van vaste stoffen, ondanks enkele oscillaties in de versnelling, vrij stabiel. Grotere schommelingen in de versnelling worden toebedeeld aan het drijven en neerslaan van de vaste stof, en is vooral zichtbaar voor B075. Tenslotte, als de 6 liter spoeling eindigt met  $t = 3,8$  s, duurt de tijd van snelheidsverminderingen varieert en lijkt korter te zijn als de vaste stof aanvankelijk meer stroomafwaarts gelegen is.

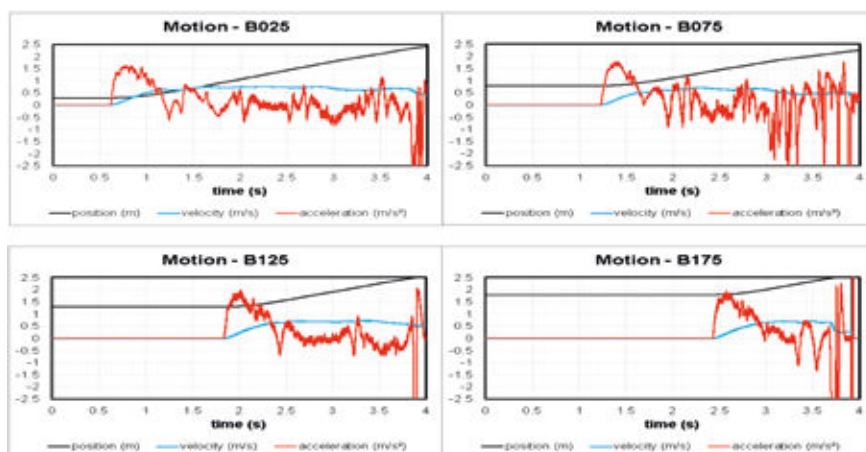
Tenslotte, om inzicht te verschaffen in de vloeistofstromen van het transport van vaste stoffen, tonen figuur 7 en 8 respectievelijk de golfhoogte (waterniveau) en vloeistofsnelheden over de secties van de leiding. In figuur 7 worden de golfhoogten (waterniveaus) bij de secties van de horizontale leiding voor vier testsituaties getoond: B025, B050, B075 en B100. In figuur 7 (a), als de vaste stof aanvankelijk gelegen is bij S1: wanneer de waterstroom de vaste stof raakt, wordt



Figuur 7. Berekende tijdshistorie van de golfhoogten (waterniveaus) bij de delen van de horizontale aansluitleiding voor de testsituaties (a) B025, (b) B050, (c) B075 en (d) B100.

de piekwaterhoogte in verband met de door de vloeistof geproduceerde splash op de stroomopwaartse zijde (bovenstrooms) van de vaste stof bij S1 bij om en nabij  $t = 0,7$  s. Nadat de piek als gevolg van de initiële impact bij S1 doorloopt, neemt het waterniveau bij de secties langzaam weer toe en daarna neemt het weer af door de vermindering van de inkomende waterstroom. In de volgende secties, bijvoorbeeld bij S2, bereikt de golfhoogte het gedeelte bij ongeveer  $t = 1,4$  s. In eerste instantie is er relatief een laag waterniveau benedenstrooms van de vaste stof. Dan, bij bijna  $t = 1,5$  s, druppelt het waterniveau op S2 plotseling naar nul en neemt het later weer toe. Deze abrupte verandering van waterniveau wordt geassocieerd met de vaste stof die de sectie overschrijdt. Na het passeren van de vaste stof,

wordt een hoger waterniveau bovenstrooms van S2 vastgesteld. In figuur 7 (b) wanneer sectie S1 25 cm bovenstrooms is van de initiële positie van de vaste stof in testsituatie B050, is de waterstroom bij S1 bijna ongestoord en heeft niet de initiële piekgolfhoogte. Echter, de patronen van de tijdshistorie bij de volgende secties zijn vrij vergelijkbaar met die in figuur 7 (a) zijn getoond, behalve bij S5, waar in dit geval een botsbeweging van de vaste stof optreedt. In figuur 7 (c), als de beginpositie van de vaste stof in B075 bij S2 ligt, is het patroon van piekgolfhoogte vergelijkbaar met die van S1 in figuur 7 (a). Daarnaast geeft de vorm van de curve bij S5 ook aan dat in dit geval de onstabiele beweging van de vaste stof als gevolg van de drijvende en botsende beweging ervan, plaatsvindt in deze sectie. Tenslotte laat de vergelijking tussen de waterniveaus in de secties zien dat de hoogte opvallend stijgt vanaf S2. Het kan de 0,3 m overschrijden, wat de diameter (en hoogte) van de vaste stof is. Voornamelijk in S4, waar de piekgolfhoogte veel groter is dan 0,3 m, neemt de kans toe op een onstabiele beweging van de vaste stof.



Figuur 6. Berekende tijdshistorie van de posities, snelheid en versnelling van de cilindrische vaste stof voor de testsituaties (a) B025, (b) B075, (c) B125 en (d) B175.

Figuur 8 toont de stromingssnelheid over de secties voor de testsituaties B025, B075, B125 en B175. Uit de figuren is duidelijk te zien dat wanneer de golf de bovenstroomse kant van de vaste stof bereikt, de vaste stof plotseling door de hydrodynamische impact gedruwd wordt met een snelle stijging van de stromingssnelheid in de sectie tot gevolg. Kort daarna is er een kleine teruggang, gevolgd door een vloeiende stijging van de stromingssnelheid. In de

overige secties, voor het einde van de flush, is de tijdshistorie van de stromingssnelheid vergelijkbaar met de situatie zonder de aanwezigheid van de vaste stof, met een abrupte stijging gevolgd door bijna constante waarden.

Ook zichtbaar in figuur 8 is de afname van de stromingssnelheid in alle testsituaties langs de secties van de leiding. Dit komt door het vloeibaar kinetische energieverlies en tegelijkertijd de lichte stijging van het waterpeil in de daaropvolgende secties, die de kans op de onstabiele vaste beweging in verband met drijven en botsen kunnen verhogen.

## CONCLUSIE

In het huidige onderzoek, dat zich richt op de hydrodynamische impactbelastingen en het gedrag van het vaste afval door de variatie van de initiële locatie, wordt modellering en deeltjesgebaseerde numerieke simulaties uitgevoerd waarbij een cilindrische vaste stof vervoerd wordt middels een kortstondige waterstroom in een horizontale afvoerleiding met een 90° bocht.

Uit de berekende resultaten blijkt dat de patronen van de initiële hydrodynamische impactfase bijna gelijk zijn, rekening houdend met de initiële positie van de vaste stof die in het onderhavige onderzoek in aanmerking wordt genomen. De variatie van de hydrodynamische druk en krachten op de vaste stof zijn bijna verwaarloosbaar. De duur van de momentumoverdracht van de vloeistof naar de vaste stof lijkt echter te verminderen, aangezien de vaste stof in de eerste plaats stroomafwaarts wordt geplaatst en verdere studies met gebruikmaking van langere

leidingen en langere simulaties nodig zijn om de effectieve verplaatsing van de vaste stoffen met betrekking tot de oorspronkelijke positie ervan te beoordelen.

Aan de andere kant blijkt dat de berekende tijdreeksen van het waterpeil aanzienlijk stijgen van S2, en kan 0,3 m overschrijden, wat de hoogte van de vaste stof is. Voornamelijk in S4, waar de piekwaterhoogte veel groter is dan 0,3 m voor de case B050, is de vaste stof gevoeliger voor de onstabiele beweging. Tenslotte wordt de afname van de stromingssnelheid en tegelijkertijd de lichte stijging van het waterniveau langs de secties van de leiding waargenomen in alle testsituaties. Dit komt door het verlies van vloeibare kinetische energie.

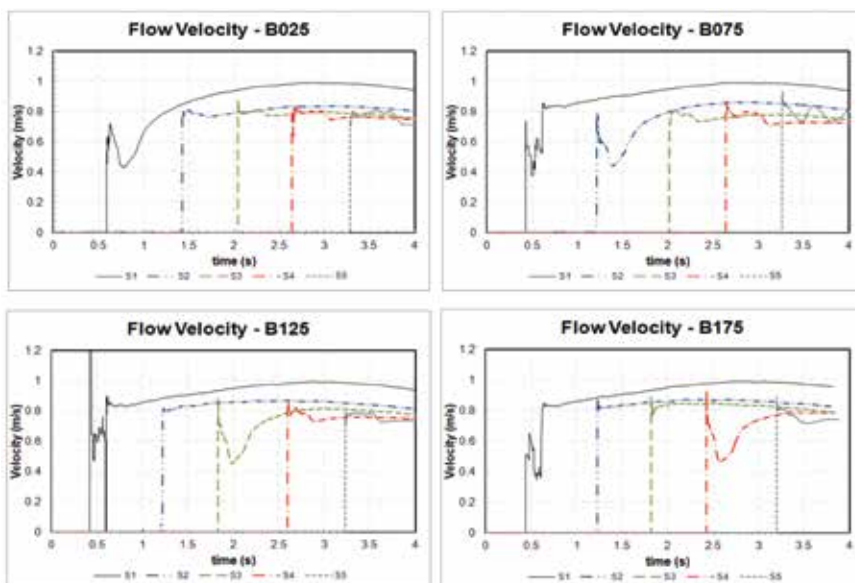
De modellering en simulatie van het complexe fluidum-structuur interactie (FSI) vormt, ondanks de vereenvoudigde vereenvoudigingen, een stap in de richting van het begrijpen van de stromingen binnen de gebouwriolering door middel van effectieve middelen om de basisproblemen van de complexe hydrodynamica te onderzoeken.

## REFERENTIES

1. Silva-Afonso A., Bernardo J., Pimentel-Rodrigues C., 'Implicatie van verminderde spoelvolumes in bouwafvoer: Een experimentele studie', Watervoorziening en Drainage voor Gebouwen CIBW62-symposium, Japan, 2013.
2. Gormley M., Jean N., 'Modelleren van solide transport in ondiepgradientleiding-installaties: toepassing op vereenvoudigd riolering in een internationale ontwikkelingscontext', Watertoevoer en Drainage

voor gebouwen CIBW62-symposium, Schotland, 2012.

3. Akiyama, K., Otsuka M., Shigefuji, H. 'Basisonderzoek over een methode voor het voorspellen van de afvalcaryng prestatie in de horizontale afvoerbuus van een waterbesparend toilet', Watertoevoer en afvoer voor gebouwen CIBW62 symposium, Brazilië, 2014.
4. Cheng L.Y., Oliveira L.H., Osello, P.H. S., Amaro JR., R. A., 'Een numerieke modellering van vaste afvalvervoer in hoofdafvoer', Watervoorziening en Drainage voor gebouwen CIBW62 symposium. Slowakije, 2016.
5. Koshizuka, S. en Oka Y., 'Semi-Implicite Moving-Particle Method for Fragmentation of Compressible Fluid', Nuclear Science and Engineering, 123, 421-434, 1996.
6. Cheng L.Y., Oliveira L.H., Favero, E.H., 'Particle-based numerical analysis of drainage flow inside building system', Water Supply and Drainage for Buildings CIBW62 symposium, Schotland, 2012.
7. Cheng L.Y., Oliveira L.H., Favero, E.H., Oliveira, I.B., 'Simulatie van drainage-systeem in gebouw met behulp van deeltjes gebaseerde numerieke methode', Watertoevoer en drainage voor gebouwen CIBW62 symposium, Japan, 2013.
8. Harada, T. 'Real-time stijf lichaamssimulatie op GPU's'. In GPU Gems 3. Addison-Wesley Professional, 2007.
9. Osello, P.H. S., Cheng, L.Y., Amaro JR, R.A. 'Het model van de rol van het middelpunt van de bewegingen van deeltjesimulatie', 37e Iberisch Latijns-Amerikaans Congres over Computational Methods in Engineering. Brazilië, 2016.
10. Amicarelli, A., Albano, R., Mirauda, D., Agate, G., Sole, A., Guandalini, R. 'Een Vloeibaar Partikel Hydrodynamica model voor 3D solid body transport in vrije oppervlakstromen', Computer & Vloeistoffen, 116 (205) 205-228.



Figuur 8. Berekende tijdshistorie van de stromingssnelheid bij de secties van de horizontale pijpleiding voor de testsituaties (a) B025, (b) B075, (c) B125 en (d) B175.



Adjunct professor  
Liang-Yee Cheng



Ing. Eric van der Blom